



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

# DESARROLLO DE HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN PARA UN SEGUIDOR SOLAR

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON ESPECIALIDAD  
EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

Irving Alfredo Alejandro Ramirez Maya

DIRECTOR: Dr. Guillermo Ronquillo Lomeli

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO.  
Mayo, 2018



CIENCIA Y TECNOLOGIA



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado  
PICYT – CIDESI  
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno **Irving Alfredo Alejandro Ramírez Maya**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Desarrollo de herramienta de calibración para un seguidor solar**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestría en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Mecatrónica** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 11 días del mes de Mayo del año dos mil dieciocho.

Dr. Guillermo Ronquillo Lomeli  
Director de Tesis



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado  
PICYT – CIDESI  
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **Irving Alfredo Alejandro Ramírez Maya**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Desarrollo de herramienta de calibración para un seguidor solar**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestría en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Mecatrónica** durante el Examen de Grado correspondiente. Y para que así conste firmamos la presente a los 11 días del mes de Mayo del año dos mil dieciocho.

Dr. Leonardo Barriga Rodríguez  
Presidente

Dr. Hugo Jiménez Hernández  
Secretario

Dr. Guillermo Ronquillo Lomeli  
Vocal

## Resumen

México se encuentra dentro del denominado *cinturón solar*; un grupo de países que reciben la mayor cantidad de radiación solar, solamente después de China y Singapur, sin embargo, se ubica dentro de los que menos invierte en desarrollo de tecnologías relacionadas con este tipo de energía. Para aprovechar al máximo la radiación solar disponible, la posición del sol requiere ser seguida de forma precisa por los sistemas de captación de energía térmica solar. La intensidad de la radiación solar varía durante el día, así como con las estaciones del año. En trabajos previos se ha determinado que el uso de un seguidor en un colector solar puede mejorar la captación de energía del 10 al 100 % dependiendo de la hora y la posición geográfica del sitio. La alineación correcta de los colectores es trascendental para un buen desempeño de los seguidores solares. Existen diversos métodos utilizados para la alineación de los colectores. Los métodos mecánicos incluyen el uso de inclinómetros o de goniómetros, el método de calibración por bloque, y el método transductor de desplazamiento lineal; son aplicables para la alineación de sistemas solares. Sin embargo, estos métodos mecánicos no son adecuados para campos a gran escala. Por el contrario, métodos de alineación ópticos, que incluyen la fotogrametría, el uso de láser, el método de superposición de imágenes teórico, el método de revisión retrospectiva de la cámara, método de reflexión de franja, etc. Estos métodos son más precisos que los métodos mecánicos comerciales, pero su costo resulta elevado. Además se debe tener en cuenta que los colectores solares no son perfectos, siempre existen errores debido a diversos factores como el diseño, proceso de fabricación, condiciones meteorológicas, etc. que modifican su geometría disminuyendo la capacidad de captación de energía. Debido a

esto es importante contar con un método de calibración que permita compensar los errores a los que se encuentre sometido el sistema. En este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta para la calibración de un seguidor solar de dos ejes de alta precisión e instrumentado para poder evaluar los errores de seguimiento derivados de las condiciones de alineación, orientación y operación, por medio de la estimación de parámetros lineales mediante el método de mínimos cuadrados, y así mejorar la captación de energía solar en colectores bajo las condiciones de operación actuales.

## Abstract

Mexico is within of the called *solar belt*; a group of countries that receive the major amount of solar radiation, only after China and Singapore, however it is among the least investing in the development of technologies in this type of energy. To maximize the available solar radiation, the sun's position needs to be followed in accurate form by the catchment solar thermal energy systems. The intensity of solar radiation varies during the day and with the seasons. In previous studies it has been determined that the use of a follower in a solar collector can improve energy capture from 10 to 100% depending on the time and the geographical position of the site. Proper alignment of the collectors is crucial for a good performance of solar trackers. There are various methods used for alignment of the collectors. Mechanical methods include use of inclinometers or goniometers, the calibration method by block, and the linear displacement transducer are applicable to the alignment of solar systems. However, these mechanical methods are not suitable for large scale fields. By contrast, optical alignment methods, including photogrammetry, using laser, the method of superposition of theoretical images, the method retrospective review of the chamber, strip reflection method, etc. These methods are more accurate than commercial mechanical methods, but the cost is high. In addition, the solar collectors are not perfect; there are always errors due to various factors such as design, manufacturing process, weather conditions, etc. modifying its geometry decreasing the energy catchment capability. Because of this is important have a calibration method that allow compensate the errors to wich the system is subject. In this paper is presented the development of a tool for solar tracker calibration with two axes of tracking of high precision and

instrumented to evaluate tracking errors resulting from alignment, orientation and operation conditions, which will allow the estimation of linear parameters, by means of the least square method, to improve the solar energy collection presents in collectors under current operating conditions

A todos los que hicieron posible este trabajo,  
especialmente a mi familia.



## Agradecimientos

La culminación de este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y colaboración de diversas personas, que aportaron su experiencia y conocimientos. En primera instancia quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de todo este tiempo. Especialmente quiero expresar mi total agradecimiento al Dr. Guillermo Ronquillo Lomeli, por su incuantificable apoyo en la dirección y elaboración de este trabajo, de igual manera agradecer a Rodolfo Coria y Antonio Trejo por sus consejos, y por los conocimientos brindados. De igual manera al Dr. Leonardo Barriga Rodríguez y al Dr. Hugo Jimenez Hernandez por su soporte en la revisión de este trabajo. Por ultimo agradezco a CIDESI; institución que me otorgo la oportunidad de poder realizar los estudios de posgrado.

# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>viii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.2. Alcance del Estudio . . . . .	3
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	3
1.4. Objetivo general . . . . .	3
1.5. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.6. Hipótesis . . . . .	3
1.7. Justificación . . . . .	4
1.8. Organización . . . . .	4
<b>2. Revisión de Literatura</b>	<b>6</b>
2.1. Plataformas de Seguimiento Solar . . . . .	6
2.1.1. Mecanismos de Movimiento . . . . .	8
2.2. Algoritmos de seguimiento solar . . . . .	14
2.3. Sensores . . . . .	19
2.3.1. Sensores de seguimiento solar . . . . .	19
2.3.2. Sensores de posición angular . . . . .	26
2.4. Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento	28
2.4.1. Colectores Solares sin seguimiento . . . . .	29
2.4.2. Colectores Solares con seguimiento . . . . .	32
2.5. Errores de seguimiento solar . . . . .	37

<b>3. Metodología</b>	<b>41</b>
3.1. La Radiación solar . . . . .	41
3.1.1. El Sol . . . . .	42
3.1.2. La constante solar . . . . .	43
3.1.3. Variación de la Radiación Solar . . . . .	44
3.1.4. Tiempo Solar . . . . .	46
3.1.5. Dirección de la Radiación . . . . .	47
3.1.6. Trayectoria aparente del Sol . . . . .	50
3.2. Algoritmo de seguimiento solar . . . . .	52
3.2.1. Escala de Tiempo . . . . .	53
3.2.2. Día, siglo y milenio Juliano y Juliano efímero . . . . .	54
3.2.3. Latitud y longitud heliocéntrica y radio vector . . . . .	55
3.2.4. Latitud y longitud geocéntrica . . . . .	56
3.2.5. Elongación, anomalía media, nutación y oblicuidad . . . . .	56
3.2.6. Ángulo Elevación y Azimutal . . . . .	59
3.3. Algoritmo de compensación de errores de seguimiento . . . . .	60
3.3.1. Introducción . . . . .	60
3.3.2. Estructura del Modelo . . . . .	63
3.3.3. Método de mínimos cuadrados . . . . .	64
<b>4. Resultados</b>	<b>70</b>
4.1. Implementación del Seguidor Solar . . . . .	70
4.1.1. Plataforma de Hardware del seguidor solar. . . . .	70
4.1.2. Sensor solar . . . . .	72
4.1.3. Sistema mecánico del seguidor solar. . . . .	73
4.2. Pruebas Experimentales . . . . .	75
4.3. Verificación de corrección del seguimiento . . . . .	79
4.4. Análisis de errores . . . . .	83
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>86</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	86
5.2. Contribuciones . . . . .	87
5.3. Recomendaciones de Trabajo Futuro . . . . .	87

Referencias	88
A. Algoritmo de Posicionamiento Solar del National Renewable Energy Laboratory (NREL)	93
A.1. Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA) . . . . .	93

# Índice de figuras

2.1. Clasificación Básica de los Seguidores Solares . . . . .	8
2.2. Seguidor Solar con actuadores independientes de Movimiento . . . . .	9
2.3. Ejemplos de Actuadores Rotacionales . . . . .	10
2.4. A) Unidad con un tornillo sin fin. B) Unidad con doble tornillo sin fin. Utilizados en aplicaciones de seguimiento solar . . . . .	12
2.5. Unidad de Giro Integradas en configuración rectangular y triangular . . . . .	13
2.6. Actuador lineales para aplicaciones solares . . . . .	14
2.7. Comparativa entre algoritmos estudiados. . . . .	17
2.8. Circuito de Fotodiodos como referencia para el seguimiento solar . . . . .	20
2.9. Sensor de luz de 5 fotodiodos para determinar la desviación del ángulo solar. . . . .	21
2.10. Sensor de seguimiento solar de múltiples caras. . . . .	22
2.11. Características operacionales de los sensores SolarMEMS . . . . .	24
2.12. Diferencia entre una imagen tomada en tiempo real y la misma imagen binarizada y con el cálculo de su centro. . . . .	25
2.13. Diagrama de funcionamiento de un encoder incremental. . . . .	27
2.14. Sensor inductivo para determinar posición angular absoluta . . . . .	28
2.15. Clasificación de los Colectores Solares. . . . .	29
2.16. A) Corte frontal y B) vista 3D de un colector Plano. . . . .	30
2.17. Estructura de un tubo evacuado. . . . .	31
2.18. Colector de Canal Parabólico. . . . .	33
2.19. Colector de Canal Cilíndrico. . . . .	34
2.20. Reflector Lineal Fresnel. . . . .	34
2.21. Receptor de Torre Central. . . . .	36

2.22. Reflector de Disco Parabolico. . . . .	36
2.23. Diagrama Sistemas de Coordenadas . . . . .	38
2.24. Diferencia en la Energía Aprovechada por distintas tecnologías de captación. . . . .	39
3.1. Profundidad de la atmósfera. . . . .	42
3.2. Estructura del Sol. . . . .	43
3.3. Distancia y relaciones entre el Sol y la Tierra. . . . .	44
3.4. Variación de la Radiación Solar a lo largo del año. . . . .	45
3.5. Ecuación del tiempo (E) como una función representada en un año. . . . .	47
3.6. Ángulos relacionados con la dirección de la radiación solar y plano de vista del ángulo azimutal. . . . .	48
3.7. Movimiento anual de la tierra alrededor del sol. . . . .	51
3.8. Cambios en la posición del sol durante el año en el Hemisferio Norte. . . . .	52
3.9. Posición inicial del prototipo. . . . .	62
3.10. Modelo del prototipo . . . . .	68
4.1. Diagrama a bloques del seguidor solar. . . . .	71
4.2. Diagrama a bloques del sistema NI cRIO-9068. . . . .	72
4.3. Referencia de los ángulos medidos. . . . .	73
4.4. Esquema del mecanismo del seguidor solar. 1) Mesa Rotatoria URS100BCC. 2) Platina de montaje URS100BCC. 3) Platina de montaje URS50BC. 4) Base de soporte para sensor solar. 5) Sensor Solar ISS T60-B0008. 6) Base soporte mesa rotatoria URS50BC. 7) Mesa rotatoria URS50BC. . . . .	74
4.5. Modelo del prototipo . . . . .	76
4.6. Representación de las funciones principales del código del controlador . . . . .	77
4.7. Representación de la función de corrección en el código del contro- lador . . . . .	78
4.8. Vectores de prueba . . . . .	81
4.9. Ángulos de prueba . . . . .	82
4.10. Corrección de seguimiento solar . . . . .	83
4.11. Distribución normal de los errores $\theta_x$ compensados . . . . .	84
4.12. Distribución normal de los errores $\theta_y$ compensados . . . . .	85

# Índice de tablas

3.1. Radiación promedio Klein (1977) . . . . .	49
4.1. Fechas de las pruebas experimentales . . . . .	80

# Glosario

- Absorbedor: Componente de un colector solar, que retiene la mayor cantidad posible de radiación solar.
- Ángulo azimut: Es el ángulo entre la línea norte-sur en una determinada localización y la proyección en el plano horizontal de la línea sol - tierra.
- Ángulo cenital: Distancia angular que existe de la proyección de los rayos del sol a la vertical.
- Ángulo de incidencia: Ángulo entre los rayos del sol y la línea normal a la superficie irradiada.
- Ángulo horario: Ángulo entre la proyección del sol en el plano ecuatorial en un tiempo dado y la proyección del sol en el mismo plano pero al medio día solar.
- Colector: Cualquier tipo de dispositivo que se puede usar para recolectar radiación solar y poder convertirla en otra forma de energía útil.
- Colector de concentración: Colector solar que utiliza lentes o reflectores para redirigir y concentrar la radiación hacia un absorbedor.
- Colector CPC: Concentrador Parabólico Compuesto, colector que se compone de dos parábolas encontradas una frente a la otra para la concentración de energía solar.
- Colector fresnel: Colector concentrador que utiliza una lente para enfocar la radiación solar hacia un receptor.



- **Colector solar:** Dispositivo diseñado para absorber la radiación del sol y poder transmitir la energía térmica a través de un fluido de trabajo que pase a través de este.
- **Colector de canal parabólico:** Colector de seguimiento de un solo eje, concentra la la energía solar mediante un punto receptor de manera lineal.
- **Colector de placa plana:** Colector estacionario que captura tanto radiación directa como difusa.
- **Colector de tubo evacuado:** Colector que utiliza un tubo de vidrio con un espacio evacuado entre el tubo y el absorbedor.
- **Constante solar:** Es la intensidad de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre, en una distancia promedio tierra - sol en una superficie perpendicular a los rayos del sol.
- **Cubierta de placa:** Material transparente utilizado para cubrir la placa colectora absorbente, para poder atrapar la energía solar por medio de un proceso de efecto invernadero.
- **Declinación:** Ángulo entre la línea tierra - sol y el plano del ecuador norte - positivo.
- **Eficiencia:** Relación entre la medida del efecto deseado y la medida del efecto de entrada, expresados en las mismas unidades.
- **Eficiencia del colector:** Es la relación que existe entre la energía recolectada por un colector y la energía radiante incidente sobre el mismo.
- **Energía solar:** Forma de energía electromagnética emitida por el sol, generada a partir de una reacción de fusión dentro del astro.
- **Helióstato:** Dispositivo para dirigir la luz solar a un objetivo fijo.
- **Irradiación o exposición radiante  $J/m^2$ :** Es la energía incidente por unidad de área en una superficie, establecida durante un tiempo específico, usualmente una hora o un día.

- Irradiancia  $W/m^2$ : Es la magnitud para describir la potencia incidente por unidad de superficie. El símbolo  $G$  es usada para la irradiancia solar.
- Latitud: Distancia angular norte o sur del ecuador, medida en grados.
- LCPV: Sistema de captación fotovoltaico de baja concentración (por sus siglas en ingles; Low Concentration Photovoltaic).
- Parábola: Lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de un punto fijo, el cual es denominado foco y de una recta fija del mismo plano denominada directriz.
- Radiación: Se denomina radiación a la emisión o transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas.
- Radiación directa: Es la radiación solar recibida del sol sin haber sido dispersa por la atmósfera.
- Radiación difusa: Es la radiación solar recibida de parte del sol después de que su dirección ha sido cambiada a causa de la dispersión provocada por la atmósfera.
- Radiación extraterrestre: Radiación solar recibida en una superficie en el límite de la atmósfera de la tierra.
- Radiación solar: Energía radiante emitida por el sol directamente como un haz, dispersado a través del cielo y reflejado en la tierra.
- Radiación solar total: Es la suma de la radiación directa y la radiación difusa en una superficie.
- Reflector de canal parabólico: Plato parabólico con seguimiento de doble eje, este concentrador enfoca la energía en un foco o punto de una unidad receptora.
- Sistema de seguimiento: Conjunto de actuadores mecánicos y/o eléctricos necesarios para mantener a un concentrador solar orientado respecto al sol.

- Vector Solar: Representa los rayos solares (los cuales cuentan con una dirección y un sentido) que inciden directamente sobre una determinada superficie. Se busca que este sea completamente perpendicular a la superficie de incidencia para la mejora en la captación.

# 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

La Estrategia Nacional de Energía 2013-2027 señala que México cuenta con importantes y bastos recursos naturales a lo largo de todo el territorio nacional, óptimos para el desarrollo de las energías renovables, los cuales pueden y deben ser aprovechados para garantizar la sustentabilidad del sector energético a largo plazo. México es un país en desarrollo con una gran cantidad de recursos naturales, una de las fuentes de energía renovable en abundancia y fácilmente disponible en México es la energía solar. El país se encuentra dentro del grupo de 66 naciones que conforman el Cinturón Solar, los cuales reciben las mayores cantidades de radiación solar, debido a que están ubicados entre los trópicos de Cáncer y Capricornio. Como ya se mencionó México está localizado en una de las mejores ubicaciones para la producción de energía solar; 70 % del territorio tiene una insolación mayor a  $4,5 \text{ KWh}/\text{m}^2/\text{día}$ . Actualmente la energía solar en México se utiliza en aplicaciones térmicas para tareas tales como, el calentamiento de espacio y agua, y en procesos térmicos de baja temperatura, por ejemplo agua sanitaria. Además, hay cerca de 38 *MWe* de capacidad fotovoltaica instalada. Se estima que la energía solar fotovoltaica y térmica suministrará aproximadamente el 5 % de la generación total en México en el año 2030 y 10 % para el año 2050. Para satisfacer sus crecientes necesidades energéticas, México tendrá que expandir su capacidad de generación de forma que se mantenga el equilibrio del impacto ambiental. En México aproximadamente 709 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  se

emiten cada año con el 30 % proveniente del sector de generación de electricidad. Para satisfacer la demanda futura de electricidad proyectada, resultaría en el aumento de las emisiones de  $CO_2$  del 230 % en México si no hubiera un cambio a la generación de energía renovable. Con el fin de evitar este aumento exagerado de  $CO_2$ , es necesario adoptar tecnologías verdes (incluyendo la solar) para ayudar a mitigar el impacto ambiental al aumentar la capacidad de generación de energía que produce emisiones de  $CO_2$ . El gobierno mexicano ha establecido objetivos para reducir las emisiones nacionales de  $CO_2$  en un 30 % para el 2020 y 50 % para el 2050, mientras que, al mismo tiempo se requiere que el 35 % de la energía de México provenga de fuentes renovables para el 2024. Las circunstancias de las crecientes necesidades energéticas y reducciones necesarias de emisiones de  $CO_2$ , junto con un medio ambiente excelente para aprovechar la energía solar, ofrece la oportunidad de desarrollar y asimilar una nueva tecnología de generación solar que puede producir tanto energía térmica como eléctrica de manera simultánea a un precio atractivo en México. Una de las fuentes de energía renovable de mayor potencial en nuestro país es la energía solar, ya que el valor promedio del recurso solar disponible es de  $5,7kWh/m^2/día$ , muy superior a las de otras regiones del mundo. Sin embargo a pesar del alto potencial y beneficios de la energía solar para lograr la aplicación masiva de la tecnología aún se deben superar algunas barreras como: altos costos de la inversión inicial, baja disponibilidad de fondos de inversión para financiar proyectos de gran escala, bajas eficiencias de conversión de la energía y poco desarrollo de tecnología para su aprovechamiento. Por ejemplo, el actual desarrollo de sistemas de posicionamiento y captación de energía se ven truncados debido a diversas fuentes de errores en el seguimiento solar que resultan ser mas complejas que las soluciones propuestas hasta el día de hoy, lo cual causa diversas oportunidades de mejora para que estos desarrollos puedan llegar a ser viables a mayores escalas. Se han identificado tres principales fuentes de errores que afectan la precisión de los sistemas de seguimiento; inclinación del pedestal, alineación, y desviación. Además de que no se conoce cuantas mediciones del error de seguimiento se deben utilizar en los procesos para que puedan ofrecer una adecuada relación costo - beneficio. Estas carencias hacen que la investigación de estos tópicos sea necesaria para la generación de soluciones a un problema de alto impacto para el sector energético y ambiental.

## 1.2. Alcance del Estudio

## 1.3. Planteamiento del problema

Los métodos de alineación y orientación que son utilizados en la instalación y montaje así como la puesta en marcha de sistemas solares resultan ser más precisos unos con respecto de otros, esto implica un costo adicional, bastante alto en algunos casos. Aunado a estos errores, el diseño mecánico de los seguidores, los procesos de fabricación, deformación o desalineamiento de los sistemas estructurales, así como las condiciones climatológicas del lugar de operación repercuten directamente en pérdidas en la captación de energía; las cuales pueden ser corregidas mediante un seguimiento óptimo del sol.

## 1.4. Objetivo general

Mejorar la captación de energía solar por medio de la corrección de los errores de seguimiento ocasionadas por las inconsistencias de instalación; en los ejes azimutal, elevación e inclinación.

## 1.5. Objetivos Específicos

- Construir e instrumentar un prototipo de seguidor solar.
- Caracterizar el sistema a través de datos experimentales.
- Proponer metodología para compensación del error.
- Compensar trayectorias de seguimiento.
- Verificar resultados.

## 1.6. Hipótesis

La captación de energía solar con sistemas de seguimiento solar convencionales, puede ser mejorada compensando las trayectorias de seguimiento a partir

de la medición de las desviaciones (offset) a los que están expuestos los sistemas solares.

### 1.7. Justificación

Las principales diferencias entre las modalidades de seguidores solares, de uno o dos ejes o simplemente los colectores estáticos, es su capacidad de captación de energía solar. Como se verá en secciones siguientes es bastante claro que los seguidores de dos ejes, tienen una captación mayor de energía respecto a los de un eje. Todos los defectos e inconsistencias a los que pueden estar expuestos los seguidores solares son:

- De instalación: Métodos de alineación, orientación y montaje.
- De operación: Deformación o desalineamiento estructural, condiciones climatológicas del lugar de operación (Temperatura ambiente, ráfagas de viento, polvo, etc).

Provocan que el seguidor solar modifique su geometría de seguimiento, disminuyendo con esto su capacidad de captación de energía y de igual manera de aprovechamiento de la misma.

### 1.8. Organización

Los métodos de seguimiento solar, algoritmos de seguimiento y los métodos de corrección de errores de posicionamiento fueron los principales temas que se estudiaron para el desarrollo de esta investigación. A partir de un algoritmo de seguimiento solar de alta exactitud embebido en un CompactRIO 9068, un sensor solar y del conocimiento de determinadas perturbaciones en la orientación y nivelación de la estructura mecánica del seguidor se obtuvieron una serie de datos que incluían las componentes de desviación del vector solar. El método de mínimos cuadrados se aplicó como una herramienta sencilla para la estimación de los parámetros del sistema lineal. Se implementó la matriz de corrección calculada por el método de mínimos cuadrados al algoritmo embebido de posicionamiento

solar de NREL y se obtuvo una corrección significativa al seguimiento solar a pesar de estar expuesto a las perturbaciones externas. En el capítulo 2 diversos mecanismos, algoritmos y métodos de corrección de errores fueron analizados con lo que se estableció las opciones mas viables para la resolución del problema, en el capítulo 3 son explicadas a detalle. En el capítulo 4 se aplica la metodología propuesta para poder determinar si existe alguna corrección en el seguimiento del sol tomando en cuenta perturbaciones externas al sistema utilizando los cálculos obtenidos mediante el método de mínimos cuadrados, los resultados y conclusiones son expuestos en el capítulo 5.



## 2

# Revisión de Literatura

## 2.1. Plataformas de Seguimiento Solar

Los diversos sistemas mecatrónicos diseñados para los seguidores solares tienen como principal objetivo asegurar una correcta movilidad para un seguimiento óptimo. Basta con conocer la posición del sol y la ubicación del seguidor como datos de entrada para tener un sistema de posicionamiento funcional. Los sistemas mecatrónicos encargados de la movilidad son una parte fundamental especialmente cuando se trata de concentración de alta temperatura donde se convierte directamente la energía solar en energía térmica o eléctrica, puesto que se requiere de un seguimiento de alta exactitud para garantizar que se está produciendo la máxima cantidad de energía en base a la radiación solar captada. Prinsloo and Dobson (2014)

El sistema mecatrónico que conformara a un seguidor solar encargado de darle funcionalidad, deberá ser plenamente eficiente, e incluso tener un funcionamiento completamente autónomo dependiendo directamente de la energía que esté generando a partir de la radiación solar. Las partes fundamentales que conforman una plataforma de seguimiento se mencionan a continuación:

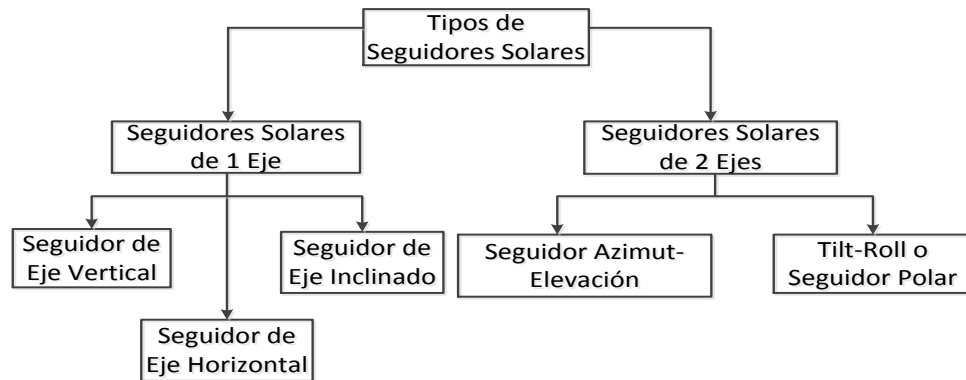
- Transmisión: Parte fundamental del sistema de posicionamiento mecánico para el movimiento del colector; actuadores lineales, engranes (en sus distintos tipos), mecanismo de transmisión etc.

## 2.1 Plataformas de Seguimiento Solar

---

- Motores Eléctricos: Motores AC/DC para controlar las transmisiones mecánicas; pueden ser controlados por medio de corriente, frecuencia y es común el uso de controladores de velocidad.
- Almacenamiento de baterías: Como respaldo para el almacenamiento de energía o para el arranque u operación del sistema mismo.
- Sensores de posición angular: Sensores de inclinación, fotodiodos, fotorresistencias, encoders; para conocer y retroalimentar el valor del ángulo de inclinación del colector.
- Algoritmo de posicionamiento solar: Algoritmo que calcule en tiempo real, la posición del sol; el ángulo azimutal y la elevación.
- Unidad de control: Dispositivos electrónicos programables; su función primordial es coordinar el método de operación de todo el sistema en conjunto, en base a la retroalimentación de un sensor y a los cálculos de un algoritmo.
- Sensores de límite: Dispositivos exclusivos para prevención de movimientos mecánicos fuera de los límites del diseño o simplemente por seguridad del usuario final.
- Sensores de variables meteorológicas: Piranómetros para la medición de radiación, anemómetro para la medición de la velocidad y orientación del viento, sensores de temperatura ambiente, presión atmosférica o estaciones meteorológicas para la detección de condiciones climatológicas de riesgo.
- Carga útil: la plataforma solar cuenta con algún tipo de sistema colector, reflector o sistema óptico útil para el manejo de la irradiancia solar, (canal cilindro parabólico, colector plano, fotovoltaico, fresnel, disco, etc.) fijado mecánicamente a la plataforma. Prinsloo and Dobson (2014)

En la figura 2.1 se muestra de manera simplificada las modalidades de los seguidores solares, los cuales se dividen básicamente en dos categorías que son; seguidores solares de uno y de dos ejes. En los sistemas de un eje se tienen tres tipos: De eje vertical, de eje horizontal y de eje inclinado.



**Figura 2.1:** Clasificación Básica de los Seguidores Solares  
K.Chong and Wong (2014)

Mientras que los seguidores de dos ejes se dividen en solo dos categorías; Azimut - Elevación y Tilt - Roll. En el seguidor solar azimut - elevación el colector solar presenta una mayor libertad de rotación en sus ambos ejes. Utiliza los valores de los ángulos del sol (azimut y elevación) para su posicionamiento, buscando la normal con el vector solar; estos pueden llegar a almacenar cerca del 100 % de eficiencia en la captación de energía.

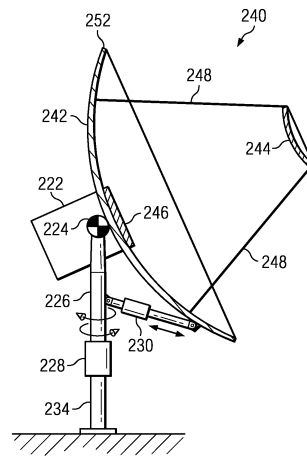
Es muy importante durante el diseño de las plataformas solares tomar en cuenta y ajustarse a los principios de funcionamiento de las mismas para que presenten una buena sinergia entre todos los sistemas. Los sistemas de seguimiento de dos ejes; por ejemplo, fueron diseñados bajo el propósito fundamental de mejorar la captación de energía solar, en base a los continuos cambios en la posición aparente del sol, pudiendo incrementar el desempeño en la captación de energía aproximadamente 50 % en verano y 30 % en invierno tomando en cuenta días despejados. Prinsloo and Dobson (2014).

### 2.1.1. Mecanismos de Movimiento

Los mecanismos utilizados para otorgar movimiento a las plataformas solares también son parte fundamental del sistema, generalmente las plataformas con

## 2.1 Plataformas de Seguimiento Solar

dos ejes de seguimiento cuentan con mecanismos independientes para cada uno de sus ejes, y en la mayoría de las ocasiones la tecnología utilizada en alguno de los movimientos de los ejes difiere mucho en relación con el otro. Existen también diversas configuraciones en el uso de actuadores para el control de los movimientos; por ejemplo en la figura 2.2 se aprecia un ejemplo de configuración de posicionamiento de actuadores, uno para movimiento rotatorio y otro para movimiento lineal, independiente uno del otro, la ubicación de los sistemas que proporcionan el movimiento dependerá de factores como la cantidad de carga, y la tecnología que se utilizara para esta función (neumática, eléctrica, hidráulica), además dependerá de factores como la velocidad de posicionamiento, la carga, los esfuerzos mecánicos o las condiciones climatológicas necesarias para la operación del sistema.



**Figura 2.2:** Seguidor Solar con actuadores independientes de Movimiento  
Esmond et al. (2011)

Otro ejemplo de un sistema mecánico muy característico son los utilizados para los paneles fotovoltaicos, los cuales presentan como elemento principal un pedestal y sus respectivos actuadores para cada ángulo de posición, estos son claramente diseños más austeros en comparación con seguidores con otro tipo de concentradores debido a la simplicidad en su diseño, a su fácil montaje y a

## 2.1 Plataformas de Seguimiento Solar

sus características físicas. En general en todas las plataformas (sin importar el tipo de concentrador) se debe tener muy en cuenta los factores antes mencionados al seleccionar los actuadores que se utilizaran para darle movimiento a la parte receptora debido a que se requiere de un movimiento armónico respecto al movimiento de rotación de la tierra ( $15^\circ$  *por hora*) para el eje azimutal, y movimientos mucho más lentos y cortos para el eje de elevación. En la actualidad; en el mercado existen un sin número de sistemas mecánicos y controladores incluso diseñados específicamente para aplicaciones de seguimiento solar. Derivado de esto existe también una vasta cantidad de literatura en la cual evalúan diversos mecanismos para diferentes tipos de plataformas de seguimiento, que van desde el uso de actuadores lineales y rotacionales (Ver figura 2.3) hasta el uso de cadenas, engranes, transmisiones etc.



**Figura 2.3:** Ejemplos de Actuadores Rotacionales  
Prinsloo and Dobson (2014)

Para poder calcular la velocidad del sol y así definir el actuador indicado, se puede utilizar la ecuación 2.1, la cual calcula la velocidad del sol en grados sobre minuto, sin embargo con la ecuación 2.2 se puede calcular en revoluciones por minuto y con lo cual se puede relacionar el valor obtenido con la velocidad de un motor.

## 2.1 Plataformas de Seguimiento Solar

---

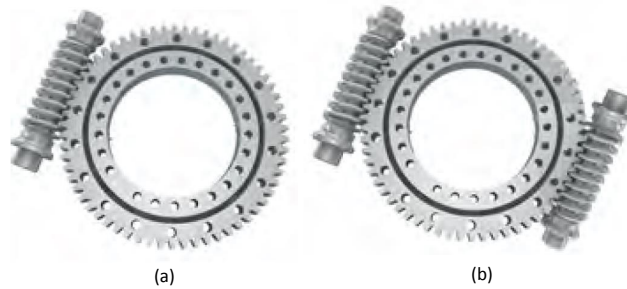
$$Velocidad\ Del\ Sol(Grados/Minuto) = \frac{\Delta Angulo\ Solar(Grados)}{\delta(minutos)} \quad (2.1)$$

$$Velocidad\ Del\ Sol(RPM) = \frac{Velocidad\ Del\ Sol(Grados/Minuto)}{360^\circ} \quad (2.2)$$

El sol se moverá a una velocidad angular promedio de  $0,25^\circ$  por minuto según Stine and Geyer (2011) (dependiendo de la ubicación del observador) o lo que es lo mismo  $0,000694\ rpm$ , por lo cual requiere de una velocidad muy lenta y un alto par.

- Actuadores Rotativos

Existe una gran diversidad de actuadores de este tipo para distintas aplicaciones, movimientos rápidos o lentos (que son los que se requieren en plataformas solares) y para cargas de diversas magnitudes. El motor como tal no podría considerarse apto para aplicaciones de seguimiento, porque como se mencionó en el apartado anterior la velocidad que se requiere para estas aplicaciones es muy baja; es por esto que este tipo de actuadores requieren de complementos que les ayuden con un control más preciso del movimiento rotativo o también, muy comúnmente utilizados; dispositivos que convierten un movimiento rotativo en un movimiento lineal. El uso de dispositivos donde es común el uso de engranajes, conlleva un importante problema; el backlash. Es por esto que en algunas unidades de giro hacen uso de tornillos sin fin, como la que se muestra en el inciso a de la figura 2.4 utilizadas en muchas aplicaciones de seguimiento por su buen desempeño, su bajo backlash y su función de autobloqueo como el del inciso b de la figura 2.4 en la cual el engrane principal cuenta con doble tornillo sin fin, el cual; cuando se llega a la posición deseada provoca un enclavamiento del engrane central por medio de un ligero giro de ambos tornillos. Prinsloo and Dobson (2014)



**Figura 2.4:** A) Unidad con un tornillo sin fin. B) Unidad con doble tornillo sin fin. Utilizados en aplicaciones de seguimiento solar

Prinsloo and Dobson (2014)

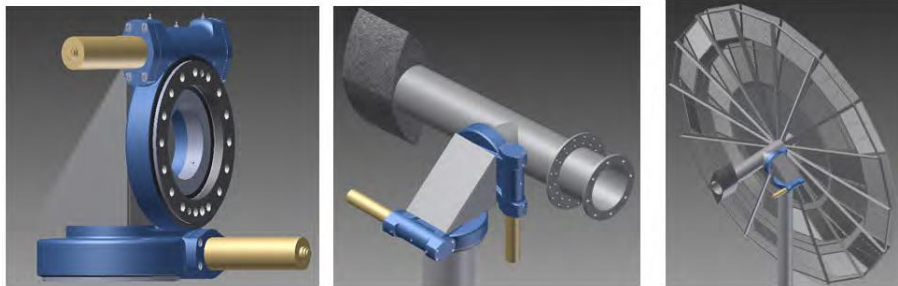
Aunque los tornillos sin fin, se han utilizado como intento para resolver el problema de la falta de precisión en los movimientos de los sistemas de engranes, Lopez and Stone (1993b) en su reporte sobre el desempeño de los discos stirling, documenta que en condiciones de viento extremo estos tipos de engranes sufren excesivo desgaste. Si dichos elementos mecánicos son propensos a este desgaste, influencias externas como el mismo viento provocarían imprecisiones en el seguimiento y estas a su vez desviaciones en tiempo real de la plataforma solar. Para solventar este problema muchos fabricantes utilizan sistemas de engranes planetarios, en los cuales el contacto se comparte entre 3 o más engranes. Sabiendo estos detalles las unidades Winsmith son utilizadas muy comúnmente en aplicaciones de seguimiento; donde el uso de un sistema planetario aporta una mejor distribución de la carga entre sus engranes y con esto asegura una mayor estabilidad rotacional Lopez and Stone (1993b).

Las unidades de giro integradas son otra opción de accionamiento mecánico de engranes, el cual puede ser para uno o para dos ejes. Dichas unidades son de montaje en pedestal como se observa en la figura 2.5. Estas unidades están compuestas de un rodamiento, un engrane recto o un tornillo sin fin, un motor hidráulico o eléctrico y una carcasa. Para el uso de unidades individuales para cada eje de seguimiento y con el fin de integrarlas, es por

## 2.1 Plataformas de Seguimiento Solar

---

medio de una caja de conexión donde los mecanismos de accionamiento se unen perpendicularmente.



**Figura 2.5:** Unidad de Giro Integradas en configuracion rectangular y triangular  
Prinsloo (2014)

- Actuadores Lineales

Un actuador de este tipo tiene la capacidad de proporcionar movimiento para elevar, inclinar o empujar determinados cuerpos por medio de diversas tecnologías (Ver figura 2.6); la fuerza que provoca este actuador puede provenir de una fuente neumática, hidráulica o eléctrica, aunado a esto, dichos dispositivos ofrecen un movimiento silencioso y limpio, de bajo consumo y muy poco mantenimiento, pueden ser utilizados en condiciones extremas de calor, lluvia o polvo. Su uso es muy común en las plataformas solares con seguimiento de eje vertical muy comúnmente con sistemas fotovoltaicos, debido a que la generación de energía optima se logra con ángulos bajos, en las plataformas con funcionamiento de dos ejes; se utiliza para el eje de elevación. Prinsloo and Dobson (2014)





**Figura 2.6:** Actuador lineales para aplicaciones solares  
DONGGUAN (2018)

En esta sección se mostraron solo algunos tipos de actuadores sin entrar en detalles de marcas, costos o métodos de control, la idea principal es mostrar los dos tipos de actuadores, sus características así como algunas variantes, el hecho de diseñar una plataforma solar y de tener que seleccionar actuadores para la transmisión del movimiento dependerá exclusivamente del diseño; el tamaño de la plataforma, el tipo de seguimiento, el tipo de colectores, las condiciones climatológicas, sin olvidar la eficiencia que se desee tener en el sistema.

## 2.2. Algoritmos de seguimiento solar

Los algoritmos son una serie de instrucciones y operaciones que calculan la solución a un determinado problema. Los algoritmos que describen la mecánica celeste han sido un importante campo de estudio; en este caso del movimiento del sol. El principal propósito es lograr un seguimiento adecuado del sol con el menor error posible mediante un captador, en base a una ubicación y a un instante de tiempo determinado. La importancia de un óptimo seguimiento radica en poder captar la mayor cantidad de energía solar mediante el dispositivo colector. A lo largo de las últimas décadas investigadores han diseñado y mejorado algoritmos que cumplan con esta tarea, llegando a obtener alta precisión de seguimiento. Dentro de la literatura se encuentra una gran diversidad de algoritmos con múltiples características, puntos a favor y en contra; algoritmos ligeros para un rápido

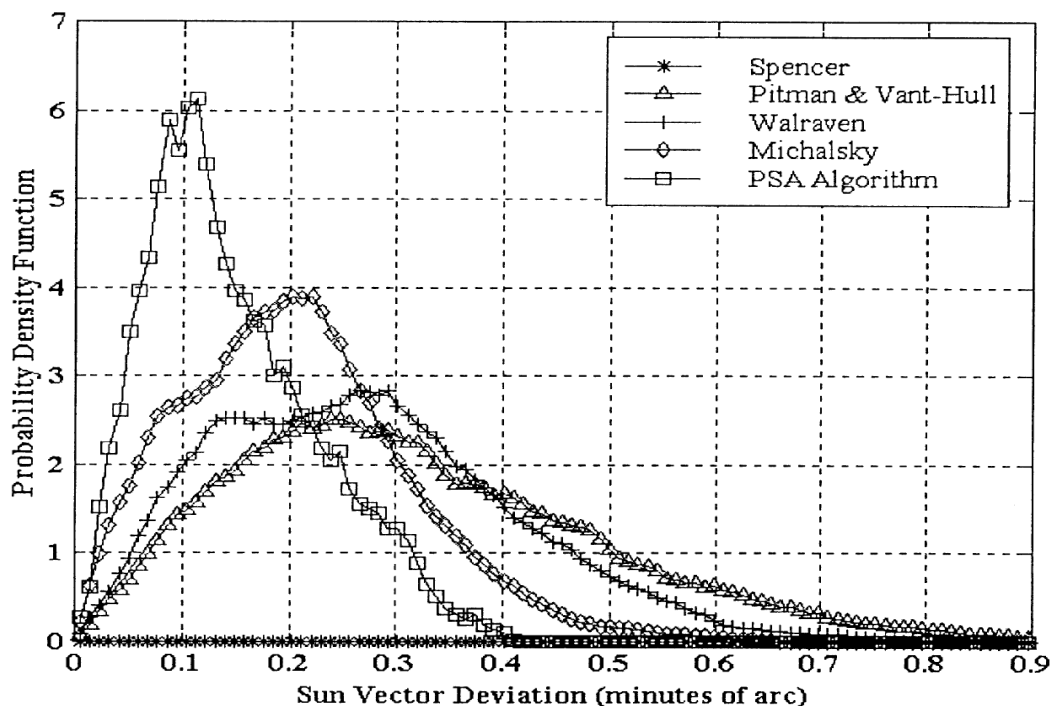
procesamiento pero de poca exactitud o algoritmos más robustos con una excelente proximidad en los datos, todo recae en los requerimientos del sistema, del tipo de colector o del tipo de condiciones a las que estará expuesto. A continuación se realiza una recapitulación de investigadores que han realizado trabajos referentes al desarrollo de algoritmos de seguimiento solar. La gran mayoría de los algoritmos requieren de bajos recursos de procesamiento aunque usualmente su error es mayor a  $0,01^\circ$ . En los primeros métodos para el cálculo de parámetros solares se encuentra Spencer (1971) con un error máximo de  $0,25^\circ$  y con la principal aportación del cálculo de la ecuación del tiempo y de la declinación solar, parte fundamental para el cálculo de la posición del sol de muchos algoritmos. A partir de este antecedente se han realizado trabajos para disminuir el error de seguimiento; el algoritmo de Pintam and Vant-Hull (1978) en 1978 se reduce a  $0,02^\circ$ , Walraven (1978) a  $0,013^\circ$ , y el algoritmo de Michalsky (1988) uno de los códigos más importantes por ser tomado como referencia para nuevos desarrollos, por su reducido error de  $0,011^\circ$ . Es a partir de Michalsky (1988) que los algoritmos comienzan a presentar mayor complejidad pues pueden calcular más parámetros relacionados al movimiento aparente del sol que todos los algoritmos anteriores y con funcionamiento en determinados periodos de tiempo. Las aportaciones de Meeus (1998) sobre mecánica celestial, permitieron el uso de fórmulas con un mayor grado de exactitud. Las necesidades actuales de la ingeniería solar permitieron desarrollar códigos modernos con determinados objetivos; Grena (2008) en su trabajo obtuvo un error máximo de  $0,0027^\circ$ , así como la plataforma Solar de Almería donde Blanco-Muriel et al. (2001) creó también su propio algoritmo de cálculo del vector solar con una exactitud de 0,5 minutos de arco y NREL dio paso al código más actual y exacto para aplicaciones de seguimiento solar Reda and Andreas (2004) con un máximo error de  $0,0003^\circ$  y un periodo de operación bastante amplio. A continuación se describe de manera detallada estos últimos desarrollos por ser los más recientes e implementados.

Blanco-Muriel et al. (2001), realizaron una clasificación de su revisión bibliográfica, donde en el primer grupo colocaron algoritmos sencillos que basan su funcionamiento en una fórmula con la que estiman solo algunos parámetros, como por ejemplo la declinación o la ecuación del tiempo, entre los que se encuentran; Cooper (1969), Lamm (1981), Spencer (1971). Mientras que en un segundo

## 2.2 Algoritmos de seguimiento solar

---

grupo colocan a los algoritmos más complejos que calculan la posición del sol en una ubicación precisa y en un momento determinado así como el cálculo de las variables ya mencionadas y, además el azimut y la elevación; Michalsky (1988). También presentan una comparación de resultados experimentales de algunos de los autores más importantes donde comparan los parámetros solares que son capaces de calcular, entre los que se encuentran; la declinación, el cálculo de la ecuación del tiempo, el azimut y la elevación, donde el algoritmo de Michalsky (1988) en comparación con el de Cooper (1969), Spencer (1971), Swift (1976), Pintam and Vant-Hull (1978), Walraven (1978), y Lamm (1981) es el mejor evaluado, al ser capaz de calcular todos los parámetros definidos en el experimento. Dicho algoritmo marca un parteaguas en el cálculo de la posición solar, pues a partir de Michalsky los códigos son más robustos, tienen mayor precisión y exactitud, y operan durante periodos de tiempo más largos, dejando en desuso los algoritmos antecesores. Blanco-Muriel et al. (2001) pudieron verificar la exactitud en los cálculos de los algoritmos por medio del Multiyear Interactive Computer Almanac (MICA) el cual es propiedad del Observatorio Naval de los Estados Unidos, con una precisión de medio segundo de arco. A partir de esta evaluación se desarrolló el algoritmo de la PSA, en el cual mejora notablemente la velocidad eliminando operaciones innecesarias, utilizando expresiones más robustas y así obteniendo un menor error en la desviación de  $0,008^\circ$  (0.5 minutos de arco), aunque solo por un periodo que comprendía del año 1999 al 2015. Ver figura 2.7.



**Figura 2.7:** Comparativa entre algoritmos estudiados.  
Blanco-Muriel et al. (2001)

Son diversos los autores que después de Michalsky y Blanco-Muriel han realizado nuevas y novedosas adaptaciones con estos algoritmos con una incertidumbre menor a  $0,01^\circ$  bajo determinadas condiciones de operación y limitando a determinado número de años de funcionamiento. Grena (2008) por ejemplo desarrollo en 2007 un código que cuenta con una alta precisión ( $0,0027^\circ$ ) y es de baja complejidad, aunque solo cubre un periodo de funcionamiento del 2003 al 2023 es adaptable en aplicaciones de ingeniería solar. El funcionamiento del código desarrollado por Grena es sencillo; necesita información de entrada; tal como el Tiempo Universal, la fecha (día, mes y año), la diferencia entre el Tiempo Universal y el Tiempo Terrestre, latitud y longitud del lugar de operación, la presión, así como la temperatura. Con estos datos se puede calcular las coordenadas del sol. El desarrollo puede ser ampliamente utilizado en el control de sistemas de seguimiento de alta precisión. Posteriormente el mismo Grena, publicaría otro artículo con cinco nuevos algoritmos para la posición del sol validados para un periodo

## 2.2 Algoritmos de seguimiento solar

---

de operación del 2010 al 2110; dichos algoritmos presentan diversos niveles de exactitud, los errores de posicionamiento solar oscilan entre  $0,19^\circ$  y  $0,0027^\circ$ , con un muy diverso rango de aplicaciones en la ingeniería solar. El propósito de estos algoritmos es directamente la optimización de la cantidad de recursos computacionales utilizados para el cálculo de los diferentes parámetros requeridos.

Reda and Andreas (2004) del National Renewable Energy Laboratory, realizaron la implementación de un código tomando como base el trabajo de Meeus (1998) con mucha mayor exactitud, variaciones de  $(\pm)0,0003^\circ$  y un periodo de funcionamiento del año  $-2000$  al  $6000$ , dichas características son sumamente mejoradas en comparación con los algoritmos de los autores mencionados anteriormente. Es importante recalcar la importancia que se tiene que dar a la reducción en la incertidumbre en el cálculo de la posición solar por debajo del  $(\pm)0,01^\circ$ , pues no solo se utiliza para mejorar la captación de energía en seguidores solares sino también se utiliza por ejemplo, en la calibración de piranómetros; debido a que la respuesta del instrumento es calculada en base al valor del ángulo cenital. El procedimiento se adoptó de *The Astronomical Algorithms* Meeus (1998). Reda and Andreas (2004) realizan diversos cambios en el procedimiento de The Astronomical Algorithms para poder utilizarlo en aplicaciones de radiación solar; en dicho libro el ángulo azimutal es medido de sur a oeste, pero para dichas aplicaciones debe ser medido de norte a este, así como la longitud geográfica del observador donde se hace la corrección para que se considere negativo al oeste y positivo al este respecto al Meridiano de Greenwich. Para 2011 Craig (2013) publicaría un libro sobre posicionamiento solar, software en tiempo real y su implementación en distintos seguidores solares con la distinción de un error máximo de  $0,00003^\circ$  aunque todos sus algoritmos programados en VB.Net. Cabe también mencionar la diversidad de lenguajes e interfaces en que se ha evolucionado el desarrollo de los diversos algoritmos; la mayoría de estos se han realizado en lenguajes como *C* y *C++*, actualmente existen estructuras diseñadas en lenguajes como Python, PHP, QBasic y Visual Basic .

La recomendación principal en relación a los algoritmos de posicionamiento solar (y de la cual se hará énfasis en las próximas secciones), es que la elección de un algoritmo para su implementación en algún sistema de captación solar o prototipo deberá realizarse en función al tipo de seguimiento, a la resolución de los

sistemas de control, a los actuadores utilizados para proporcionar el movimiento y al tipo de elemento colector.

## 2.3. Sensores

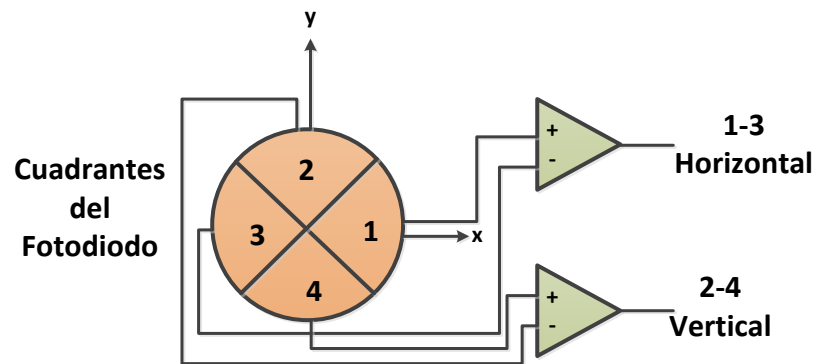
### 2.3.1. Sensores de seguimiento solar

Los sensores son la parte medular de los seguidores solares con configuración de lazo cerrado (para tratar de compensar los errores de seguimiento), puesto que al contar con una retroalimentación y conociendo así el error, se podrían corregir determinados parámetros por medio de algún método de control. Los sensores son los encargados de generar estas señales de retroalimentación e incorporarlas al controlador, ya sean provenientes de un sensor solar, de una cámara o de algún otro sensor sensible a la luz o sistema óptico. La estrategia de control de bucle cerrado funciona a partir de la retroalimentación del error de apunte en cada instante durante el seguimiento del sol, esta retroalimentación la lleva a cabo generalmente un sensor óptico. El principal inconveniente del uso de estos dispositivos es que miden el error en su orientación en base a la incidencia de los rayos solares respecto a la superficie del sensor y no con respecto a la orientación de todo el sistema incluyendo el sistema mecánico. Noriega and Perez (2014)

- Fototransistores y Fotodiodos

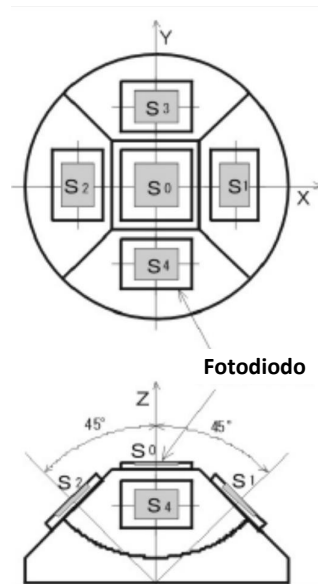
Los sensores más básicos comúnmente utilizados para el sensado de la posición del sol, son los fotodiodos y los fototransistores, elementos electrónicos sensibles a la luz, que son muy utilizados en sistemas de lazo cerrado, de manera general el uso de estos dispositivos permiten que las diferencias entre los valores de las respuestas de cada elemento, puedan servir para la compensación de las trayectorias de seguimiento. En el caso de los fototransistores cuando la luz incide en su región base, genera una carga y esta a su vez provoca que el transistor cambie a estado de conducción. Esta característica permite que se puedan conectar directamente a los circuitos controladores para el movimiento de los motores. Prinsloo and Dobson

(2014) Por otro lado los fotodiodos son semiconductores sensibles a la incidencia de la luz; este elemento produce una circulación de corriente cuando es excitado por la luz. En la figura 2.8 se muestra un circuito cuadrante con fotodiodos con niveles de energía diferencial que se utiliza como referencia para el posicionamiento solar. Prinsloo and Dobson (2014)



**Figura 2.8:** Circuito de Fotodiodos como referencia para el seguimiento solar  
F.Cavalier (2014)

Pattanasethanon (2010) diseñó un sistema de control de seguimiento solar denominado el cual utiliza una especie de pantallas para sombrear los fototransistores y poder estimar el ángulo solar en base a las diferencias entre los valores de las señales y entonces retroalimentar esta información al circuito de control. Shibata and Toyokazu (2000) diseñaron un sensor bajo el mismo principio, el cual tiene una estructura de 5 fotodiodos distribuidos en una estructura de forma piramidal truncada (como se observa en la figura 2.9), las diferencias en los valores de las señales de los diodos provocados por la diferencia del ángulo de la luz incidente, son utilizadas para el seguimiento solar, este diseño presenta una gran mejora respecto a otros similares debido a que uno de los fotodiodos se encuentra paralelo a la horizontal.



**Figura 2.9:** Sensor de luz de 5 fotodiodos para determinar la desviación del ángulo solar.

Shibata and Toyokazu (2000)

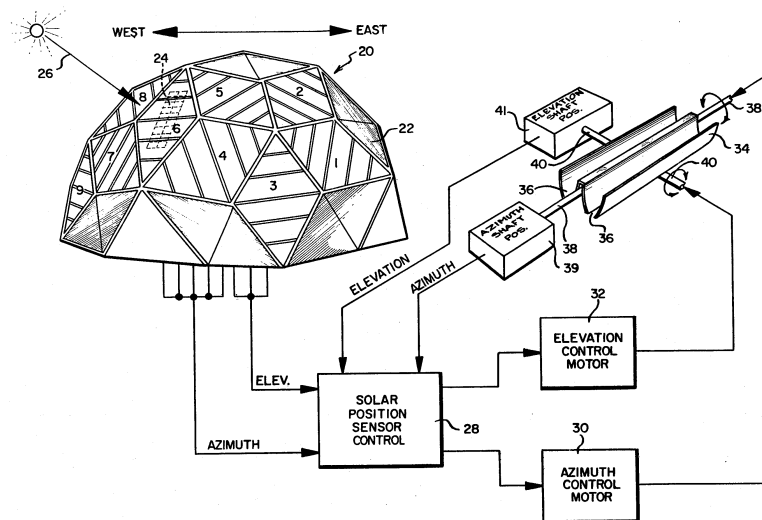
- Fotorresistencias

Su funcionamiento está basado en el principio de la fotoconductividad en el cual un material se vuelve un mejor conductor eléctrico a causa de absorción de radiación electromagnética. En el caso de este componente un aumento en la intensidad de la luz incidente provoca que la resistencia de este elemento disminuya y que la tensión de salida aumente. Bishop (2002)

Estos elementos son ampliamente utilizados en el sensado de la luz solar para aplicaciones de seguimiento, (en configuraciones semejantes a las de los sensores con fotodiodos o fototransistores) en las cuales las variaciones en los valores de resistencia provocados por el sombreado a causa del movimiento aparente del sol son utilizados como retroalimentación del sistema. Prinsloo and Dobson (2014) El primer sistema que se implementó con estos elementos resistivos para aplicaciones de seguimiento solar fue diseñado por Rotolo (1980), su sistema cuenta con múltiples caras planas formando una



especie de domo, donde cada cara presenta una relación angular diferente con respecto del sol, y así mismo un sensor en cada una de las mismas. Los valores de los ejes azimutal y elevación se obtienen a partir de las diferencias en valores leídos por los sensores. En la figura 2.10 se observa el diagrama general del sistema publicado en su respectiva patente.



**Figura 2.10:** Sensor de seguimiento solar de múltiples caras.  
Rotolo (1980)

De igual manera Z.Xinhong et al. (2007) diseñaron un sistema óptico para sensar la luz solar incidente en su seguidor, incorporando fotorresistencias y así retroalimentar los valores leídos a un FPGA, donde por medio de un controlador difuso controla los motores de accionamiento los cuales están desacoplados, lo que implica que el ángulo de rotación de uno no influye en el del otro motor, reduciendo los problemas de control, además de que uno de ellos no soporta el peso del otro como comúnmente se utiliza, estos ajustes que realizaron implican un ahorro en el consumo de energía del sistema durante su operación pudiendo así aumentar la energía generada. En esta configuración de los sensores Z.Xinhong et al. (2007), cada una de las fotorresistencias utilizadas se orienta a los cuatro puntos cardinales a un ángulo de  $45^\circ$  mientras que a los lados cuenta con una especie de

separadores que aísla la luz de las otras orientaciones. Si los valores de todos los elementos son iguales indicara que el colector solar esta completamente perpendicular a los rayos del sol.

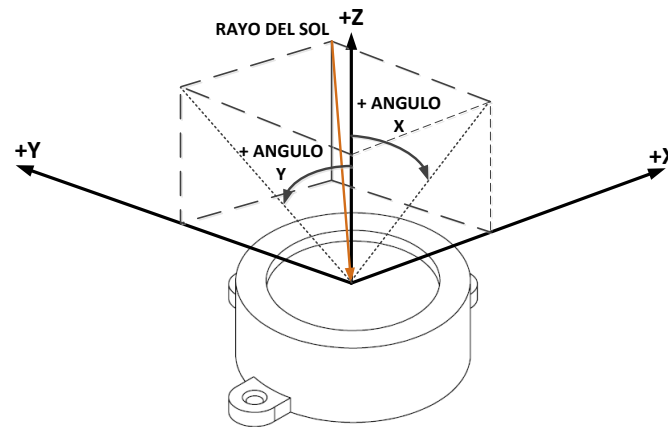
- Celdas Fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas convierten la luz que incide sobre ellas directamente en energía eléctrica. Para efectos del tema en curso, estos dispositivos son utilizados de diversas configuraciones para la obtención de información sobre la posición del sol en base a la diferencia en los valores de generación de energía de cada celda. La configuración piramidal con celdas convencionales o en forma de cúpula o esfera con celdas flexibles se han configurado para determinar los ángulos solares. La cantidad de energía que se genere dependerá de la intensidad de la luz y del tamaño de la celda. El principio de funcionamiento para aplicaciones de seguimiento solar, es el mismo que en los elementos utilizados en las secciones anteriores, se utiliza un medio comparador para los valores obtenidos (en este caso la cantidad de energía generada)Prinsloo and Dobson (2014). A.Catarius (2010) es su tesis de doctorado diseñó un seguidor solar de dos ejes en el cual implementa un sensor de seguimiento en base a celdas fotovoltaicas con la particularidad de hacerlo en un arreglo piramidal, y con un circuito comparador para poder controlar los movimientos del seguidor, en adición a esto realizó comparaciones de funcionalidad del sensor con celdas de distintos materiales para muestrear las respectivas capacidades de sensibilidad.

- Sensores Solares

El diseño, fabricación y uso de sensores solares, proviene de la industria aeroespacial, en la cual la orientación de los satélites o de las naves espaciales se determinan en tiempo real y con muy alta exactitud en base a la posición del sol. El mayor problema al que se enfrentan los sensores solares son los efectos del clima donde el polvo, el viento y la lluvia pueden causar severos problemas si de una aplicación de seguimiento solar se trata, debido a que estos dispositivos utilizan un ángulo apertura muy pequeño para determinar la posición del sol Prinsloo and Dobson (2014). En la imagen 2.11 se muestra

la configuración de los sensores de Solar MEMS, los cuales pueden medir el ángulo de incidencia de los rayos solares, además de contar con alta sensibilidad a consecuencia de su diseño y sus dimensiones geométricas, y ser de bajo consumo. SolarMEMS (2013)



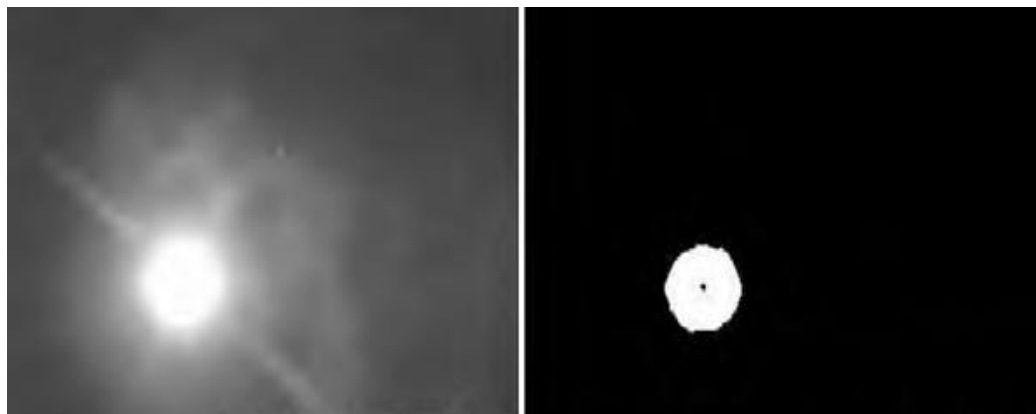
**Figura 2.11:** Características operacionales de los sensores SolarMEMS  
SolarMEMS (2013)

- Procesamiento de Imágenes

El procesamiento de imágenes puede ser también útil para la operación de seguidores solares así como para la compensación de los errores de seguimiento utilizando este método como medio de retroalimentación óptica. Los algoritmos de visión artificial en general tienen la capacidad de localizar objetos de características conocidas con alta resolución y exactitud dentro de decimas o centésimas de pixel. Prinsloo and Dobson (2014)

A.Minor and A.Garcia (2010) presentaron un sistema que por medio de una cámara comercial se puede compensar el posicionamiento de un sistema solar, durante un seguimiento continuo, además de poder extrapolar la posición cuando no se encuentra visible en un determinado periodo de tiempo, el método que utilizan es la binarización de la imagen que toman

del sol para poder conocer que objetos son blancos y que objetos son negros, entonces al binarizar y conocer la parte de la imagen que corresponde al sol, se calcula el centro de la misma para poder compensar los movimientos del seguimiento. En la imagen 2.12 se observa una comparativa entre una imagen tomada en tiempo real y una imagen binarizada con su centro indicado.



**Figura 2.12:** Diferencia entre una imagen tomada en tiempo real y la misma imagen binarizada y con el calculo de su centro.

A.Minor and A.Garcia (2010)

El uso de visión artificial para conocer el vector solar en tiempo real, es una opción viable para utilizar en sistemas con un lazo de control cerrado, aunque el aspecto más importante a considerar en estos casos es el rápido deterioro que pueden tener estos equipos bajo determinadas condiciones climáticas, así como el alto costo de los mismos, el mantenimiento constante que requieren así como la complejidad en los procedimientos de instalación A.Minor and A.Garcia (2010).

Retomando de manera más general el tema de los sensores ópticos Prinsloo (2014) realizó una comparación en las señales de error obtenidas mediante el uso de cámaras con las del uso de sensores solares; concluyó que la corrección de errores utilizando cámaras varían en mayor medida, fluctuando

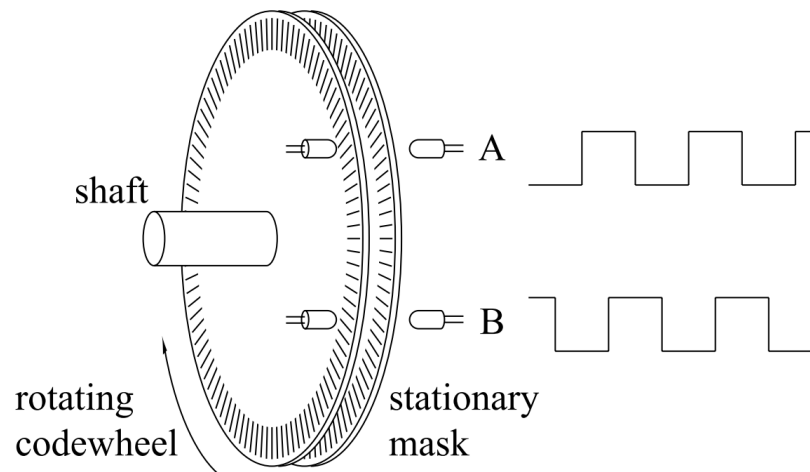
entre diversos valores, atribuyéndolo a que el método del procesamiento de imágenes para dicha aplicación es más complejo y costoso, las variaciones en el brillo de la luz solar también interfieren en la precisión del procesamiento. Prinsloo en su tesis de doctorado hace hincapié en que los sensores ópticos en general, sufren de gran desventaja debido a que dependen completamente de la visibilidad del sol, puesto que están propensos a la obstrucción por nubes o polvo, lo que provoca que el sistema de seguimiento pierda de vista al sol.

### 2.3.2. Sensores de posición angular

En diversas plataformas solares es de utilidad conocer la orientación angular, por ejemplo; en algunos casos se fijan sensores a cada uno de los ejes de los seguidores para poder así medir su orientación; para este propósito existen diversos tipos de dispositivos con una gran variedad de tecnologías como pueden ser elementos de contacto, resistivos, magnéticos etc. A continuación se mencionan algunos de los más utilizados.

- Encoders

A diferencia del resolver, un encoder genera señales digitales en respuesta al movimiento y pueden ser utilizados tanto para movimiento rotacional como lineal. Existen dos configuraciones básicas; el codificador incremental y el absoluto. El incremental no es más que un disco con un patrón radial que gira entre dos foto interruptores bloqueando alternativamente la luz infrarroja (Ver figura 2.13), de esta manera; contando el número de pulsos se puede medir la velocidad del eje. Como no existe una manera de poder conocer la posición absoluta en los encoders incrementales, se utilizan los absolutos; los cuales presentan el mismo principio de operación pero con la diferencia que este ofrece un código único para cada posición, con lo que independientemente de poder calcular con esto la velocidad de un eje, también se puede conocer su posición precisa incluso después de haber desenergizado el sistema Bishop (2002).



**Figura 2.13:** Diagrama de funcionamiento de un encoder incremental.  
Bishop (2002)

- Inclinómetros

Los inclinómetros son sensores que también pueden proporcionar información sobre posición angular de los ejes de cualquier sistema solar. Los inclinómetros electrolíticos por ejemplo, funcionan con electrodos repartidos sobre la superficie del sensor, y este a su vez parcialmente lleno con algún líquido conductor. Al inclinar el sensor cambia la distribución de la corriente a favor de los electrodos que estén más sumergidos sobre dicho líquido, una gran opción para ser utilizados en seguidores solares, la desventaja; la conductividad del líquido depende de la temperatura, por lo que se requeriría el uso de un sensor robusto que soportara las condiciones en las que operan los sistemas solares Bishop (2002).

- Acelerómetros, magnetómetros y giroscopios

Estos sensores son una opción bastante viable para la instrumentación de un seguidor solar, el cual podría utilizar acelerómetros para sensar el movimiento, la orientación por medio de giroscopios o magnetómetros para conocer la dirección de un campo magnético, y estos parámetros a su vez

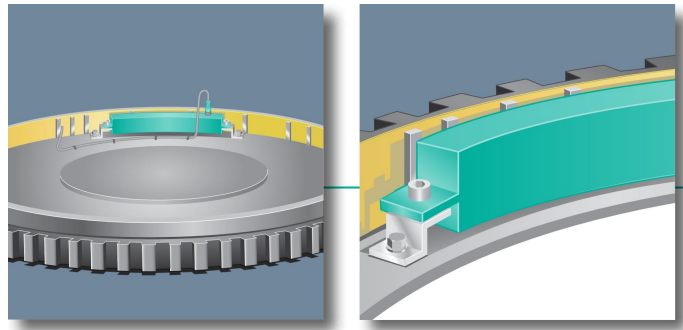
## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento

---

ser retroalimentados al sistema con el objetivo de calcular la posición, orientación y velocidad a la que debería posicionarse el sistema. La combinación en el uso de los acelerómetros con giroscopios pueden ayudar a caracterizar el movimiento completo de un sistema en un espacio tridimensional utilizando los sistemas de navegación inercial F.Pasolini (2011).

- **Sensores Inductivos**

El poder instrumentar los ejes de los seguidores solares resulta en ocasiones ser difícil (en caso por ejemplo de seguidores comerciales), pues para tal propósito se requiere en la mayoría de las ocasiones, modificaciones a los sistemas mecánicos, es por esto que Fuchs (2011) diseñaron y comercializan actualmente un sensor que proporciona la posición angular absoluta basada en detección inductiva sin contactos con la ayuda de una tira de pines de acero como se aprecia en la figura 2.14. Este tipo de sensores son adecuado por su gran robustez en sistemas que están expuestos a la intemperie y que además no requiere de mantenimiento alguno.



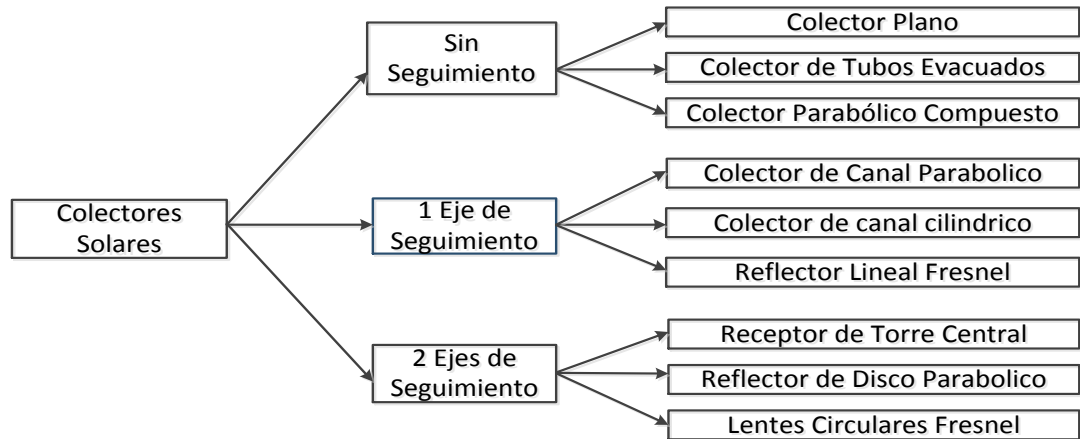
**Figura 2.14:** Sensor inductivo para determinar posición angular absoluta  
Fuchs (2011)

## 2.4. Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento

Los colectores solares son dispositivos que absorben la energía térmica de la insolación solar, la energía térmica es entonces almacenada y transportada por

## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento

medio de un fluido para su uso en una gran diversidad de procesos. En general los colectores pueden ser utilizados en sistemas con y sin seguimiento. Los colectores sin seguimiento permanecen estáticos o fijos, mientras que las plataformas con seguimiento son diseñadas con el propósito de orientar a los sistemas de captación en dirección al sol. Generalmente de acuerdo a su comportamiento y a la tecnología de captación, se pueden clasificar bajo que método de funcionamiento pueden ser utilizados. En la figura 2.15 se muestra la clasificación de captadores que realizó Suman et al. (2015).



**Figura 2.15:** Clasificación de los Colectores Solares.  
Suman et al. (2015)

### 2.4.1. Colectores Solares sin seguimiento

Este tipo de colectores permanecen completamente fijos, y no consideran el movimiento aparente del sol en el cielo; sin embargo son instalados bajo una determinada inclinación y orientación, los valores de estos parámetros variaran dependiendo de la ubicación geográfica donde se encuentren para que tengan la capacidad de aprovechar la máxima cantidad de radiación solar. Suman et al. (2015).

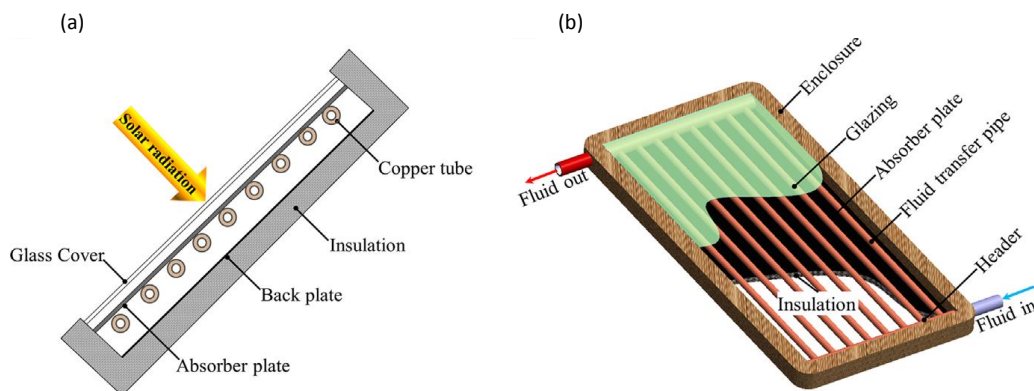
- **Colector fotovoltaico** Los colectores fotovoltaicos (PV por sus siglas en inglés) son dispositivos de estado sólido que son capaces de convertir la luz del



## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento

sol directamente en electricidad sin la intervención de algún equipo térmico o mecánico. Estos equipos no contienen partes móviles, por lo que requieren de muy poco mantenimiento y presentan una alta vida útil. Una celda fotovoltaica consta de dos o más capas delgadas de material semiconductor, generalmente silicio. Cuando este material se encuentra expuesto a la luz, se generan cargas eléctricas, cuando un fotón impacta con un electrón de un átomo de dicho material superando la fuerza de atracción del núcleo. Estas capas están encapsuladas, comúnmente con una cubierta de vidrio

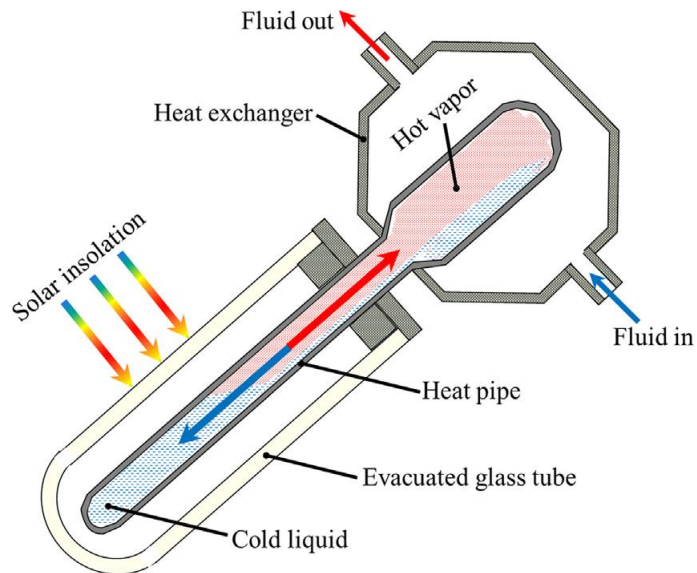
- **Colector plano** Los colectores planos aprovechan la radiación solar para convertirla en energía térmica de baja temperatura muy utilizada para aplicaciones domésticas. Constan principalmente de una cubierta de vidrio transparente la cual deja pasar la mayor parte de la energía solar y que también aísla al captador de las condiciones ambientales externas, un elemento absorbedor encargado de interceptar la energía solar dentro del captador para transformarla en energía térmica, así como de elementos aislantes y una carcasa. Su funcionamiento se basa en el principio del efecto invernadero, la luz del sol atraviesa la cubierta de vidrio, la cual calienta al absorbedor y genera radiación de onda más larga para la que el vidrio es opaco, por lo que al no poder salir se refleja nuevamente hacia el interior provocando que el colector presente una temperatura mayor a la del exterior. En la Imagen 2.16 se aprecia la composición general de un colector de este tipo.



**Figura 2.16:** A) Corte frontal y B) vista 3D de un colector Plano.  
Suman et al. (2015)

## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento

- Colector de tubos evacuados Estos colectores constan de un tubo que se conserva dentro de una cubierta de vidrio, para capturar la insolación solar requiere de un fluido transportador; entre los más comunes está el agua, el etanol y el metanol. El fluido transportador transfiere el calor a otro fluido de trabajo al ser expuesto a ciclos de evaporación o condensación. Durante la captación de la radiación solar el fluido transportador cambia de fase convirtiéndose en vapor. El vapor regresa entonces a su estado líquido después de haber transferido el calor al fluido de trabajo. El diagrama de la figura 2.17 muestra los principales elementos del tubo y su proceso de funcionamiento.



**Figura 2.17:** Estructura de un tubo evacuado.

Suman et al. (2015)

- Parabólico compuesto El Colector Parabólico Compuesto o CPC, está compuesto por una cubierta de vidrio y un tubo absorbedor así como dos superficies parabólicas reflectantes formando entre si sus respectivos puntos focales. El tubo absorbedor es colocado en un plano medio entre estos dos puntos, si el ángulo de incidencia es menor a la mitad del ángulo de aceptación la radiación solar pasa a través de la apertura del receptor, por lo

## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento

---

contrario, si el ángulo de incidencia es más grande que la mitad del valor del ángulo de aceptación la radiación solar finalmente será reflejada de vuelta al ambiente. La orientación de los reflectores parabólicos debe ser tal que la posición del sol o el ángulo de incidencia no afecte el comportamiento del sistema por lo que los CPCs se orientan a lo largo de la dirección este – oeste y de esta manera eliminar el tener que utilizar un seguimiento solar. Suman et al. (2015)

### 2.4.2. Colectores Solares con seguimiento

La necesidad de utilizar técnicas con estas características surge a partir de conocer que los sistemas estáticos no aprovechan al máximo la radiación solar durante el día, y que la variación que presenta la radiación solar durante el día y las estaciones del año. Hossein et al. (2009) realizó una revisión de investigaciones relacionadas con sistemas de seguimiento, llegando a la conclusión de que un sistema colector con seguidor puede mejorar el proceso de captura de energía de un rango de 10 – 100 % dependiendo de la hora y localización geográfica. Es importante señalar que el uso de un seguidor incrementa el consumo de energía de 2 – 3 %, por lo que es recomendable no utilizarlos en sistemas con colectores solares de baja capacidad. Ren et al. (2014) en su trabajo discute diversos métodos utilizados para la alineación de colectores solares con el propósito de incrementar la capacidad de captación de insolación solar. Estos métodos de alineación se clasifican generalmente en dos: mecánicos y ópticos.

- Colectores Solares con un eje de seguimiento

Los colectores que cuentan con esta configuración son orientados a lo largo de la dirección norte - sur siendo la posición del sol seguida de este a oeste durante el día. Los colectores de canal parabólico, los colectores de canal cilíndrico y los reflectores lineales Fresnel se encuentran en esta categoría.

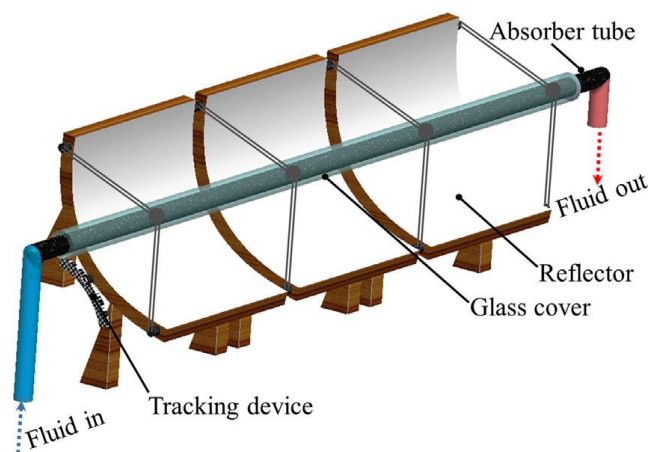
- Canal parabólico

Los colectores de canal parabólico en una superficie reflectante en forma de parábola, con un tubo absorbedor colocado a lo largo del punto focal, como lo muestra la figura 2.18. La posición del sol es seguida a

## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento

---

lo largo del día para una incidencia normal de la radiación solar sobre el colector. Estos sistemas son utilizados generalmente para la generación de energía a gran escala, sin embargo, son utilizados también a baja escala para la generación directa de vapor. Estudios muestran que el uso de colectores de canal parabólico para energizar los ciclos de potencia del vapor y generar electricidad requieren de un fluido de trabajo con una temperatura que puede alcanzar los  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



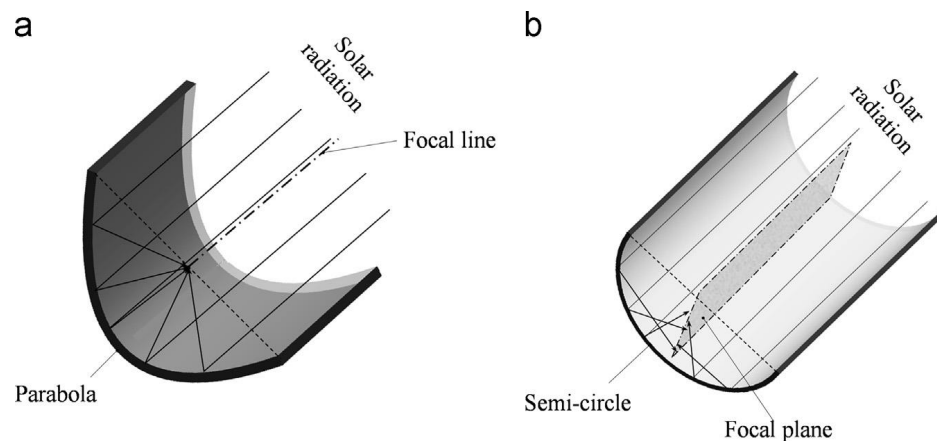
**Figura 2.18:** Colector de Canal Parabólico.

Suman et al. (2015)

- Canal cilíndrico

Este tipo de colectores son bastante semejantes a los colectores de canal parabólico con la única diferencia que los rayos solares convergen a lo largo de un plano focal en lugar de una línea focal como ocurre con los reflectores parabólicos. Ver figura 2.19.

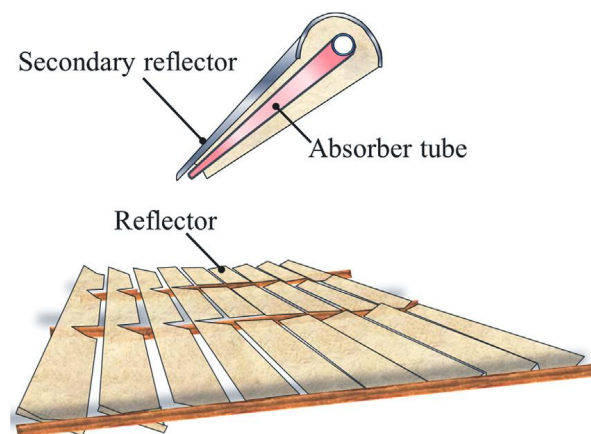
## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento



**Figura 2.19:** Colector de Canal Cilindrico.  
Suman et al. (2015)

- Reflectores Lineales Fresnel

Se trata de espejos planos utilizados para la concentración de la radiación solar en tubos absorbedores como si de un canal parabólico se tratara. Debido a un factor de concentración más bajo en comparación con los sistemas de canal parabólico las temperaturas de operación más bajas son alcanzadas en el fluido de trabajo, por lo cual las plantas operan a una baja eficiencia. Ver figura 2.20



**Figura 2.20:** Reflector Lineal Fresnel.  
Suman et al. (2015)

## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento

---

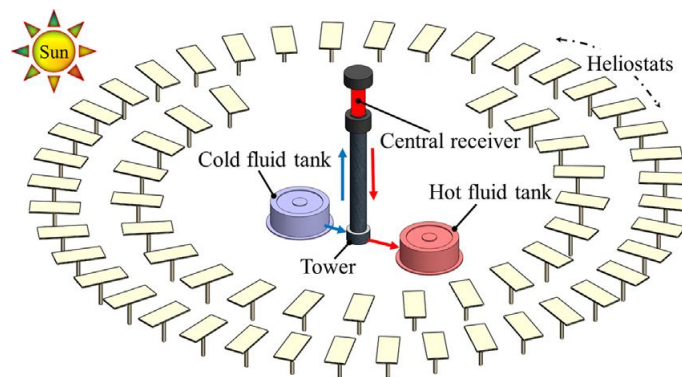
- Colectores Solares con dos ejes de seguimiento

Los sistemas de seguimiento solar de dos ejes cuentan con dos ejes de rotación perpendiculares uno con respecto del otro. El eje primario esta fijo respecto al suelo (azimutal), mientras que el segundo se posiciona respecto del primero (elevación), los colectores solares son instalados de manera paralela al segundo eje. Este tipo de seguidores presentan grandes ventajas en cuanto a un mejor aprovechamiento de la radiación solar debido a su capacidad de seguimiento de manera tanto vertical como horizontal. Como se trató en temas puntuales en capítulos anteriores, generalmente el diseño se basa en la solución de ecuaciones dinámicas sobre el movimiento planetario y el uso de microcontroladores, motores a pasos, sensores solares es indispensable, así como la validación de su funcionamiento a lo largo del año con las variaciones en la posición aparente del sol durante las estaciones.

- Receptor de torre central

Este tipo de sistemas es utilizado en instalaciones a gran escala para la generación de energía, cuenta con una torre central rodeada de una gran cantidad de heliostatos, donde cada uno cuenta con un sistema de seguimiento de dos ejes. La energía solar es concentrada por el campo de heliostatos en un receptor en lo alto de la torre; los fluidos de trabajo que se utilizan en estas plantas comúnmente son sales fundidas, agua y aire presurizado, debido a las altas temperaturas que pueden llegar a alcanzar. Ver figura 2.21.

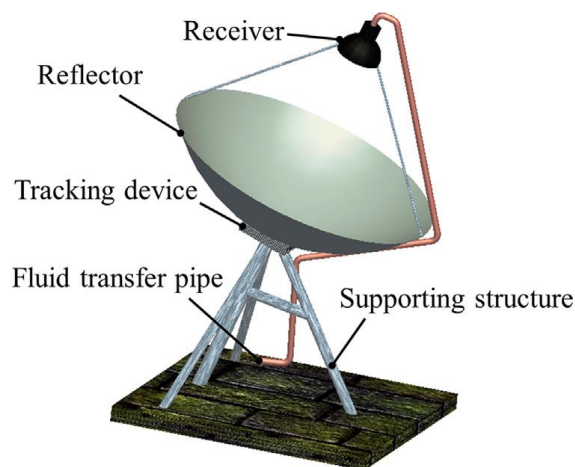
## 2.4 Tipos de Colectores Solares y su relación con el tipo de seguimiento



**Figura 2.21:** Receptor de Torre Central.  
Suman et al. (2015)

- Disco parabólico

Los sistemas de disco parabólico también trabajan con dos ejes de seguimiento y su diseño mecánico es muy semejante al de una antena, el disco concentra los rayos solares y los refleja hacia un receptor, en donde un intercambiador de calor, transfiere ese calor a un fluido de trabajo. Los equipos comerciales de este tipo, resultan costosos debido a los requerimientos de alta precisión durante su manufactura así como las dificultades para su transporte. Ver figura 2.22.



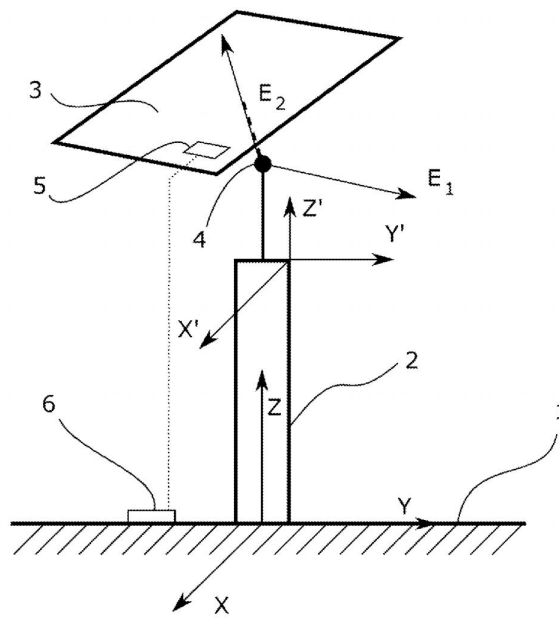
**Figura 2.22:** Reflector de Disco Parabólico.  
Suman et al. (2015)

### 2.5. Errores de seguimiento solar

La caracterización y el método de corrección de los errores de seguimiento es el tema central de este trabajo, se han realizado diversas investigaciones para poder resolver el problema; a continuación se describen algunas de las más importantes y destacadas. El hecho de no utilizar un sistema de seguimiento implica pérdidas de energía del 10 al 100 % dependiendo del periodo de tiempo y de la ubicación geográfica Hossein et al. (2009). Son diversos los autores que han destacado la importancia del uso de este tipo de sistemas; Grass et al. (2004) realizaron un estudio donde compararon concentradores parabólicos sin seguimiento con uno de canal parabólico y un colector de tubo evacuado con sistemas de seguimiento integrado, después de realizar una evaluación óptica de los dispositivos concluyeron que las eficiencias ópticas y la captación de radiación directa pueden incrementar a lo largo del día si se usan sistemas de seguimiento, y además que pequeños errores de seguimiento pueden tener efectos significativos si el ángulo de paso es bajo. Noriega and Perez (2014) publicaron una patente donde presentan un método para la determinación de la corrección de errores de seguimiento de la plataforma de un seguidor solar a partir de errores producidos por errores de montaje e instalación así como deformaciones estructurales, lo que provocan desviaciones en los ángulos azimut y elevación. Dicho método establece posiciones iniciales de referencia en base a cálculos de efemérides solares, entonces dispone de un control híbrido con el cual se obtienen factores de corrección, con los cuales a partir de varias calibraciones se mejora el seguimiento respecto a un sistema de bucle abierto. De manera general Noriega and Perez (2014) presentan una metodología donde colocan dos sistemas de coordenadas; el primero en el elemento estructural que es una base fija referenciada al suelo; es ahí donde colocan un primer sistema de coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$   $x$  e  $y$  paralelos al suelo y  $z$  orientada al cenit. Sobre este elemento estructural instalaron una plataforma móvil, las cuales están unidas mediante un vínculo de 1 o más grados de libertad; un punto antes de este vínculo es donde ubicaron un segundo conjunto de coordenadas. Ver Figura 2.23. De manera ideal, pensando en un sistema que no tuviera ningún tipo de desviación, errores de montaje, fabricación etc. Estos dos sistemas de coordenadas deberían ser totalmente paralelos. Existe el segundo sistema de coordenadas



debido a que los errores son causados principalmente por el elemento estructural fijado al suelo, aunado a esto dichas coordenadas se vinculan con un punto de la plataforma el cual acumula los distintos errores que afectan a la plataforma móvil. En resumen la metodología propuesta establece que una vez definida una dirección de apunte de la plataforma, determinara un cambio en la dirección que corregirá las desviaciones, este cambio se expresa por medio de una matriz de rotación que manipulara los actuadores de la plataforma.

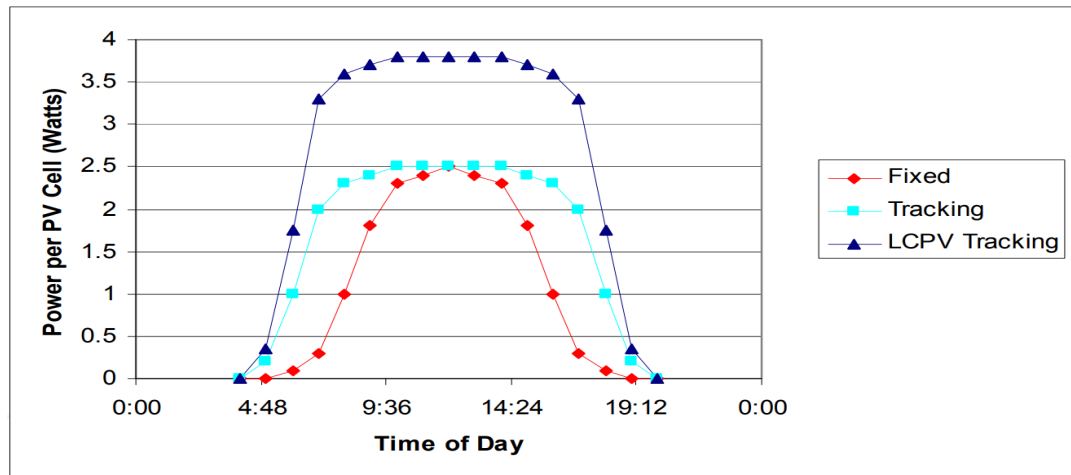


**Figura 2.23:** Diagrama Sistemas de Coordenadas  
Noriega and Perez (2014)

En teoría las desviaciones presentadas en los seguidores solares no tendrían por qué ser grandes, sin embargo mínimas desviaciones en el seguimiento podrían reducir significativamente el rendimiento de un sistema de captación, y en ocasiones hacer que el sistema en general quede completamente inoperante. Noriega and Perez (2014) La cantidad de energía aprovechada por el captador de un seguidor, está ligada directamente a la precisión con la que el sistema sigue al sol. Cuanta más precisión se tenga en el seguimiento solar, la cantidad de energía captada se incrementara. En la figura 2.24 se muestra la comparación de resultados de

## 2.5 Errores de seguimiento solar

generación de energía en pruebas con celdas fotovoltaicas entre un sistema fijo y sistemas con seguimiento, la experimentación de la cual obtienen la gráfica orientada a mostrar la mejora en el rendimiento de sistemas LCPV (Low Concentration Photovoltaic), donde se demuestra claramente el incremento en la generación de energía en los sistemas que cuentan con seguimiento solar a diferencia de los que se encuentran estáticos, además es un buen ejemplo para observar la importancia y la relación con el incremento en la energía que radica en que los rayos solares incidan perpendicularmente a la superficie de los colectores. Hebrink (2012).



**Figura 2.24:** Diferencia en la Energía Aprovechada por distintas tecnologías de captación.

Hebrink (2012)

Especialistas en la fabricación y comercialización de seguidores solares con cilindros oleohidráulicos también han trabajado en métodos de funcionamiento desde que notaron cambios en el valor de la constante de compresibilidad a partir de la acción de fuerzas externas como el viento o el peso del seguidor, lo que en consecuencia significó que la compresión se viera incrementada en 6mm en la longitud del vástago del cilindro y por tanto generara importantes pérdidas de precisión y pérdidas en la eficiencia del sistema de hasta el 100 % en un instante determinado Del-Pozo-Polidoro and Enrile-Medina (2011).

Kinoshita (1985) y R.Baheti and P.Scott (1980) son de los primeros investigadores en detallar las pérdidas energéticas de captación a las que puede estar sometido un colector (en este caso ambos trabajaron con helióstatos) y por ende desarrollaron métodos para el mejoramiento de la captación solar. Debido a que los helióstatos se utilizan para la orientación de los rayos solares hacia un colector absorbedor a grandes distancias, un pequeño error en su seguimiento podría significar varios metros de error en el direccionamiento hacia el concentrador. R.Baheti and P.Scott (1980) desarrolla una herramienta matemática para poder estimar los errores a los que puede estar sometido el seguidor para poder así compensarlo, mientras que Kinoshita (1985) se enfoca más a una manufactura de precisión del colector. Khalsa et al. (2011) por su parte desarrolla un método automatizado de caracterización y corrección de errores de seguimiento, haciendo énfasis en la utilidad de un método de corrección debido a la dificultad que se tendría en la reparación de errores de fabricación o instalación de los equipos una vez estuvieran operando. Los errores que busca este método en la caracterización del sistema son:

- Inclinación del pedestal Norte / Sur.
- Inclinación del pedestal Este / Oeste.
- Sesgos de referencia Azimut.
- Sesgos de referencia Elevación.
- Errores lineales en Azimut.
- Errores lineales en Elevación.
- No nacionalidad del eje.
- Error en la puntería.

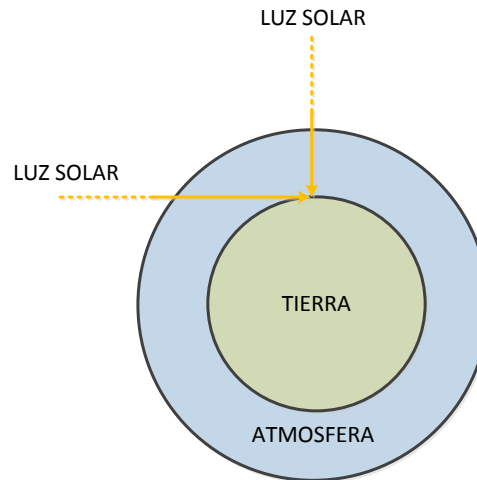
# 3

## Metodología

### 3.1. La Radiación solar

El sol provee el 99,98 % de toda la energía en la superficie terrestre, mientras que la pequeña parte restante se obtiene de fuentes geotérmicas. Esto resulta en una temperatura promedio de la superficie del planeta de  $14^{\circ}C$ . El ángulo de incidencia de los rayos solares esta en constante cambio debido al movimiento de la tierra sobre su órbita elíptica y también sobre su propio eje. La propagación de la radiación bien podría describirse por medio de la ley de Lambert, la cual determina que la iluminación producida por determinada fuente luminosa sobre alguna superficie será directamente proporcional a la intensidad de dicha fuente y al coseno del ángulo que forma los rayos de luz con la normal a la superficie; se considera entonces que el flujo de energía emitido por la fuente de luz se distribuirá sobre una superficie cada vez mayor conforme aumenta la distancia entre la superficie y la fuente. La cantidad y el tipo de radiación que recibirá la superficie terrestre dependerán de las características de la atmósfera, así como la cantidad de radiación absorbida o reflejada por la tierra dependerá de la composición de la superficie. De manera más específica la intensidad de energía solar recibida en un determinado lugar también depende de los  $23,5^{\circ}$  de inclinación que tiene el planeta respecto a su eje y de las curvaturas que tiene al no ser una esfera perfecta. La radiación solar alcanza su mayor intensidad, cuando el sol se encuentra exactamente sobre el observador (a  $90^{\circ}$  respecto de la superficie terrestre) y es entonces cuando el espesor de la atmósfera es el mínimo como se muestra en la

figura 3.1. Cuando el sol se encuentra en el horizonte ( $0^\circ$  respecto al observador) el espesor de la atmósfera es aproximadamente 11 veces mayor.



**Figura 3.1:** Profundidad de la atmósfera.  
Rosemann (2011)

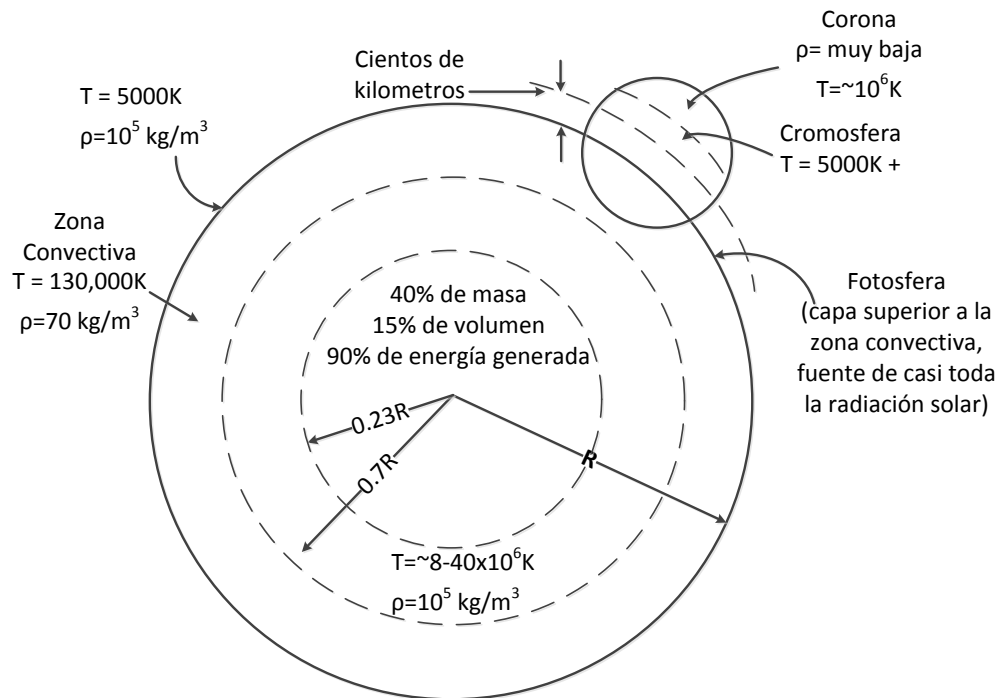
De manera general la radiación total que entra a la atmósfera terrestre se divide en radiación directa, difusa y reflejada, y la suma de estas la radiación global, aunque del 100 % de la radiación solar que llega a la superficie del planeta el 30 % es reflejada y regresada al espacio, el 51 % absorbida por la tierra y el agua y el 19 % restante absorbido por la atmósfera y las nubes. Rosemann (2011)

### 3.1.1. El Sol

El sol es un cuerpo de materia gaseosa intensamente caliente, cuenta con un diámetro de  $1,39 \times 10^9$  y está a una distancia promedio de la tierra de  $1,5 \times 10^{11}$ . La temperatura interior central se estima en  $8 \times 10^6 K$  y la densidad está estimada en unas 100 veces la densidad del agua. Este astro tiene una temperatura de cuerpo negro efectiva de  $5777 K$ . El sol en efecto es un reactor en fusión continua, donde dichas reacciones de fusión propician el suministro de energía radiada. La temperatura producida en el interior de la esfera solar a tan elevadas temperaturas debe ser transferida fuera de su superficie y entonces irradiada a través del espacio.

### 3.1 La Radiación solar

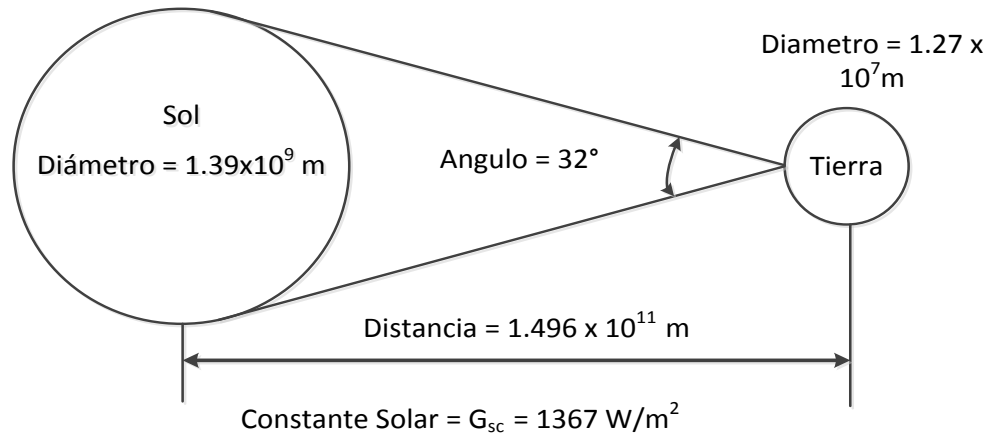
Se estima que el 90% de la energía es generada en la región  $0,23R$  (Siendo  $R$  el radio del sol), el cual contiene aproximadamente el 40% de la masa total del sol, mientras que a una distancia de  $0,7R$  respecto del centro del sol la temperatura tiende a caer aproximadamente a los  $130,000K$  Duffie and Beckman (1991). En la figura 3.2 se muestra de manera muy general las dimensiones del sol. Duffie and Beckman (1991).



**Figura 3.2:** Estructura del Sol.  
Duffie and Beckman (1991)

#### 3.1.2. La constante solar

Existe una variación en la distancia que existe entre el Sol y la Tierra, dicho valor puede variar hasta en  $1,7\%$  debido a la excentricidad de la órbita terrestre. La distancia media entre estos dos cuerpos celestes es de  $1,495 \times 10^{11}$ , además de formar un ángulo de  $32^\circ$ . La figura 3.3 describe estos valores y las relaciones que existen entre ambos astros Duffie and Beckman (1991).



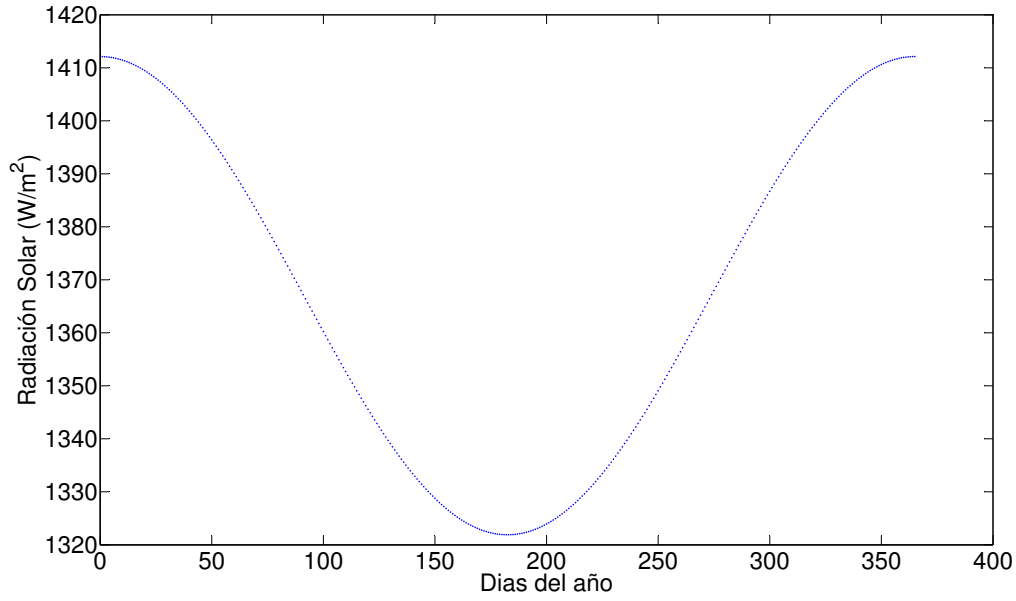
**Figura 3.3:** Distancia y relaciones entre el Sol y la Tierra.  
Duffie and Beckman (1991)

La radiación emitida por el sol y su relación de distancia con la tierra resulta en una intensidad de radiación casi fija fuera de la atmósfera terrestre. La constante solar  $G_{sc}$  es la energía proveniente del sol por unidad de tiempo recibida sobre una unidad de área en una superficie perpendicular a la dirección de la radiación. El valor de la constante solar ha sido estudiado a lo largo de mucho tiempo, encontrando variantes y discrepancias, Johnson (1954) a partir de datos obtenidos del uso de cohetes espaciales y resultados de investigadores del Instituto Smithsonian, reporto un resultado de  $1395 \text{ W/m}^2$ . Frohlich (1977) redujo la escala en base a estudios con un nuevo pirheliómetro a  $1373 \text{ W/m}^2$ , mientras que Hickey et al. (1982) reporto  $1373 \text{ W/m}^2$ , y Wilson et al. (1981)  $1368 \text{ W/m}^2$ . Para efectos de cálculos muchos autores entre ellos Duffie and Beckman (1991) utilizan el valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ .

#### 3.1.3. Variación de la Radiación Solar

En la medición de la radiación solar se consideran dos fuentes causantes de variación; una de ellas es la variación en la intensidad emitida por el sol, se han reportado por ejemplo discrepancias de alrededor del  $\pm 1,5\%$  con distintas periodicidades y variaciones las cuales han sido relacionadas con las manchas

solares. En la figura 3.4 se muestra la gráfica donde se describe la variación de la radiación solar a lo largo del año.



**Figura 3.4:** Variación de la Radiación Solar a lo largo del año.  
Duffie and Beckman (1991)

De acuerdo a Duffie and Beckman (1991), para propósitos de ingeniería, teniendo en cuenta las incertidumbres, la energía emitida por el sol se puede considerar fija. Spencer (1971) presentó una ecuación muy útil para cálculos ingenieriles la cual es mostrada en la ecuación 3.1.

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (3.1)$$

Mientras que Iqbal (1983) propone una ecuación con una exactitud mayor  $\pm 0,01\%$ , ecuación 3.2.

$$G_{on} = G_{sc} (1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B) \quad (3.2)$$

Donde  $G_{on}$  es la radiación incidente en el plano normal de la radiación en  $n$



día del año,  $G_{sc}$  es la constante solar y el parámetro  $B$  es dado por la ecuación 3.3.

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3.3)$$

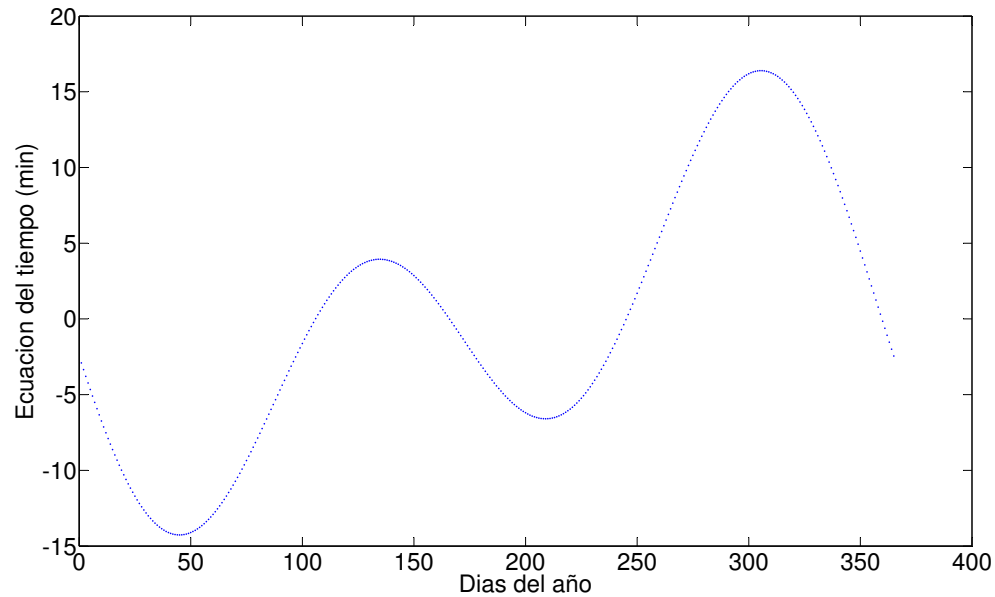
### 3.1.4. Tiempo Solar

El tiempo solar está basado en el movimiento angular aparente del sol a través del cielo al medio día solar, al momento en el cual el sol cruza el meridiano del observador. Esta variable es utilizada en todas las relaciones del ángulo solar. Dicha variable no coincide con el tiempo local, en dado caso para convertir el tiempo estándar a tiempo solar se requiere aplicar dos correcciones; la primera una constante de corrección para la diferencia en la longitud entre el meridiano del observador (longitud) y el meridiano en el cual el tiempo estándar este basado. El sol tarda 4 minutos para avanzar  $1^\circ$  de longitud, por lo que la segunda corrección se aplica desde la ecuación del tiempo, la cual toma en cuenta las perturbaciones a las que está sometida la velocidad de rotación de la tierra, debido a que afecta directamente el tiempo en el que el sol cruza el meridiano del observador. La diferencia entre el tiempo solar y el tiempo estándar lo podemos obtener mediante la ecuación 3.4 Duffie and Beckman (1991).

$$\text{Tiempo Solar} - \text{Tiempo Estandar} = 4 (L_{st} - L_{loc} + E) \quad (3.4)$$

Donde  $L_{st}$  es el movimiento estándar para el tiempo de la zona local, y  $L_{loc}$  es la longitud de la locación en cuestión, las longitudes se representan en grados oeste, que es,  $0^\circ < L < 360^\circ$ . El parámetro  $E$  es la ecuación del tiempo representada en minutos Spencer (1971); ecuación 3.5 y en la figura 3.5 se puede observar su comportamiento durante el transcurso del año.

$$E = 229,2 (0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (3.5)$$



**Figura 3.5:** Ecuación del tiempo (E) como una función representada en un año.  
Duffie and Beckman (1991)

#### 3.1.5. Dirección de la Radiación

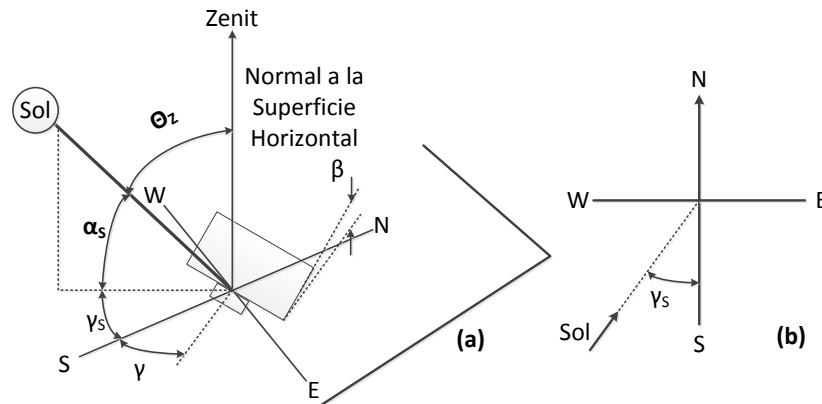
La relación geométrica entre un plano en cualquier orientación relativa a la tierra en cualquier momento, y la radiación solar, es decir, la posición del sol respecto a ese plano puede ser descrita en términos de ángulos que describan estos valores Benfort and Bock (1939). A continuación, se describen los parametros que que se requieren para definir la posición del sol. Duffie and Beckman (1991) En la figura 3.6 se indican estas mismas variables de manera gráfica.

$\phi$  **Latitud:** Localización angular de norte a sur del ecuador, norte positivo  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ .

$\delta$  **Declinación:** Posición angular del sol al medio día solar, con respecto al plano del ecuador, norte positivo:  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ .

$\beta$  **Inclinación:** Ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal:  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .  $\beta > 90^\circ$  significa que la superficie en cuestión tiene un componente de orientación hacia abajo.

- $\gamma$  **Ángulo de Superficie Azimutal:** Desviación de la proyección en el plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local, con el zero al sur, este negativo y oeste positivo:  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .
- $\omega$  **Ángulo Horario:** Desplazamiento angular del sol de este a oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje, con un valor de  $15^\circ$  por hora, siendo negativo por las mañanas y positivo por las tardes.
- $\theta$  **Ángulo de Incidencia:** Es el ángulo entre la radiación sobre una superficie y la normal respecto a la misma.
- $\theta_s$  **Ángulo Zenit:** Ángulo entre la vertical y la línea de dirección sol, esto es, el ángulo de incidencia del haz de radiación en una superficie horizontal.
- $\alpha_s$  **Ángulo de Altitud Solar:** Ángulo entre la horizontal y la línea de dirección del sol, esto es en complemento del ángulo zenit.
- $\gamma_s$  **Ángulo Azimutal:** Desplazamiento azimutal del sur de la proyección del haz de radiación en el plano horizontal, desplazamiento del este hacia el sur es negativo y oeste desde el sur es positivo.



**Figura 3.6:** Ángulos relacionados con la dirección de la radiación solar y plano de vista del ángulo azimutal.

Duffie and Beckman (1991)

La declinación se puede definir mediante la ecuación de Cooper (1969), de la siguiente manera (ecuación 3.6):

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (3.6)$$

Dicho parámetro también puede ser calculado mediante la ecuación de Spencer (1971) con una precisión de  $< 0,035^\circ$ , que de igual manera cita Iqbal (1983). Ecuación 3.7

$$\begin{aligned} \delta = & (180/\pi)(0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B \\ & - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B \\ & - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Donde el parámetro  $B$  (a partir de la ecuación 3.3) y el día del año  $n$  obtenido con la ayuda de la tabla 3.1, donde se recomiendan los días promedio por mes.

**Tabla 3.1:** Radiación promedio Klein (1977)

Mes	$n$ para el día del mes	Fecha	$n$	$\delta$
Enero	$i$	17	17	-20,9
Febrero	$31 + i$	16	47	-13,0
Marzo	$59 + i$	16	75	-2,4
Abril	$90 + i$	15	105	9,4
Mayo	$120 + i$	15	135	18,8
Junio	$151 + i$	11	162	23,1
Julio	$181 + i$	17	198	21,2
Agosto	$212 + i$	16	228	13,5
Septiembre	$243 + i$	15	258	2,2
Octubre	$273 + i$	15	288	-9,6
Noviembre	$304 + i$	14	318	-18,9
Diciembre	$334 + i$	10	344	-23,0

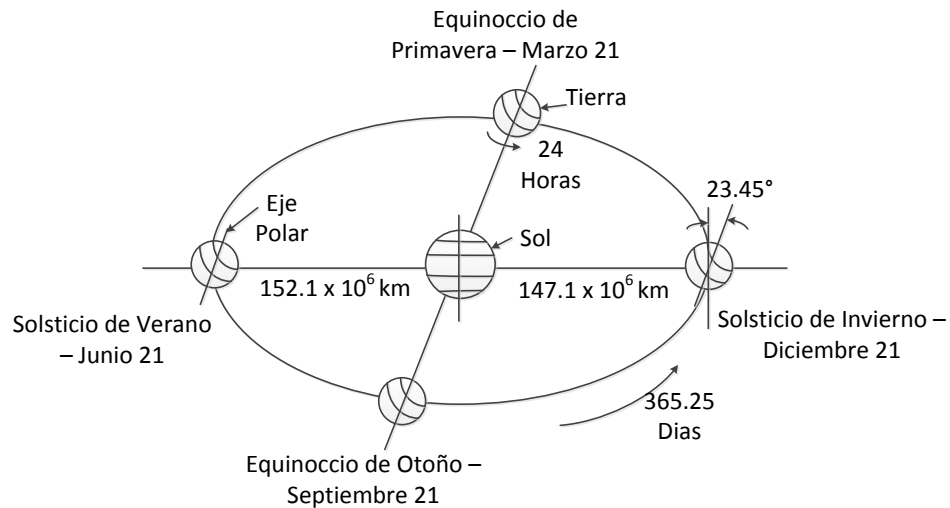
Las variaciones de la distancia entre el sol y la tierra, la ecuación del tiempo  $E$  y la declinación son funciones de variación continua durante el año. Por

propósitos computacionales se acostumbra expresar el tiempo en términos de  $n$  que representa el día del año, esto en términos enteros entre 1 y 365. Es importante resaltar que el máximo grado de cambio en la declinación será de  $0,4^\circ$  por día Duffie and Beckman (1991). La ecuación que relaciona el ángulo de incidencia de la radiación sobre una superficie,  $\theta$ , con los demás ángulos se representa en las ecuación 3.8

$$\begin{aligned}\cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega\end{aligned}\quad (3.8)$$

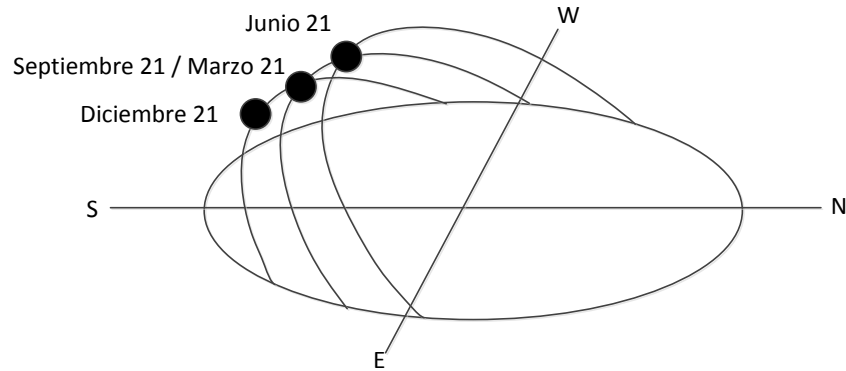
#### 3.1.6. Trayectoria aparente del Sol

La irradiancia define la cantidad de energía solar recibida en una determinada unidad de área en un tiempo dado. Como se mencionó en una sección anterior generalmente se utiliza la constante  $1367W/m^2$  Duffie and Beckman (1991), lo que en teoría significa que por cada metro cuadrado de superficie de colectores solares orientadas al sol, se podrá recolectar alrededor de  $1000W$  de energía solar, asumiendo que la tecnología del colector tuviera una eficiencia del 100 %. Como se sabe, es la tierra la que se mueve alrededor del sol, aunque para el observador parezca lo contrario. La posición aparente del sol en el cielo cambia a lo largo del día hora tras hora, y es común conocer que el sol está en una posición más alta en el cielo durante el verano que durante el invierno; estos movimientos no son sencillos aunque resultan predecibles y constantes. La tierra realiza una rotación cada 24 horas sobre su propio eje (el cual tiene una inclinación de  $23,45^\circ$ ) y completa una revolución alrededor del sol en aproximadamente 365.25 días, dicha revolución es de forma elíptica con una excentricidad muy pequeña Kalogirou (2009). Esta excentricidad en la órbita produce que una vez al año (el 3 de Enero9 la distancia entre el sol y la tierra sea la más corta (perihelio) mientras que el 4 de Julio sea la más larga (afelio). Garg (1982) En la figura 3.7 se muestra la órbita de la tierra y como es que se mueve el planeta alrededor de esta durante el año, provocando así las estaciones.



**Figura 3.7:** Movimiento anual de la tierra alrededor del sol.  
Kalogirou (2009)

También es importante conocer las trayectorias diarias del sol en forma de arco, teniendo el punto más alto al medio día. Como se aprecia en la imagen 3.8 con forme el año avanza el invierno pasa a ser primavera y este a su vez verano, los puntos de salida y puesta del sol se mueven hacia el norte, entonces el sol sale más temprano y se oculta más tarde. En el solsticio de verano el 21 de Junio el sol se encuentra en su punto más al norte respecto a la tierra; posteriormente para el solsticio de invierno el 21 de Diciembre el sol esta es su punto más meridional. Kalogirou (2009)



**Figura 3.8:** Cambios en la posición del sol durante el año en el Hemisferio Norte.  
Kalogirou (2009)

Conociendo ya las trayectorias del sol, y los ángulos que se expusieron en apartados anteriores, se puede calcular el comportamiento del sol a un determinado momento y en determinado lugar, por medio del uso del vector solar; línea imaginaria que parte de la ubicación del seguidor solar o de algún punto de observación en la superficie terrestre directamente al centro del sol.

### 3.2. Algoritmo de seguimiento solar

De los algoritmos de seguimiento solar desarrollados hasta el momento el que presenta Reda Reda and Andreas (2004) del National Renewable Energy Laboratory es el que cuenta con las mejores características de precisión e intervalo de tiempo de validez, por lo que se seleccionó este algoritmo para el seguidor solar en este trabajo. En este algoritmo de posición solar (SPA) se calcula el ángulo cenital solar y el azimut con incertidumbres igual a  $\pm 0,0003^\circ$  en el período comprendido entre los años  $-2000$  a  $6000$ . Los datos de entrada para este algoritmo son: la fecha (día, mes y año), la ubicación del seguidor (latitud y longitud) y la altura; con estos datos se calculan variables intermedias como, el día Juliano, latitud y longitud geocéntrica, la corrección de aberraciones, la declinación del sol, para finalmente obtener los valores de los ángulos zenit y azimutal, a continuación se

describe el procedimiento para la obtención tanto de los parámetros intermedios como de los finales.

### 3.2.1. Escala de Tiempo

Es importante conocer el formato en que se maneja el tiempo; por lo que existen 4 escalas de Tiempo reconocidas Internacionalmente:

1. (UT1) Tiempo Universal 1, o también conocido como el tiempo civil de Greenwich. Está basado en el movimiento de rotación de la tierra, en el cual se cuenta a partir de la hora 0, que es a la media noche, su unidad es el medio día solar.

$$UT = TT - (\Delta)T \quad (3.9)$$

$$UT = UT1 = UTC + (\Delta)UT1 \quad (3.10)$$

Donde:

- $(\Delta)T$  = Diferencia entre el tiempo de rotación de la tierra y el Tiempo Terrestre (TT)
  - $(\Delta)UT1$  = Fracción de segundo, que se agrega al UTC para ajustarse a la velocidad rotacional irregular de la tierra.
2. (TAI) Tiempo Internacional Atómico el cual está basado en un gran número de relojes atómicos en laboratorios alrededor del mundo.
  3. (UTC) Tiempo Universal Coordinado. Es el principal estándar de tiempo, en el cual se basan los sistemas de tiempo habituales. Se sincroniza con el tiempo medio de Greenwich, a partir del cual se le agrega un segundo intercalar cuando sea necesario.
  4. (TDT o TT) Tiempo Terrestre o Tiempo Dinámico Terrestre es la escala de tiempo para la observación de efemérides desde la superficie del planeta.



$$TT = TAI + 32,184 \quad (3.11)$$

Como se mencionó con anterioridad las variables necesarias que se introducirán al algoritmo son: Fecha, UTC,  $(\Delta)T1$ , longitud y latitud de la ubicación de la experimentación, altura así como la temperatura y presión promedio anual.

### 3.2.2. Día, siglo y milenio Juliano y Juliano efímero

Dentro del procedimiento formal del cálculo de la posición del sol, uno de los primeros parámetros a calcular es el día Juliano (JD). Este día se utiliza para poder fechar fenómenos astronómicos, lo cual sería complejo debido a los cambios en los calendarios de las diversas culturas. Su conteo inicia el 1 de Enero del año  $-4712$  a las  $12 : 00 : 00UT$ . Ver 3.12.

$$JD = INT(365,25(Y + 4716)) + INT(30,6001(M + 1)) + D + B - 1524,5 \quad (3.12)$$

Donde:

- $INT$  = Es el termino entero del resultado calculado.
- $Y$  = Es el año.
- $M$  = Es el mes del año.
- $D$  = Es el día del mes con el tiempo decimal.
- $B$  = Es igual a 0 para el calendario Juliano y  $2 - A + INT\frac{A}{4}$  para el Gregoriano.

El día Juliano (JD) es calculado utilizando el tiempo universal mientras que el día efímero Juliano (JDE) se calcula mediante el tiempo terrestre. Debido a esto existe una diferencia de tiempo de 10 días entre el calendario Gregoriano y el Juliano  $(\Delta T)$  y la cuál se utiliza en la ecuación 3.13.

$$JDE = JD + \frac{\Delta T}{86400} \quad (3.13)$$

Para efectos de operaciones matemáticas intermedias, también se utiliza el llamado siglo Juliano (JC), el siglo efímero Juliano (JCE) y el milenio efímero Juliano (JME). Ver 3.14, 3.15, 3.16.

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (3.14)$$

$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36525} \quad (3.15)$$

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (3.16)$$

### 3.2.3. Latitud y longitud heliocéntrica y radio vector

La posición del planeta tierra con respecto al centro del sol definen los parámetros heliocéntricos. Haciendo referencia a la tabla 1 del artículo publicado por (Reda and Andreas, 2004), dichos valores de los términos periódicos de la tierra se utilizan para dichos cálculos. Para los valores intermedios de la longitud heliocéntrica ( $L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$ ) se utiliza la ecuación 3.17 donde los subíndices  $i$  definen los valores de las filas y se requieren también los respectivos valores de las columnas A, B y C de la Tabla 1 para dichos cálculos. Mientras que para el valor final de la longitud se obtiene mediante 3.18.

$$L_0_i = A_i \cos(B_i + C_i * JME) \quad (3.17)$$

$$L = \frac{L_0 + L_1 * JME + L_2 + JME^2 + L_3 + JME^3 + L_4 * JME^4 + L_5 * JME^5}{10^8} \quad (3.18)$$

Para la obtención de la Latitud heliocéntrica,  $B$  y el radio vector,  $R$  se utilizan las mismas formulas únicamente sustituyendo la variable  $L$  por la variable  $B$  y  $S$  respectivamente, los valores de dichas variables también se encuentran en la tabla del artículo mencionado.

### 3.2.4. Latitud y longitud geocéntrica

Los parámetros geocéntricos; latitud ( $\beta$ ) y longitud ( $\Theta$ ) se utilizan para calcular la posición del sol con respecto al centro de la tierra. Dicho parámetro se obtiene mediante las ecuaciones 3.19 y 3.20.

$$\Theta = L + 180 \quad (3.19)$$

$$\beta = -B \quad (3.20)$$

### 3.2.5. Elongación, anomalía media, nutación y oblicuidad

Se calcula la elongación media ( $X_0$ ); que es la distancia angular entre dos astros, en este caso entre la luna desde el sol, por medio de la ecuación 3.21 y la anomalía media del sol ( $X_1$ ) que es la fracción de un periodo orbital, ver 3.22.

$$X_0 = 297,85036 + 445267,111480 * JCE - 0,0019142 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{189474} \quad (3.21)$$

$$X_1 = 357,52772 + 35999,050340 * JCE - 0,0001603 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{300000} \quad (3.22)$$

El movimiento de nutación es un movimiento ligero en el eje de rotación del planeta, mas precisamente es una oscilación periódica del eje de rotación, ocasionado por las fuerzas gravitatorias entre el sol y la luna. Para efectos del algoritmo se calcula la nutación en la longitud ( $\Delta_\Psi$ ) y la oblicuidad ( $\Delta_\epsilon$ ), ver 3.23 y 3.24. Los términos ( $\Delta_{\Psi_i}$ ), ( $\Delta_{\epsilon_i}$ ) y  $n$  son calculados en base a la tabla 2 del artículo de Reda and Andreas (2004).

$$\Delta_\Psi = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta_{\Psi_i}}{36000000} \quad (3.23)$$

$$\Delta_\epsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta_{\epsilon_i}}{36000000} \quad (3.24)$$

Con la escala del tiempo y el día Juliano principalmente se calculan variables intermedias al proceso de posición solar; como por ejemplo, la longitud y latitud

## 3.2 Algoritmo de seguimiento solar

---

heliocéntrica y geocéntrica de la tierra, la oblicuidad de la trayectoria de la tierra, la declinación del sol, el ángulo horario del observador; hasta poder llegar a los cálculos finales que son obtener los ángulos azimut y zenit del sol.

- Oblicuidad media de la eclíptica, ( $\epsilon_0$ ). Donde  $U = \frac{JME}{10}$

$$\begin{aligned} \epsilon = & 84381,448 - 4680,93U - 1,55U^2 \\ & + 1999,25U^3 - 51,38U^4 - 249,67U^5 \\ & - 39,05U^6 + 7,12U^7 + 27,87U^8 + 5,79U^9 + 2,45U^{10} \end{aligned} \quad (3.25)$$

- Oblicuidad verdadera de la eclíptica, ( $\epsilon$ )

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0}{3600} + \Delta\epsilon \quad (3.26)$$

- Corrección de aberración, ( $\Delta\tau$ )

$$\Delta\tau = -\frac{20,4898}{3600 * R} \quad (3.27)$$

- Longitud aparente del sol, ( $\lambda$ )

$$\lambda = \Theta + \Delta_\psi + \Delta_\tau \quad (3.28)$$

- Tiempo sideral promedio de Greenwich, en un momento dado, ( $v_0$ )

$$\begin{aligned} v_0 = & 280,46061837 + 360,98564736629 * (JD \\ & - 2451545) + 0,000387933 * JC^2 - \frac{JC^3}{38710000} \end{aligned} \quad (3.29)$$

- Tiempo sideral aparente de Greenwich, ( $v$ )

$$v = v_0 + \Delta_\psi * \cos(\epsilon) \quad (3.30)$$

## 3.2 Algoritmo de seguimiento solar

---

- Ascensión recta del sol, ( $\alpha$ )

$$\alpha = \arctan 2 \frac{\sin \lambda * \cos \epsilon - \tan \beta * \sin \epsilon}{\cos \lambda} \quad (3.31)$$

- Declinación geocéntrica del sol, ( $\delta$ )

$$\delta = \arcsin (\sin \beta * \cos \epsilon + \cos \beta * \sin \epsilon * \sin \lambda) \quad (3.32)$$

- Ángulo de la hora local del observador, ( $H$ ). Donde  $\sigma$  es la longitud geográfica del observador.

$$H = v + \sigma - \alpha \quad (3.33)$$

- Paralaje horizontal ecuatorial del sol, ( $\xi$ )

$$\xi = \frac{8,794}{3600 * R} \quad (3.34)$$

- Termino ( $u$ ). Donde ( $\varphi$ ) es la latitud geográfica del observador.

$$u = \arctan (0,99664719 * \tan \varphi) \quad (3.35)$$

- Termino ( $x$ ). Donde ( $E$ ) es la elevación del observador.

$$x = \cos u + \frac{E}{6378140} * \sin \varphi \quad (3.36)$$

- Termino ( $y$ )

$$y = 0,99664719 * \sin u + \frac{E}{6378140} * \sin \varphi \quad (3.37)$$

- Paralaje en la ascensión recta del sol ( $\Delta_\alpha$ )

$$\Delta_\alpha = \arctan 2 \frac{-x * \sin \xi * \sin H}{\cos \delta - x * \sin \xi * \cos H} \quad (3.38)$$

- Ascensión topocéntrica recta del sol ( $x'$ )

$$x' = \alpha + \Delta_\alpha \quad (3.39)$$

- Declinación topocéntrica del sol ( $\delta'$ )

$$\delta' = \arctan 2 \frac{(\sin \delta - y * \sin \xi) * \cos \Delta_\alpha}{\cos \delta - y * \sin \xi * \cos H} \quad (3.40)$$

### 3.2.6. Ángulo Elevación y Azimutal

Los parámetros que se obtienen con las ecuaciones anteriores son muy importantes porque toman en cuenta factores que en otros algoritmos de posicionamiento solar no incluyen, esto permite que el error en el seguimiento sea mínimo.

Cálculo del ángulo de hora local topocéntrico ( $H$ )

$$H' = H - \Delta_\alpha \quad (3.41)$$

Para el cálculo de el ángulo zenith topocéntrico ( $\theta$ ) (Ver 3.42), se comienza con el valor del ángulo de elevación sin la corrección de la refracción atmosférica ( $e_0$ ).

$$e_0 = \arcsin(\sin \phi * \sin \phi + \cos \phi * \cos \delta * \cos H') \quad (3.42)$$

Posterior a esto se puede obtener la corrección debido a la refracción atmosférica ( $\Delta_e$ ) por medio de la ecuación 3.43, donde  $P$  es el promedio anual de la presión local y ( $T$ ) el promedio anual de la temperatura local en ( $^{\circ}C$ ) .

$$\Delta_e = \frac{P}{1010} * \frac{283}{273 + T} * \frac{1,02}{60 * \tan \left( e_0 + \frac{10,3}{e_0 + 5,11} \right)} \quad (3.43)$$

Después de aplicar dicha corrección se puede obtener el ángulo de elevación topocéntrico ( $e$ ):

$$e = e_0 + \Delta_e \quad (3.44)$$

### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

---

Y a su vez con este valor obtener el ángulo zenith topocéntrico ( $\theta$ ):

$$\theta = 90 - e \quad (3.45)$$

Por otra parte con respecto al ángulo azimutal ( $\Phi$ ) se comienza obteniendo el ángulo azimutal topocéntrico astronómico ( $\Gamma$ )(el cual se mide de Oeste a Sur) de la siguiente manera:

$$\Gamma = \arctan 2 \frac{\sin H'}{\cos H' * \sin \phi - \tan \delta * \cos \phi} \quad (3.46)$$

Y para aplicaciones de navegación y radiación solar se ajusta (Con un rango de  $0a360^\circ$  y medido de Este a Norte):

$$\Phi = \Gamma + 180 \quad (3.47)$$

## 3.3. Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

### 3.3.1. Introducción

En el controlador se encuentra embebido el algoritmo astronómico diseñado por NREL que define dentro de un periodo de captación de energía solar una serie de movimientos en cada determinado instante; donde en cada uno de estos movimientos se asigna la posición del sol en un vector llamado  $s$ ,  $s = (s_x, s_y, s_z)$ . El controlador gestiona todas las posiciones hacia los actuadores para que el seguidor pueda tener una dirección de apunte acorde a dicho vector. El lugar de instalación (el suelo por ejemplo) al entrar en contacto con la base del sistema permite establecer un primer sistema de coordenadas cartesiano ortogonal que en este caso se representa por  $(x, y, z)$ , pero una vez incluidos los errores antes mencionados, en la parte estructural se establece un segundo sistema de coordenadas:  $(x', y', z')$ . Las desviaciones y errores dan paso a que este segundo sistema de coordenadas no coincida con el primero traduciéndolo en giros de los ejes. Por lo regular dichas desviaciones no tienden a ser grandes; sin embargo como se ha mencionado en secciones previas, pequeñas irregularidades pueden ocasionar un bajo rendimiento

### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

---

en los dispositivos de captación, incluso volverlos inoperantes en el caso de los captadores que hacen uso de un punto focal. En la figura 3.9 se muestra de manera más gráfica lo descrito, además de indicar la configuración inicial o la posición de "home" que debe adoptar el sistema al comenzar las pruebas, con una nivelación aceptable y una orientación al norte (la cual se fue alterando conforme se realizaron las pruebas de corrección). Los diversos sistemas de coordenadas que se indican en la figura se irán moviendo conforme el sistema sigue al sol, y los errores a los que se encuentre sometido el sistema se irán sumando entre ellos de manera ascendente. La ubicación de los sistemas de coordenadas es para destacar cada uno de los movimientos elementales, de forma que el primer conjunto de coordenadas  $(x, y, z)$  se asocia al suelo, mientras que el segundo  $(x', y', z')$  a un punto próximo de la cadena cinemática, lo cual indica que  $(x, y, z)$  tiene una orientación definida por el plano del suelo y  $(x', y', z')$  tiene una orientación que está definida por los cambios de orientación y nivelación; los cuales son impuestos por las desviaciones a las que está sometido el sistema estructural. En el método de corrección se propone una matriz  $R$ , la cual es una matriz de giro que se compone de los tres giros elementales aplicados, de esta manera si  $R_x, R_y, R_z$  son las matrices de giro elementales se puede expresar como  $R = R_x, R_y, R_z$ . De todas las posibles desviaciones a las que puede estar expuesto el sistema de coordenadas  $(x, y, z)$  la matriz de giro  $R$  permite llevar a cabo una corrección de errores tanto de elevación del elemento estructural como de los errores del eje azimut. Para poder conformar el sistema de ecuaciones  $PxR = S$  es necesario  $n$  pares de puntos, donde en cada par de puntos, uno expresa las coordenadas cartesianas de apunte de la plataforma al sol  $S = (s_x, s_y, s_z)$  expresadas en el primer sistema de coordenadas  $(x, y, z)$  del sistema, es decir; las coordenadas que son enviadas a los actuadores y donde el movimiento de apunte se comporta como si la plataforma fuera ideal. El otro punto son las coordenadas cartesianas que se van a adoptar y que se expresan como  $p = (p_x, p_y, p_z)$ , después de haber sufrido una corrección y las cuales son expresadas en un segundo sistema de coordenadas  $(x', y', z')$ . Los valores de estos puntos podrían ser determinados a partir de una calibración de bucle abierto hasta encontrar la orientación correcta de la plataforma, si son definidos mediante este método se denominan puntos reales, pero si son calculados y no calibrados se denominan virtuales. Es entonces



### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

que se tiene una correspondencia entre los pares de puntos que representan a los vectores  $s = (s_x, s_y, s_z)$  y  $p = (p_x, p_y, p_z)$ , se requieren como mínimo de tres pares de puntos para poder construir el sistema de ecuaciones; es importante mencionar que si el número de puntos es tres el sistema será determinado, pero si es mayor a tres el sistema estará sobredeterminado, el sistema que minimiza el residuo es el que se considera como solución, por lo que el uso del método de mínimos cuadrados es el método ideal para dicha aplicación.

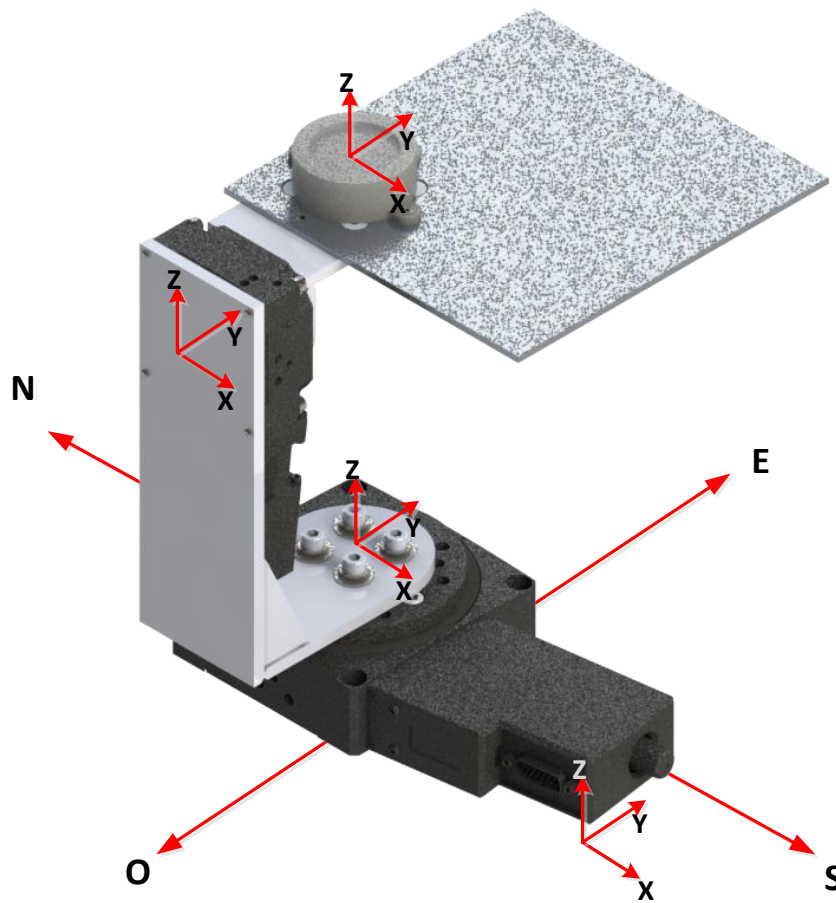


Figura 3.9: Posición inicial del prototipo.

#### 3.3.2. Estructura del Modelo

Supongamos que la dirección teórica del sol y la dirección real del sol son accesibles y podemos disponer de ellas, es decir, pueden ser medidas o calculadas con un período de muestreo  $T$ . Independientemente de que el sistema original puede ser continuo, para describir el comportamiento de un conjunto de mediciones, tomadas durante un cierto número de intervalos de tiempo  $T$ , es posible en muchos casos, asumir el siguiente modelo lineal en diferencias:

$$s(k) = R^T p(k) + e(k) \quad (3.48)$$

donde

$$s(k) = \begin{bmatrix} s_x(k) \\ s_y(k) \\ s_z(k) \end{bmatrix}, \quad p(k) = k \begin{bmatrix} p_x(k) \\ p_y(k) \\ p_z(k) \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$s(k)$  y  $p(k)$  son la dirección teórica y real del sol, respectivamente, en coordenadas cartesianas para  $k = 1, 2, 3, \dots, L$  ( $L$  el número de muestras) y  $R \in R^{3 \times 3}$  la matriz de parámetros que representa una matriz de rotación, los índices  $k, k-1, \dots, k-n$  se utilizan, en aras de la simplicidad de la notación, en lugar de  $kT, (k-1)T, \dots, (k-n)T$ . El término  $e(k)$  es un proceso aleatorio al que pueden atribuirse varias interpretaciones. Desde el punto de vista puramente estadístico, este término generalmente se interpreta como el residuo o efecto no considerado en el modelo. Mirado desde la óptica de los seguidores solares, el proceso  $e(k)$  puede asociarse al ruido presente en las mediciones, no linealidades mecánicas, no ortogonalidad en ejes de rotación, etc.

Como este ruido no es medible, el cálculo de  $e(k)$  a partir del modelo, puede servir como una estimación del mismo. El hecho de suponer a priori la presencia del ruido, sitúa en un plano más cercano a la realidad la identificación de rotación. En efecto, esto significa que se admite a priori que el modelo asumido no es exacto, que refleja sólo parcialmente el proceso y que factores tales como la no linealidad, la imprecisión de las mediciones, la presencia de perturbaciones no consideradas explícitamente, etc., influyen sobre el mismo.

El modelo describe la dirección teórica del sol  $s(k)$  como una combinación lineal no conocida de la dirección real del sol  $p(k)$  más ruido  $e(k)$ .

### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

---

Si las características estadísticas del término del ruido no es conocido podemos asumir que  $\hat{s}(k) = R^T p(k)$  como una predicción natural de  $s(k)$ . Esta expresión puede llegar a ser exacta en el sentido estadístico si  $e(k)$  es una secuencia de variable aleatoria independiente, independiente de las observaciones  $p(k)$  con media cero y varianza finita.

En este caso, los valores de  $R$  no son conocidos y necesitan ser estimados. Si  $\hat{R}$  es el estimado de  $R$

$$\hat{s}(k) = \hat{R}^T p(k) \quad (3.50)$$

#### 3.3.3. Método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados es una herramienta sencilla para la estimación de parámetros de sistemas lineales. En esta sección trabajaremos con el modelo (3.48):

$$s(k) = R^T p(k) + e(k) \quad (3.51)$$

donde  $R$  es una matriz de rotación a ser estimada a partir de las observaciones  $s(k), p(k)$  con  $k = 1, 2, \dots, L$  y donde  $p(k)$  es independiente de  $R$ .

El objetivo de la estimación de parámetros es obtener una estimación de la matriz  $R$  del modelo, de tal manera que el modelo se ajuste "bien" bajo algún criterio. Un método aceptable de ajuste es calcular los valores de los parámetros de la matriz  $R$  que minimice la suma de los residuos cuadrados. Consideraremos el siguiente criterio de estimación.

$$J(R) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L [s(k) - R^T p(k)]^2 \quad (3.52)$$

Esta función de costo cuadrática (a ser minimizada con respecto a  $R$ ) expresa el promedio de los errores cuadrados ponderados entre las  $L$  posiciones teóricas del sol y las predicciones proporcionadas por el modelo  $R^T p(k)$ .

Una ventaja de esta función de costo cuadrática es que puede ser minimizada analíticamente y debido a que las funciones cuadráticas tienen forma parabólica, se puede encontrar un único punto óptimo. El punto óptimo puede ser calculado

### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

---

analíticamente igualando la derivada de la función de costo a cero y examinando la segunda derivada para mostrar si se trata de un máximo o un mínimo.

Vamos a minimizar la función de costo  $J$  con respecto a  $R$

$$\hat{R} = \underset{R}{\operatorname{argmin}}(J) \quad (3.53)$$

donde  $J$  es dada por (3.52)

$$J(R) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L [s(k) - R^T p(k)]^2 \quad (3.54)$$

Asumimos que  $p(k)$  no es una función de  $R$ , entonces la derivada parcial de la función de costo  $J$  con respecto a  $R$  es

$$\frac{\partial J}{\partial R} = \frac{\partial J}{\partial R} \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L [s(k) - R^T p(k)]^2 \quad (3.55)$$

$$= \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \frac{\partial J}{\partial R} [s(k) - R^T p(k)]^2 \quad (3.56)$$

$$= \frac{2}{L} \sum_{k=1}^L [p(k)p^T(k)R - p(k)s^T(k)] \quad (3.57)$$

$$= \frac{2}{L} \left[ \sum_{k=1}^L [p(k)p^T(k)] R - \sum_{k=1}^L p(k)s^T(k) \right] \quad (3.58)$$

Tomado la transpuesta tenemos

$$\frac{\partial J^T}{\partial R} = \frac{2}{L} \left[ R^T \sum_{k=1}^L [p(k)p^T(k)] - \sum_{k=1}^L s(k)p^T(k) \right] \quad (3.59)$$

El óptimo de la función cuadrática se encuentra igualando la derivada parcial a cero:

$$\frac{\partial J}{\partial R} = 0 \quad (3.60)$$

$$\frac{2}{L} \left[ \sum_{k=1}^L [p(k)p^T(k)] \hat{R} - \sum_{k=1}^L p(k)s^T(k) \right] = 0 \quad (3.61)$$

### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

---

$$\sum_{k=1}^L [p(k)p^T(k)] \hat{R} = \sum_{k=1}^L p(k)s^T(k) \quad (3.62)$$

El cálculo de la segunda derivada queda como sigue:

$$\frac{\partial^2 J}{\partial R^2} = \sum_{k=1}^L p(k)p^T(k) \quad (3.63)$$

Para que el óptimo sea el mínimo se requiere que la matriz  $\frac{\partial^2 J}{\partial R^2}$  sea definida positiva.

Finalmente los parámetros de la matriz  $\hat{R}$  que minimiza la función de costo  $J$  está dada por:

$$\hat{R} = \left[ \sum_{k=1}^L p(k)p^T(k) \right]^{-1} \sum_{k=1}^L p(k)s^T(k) \quad (3.64)$$

El óptimo es un mínimo si la segunda derivada es positiva, es decir la matriz  $\frac{\partial^2 J}{\partial R^2}$  es definida positiva.

Algunas veces es conveniente calcular la estimación mínimo cuadrático de una forma matricial compacta. Si ordenamos las coordenada reales medidas del sol  $p(k)$  en una matriz  $P$  de  $L \times 3$  tenemos

$$P = \begin{bmatrix} p^T(1) \\ p^T(2) \\ \vdots \\ p^T(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x(1) & p_y(1) & p_z(1) \\ p_x(2) & p_y(2) & p_z(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_x(L) & p_y(L) & p_z(L) \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

y las coordenadas de la dirección teórica del sol en una matriz  $S$  de  $L \times 3$

$$S = \begin{bmatrix} s^T(1) \\ s^T(2) \\ \vdots \\ s^T(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x(1) & s_y(1) & s_z(1) \\ s_x(2) & s_y(2) & s_z(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_x(L) & s_y(L) & s_z(L) \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Las  $L$  ecuaciones del modelo pueden ser representadas por una ecuación de matrices

$$S = PR + E \quad (3.67)$$

### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

---

donde  $E$  es una matriz de  $L \times 3$  de los errores del modelo. Ahora el algoritmo de mínimos cuadrados que minimiza a

$$J(R) = \frac{1}{L}(S - PR)^T(S - PR) \quad (3.68)$$

puede ser representado de una manera compacta

$$\hat{R} = (P^T P)^{-1} P^T S \quad (3.69)$$

donde

$$\frac{\partial^2 J}{\partial R^2} = P^T P \quad (3.70)$$

debe ser definida positiva.

La segunda derivada  $\frac{\partial^2 J}{\partial R^2}$  es la matriz al menos semidefinida positiva  $P^T P$ , lo cual es una condición suficiente para que la expresión (3.69) minimice efectivamente a  $J$ .

Nótese que la existencia del estimador óptimo  $\hat{R}$  está condicionada a que la matriz cuadrada  $P^T P$ , de dimensión  $3 \times 3$  sea invertible. Esta última condición equivale a su vez, a que la matriz  $P$  de dimensión  $L \times 3$ , sea de rango 3.

La necesidad de que la matriz  $P$  sea de rango completo, nos lleva a profundizar un tanto en los requerimientos que deben cumplir las posiciones teóricas del sol  $s(k)$  a fin de que el sistema sea identificable. Astrom y Eykhof (1975), introducen el concepto de excitación persistente y lo consideran un requerimiento indispensable para que sea posible obtener un estimador mínimo cuadrático único de los parámetros de la matriz  $R$ .

La condición de excitación persistente asegura no solamente que la matriz  $P$  sea de rango completo sino también que la estimación de la matriz de parámetros  $R$  del modelo mediante el método de mínimos cuadrados sea estadísticamente consistente. Esta condición, por otra parte, no impone serias restricciones las posiciones del sol  $\underline{s(k)}$  admisibles, cumpliéndose en la gran mayoría de las épocas del año, bajo condiciones normales de operación. Debe señalarse, sin embargo, que en adición a la condición de excitación persistente generalmente se requiere que las señales de entrada utilizadas sean perturbantes, es decir, que su espectro de frecuencias sea suficientemente amplio, de manera que las frecuencias fundamentales del sistema sean perturbadas. Esta última condición, sin embargo, no

### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

resulta necesaria desde el punto de vista de la existencia de un estimador mínimo cuadrático de la matriz de parámetros.

La figura 3.10 muestra de manera bastante gráfica como es que interactúan entre si los diversos sistemas de coordenadas que se han estado mencionado, el eje de coordenadas  $x, y, z$  representa el sistema ideal sin ninguna perturbación, mientras que el sistema representado en color azul  $x', y', z'$ , los puntos de estudio se identifican como  $p$  y  $s$  que representan la dirección de apunte ideal y el real respectivamente, así como el sistema de coordenadas fijo en la cara del sensor solar.

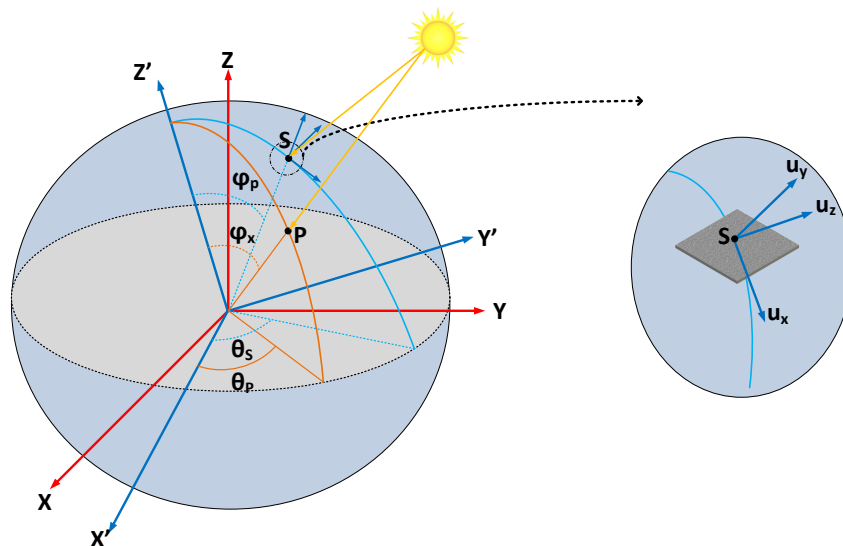


Figura 3.10: Modelo del prototipo

Por último se describe de manera puntual el procedimiento que sigue el algoritmo que se utilizó para la calibración del prototipo de seguidor solar. Se inició con la obtención de datos experimentales. El código utilizó datos de días en que el cielo se encontraba mayormente despejado evitando perturbaciones mayores en la obtención de los datos.

1. Los ángulos azimutal y elevación entregados por el algoritmo se ajustan a coordenadas esféricas considerando  $r = 1$  y considerando la orientación de  $x$  hacia el sur. A partir de estos valores se hace la conversión a coordenadas rectangulares.

### 3.3 Algoritmo de compensación de errores de seguimiento

---

2. En base al error conocido por los datos obtenidos del sensor solar  $(x, y)$  expresados en grados, se realiza la conversión a radianes. Con el vector de dirección de longitud 1 ( $r = 1$ ), se realiza la transformación a coordenadas cartesianas.
3. Realizar una rotación del error medido sobre la referencia  $(0, 0, 1)$ , en la dirección teórica del sol, para obtener así la dirección real del mismo.
4. Formar las matrices correspondientes P (dirección real del sol) y S (dirección teórica del sol).
5. Calcular la estimación mínimo cuadrática de la matriz de rotación R.
6. Calcular los vectores de error para cada una de las coordenadas  $(x, y, z)$ .
7. Obtener la matriz de rotación ocasionada por las desviaciones en la instalación del prototipo.
8. Obtener la posición del sol corregida en base a la posición teórica del sol y la matriz inversa de la de rotación.
9. Se definen los ángulos corregidos teniendo en cuenta que en el marco de trabajo tienen el sentido opuesto.
10. Los ángulos de la posición de corrección cuyas unidades están en radianes se convierten a grados para ser enviados al controlador de movimiento.



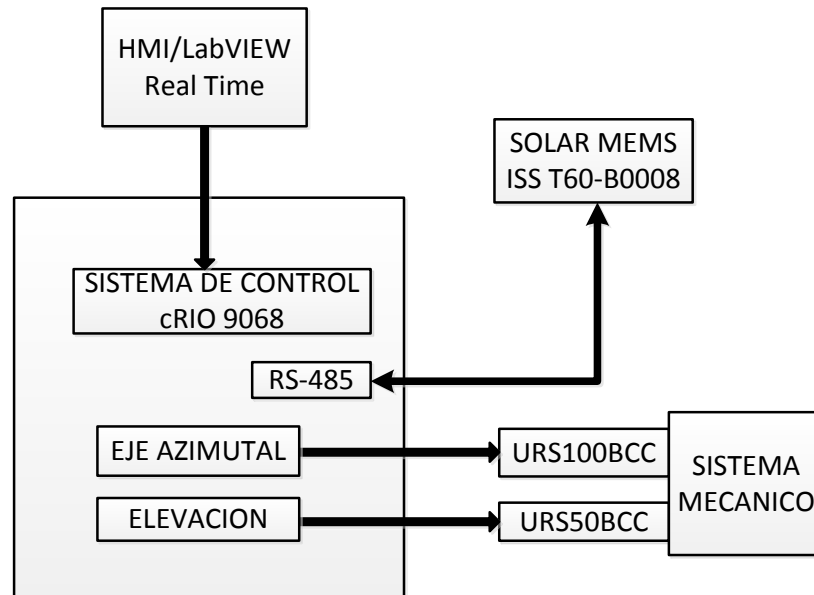
# 4

## Resultados

### 4.1. Implementación del Seguidor Solar

#### 4.1.1. Plataforma de Hardware del seguidor solar.

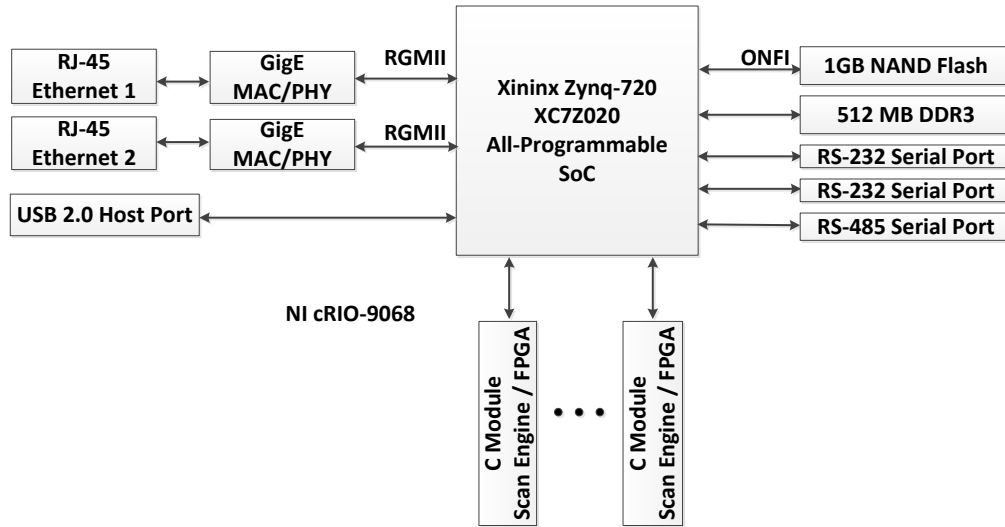
Los sistemas de seguimiento solar de dos ejes requieren al menos de microprocesador, sensores fotoeléctricos, interface hombre-máquina (HMI por sus siglas en inglés), controladores de motor y motores. En la figura 4.1 se muestran los componentes que conforman al seguidor solar utilizado en la experimentación de este trabajo. El microprocesador (cRIO-9068 de National Instrument) es el dispositivo base del sistema usado para procesar las señales de entrada, aplicar algoritmos de control y dar instrucciones de control para el posicionamiento de los mecanismos. Los sensores fotoeléctricos (ISS T60-B0008 de Solar MEMS) detectan si la luz del sol incide verticalmente sobre el sistema solar. La interface hombre-máquina (PC/LabVIEW) se utiliza para controlar el sistema manualmente, configurar los parámetros del sistema y mostrar la información como parámetros del sistema y estado actual (aunque también al estar el algoritmo embebido, puede funcionar sin estar conectado a un host). El controlador de motores (ESP301) es el encargado de proporcionar la potencia a los motores URSXXBCC, y de entregarles señales de velocidad y aceleración para el ajuste de posición del sistema a partir de las señales recibidas del controlador directamente por medio de una comunicación serial y estos su vez orientar el sistema acorde a los valores de los ángulos azimut y de elevación calculados.



**Figura 4.1:** Diagrama a bloques del seguidor solar.

El algoritmo de posición solar fue embebido en el controlador CompactRIO (cRIO) de National Instruments (NI cRIO-9068) el cual cuenta con un sistema operativo en tiempo real (RTO) basado en Linux. Este sistema dispone de un FPGA Xilinx Zynq 7020, un chasis de 8 slots, un reloj interno de tiempo real con una exactitud de 5ppm y algunas otras de características como 1Gb de almacenamiento no volátil, procesador ARM Cortex-A9 667 MHz, puertos Ethernet, USB, RS32 y RS485. En la figura 4.2 se muestra un diagrama a bloques de este sistema. La plataforma cRIO tiene software altamente integrado, una variedad de opciones de rendimiento y formato, y diversas I/O que proporcionan versatilidad, impulsan el rendimiento del sistema y simplifica el diseño de sistemas avanzados de monitoreo y control embebidos lo cual lo hace ideal para el desarrollo de nuevos algoritmos y metodologías para la optimización de la captación de energía solar.

## 4.1 Implementación del Seguidor Solar



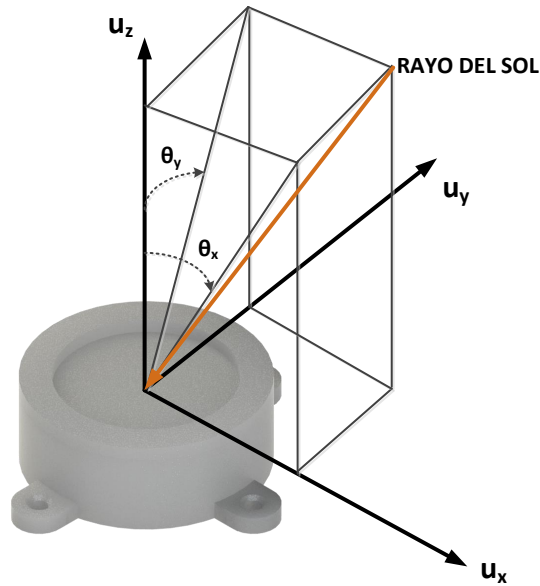
**Figura 4.2:** Diagrama a bloques del sistema NI cRIO-9068.  
Instruments (2016)

### 4.1.2. Sensor solar

La precisión óptica durante el seguimiento solar continuo es un criterio clave para la evaluación del rendimiento del sistema colector solar. Se requiere un instrumento de diagnóstico óptico para medir la precisión de seguimiento solar en los ejes azimutal y elevación para evaluar el rendimiento del sistema. El sensor de sol ISS-TX de Solar MEMS proporciona mediciones ópticas muy precisas del vector de incidencia del rayo del sol. Estos sensores fueron diseñados para aplicaciones satelitales de alta precisión. Utiliza una estructura de circuito integrado con un tipo de sustrato para la detección de alta precisión en la medición de ángulos de incidencia de rayos de sol respecto a su perpendicular como se muestra en la figura 4.3. Los ángulos  $x$  y  $y$  especifican la posición angular de los rayos del sol incidentes dentro del campo de vista del sensor; la precisión del sensor incrementa cerca del cero (posición perpendicular). Esto garantiza que el dispositivo ISSTX proporcione mediciones ópticas confiables, y además con bajos niveles de consumo de energía. Estas características lo hacen un dispositivo adecuado para sistemas de posicionamiento y seguimiento solar de alta precisión, por su diversidad de variables que puede medir como por ejemplo, los ángulos solares, medición de

## 4.1 Implementación del Seguidor Solar

niveles de radiación solar, temperatura, etc. Para el desarrollo del seguidor solar se instaló un sensor solar modelo ISS T60-B0008 de Solar MEMS, estos dispositivos cuentan con una precisión de  $0,06^\circ$ , tienen un campo de visión de  $120^\circ$ , y la información es proporcionada a través del protocolo *RS485*.



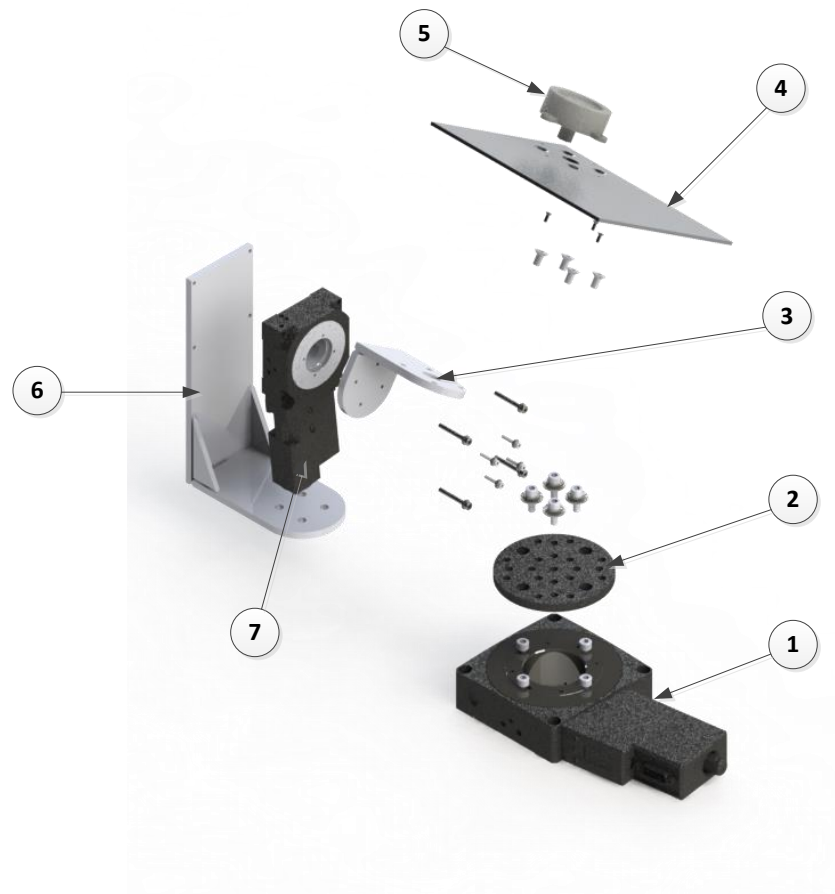
**Figura 4.3:** Referencia de los ángulos medidos.

### 4.1.3. Sistema mecánico del seguidor solar.

Se desarrolló un sistema mecánico (previamente en un trabajo de investigación anterior) que se muestra en la figura 4.4, basado en un par de mesas rotatorias de alta precisión para la ejecución de los movimientos de seguimiento solar (azimutal y elevación). Las mesas rotatorias son de la marca Newport modelo URS100BCC (para movimiento azimutal) y URS50BC (para el movimiento de elevación), estos sistemas tienen una exactitud de  $0,015^\circ$  y  $0,04^\circ$  respectivamente lo cual los hace un mecanismo muy confiable; cuentan con motores DC instrumentados con encoders con resoluciones de  $0,00016^\circ$  y  $0,0005^\circ$ . Las mesas rotatorias se ensamblan sobre elementos estructurales sencillos, esto para garantizar que los ejes de giro de las mesas rotatorias sean perpendiculares y proporcionar el soporte pa-

## 4.1 Implementación del Seguidor Solar

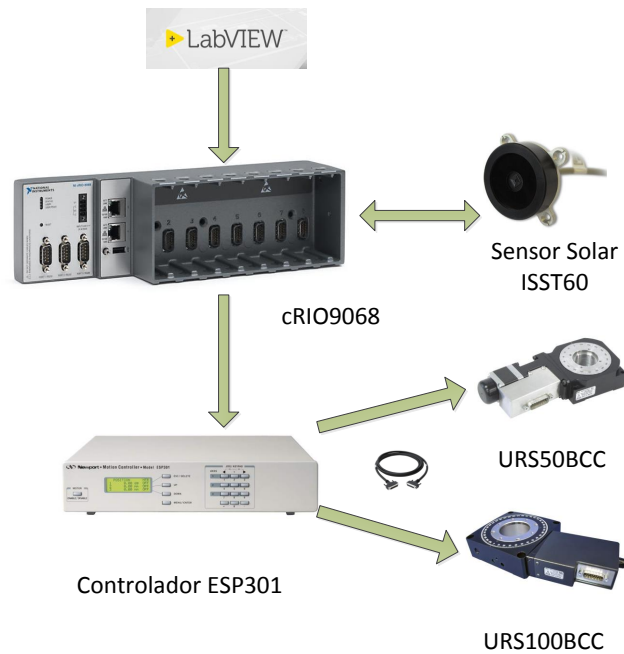
ra los instrumentos de medición de desviación de la posición del sol. Las mesas rotatorias instaladas perpendicularmente generan los movimientos de los ángulos estudiados, mientras que en una placa metálica montada sobre la mesa rotatoria del movimiento de altitud se instaló el sensor solar, lo que permite orientarlo a la posición del sol y así obtener información sobre las posibles desviaciones existentes, de esta manera los datos obtenidos son importantes para el análisis y desarrollo de la metodologías para la corrección del seguimiento solar.



**Figura 4.4:** Esquema del mecanismo del seguidor solar. 1) Mesa Rotatoria URS100BCC. 2) Platina de montaje URS100BCC. 3) Platina de montaje URS50BC. 4) Base de soporte para sensor solar. 5) Sensor Solar ISS T60-B0008. 6) Base soporte mesa rotatoria URS50BC. 7) Mesa rotatoria URS50BC.

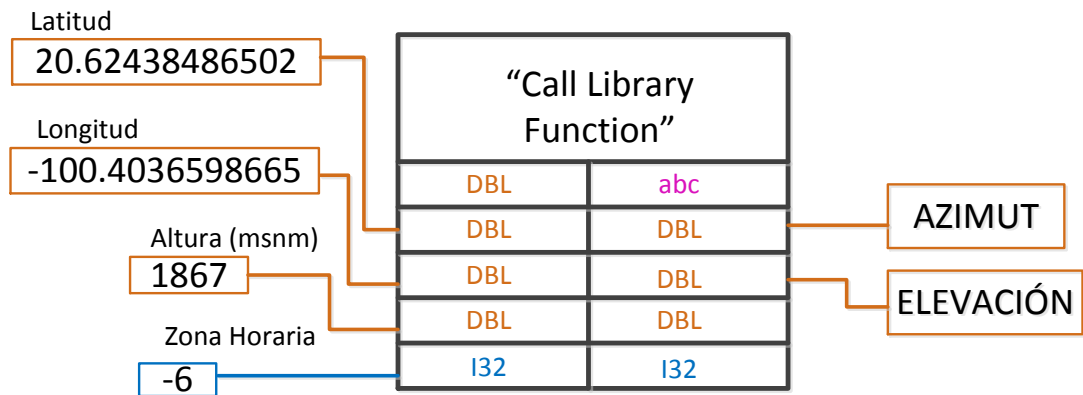
### 4.2. Pruebas Experimentales

La figura 4.5 muestra de manera gráfica los elementos que formaron parte del experimento, la parte central de las pruebas fue el controlador cRIO 9068 el cual mantuvo una comunicación vía modbus con una interfaz RS485, con el sensor solar; el controlador envía comandos de solicitud para que el sensor pueda comenzar a operar. Los datos recabados por el sensor, tienen como destino una aplicación embebida en el controlador, donde se almacenan en un archivo con extensión .TDMS el cual se crea en un dispositivo USB conectado al cRIO, gracias a esto el acceso a los datos recabados en cada prueba es de manera rápida y sencilla, pudiendo visualizarlos en Microsoft Excel o mejor aún con DIAdem de National Instruments. Entre los datos que envía el sensor están los errores de los ejes  $X, Y$  debido al error de apunte, la temperatura y la radiación solar. Los valores de los ángulos medidos por el sensor son de extrema importancia en la experimentación pues es la diferencia de estos valores con respecto a los calculados mediante el algoritmo de posicionamiento solar en los mismos instantes de tiempo que podemos calcular la posición teórica del sol para definir así el vector  $s(k)$  que se utiliza con el método de mínimos cuadrados que se explicó en la sección anterior. Respecto a la posición real del sol se obtiene directamente del algoritmo de NREL (mediante ecuaciones astronómicas), y dichos datos se representan en el vector  $p(k)$ . El controlador y las mesas rotatorias complementan el sistema direccionando el sistema hacia donde les indique el controlador.



**Figura 4.5:** Modelo del prototipo

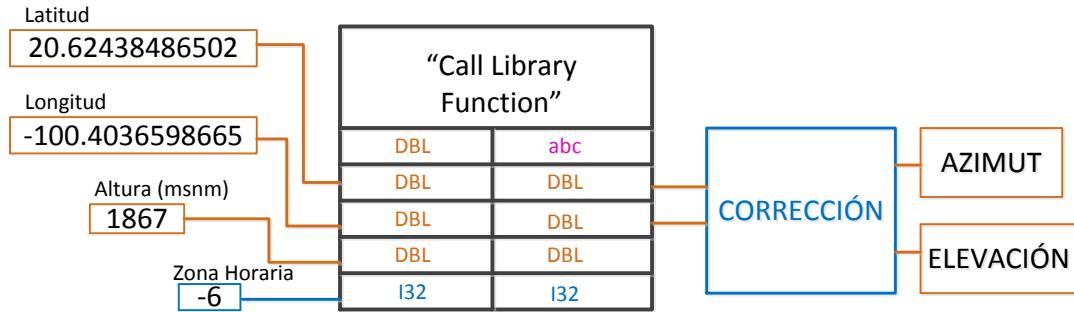
En la figura 4.6 se representa la parte principal de la aplicación la cual se programó en LabVIEW y se embebió en un cRIO, se observan los parámetros de entrada necesarios para los cálculos y las variables de salida. El código principal alberga una serie de subVIs, donde cada uno realiza una tarea en específico, de los cuales destacan, la descomposición de la trama de datos del sensor, el manejo del controlador, la corrección del seguimiento y la función que hace uso del código de NREL escrito en C dentro de la programación de bloques. La función **Call Library Function** realiza el llamado a la librería `.so` (extensión para las librerías en linux, semejante al `.dll` en windows) la cual contiene el algoritmo de posicionamiento, (que previamente debe de copiarse a la biblioteca interna del cRIO) y se configura estableciendo el número de variables de entrada y de salida así como el tipo de dato que se requiere. Como se observa, los datos de entrada que se requiere ingresar son la latitud, longitud y altura de la ubicación en donde se realizara la prueba, así como la zona horaria establecida para el lugar dependiendo de la época del año, mientras que las variables de salida son los valores de los ángulos azimut y elevación expresadas en grados.



**Figura 4.6:** Representación de las funciones principales del código del controlador

Es de esta manera como se realizaron las pruebas normales sin corrección, obteniendo así; en el archivo de almacenamiento de datos (.TDMS) las lecturas de los valores en tiempo real con una frecuencia de 1 segundo y con una duración aproximada de 8 horas por prueba. A partir de estas pruebas sin corrección se definen los vectores  $p(k)$  y  $s(k)$ . Recapitulando, el vector  $p(k)$  es el vector que representa la dirección real del sol, por lo que la información calculada por el algoritmo de posicionamiento es la que utiliza, mientras que la dirección teórica se obtiene mediante las diferencias entre los valores de desviación leídos por el sensor y los valores reales, y así conocer la ubicación a la que se está apuntando, derivado de las perturbaciones. Con estos dos vectores se obtiene por medio del MMC la matriz de corrección  $R$  que se agrega al módulo de corrección, en la figura 4.7 se observa que la programación de dicho método se realiza en un subVI el cual se coloca a la salida de la función **Call Library Function** para así poder modificar y compensar los ángulos calculados.





**Figura 4.7:** Representación de la función de corrección en el código del controlador

Para la obtención de los datos de las pruebas realizadas que aquí se presentan, se utilizó la matriz  $R$  calculada mediante el MMC que se muestra en 4.1 y a continuación se presentan los cálculos que se siguieron para poder aplicar la corrección a los ángulos.

$$\begin{pmatrix} 0,959233 & -0,147102 & 0,043736 \\ 0,166930 & 1,009771 & -0,017601 \\ -0,087309 & -0,005575 & 1,060364 \end{pmatrix}^{-1} \quad (4.1)$$

De los ángulos azimut y elevación del algoritmo se calculan las coordenadas rectangulares, se ajustan a coordenadas esféricas considerando  $r = 1$ , orientación de  $x$  hacia el sur y se convierten a radianes. 4.2

$$\theta = \frac{\pi * (Azimut - 180)}{180} \quad (4.2)$$

$$\phi = \frac{\pi * (90 - Elevacion)}{180} \quad (4.3)$$

Se calculan las coordenadas rectangulares 4.4

$$s_x = \cos(\theta) * \sin(\phi) \quad (4.4)$$

$$s_y = -\sin(\theta) * \sin(\phi) \quad (4.5)$$

$$s_z = \cos(\phi) \quad (4.6)$$

### 4.3 Verificación de corrección del seguimiento

---

De manera que se puede calcular el vector  $p$

$$[p_x, P_y, p_z] = R * [s_x, s_y, s_z] \quad (4.7)$$

En el marco de trabajo los ángulos tienen el sentido opuesto:

$$\theta_1 = \arctan 2(-p_y, p_x) \quad (4.8)$$

$$\phi_1 = \arccos(p_z) \quad (4.9)$$

Finalmente con este ajuste se obtienen los valores de los ángulos solares con la corrección aplicada, los cuales se convierten a grados para enviarlos al controlador de movimiento:

$$AzimutCorregido = \frac{180 * \theta_1}{\pi} + 180 \quad (4.10)$$

$$ElevacionCorregida = 90 - \frac{180 * \phi}{\pi} \quad (4.11)$$

Las pruebas se validaron para determinar qué datos eran aceptables y así poder entrenar al algoritmo del MMC y obtener una matriz  $R$  que disminuyera considerablemente el error, el común denominador fue el uso de los datos de días en que el cielo estuvo mayormente despejado, garantizando así que los datos no reflejaran las inconsistencias que se tienen cuando existe nubosidad cubriendo de manera total o parcial al sol. En la tabla 4.8 se enlistan las fechas en que se realizaron pruebas y en que los datos obtenidos fueron aceptables para la obtención de la matriz  $R$ .

### 4.3. Verificación de corrección del seguimiento

En la figura 4.8 se presenta gráficamente el comportamiento de los vectores de prueba ( $p$  y  $s$ ) a lo largo de un día (en este caso de la prueba del día 27 de Noviembre de 2017), antes de corregirse y después de aplicarle el método de

### 4.3 Verificación de corrección del seguimiento

---

**Tabla 4.1:** Fechas de las pruebas experimentales

Fecha	Eje Z ( $\alpha$ )	Eje Y ( $\beta$ )	Eje X ( $\gamma$ )
Nov 01, 2017	5°	0,5°	1,5°
Nov 03, 2017	10°	0,5°	1,5°
Nov 06, 2017	7,5°	0,5°	1,5°
Nov 07, 2017	-5°	0,5°	1,5°
Nov 08, 2017	-5°	0,5°	1,5°
Nov 09, 2017	-5°	0,5°	1,5°
Nov 13, 2017	5°	0,5°	1,5°
Nov 14, 2017	0°	0,5°	1,5°
Nov 15, 2017	5°	0,5°	1,5°
Nov 16, 2017	5°	0,5°	1,5°
Nov 17, 2017	5°	0,5°	1,5°
Nov 21, 2017	5°	0,5°	1,5°
Nov 23, 2017	5°	0,5°	1,5°
Nov 24, 2017	0°	0,5°	0,5°
Nov 27, 2017	7,5°	0,5°	0,5°
Nov 28, 2017	7,5°	0,5°	0,5°
Nov 29, 2017	7,5°	0,5°	0,5°
Dic 04, 2017	7,5°	0,5°	0,5°
Dic 05, 2017	7,5°	0,5°	0,5°
Dic 07, 2017	7,5°	0,5°	0,5°
Dic 08, 2017	7,5°	0,5°	0,5°
Dic 12, 2017	7,5°	0,5°	0,5°

### 4.3 Verificación de corrección del seguimiento

corrección, en esta prueba se le indujo un error de orientación de  $7,5^\circ$  al este con una nivelación aceptable. Se puede observar entonces como afectan los factores externos al comportamiento del sistema, se muestra la diferencia significativa entre los valores de los ejes de los sistemas de coordenadas.

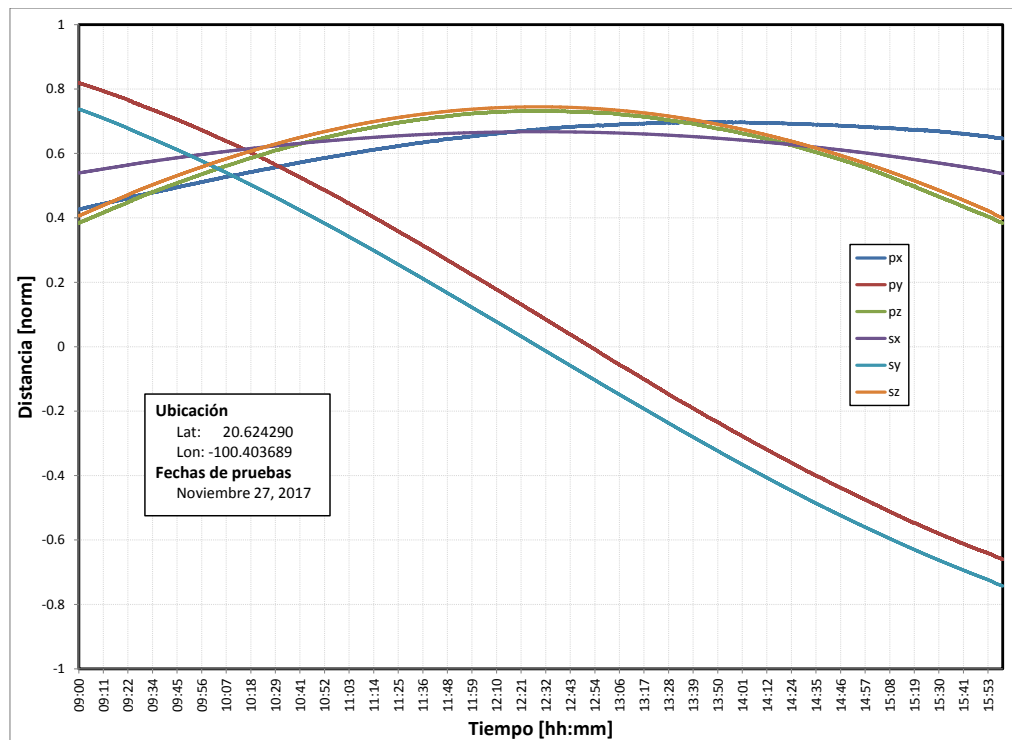


Figura 4.8: Vectores de prueba

Durante las pruebas del seguidor solar el sistema estuvo expuesto a variaciones en las condiciones ambientales y mecánicas, estas variaciones inciden directamente provocando perturbaciones en la orientación y nivelación. Siguiendo la metodología expuesta al inicio del capítulo los datos mostrados en la imagen anterior son los dos vectores ( $p$  y  $s$ ) que se utilizan para el cálculo de la matriz  $R$ . En la figura 4.9 se muestra el comportamiento del sistema pero ahora se muestran

### 4.3 Verificación de corrección del seguimiento

las trayectorias de los ángulos azimutal y de elevación de igual manera con y sin corrección.

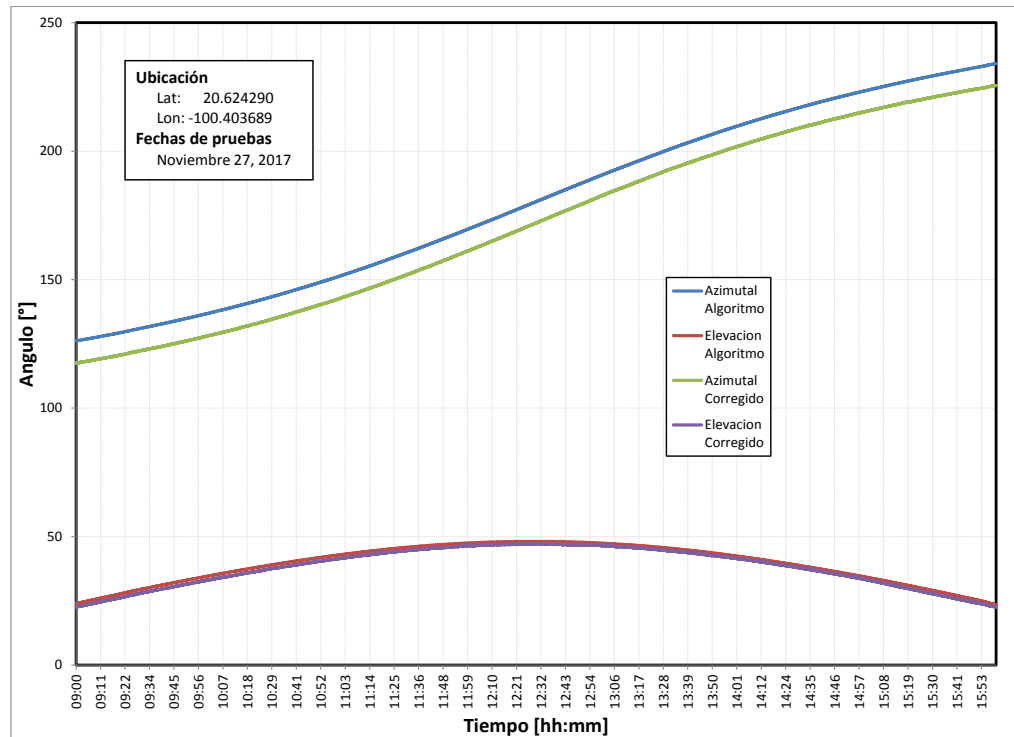


Figura 4.9: Ángulos de prueba

En la figura 4.10 se muestran los datos obtenidos en coordenadas esféricas, y donde se observa de manera más clara la corrección de aproximadamente  $8^\circ$  a partir de un error inducido en el ángulo azimutal. Cabe señalar que la desorientación inducida fue bastante grande y por encima de lo que los factores externos pudieran provocar, sin embargo la corrección que se realizó con la matriz  $R$  fue satisfactoria.

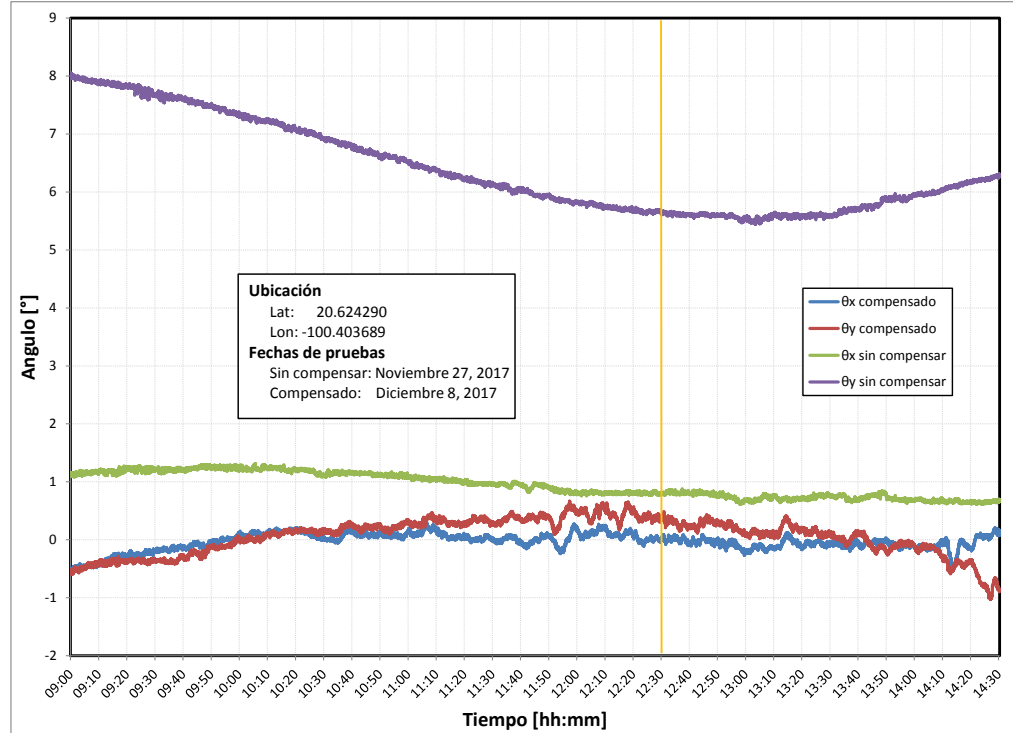


Figura 4.10: Corrección de seguimiento solar

## 4.4. Análisis de errores

El método de los mínimos cuadrados proporciona buenas predicciones y un buen ajuste si se verifican las condiciones definidas por Gauss-Markov. En este caso, para el análisis de los residuos obtenidos después de haber aplicado la compensación, se verificó la propiedad de homocedasticidad:

$$\text{var}(\varepsilon_i) = \sigma^2 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.12)$$

Los gráficos 4.11 y 4.12 muestran una distribución normal y aproximadamente centrada de los residuos que se obtuvieron por medio del sensor solar una vez aplicada la matriz de compensación, es decir la dispersión en los datos o la

varianza de los errores es aproximadamente constante. Se presentaría heterocedasticidad si la dispersión del error creciera a lo largo de las observaciones debido a factores externos al modelo y con esto las gráficas de los errores se mostrarían sesgadas. Esto nos muestra que el ajuste que se le realizó a los ángulos estudiados es aceptable.

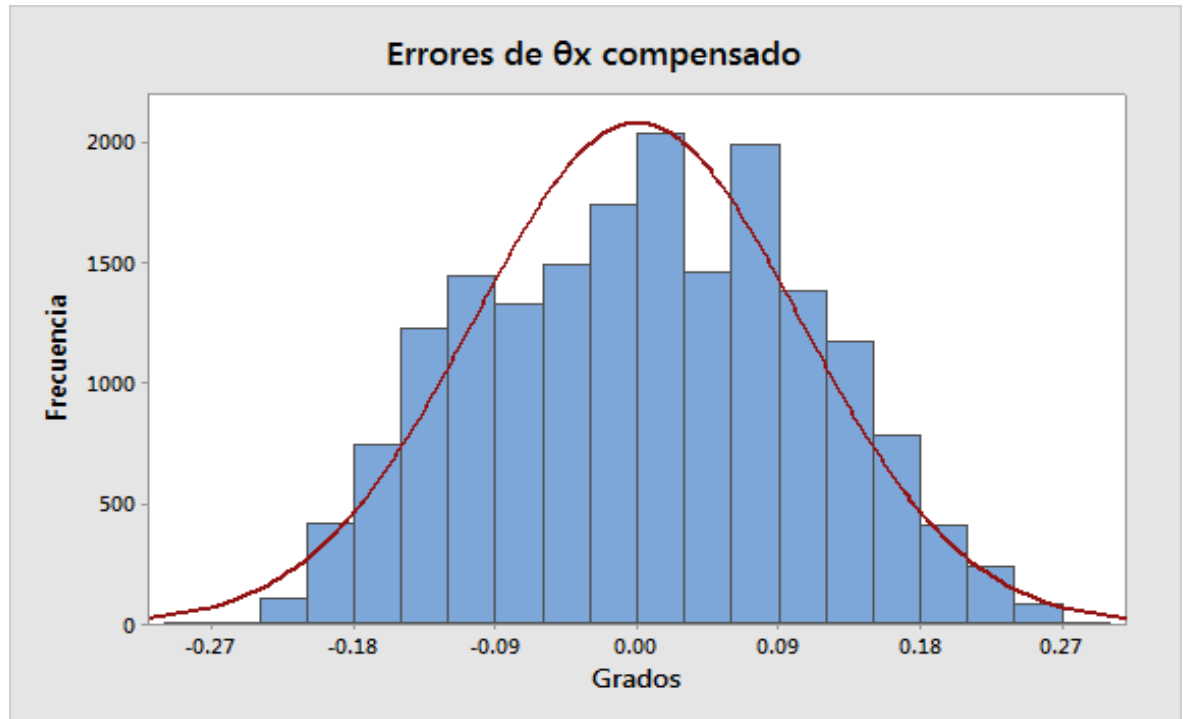


Figura 4.11: Distribución normal de los errores  $\theta_x$  compensados

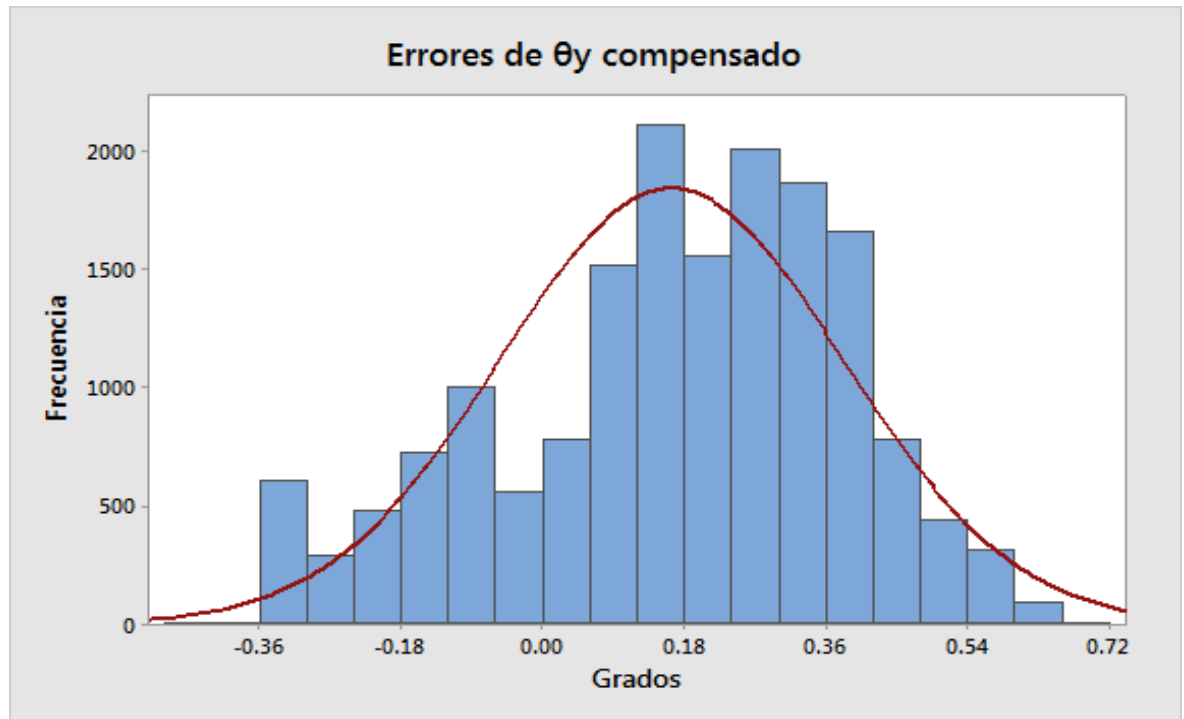


Figura 4.12: Distribución normal de los errores  $\theta_y$  compensados



# 5

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Se investigaron y analizaron los elementos y sistemas que forman parte del funcionamiento de los seguidores solares, de donde principalmente se identificaron diversos algoritmos de posicionamiento y los métodos de control y corrección. Después de analizar los algoritmos desarrollados se concluyó que el algoritmo desarrollado por NREL es la mejor opción si se requiere conocer la posición del sol en base a ecuaciones astronómicas. El uso de este código resulto de bastante utilidad para dichos cálculos durante las pruebas debido a su alta exactitud. El sensor solar también fue bastante útil en el desarrollo de la experimentación, como resultado de un diseño robusto y de la cantidad de variables que puede leer. Gracias a la información de ambos dispositivos fue posible diseñar la metodología que mediante el uso del método de mínimos cuadrados se pudo calcular la matriz de corrección. En base al análisis de los resultados obtenidos se concluye que se logró una reducción bastante amplia del error de seguimiento compensándolo por medio de un lazo abierto y aplicando el método de mínimos cuadrados como herramienta para la estimación de parámetros de sistemas lineales. Sin compensación el error máximo al que fue sometido el sistema fue de  $7,5^\circ$ . Por el contrario al aplicar la matriz de corrección al algoritmo, las compensaciones en los valores de los ángulos lograron que el error se redujeron a  $\pm 0,5^\circ$ . En general las pruebas que se realizaron comparando los datos del seguidor con y sin corrección representaron una reducción de 8:1.

### 5.2. Contribuciones

Este trabajo contribuye a la aplicación de los métodos numéricos para la corrección de errores de posicionamiento en sistemas de seguimiento solar, el uso de estas técnicas pueden evitar gastos encaminados a la corrección de elementos estructurales, mecanismo, o colectores que se encuentren ya instalados pero que presenten inconsistencias en su funcionamiento y por ende provoquen errores en la geometría de seguimiento debido a los factores externos que son imposibles de aislar como las condiciones ambientales, desaciertos en la manufactura, instalación etc. La caracterización de un sistema que ya se encuentre bajo un problema latente que afecte su funcionamiento (y que incremente la inversión si lo que se propone es corregirlo ) es viable adicionando estas metodologías que compensan los ángulos de direccionamiento al sol mediante software, sin la necesidad de modificar ni corregir los sistemas tangibles.

### 5.3. Recomendaciones de Trabajo Futuro

Se recomienda para trabajos futuros poder integrar un mayor número de errores; puesto que por más pequeños que estos sean implican un error en el seguimiento. Dichos errores podrían provocar que el sistema presentara mayores perturbaciones y tal vez fuera propenso a que la corrección del seguimiento se volviera más compleja, por lo que sería importante en trabajos futuros realizar experimentación y obtener datos de errores inducidos distintos a los que se incluyeron en este trabajo y entonces utilizar técnicas novedosas de identificación y control como por ejemplo redes neuronales, control difuso o el uso de algoritmos de optimización que se enfoquen en la relación de energía producida por los sistemas en relación con los errores a los que se encuentre sometido el proceso.

# Referencias

- A.Catarius. Azimuth-altitude dual axis solar tracker. Master's thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2010. 23
- A.Minor and A.Garcia. High-precision solar tracking system. *Proceedings of the World Congress on Engineering. Vol. II, London U.K.*, 2010. 24, 25
- F. Benfort and E. Bock. Avtima analysis of sunshine. *Trans. Am. Illumin. Soc.*, 34, 1939. 47
- R.H. Bishop. *The mechatronics Handbook*. 2002. ISBN 0-8493-0066-5/02. 21, 26, 27
- M. Blanco-Muriel, D. Alarcon-Padilla, T. Lopez-Moratalla, and M. Lara-Coira. Computing the solar vector. *Solar Energy*, 70:431–441, 2001. 15, 16, 17
- P.I Cooper. The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 13:333–346, 1969. 15, 16, 49
- J.C. Craig. *Sun Position - High accuracy solar position algorithms - a resource for programmers and solar energy engineers(VB.Net Programming by Example Book 2)*. 2013. ISBN 978-1932344684. 18
- E. Del-Pozo-Polidoro and J. Enrile-Medina. *Solar Traker Having Oleo-Hydraulic Cylinders and Method for Operating Same*. Second edition, 2011. Patente numero de publicación Internacional WO 2011/161280 A1. Solicitante Abengoa Solar New Technologies. 39
- TOMUU DONGGUAN. Actuator technology co. *Actuador Lineal de Seguimiento Solar*, 2018. URL [es.tomuu.com/solar-traker-actuator](http://es.tomuu.com/solar-traker-actuator). 14
- J. Duffie and W. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Process*. 1991. ISBN 9780470873663. 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50

- G. Esmond, Z. Tao, and Y. Chin. *Array Module of Parabolic Solar Energy Receivers*. Google Patents, 2011. US Patent US20110174359. 9
- F.Cavalier. Angular control. <http://publication.lal.in2p3.fr/2001/web/node33.html>, 2014. 20
- F.Pasolini. Mems accelerometers, gyroscopes, and geomagnetic sensors. *Propelling Disruptive Consumer Applications*, 2011. 28
- C. Frohlich. Contemporary measures of the solar constant. *The solar output and its variation*, 1977. 44
- Pepperl Fuchs. Accurate by design sensor technology for solar tracking applications. *Propelling Disruptive Consumer Applications*, 2011. 28
- H.P. Garg. Treatise on solar energy, fundamentals of solar energy research john wiley and sons. 1982. 50
- C. Grass, W. Schoelkopf, L. Staudacher, and Z. Hacker. Comparison of the optics of non-tracking and novel types of tracking solar thermal collectors for process heat applications up to 300°C. *Solar Energy*, 76, 2004. 37
- R. Grena. An algorithm for the computation of the solar position. *Solar Energy*, 82: 462–470, 2008. 15, 17
- T.J Hebrink. *Durable Polymeric Films for Increasing the Performance of Concentrators. Third Generation Photovoltaics*. 2012. 39
- J.R Hickey, B.M Alton, F.J. Griffin, H. Jacobowitz, R.H. Maschhoff, and T.H. Vonder Haar. Extraterrestrial solar irradiance variability: Two and one-half years of measurements from nimbus 7. *Solar Energy*, 28:443, 1982. 44
- M. Hossein, K. Alireza, J. Arzhang, M. Hossein, A. Karen, and S. Ahmad. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:1800–1818, 2009. 32, 37
- National Instruments. Ni crio-9068 user manual. *User Manual*, 2016. URL [www.ni.com/pdf/manuals/376007b\\_03.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/376007b_03.pdf). 72
- M. Iqbal. *An Introduction to Solar Radiation*. 1983. ISBN 0123737508. 45, 49
- F.S Johnson. The solar constant. *Meteorol*, 11:431, 1954. 44

- S. Kalogirou. *Solar energy engineering: processes and systems*. 2009. ISBN 978-0-12-374501-9. 50, 51, 52
- K.Chong and C.W. Wong. General formula for on-axis sun-tracking system. *University Tunku Abdul Malaysia. Capitulo 3*, pages 263–291, 2014. 8
- S.S. Khalsa, C.K. Ho, and C.E. Andraka. An automated method to correct heliostat tracking errors. *SolarPACES*, 2011. Granada, Spain. 40
- G.S Kinoshita. The shenandoah parabolic dish solar collector. *SANDIA Report*, 1985. Sandia National Laboratories. 39, 40
- S.A. Klein. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 19:325, 1977. viii, 49
- L.O Lamm. A new analytic expression for the equation of time. *Solar Energy*, 26:465, 1981. 15, 16
- C.W. Lopez and K.W. Stone. *Performance of the Southern California Edison Company Stirling Dish, Southern California Edison Co., Rosemead and Mazo Enterprises, Huntington, CA*. 1993b. 12
- J. Meeus. *Astronomical Algorithms*. Second edition, 1998. ISBN 09433966611. 15, 18
- J.J Michalsky. The astronomical almanac algorithm for approximate solar position (1950-2050). *Solar Energy*, 40:227–235, 1988. 15, 16
- P. Noriega and J.A Perez. *Method for determining the correction of tracking errors of solar tracking platforms, central processing unit adapted to perform said method and solar tracker comprising said central processing unit*. Google Patents, 2014. URL <https://www.google.com/patents/WO2014102420A1?c1=es>. Patente numero de publicación Internacional WO 2014/102420 A1. Solicitante Abengoa Solar New Technologies. 19, 37, 38
- S. Pattanasethanon. The solar tracking system by using digital solar position sensor. *American Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 3*, pages 678–682, 2010. 20
- C.L Pintam and L.L Vant-Hull. Errors in locating the sun and their effect on solar intensity predicitions. *Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society*, pages 701–706, 1978. 15, 16

- G. Prinsloo and R. Dobson. *Solar Tracking*. 2014. ISBN 9780620615761. 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 23, 24
- G.J. Prinsloo. Automatic positioner and control system for a monotorized parabolic solar reflector. Master's thesis, Stellenbosch University, 2014. 13, 25
- R.Baheti and P.Scott. Design of self-calibrating controllers for heliostats in a solar power plant. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 25, 1980. 40
- I. Reda and A. Andreas. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*, 76:577–589, 2004. 15, 18, 52, 55, 56
- L. Ren, X.Wei, Z.Lu, W.Yu, W.Xu, and Z.Shen. A review of available methods for the alignment of mirror facets of solar concentrator in solar termal power system. *Renew Sustain Energy Rev* 32, pages 76–83, 2014. 32
- R. Rosemann. *A guide to solar radiation measurement*. 2011. ISBN 9789081739702. 42
- G.E. Rotolo. *Sun position sensor for two axis tracking*. 1980. ISBN Available at: <http://www.google.com.ar/patents/US4361758>. 21, 22
- M. Shibata and T. Toyokazu. Dual axis light sensor for tracking sun. *University of Toyama*, page 91, 2000. 20, 21
- SolarMEMS. *Sun Sensor ISS-Ax Technical Specifications, Solar MEMS Technologies S.L. Sevilla Spain*. 2013. 24
- J.W Spencer. Fourier series representation of the position of the sun. *Search* 2, 2, 1971. URL <http://www.mail-archive.com/sundial@uni-koeln.de/msg01050.html>. 15, 16, 45, 46, 49
- W.B. Stine and M. Geyer. *Power from the Sun*. 2011. ISBN [www.powerfromthesun.net/book.html](http://www.powerfromthesun.net/book.html). 11
- S. Suman, Mohd, K.Khan, and M.Pathak. Performance enhancement of solar collectors - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, pages 192–210, 2015. 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36
- L.W Swift. Algorithm for solar radiation on mountain slopes. *Water Resour*, 12:108–112, 1976. 16
- R. Walraven. Calculating the position of the sun. *Solar Energy*, 20:393–397, 1978. 15, 16

## REFERENCIAS

---

- R.C Wilson, S.Gulkis, M. Janssen, H.S Hudson, and G.A Chapman. Observations of solar irradiance variability. *Science*, 211, 700, 1981. 44
- Z.Xinhong, W. Zongxian, and Y. Zhengda. Intelligent solar tracking control system implemented on an fpga. *Institute of Electrical Engineering Yuan Ze University*, pages 217-246, 2007. 22

# Apéndice A

## Algoritmo de Posicionamiento Solar del National Renewable Energy Laboratory (NREL)

### A.1. Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

```
#include <math.h>
#include "spa.h"

#define PI 3.1415926535897932384626433832795028841971
#define SUN_RADIUS 0.26667

#define L_COUNT 6
#define B_COUNT 2
#define R_COUNT 5
#define Y_COUNT 63

#define L_MAX_SUBCOUNT 64
#define B_MAX_SUBCOUNT 5
#define R_MAX_SUBCOUNT 40

enum {TERMA, TERMB, TERMC, TERMCOUNT};
enum {TERMX0, TERMX1, TERMX2, TERMX3,
      TERMX4, TERMXCOUNT};
```



## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
enum {TERM.PSLA, TERM.PSLB, TERM.EPS.C,  
      TERM.EPS.D, TERM.PE.COUNT};  
enum {JD.MINUS, JD.ZERO, JD.PLUS, JD.COUNT};  
enum {SUN.TRANSIT, SUN.RISE, SUN.SET, SUN.COUNT};  
  
#define TERMY.COUNT TERMX.COUNT  
  
const int l_subcount[L.COUNT] = {64,34,20,7,3,1};  
const int b_subcount[B.COUNT] = {5,2};  
const int r_subcount[R.COUNT] = {40,10,6,2,1};  
  
////////////////////////////////////  
/// Earth Periodic Terms  
////////////////////////////////////  
const double L_TERMS[L.COUNT][LMAX.SUBCOUNT][TERMCOUNT]=  
{  
    {  
        {175347046.0,0,0},  
        {3341656.0,4.6692568,6283.07585},  
        {34894.0,4.6261,12566.1517},  
        {3497.0,2.7441,5753.3849},  
        {3418.0,2.8289,3.5231},  
        {3136.0,3.6277,77713.7715},  
        {2676.0,4.4181,7860.4194},  
        {2343.0,6.1352,3930.2097},  
        {1324.0,0.7425,11506.7698},  
        {1273.0,2.0371,529.691},  
        {1199.0,1.1096,1577.3435},  
        {990,5.233,5884.927},  
        {902,2.045,26.298},  
        {857,3.508,398.149},  
        {780,1.179,5223.694},  
        {753,2.533,5507.553},  
        {505,4.583,18849.228},  
        {492,4.205,775.523},  
        {357,2.92,0.067},  
        {317,5.849,11790.629},  
        {284,1.899,796.298},  
        {271,0.315,10977.079},  
        {243,0.345,5486.778},  
        {206,4.806,2544.314},
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

{205,1.869,5573.143},  
{202,2.458,6069.777},  
{156,0.833,213.299},  
{132,3.411,2942.463},  
{126,1.083,20.775},  
{115,0.645,0.98},  
{103,0.636,4694.003},  
{102,0.976,15720.839},  
{102,4.267,7.114},  
{99,6.21,2146.17},  
{98,0.68,155.42},  
{86,5.98,161000.69},  
{85,1.3,6275.96},  
{85,3.67,71430.7},  
{80,1.81,17260.15},  
{79,3.04,12036.46},  
{75,1.76,5088.63},  
{74,3.5,3154.69},  
{74,4.68,801.82},  
{70,0.83,9437.76},  
{62,3.98,8827.39},  
{61,1.82,7084.9},  
{57,2.78,6286.6},  
{56,4.39,14143.5},  
{56,3.47,6279.55},  
{52,0.19,12139.55},  
{52,1.33,1748.02},  
{51,0.28,5856.48},  
{49,0.49,1194.45},  
{41,5.37,8429.24},  
{41,2.4,19651.05},  
{39,6.17,10447.39},  
{37,6.04,10213.29},  
{37,2.57,1059.38},  
{36,1.71,2352.87},  
{36,1.78,6812.77},  
{33,0.59,17789.85},  
{30,0.44,83996.85},  
{30,2.74,1349.87},  
{25,3.16,4690.48}  
},

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
{
  {628331966747.0,0,0},
  {206059.0,2.678235,6283.07585},
  {4303.0,2.6351,12566.1517},
  {425.0,1.59,3.523},
  {119.0,5.796,26.298},
  {109.0,2.966,1577.344},
  {93,2.59,18849.23},
  {72,1.14,529.69},
  {68,1.87,398.15},
  {67,4.41,5507.55},
  {59,2.89,5223.69},
  {56,2.17,155.42},
  {45,0.4,796.3},
  {36,0.47,775.52},
  {29,2.65,7.11},
  {21,5.34,0.98},
  {19,1.85,5486.78},
  {19,4.97,213.3},
  {17,2.99,6275.96},
  {16,0.03,2544.31},
  {16,1.43,2146.17},
  {15,1.21,10977.08},
  {12,2.83,1748.02},
  {12,3.26,5088.63},
  {12,5.27,1194.45},
  {12,2.08,4694},
  {11,0.77,553.57},
  {10,1.3,6286.6},
  {10,4.24,1349.87},
  {9,2.7,242.73},
  {9,5.64,951.72},
  {8,5.3,2352.87},
  {6,2.65,9437.76},
  {6,4.67,4690.48}
},
{
  {52919.0,0,0},
  {8720.0,1.0721,6283.0758},
  {309.0,0.867,12566.152},
  {27,0.05,3.52},
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
        {16,5.19,26.3},
        {16,3.68,155.42},
        {10,0.76,18849.23},
        {9,2.06,77713.77},
        {7,0.83,775.52},
        {5,4.66,1577.34},
        {4,1.03,7.11},
        {4,3.44,5573.14},
        {3,5.14,796.3},
        {3,6.05,5507.55},
        {3,1.19,242.73},
        {3,6.12,529.69},
        {3,0.31,398.15},
        {3,2.28,553.57},
        {2,4.38,5223.69},
        {2,3.75,0.98}
    },
    {
        {289.0,5.844,6283.076},
        {35,0,0},
        {17,5.49,12566.15},
        {3,5.2,155.42},
        {1,4.72,3.52},
        {1,5.3,18849.23},
        {1,5.97,242.73}
    },
    {
        {114.0,3.142,0},
        {8,4.13,6283.08},
        {1,3.84,12566.15}
    },
    {
        {1,3.14,0}
    }
};

const double B.TERMS[B.COUNT][B.MAX.SUBCOUNT][TERMLCOUNT]=
{
    {
        {280.0,3.199,84334.662},
        {102.0,5.422,5507.553},
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
        {80,3.88,5223.69},
        {44,3.7,2352.87},
        {32,4,1577.34}
    },
    {
        {9,3.9,5507.55},
        {6,1.73,5223.69}
    }
};

const double R_TERMS[R_COUNT][R_MAX_SUBCOUNT][TERM_COUNT]=
{
    {
        {100013989.0,0,0},
        {1670700.0,3.0984635,6283.07585},
        {13956.0,3.05525,12566.1517},
        {3084.0,5.1985,77713.7715},
        {1628.0,1.1739,5753.3849},
        {1576.0,2.8469,7860.4194},
        {925.0,5.453,11506.77},
        {542.0,4.564,3930.21},
        {472.0,3.661,5884.927},
        {346.0,0.964,5507.553},
        {329.0,5.9,5223.694},
        {307.0,0.299,5573.143},
        {243.0,4.273,11790.629},
        {212.0,5.847,1577.344},
        {186.0,5.022,10977.079},
        {175.0,3.012,18849.228},
        {110.0,5.055,5486.778},
        {98,0.89,6069.78},
        {86,5.69,15720.84},
        {86,1.27,161000.69},
        {65,0.27,17260.15},
        {63,0.92,529.69},
        {57,2.01,83996.85},
        {56,5.24,71430.7},
        {49,3.25,2544.31},
        {47,2.58,775.52},
        {45,5.54,9437.76},
        {43,6.01,6275.96},
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
{39,5.36,4694},
{38,2.39,8827.39},
{37,0.83,19651.05},
{37,4.9,12139.55},
{36,1.67,12036.46},
{35,1.84,2942.46},
{33,0.24,7084.9},
{32,0.18,5088.63},
{32,1.78,398.15},
{28,1.21,6286.6},
{28,1.9,6279.55},
{26,4.59,10447.39}
},
{
{103019.0,1.10749,6283.07585},
{1721.0,1.0644,12566.1517},
{702.0,3.142,0},
{32,1.02,18849.23},
{31,2.84,5507.55},
{25,1.32,5223.69},
{18,1.42,1577.34},
{10,5.91,10977.08},
{9,1.42,6275.96},
{9,0.27,5486.78}
},
{
{4359.0,5.7846,6283.0758},
{124.0,5.579,12566.152},
{12,3.14,0},
{9,3.63,77713.77},
{6,1.87,5573.14},
{3,5.47,18849.23}
},
{
{145.0,4.273,6283.076},
{7,3.92,12566.15}
},
{
{4,2.56,6283.08}
}
};
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
////////////////////////////////////  
/// Periodic Terms for the nutation in longitude and obliquity  
////////////////////////////////////
```

```
const int Y_TERMS[Y_COUNT][TERMY_COUNT]=
```

```
{  
    {0,0,0,0,1},  
    {-2,0,0,2,2},  
    {0,0,0,2,2},  
    {0,0,0,0,2},  
    {0,1,0,0,0},  
    {0,0,1,0,0},  
    {-2,1,0,2,2},  
    {0,0,0,2,1},  
    {0,0,1,2,2},  
    {-2,-1,0,2,2},  
    {-2,0,1,0,0},  
    {-2,0,0,2,1},  
    {0,0,-1,2,2},  
    {2,0,0,0,0},  
    {0,0,1,0,1},  
    {2,0,-1,2,2},  
    {0,0,-1,0,1},  
    {0,0,1,2,1},  
    {-2,0,2,0,0},  
    {0,0,-2,2,1},  
    {2,0,0,2,2},  
    {0,0,2,2,2},  
    {0,0,2,0,0},  
    {-2,0,1,2,2},  
    {0,0,0,2,0},  
    {-2,0,0,2,0},  
    {0,0,-1,2,1},  
    {0,2,0,0,0},  
    {2,0,-1,0,1},  
    {-2,2,0,2,2},  
    {0,1,0,0,1},  
    {-2,0,1,0,1},  
    {0,-1,0,0,1},  
    {0,0,2,-2,0},
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
{2,0,-1,2,1},
{2,0,1,2,2},
{0,1,0,2,2},
{-2,1,1,0,0},
{0,-1,0,2,2},
{2,0,0,2,1},
{2,0,1,0,0},
{-2,0,2,2,2},
{-2,0,1,2,1},
{2,0,-2,0,1},
{2,0,0,0,1},
{0,-1,1,0,0},
{-2,-1,0,2,1},
{-2,0,0,0,1},
{0,0,2,2,1},
{-2,0,2,0,1},
{-2,1,0,2,1},
{0,0,1,-2,0},
{-1,0,1,0,0},
{-2,1,0,0,0},
{1,0,0,0,0},
{0,0,1,2,0},
{0,0,-2,2,2},
{-1,-1,1,0,0},
{0,1,1,0,0},
{0,-1,1,2,2},
{2,-1,-1,2,2},
{0,0,3,2,2},
{2,-1,0,2,2},
};

const double PE.TERMS[Y.COUNT][TERM.PE.COUNT]={
{-171996,-174.2,92025,8.9},
{-13187,-1.6,5736,-3.1},
{-2274,-0.2,977,-0.5},
{2062,0.2,-895,0.5},
{1426,-3.4,54,-0.1},
{712,0.1,-7,0},
{-517,1.2,224,-0.6},
{-386,-0.4,200,0},
{-301,0,129,-0.1},
```



## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

$\{217, -0.5, -95, 0.3\}$ ,  
 $\{-158, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{129, 0.1, -70, 0\}$ ,  
 $\{123, 0, -53, 0\}$ ,  
 $\{63, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{63, 0.1, -33, 0\}$ ,  
 $\{-59, 0, 26, 0\}$ ,  
 $\{-58, -0.1, 32, 0\}$ ,  
 $\{-51, 0, 27, 0\}$ ,  
 $\{48, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{46, 0, -24, 0\}$ ,  
 $\{-38, 0, 16, 0\}$ ,  
 $\{-31, 0, 13, 0\}$ ,  
 $\{29, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{29, 0, -12, 0\}$ ,  
 $\{26, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{-22, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{21, 0, -10, 0\}$ ,  
 $\{17, -0.1, 0, 0\}$ ,  
 $\{16, 0, -8, 0\}$ ,  
 $\{-16, 0.1, 7, 0\}$ ,  
 $\{-15, 0, 9, 0\}$ ,  
 $\{-13, 0, 7, 0\}$ ,  
 $\{-12, 0, 6, 0\}$ ,  
 $\{11, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{-10, 0, 5, 0\}$ ,  
 $\{-8, 0, 3, 0\}$ ,  
 $\{7, 0, -3, 0\}$ ,  
 $\{-7, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{-7, 0, 3, 0\}$ ,  
 $\{-7, 0, 3, 0\}$ ,  
 $\{6, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{6, 0, -3, 0\}$ ,  
 $\{6, 0, -3, 0\}$ ,  
 $\{-6, 0, 3, 0\}$ ,  
 $\{-6, 0, 3, 0\}$ ,  
 $\{5, 0, 0, 0\}$ ,  
 $\{-5, 0, 3, 0\}$ ,  
 $\{-5, 0, 3, 0\}$ ,  
 $\{-5, 0, 3, 0\}$ ,  
 $\{4, 0, 0, 0\}$ ,

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
{4,0,0,0},
{4,0,0,0},
{-4,0,0,0},
{-4,0,0,0},
{-4,0,0,0},
{-4,0,0,0},
{3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
};

////////////////////////////////////

double rad2deg(double radians)
{
    return (180.0/PI)*radians;
}

double deg2rad(double degrees)
{
    return (PI/180.0)*degrees;
}

int integer(double value)
{
    return value;
}

double limit_degrees(double degrees)
{
    double limited;

    degrees /= 360.0;
    limited = 360.0*(degrees-floor(degrees));
    if (limited < 0) limited += 360.0;

    return limited;
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
}

double limit_degrees180pm(double degrees)
{
    double limited;

    degrees /= 360.0;
    limited = 360.0*(degrees-floor(degrees));
    if (limited < -180.0) limited += 360.0;
    else if (limited > 180.0) limited -= 360.0;

    return limited;
}

double limit_degrees180(double degrees)
{
    double limited;

    degrees /= 180.0;
    limited = 180.0*(degrees-floor(degrees));
    if (limited < 0) limited += 180.0;

    return limited;
}

double limit_zero2one(double value)
{
    double limited;

    limited = value - floor(value);
    if (limited < 0) limited += 1.0;

    return limited;
}

double limit_minutes(double minutes)
{
    double limited=minutes;

    if (limited < -20.0) limited += 1440.0;
    else if (limited > 20.0) limited -= 1440.0;
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
    return limited;
}

double dayfrac_to_local_hr(double dayfrac, double timezone)
{
    return 24.0*limit_zero2one(dayfrac + timezone/24.0);
}

double third_order_polynomial(double a, double b, double c,
double d, double x)
{
    return ((a*x + b)*x + c)*x + d;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
int validate_inputs(spa_data *spa)
{
    if ((spa->year < -2000) || (spa->year > 6000))
        return 1;
    if ((spa->month < 1) || (spa->month > 12 ))
        return 2;
    if ((spa->day < 1) || (spa->day > 31 ))
        return 3;
    if ((spa->hour < 0 ) || (spa->hour > 24 ))
        return 4;
    if ((spa->minute < 0 ) || (spa->minute > 59 ))
        return 5;
    if ((spa->second < 0 ) || (spa->second >=60 ))
        return 6;
    if ((spa->pressure < 0 ) || (spa->pressure > 5000))
        return 12;
    if ((spa->temperature <= -273) || (spa->temperature > 6000))
        return 13;
    if ((spa->delta_ut1 <= -1 ) || (spa->delta_ut1 >= 1 ))
        return 17;
        if ((spa->hour == 24 ) && (spa->minute > 0 ))
            return 5;
    if ((spa->hour == 24 ) && (spa->second > 0 ))
        return 6;
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
if (fabs(spa->delta_t) > 8000 ) return 7;
if (fabs(spa->timezone) > 18 ) return 8;
if (fabs(spa->longitude) > 180 ) return 9;
if (fabs(spa->latitude) > 90 ) return 10;
if (fabs(spa->atmos_refract) > 5 ) return 16;
if ( spa->elevation < -6500000) return 11;

if ((spa->function == SPA_ZA_INC) || (spa->function == SPA_ALL))
{
    if (fabs(spa->slope) > 360) return 14;
    if (fabs(spa->azm_rotation) > 360) return 15;
}

return 0;
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
double julian_day (int year, int month, int day, int hour, int minute,
double second, double dut1, double tz)
{
    double day_decimal, julian_day, a;

    day_decimal = day + (hour - tz + (minute +
(second + dut1)/60.0)/60.0)/24.0;

    if (month < 3) {
        month += 12;
        year--;
    }

    julian_day = integer(365.25*(year+4716.0)) + integer(30.6001*(month+1))
+ day_decimal - 1524.5;

    if (julian_day > 2299160.0) {
        a = integer(year/100);
        julian_day += (2 - a + integer(a/4));
    }

    return julian_day;
}

double julian_century(double jd)
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
{
    return (jd - 2451545.0)/36525.0;
}

double julian_ephemeris_day(double jd, double delta_t)
{
    return jd+delta_t/86400.0;
}

double julian_ephemeris_century(double jde)
{
    return (jde - 2451545.0)/36525.0;
}

double julian_ephemeris_millennium(double jce)
{
    return (jce/10.0);
}

double earth_periodic_term_summation(const double terms[]
[TERMCOUNT],
int count, double jme)
{
    int i;
    double sum=0;

    for (i = 0; i < count; i++)
        sum += terms[i][TERMLA]*cos(terms[i][TERMLB]+terms[i]
[TERMLC]*jme);

    return sum;
}

double earth_values(double term_sum[], int count, double jme)
{
    int i;
    double sum=0;

    for (i = 0; i < count; i++)
        sum += term_sum[i]*pow(jme, i);
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
    sum /= 1.0e8;

    return sum;
}

double earth_heliocentric_longitude(double jme)
{
    double sum[L.COUNT];
    int i;

    for (i = 0; i < L.COUNT; i++)
        sum[i] = earth_periodic_term_summation(L.TERMS[i],
        l_subcount[i], jme);

    return limit_degrees(rad2deg(earth_values(sum, L.COUNT, jme)));
}

double earth_heliocentric_latitude(double jme)
{
    double sum[B.COUNT];
    int i;

    for (i = 0; i < B.COUNT; i++)
        sum[i] = earth_periodic_term_summation(B.TERMS[i],
        b_subcount[i], jme);

    return rad2deg(earth_values(sum, B.COUNT, jme));
}

double earth_radius_vector(double jme)
{
    double sum[R.COUNT];
    int i;

    for (i = 0; i < R.COUNT; i++)
        sum[i] = earth_periodic_term_summation(R.TERMS[i],
        r_subcount[i], jme);

    return earth_values(sum, R.COUNT, jme);
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
}  
  
double geocentric_longitude(double l)  
{  
    double theta = l + 180.0;  
  
    if (theta >= 360.0) theta -= 360.0;  
  
    return theta;  
}  
  
double geocentric_latitude(double b)  
{  
    return -b;  
}  
  
double mean_elongation_moon_sun(double jce)  
{  
    return third_order_polynomial(1.0/189474.0, -0.0019142,  
    445267.11148, 297.85036, jce);  
}  
  
double mean_anomaly_sun(double jce)  
{  
    return third_order_polynomial(-1.0/300000.0, -0.0001603,  
    35999.05034, 357.52772, jce);  
}  
  
double mean_anomaly_moon(double jce)  
{  
    return third_order_polynomial(1.0/56250.0, 0.0086972,  
    477198.867398, 134.96298, jce);  
}  
  
double argument_latitude_moon(double jce)  
{  
    return third_order_polynomial(1.0/327270.0, -0.0036825,  
    483202.017538, 93.27191, jce);  
}
```



## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
double ascending_longitude_moon(double jce)
{
    return third_order_polynomial(1.0/450000.0,
    0.0020708, -1934.136261, 125.04452, jce);
}

double xy_term_summation(int i, double x[TERMLX_COUNT])
{
    int j;
    double sum=0;

    for (j = 0; j < TERMLY_COUNT; j++)
        sum += x[j]*Y_TERMS[i][j];

    return sum;
}

void nutation_longitude_and_obliquity(double jce,
double x[TERMLX_COUNT], double *del_psi, double *del_epsilon)
{
    int i;
    double xy_term_sum, sum_psi=0, sum_epsilon=0;

    for (i = 0; i < Y_COUNT; i++) {
        xy_term_sum = deg2rad(xy_term_summation(i, x));
        sum_psi += (PE_TERMS[i][TERM_PSLA] + jce*PE_TERMS[i]
        [TERM_PSLB])*sin(xy_term_sum);
        sum_epsilon += (PE_TERMS[i][TERM_EPS_C] + jce*PE_TERMS[i]
        [TERM_EPS_D])*cos(xy_term_sum);
    }

    *del_psi = sum_psi / 36000000.0;
    *del_epsilon = sum_epsilon / 36000000.0;
}

double ecliptic_mean_obliquity(double jme)
{
    double u = jme/10.0;

    return 84381.448 + u*(-4680.93 + u*(-1.55 + u*(1999.25 + u*
    (-51.38 + u*(-249.67 + u*(-39.05 + u*( 7.12 + u*( 27.87
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
    + u*( 5.79 + u*2.45))))))));
}

double ecliptic_true_obliquity(double delta_epsilon, double epsilon0)
{
    return delta_epsilon + epsilon0/3600.0;
}

double aberration_correction(double r)
{
    return -20.4898 / (3600.0*r);
}

double apparent_sun_longitude(double theta, double delta_psi,
double delta_tau)
{
    return theta + delta_psi + delta_tau;
}

double greenwich_mean_sidereal_time (double jd, double jc)
{
    return limit_degrees(280.46061837 + 360.98564736629 *
    (jd - 2451545.0) + jc*jc*(0.000387933 - jc/38710000.0));
}

double greenwich_sidereal_time (double nu0, double delta_psi,
double epsilon)
{
    return nu0 + delta_psi*cos(deg2rad(epsilon));
}

double geocentric_right_ascension(double lamda, double epsilon,
double beta)
{
    double lamda_rad = deg2rad(lamda);
    double epsilon_rad = deg2rad(epsilon);

    return limit_degrees(rad2deg(atan2(sin(lamda_rad)*cos(epsilon_rad) -
    tan(deg2rad(beta))*sin(epsilon_rad), cos(lamda_rad))));
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
double geocentric_declination(double beta, double epsilon, double lamda)
{
    double beta_rad    = deg2rad(beta);
    double epsilon_rad = deg2rad(epsilon);

    return rad2deg(asin(sin(beta_rad)*cos(epsilon_rad) +
        cos(beta_rad)*sin(epsilon_rad)*sin(deg2rad(lamda))));
}

double observer_hour_angle(double nu, double longitude, double alpha_deg)
{
    return limit_degrees(nu + longitude - alpha_deg);
}

double sun_equatorial_horizontal_parallax(double r)
{
    return 8.794 / (3600.0 * r);
}

void right_ascension_parallax_and_topocentric_dec(double latitude,
    double elevation,
        double xi, double h, double delta, double *delta_alpha,
        double *delta_prime)
{
    double delta_alpha_rad;
    double lat_rad    = deg2rad(latitude);
    double xi_rad     = deg2rad(xi);
    double h_rad      = deg2rad(h);
    double delta_rad  = deg2rad(delta);
    double u = atan(0.99664719 * tan(lat_rad));
    double y = 0.99664719 * sin(u) + elevation*sin(lat_rad)/6378140.0;
    double x = cos(u) + elevation*cos(lat_rad)/6378140.0;

    delta_alpha_rad = atan2(-x*sin(xi_rad) *sin(h_rad),
        cos(delta_rad) - x*sin(xi_rad) *cos(h_rad));

    *delta_prime = rad2deg(atan2((sin(delta_rad) - y*sin(xi_rad))*
        cos(delta_alpha_rad), cos(delta_rad) - x*sin(xi_rad) *cos(h_rad)));

    *delta_alpha = rad2deg(delta_alpha_rad);
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
double topocentric_right_ascension(double alpha_deg, double delta_alpha)
{
    return alpha_deg + delta_alpha;
}

double topocentric_local_hour_angle(double h, double delta_alpha)
{
    return h - delta_alpha;
}

double topocentric_elevation_angle(double latitude, double delta_prime,
double h_prime)
{
    double lat_rad      = deg2rad(latitude);
    double delta_prime_rad = deg2rad(delta_prime);

    return rad2deg(asin(sin(lat_rad)*sin(delta_prime_rad) +
        cos(lat_rad)*cos(delta_prime_rad) * cos(deg2rad(h_prime))));
}

double atmospheric_refraction_correction(double pressure, double temperature,
double atmos_refract, double e0)
{
    double del_e = 0;

    if (e0 >= -1*(SUN_RADIUS + atmos_refract))
        del_e = (pressure / 1010.0) * (283.0 / (273.0 + temperature)) *
            1.02 / (60.0 * tan(deg2rad(e0 + 10.3/(e0 + 5.11))));

    return del_e;
}

double topocentric_elevation_angle_corrected(double e0, double delta_e)
{
    return e0 + delta_e;
}

double topocentric_zenith_angle(double e)
{
    return 90.0 - e;
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
}

double topocentric_azimuth_angle_astro(double h_prime, double latitude,
double delta_prime)
{
    double h_prime_rad = deg2rad(h_prime);
    double lat_rad      = deg2rad(latitude);

    return limit_degrees(rad2deg(atan2(sin(h_prime_rad),
        cos(h_prime_rad)*sin(lat_rad) - tan(deg2rad(delta_prime))
        *cos(lat_rad))));
}

double topocentric_azimuth_angle(double azimuth_astro)
{
    return limit_degrees(azimuth_astro + 180.0);
}

double surface_incidence_angle(double zenith, double azimuth_astro,
double azm_rotation, double slope)
{
    double zenith_rad = deg2rad(zenith);
    double slope_rad   = deg2rad(slope);

    return rad2deg(acos(cos(zenith_rad)*cos(slope_rad) +
        sin(slope_rad)*sin(zenith_rad)*cos(deg2rad
        (azimuth_astro - azm_rotation))));
}

double sun_mean_longitude(double jme)
{
    return limit_degrees(280.4664567 + jme*(360007.6982779 +
        jme*(0.03032028 +jme*(1/49931.0 + jme*(-1/15300.0 + jme*(-1/2000000.0))));
}

double eot(double m, double alpha, double del_psi, double epsilon)
{
    return limit_minutes(4.0*(m - 0.0057183 - alpha +
        del_psi*cos(deg2rad(epsilon))));
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
double approx_sun_transit_time(double alpha_zero, double longitude, double nu)
{
    return (alpha_zero - longitude - nu) / 360.0;
}
```

```
double sun_hour_angle_at_rise_set(double latitude, double delta_zero,
double h0_prime)
{
    double h0 = -99999;
    double latitude_rad = deg2rad(latitude);
    double delta_zero_rad = deg2rad(delta_zero);
    double argument = (sin(deg2rad(h0_prime)) - sin(latitude_rad)*
        sin(delta_zero_rad)) / (cos(latitude_rad)*cos
        (delta_zero_rad));

    if (fabs(argument) <= 1) h0 = limit_degrees180(rad2deg(acos(argument)));

    return h0;
}
```

```
void approx_sun_rise_and_set(double *m_rts, double h0)
{
    double h0_dfrac = h0/360.0;

    m_rts[SUN_RISE] = limit_zero2one(m_rts[SUN_TRANSIT] - h0_dfrac);
    m_rts[SUN_SET] = limit_zero2one(m_rts[SUN_TRANSIT] + h0_dfrac);
    m_rts[SUN_TRANSIT] = limit_zero2one(m_rts[SUN_TRANSIT]);
}
```

```
double rts_alpha_delta_prime(double *ad, double n)
{
    double a = ad[JD.ZERO] - ad[JD.MINUS];
    double b = ad[JD.PLUS] - ad[JD.ZERO];

    if (fabs(a) >= 2.0) a = limit_zero2one(a);
    if (fabs(b) >= 2.0) b = limit_zero2one(b);

    return ad[JD.ZERO] + n * (a + b + (b-a)*n)/2.0;
}
```

```
double rts_sun_altitude(double latitude, double delta_prime, double h_prime)
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
{
    double latitude_rad    = deg2rad(latitude);
    double delta_prime_rad = deg2rad(delta_prime);

    return rad2deg(asin(sin(latitude_rad)*sin(delta_prime_rad) +
        cos(latitude_rad)*cos(delta_prime_rad)*cos(deg2rad(h_prime))));
}

double sun_rise_and_set(double *m_rts,    double *h_rts,
double *delta_prime, double latitude, double *h_prime,
double h0_prime, int sun)
{
    return m_rts[sun] + (h_rts[sun] - h0_prime) / (360.0 *
        cos(deg2rad(delta_prime[sun])) * cos(deg2rad(latitude)) *
        sin(deg2rad(h_prime[sun])));
}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// Calculate required SPA parameters to get the right
// ascension (alpha) and declination (delta) Note: JD must
// be already calculated and in structure
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void calculate_geocentric_sun_right_ascension_and_declination(spa_data *spa)
{
    double x[TERMX_COUNT];

    spa->jc = julian_century(spa->jd);

    spa->jde = julian_ephemeris_day(spa->jd, spa->delta_t);
    spa->jce = julian_ephemeris_century(spa->jde);
    spa->jme = julian_ephemeris_millennium(spa->jce);

    spa->l = earth_heliocentric_longitude(spa->jme);
    spa->b = earth_heliocentric_latitude(spa->jme);
    spa->r = earth_radius_vector(spa->jme);

    spa->theta = geocentric_longitude(spa->l);
    spa->beta  = geocentric_latitude(spa->b);

    x[TERMX0] = spa->x0 = mean_elongation_moon_sun(spa->jce);
    x[TERMX1] = spa->x1 = mean_anomaly_sun(spa->jce);
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
x[TERMX2] = spa->x2 = mean_anomaly_moon(spa->jce);
x[TERMX3] = spa->x3 = argument_latitude_moon(spa->jce);
x[TERMX4] = spa->x4 = ascending_longitude_moon(spa->jce);

nutation_longitude_and_obliquity(spa->jce, x, &(spa->del_psi),
&(spa->del_epsilon));

spa->epsilon0 =
ecliptic_mean_obliquity(spa->jme);
spa->epsilon =
ecliptic_true_obliquity(spa->del_epsilon, spa->epsilon0);

spa->del_tau =
aberration_correction(spa->r);
spa->lamda =
apparent_sun_longitude(spa->theta, spa->del_psi, spa->del_tau);
spa->nu0 =
greenwich_mean_sidereal_time(spa->jd, spa->jc);
spa->nu =
greenwich_sidereal_time(spa->nu0, spa->del_psi, spa->epsilon);

spa->alpha =
geocentric_right_ascension(spa->lamda, spa->epsilon, spa->beta);
spa->delta =
geocentric_declination(spa->beta, spa->epsilon, spa->lamda);
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// Calculate Equation of Time (EOT) and Sun Rise, Transit, & Set (RTS)
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

void calculate_eot_and_sun_rise_transit_set(spa_data *spa)
{
    spa_data sun_rts;
    double nu, m, h0, n;
    double alpha[JD_COUNT], delta[JD_COUNT];
    double m_rts[SUN_COUNT], nu_rts[SUN_COUNT], h_rts[SUN_COUNT];
    double alpha_prime[SUN_COUNT], delta_prime[SUN_COUNT], h_prime[SUN_COUNT];
    double h0_prime = -1*(SUN_RADIUS + spa->atmos_refract);
    int i;
```



## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
    sun_rts = *spa;
m      = sun_mean_longitude(spa->jme);
spa->eot = eot(m, spa->alpha, spa->del_psi, spa->epsilon);

sun_rts.hour = sun_rts.minute = sun_rts.second = 0;
sun_rts.delta_ut1 = sun_rts.timezone = 0.0;

sun_rts.jd = julian_day (sun_rts.year, sun_rts.month,
sun_rts.day, sun_rts.hour, sun_rts.minute, sun_rts.second,
sun_rts.delta_ut1, sun_rts.timezone);

calculate_geocentric_sun_right_ascension_and_declination(&sun_rts);
nu = sun_rts.nu;

sun_rts.delta_t = 0;
sun_rts.jd--;
for (i = 0; i < JD_COUNT; i++) {
    calculate_geocentric_sun_right_ascension_and_declination(&sun_rts);
    alpha[i] = sun_rts.alpha;
    delta[i] = sun_rts.delta;
    sun_rts.jd++;
}

m_rts[SUN_TRANSIT] = approx_sun_transit_time(alpha[JD_ZERO],
spa->longitude, nu);
h0 = sun_hour_angle_at_rise_set(spa->latitude, delta[JD_ZERO],
h0_prime);

if (h0 >= 0) {

    approx_sun_rise_and_set(m_rts, h0);

    for (i = 0; i < SUN_COUNT; i++) {

        nu_rts[i]      = nu + 360.985647*m_rts[i];

        n              = m_rts[i] + spa->delta_t/86400.0;
        alpha_prime[i] = rts_alpha_delta_prime(alpha, n);
        delta_prime[i] = rts_alpha_delta_prime(delta, n);

        h_prime[i]     = limit_degrees180pm(nu_rts[i] +
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
spa->longitude = alpha_prime[i]);

h_rts[i] = rts_sun_altitude(spa->latitude,
delta_prime[i], h_prime[i]);
}

spa->srha = h_prime[SUN_RISE];
spa->ssha = h_prime[SUN_SET];
spa->sta = h_rts[SUN_TRANSIT];

spa->suntransit = dayfrac_to_local_hr(m_rts[SUN_TRANSIT] -
h_prime[SUN_TRANSIT] / 360.0, spa->timezone);

spa->sunrise = dayfrac_to_local_hr(sun_rise_and_set(m_rts, h_rts,
delta_prime, spa->latitude, h_prime, h0_prime, SUN_RISE),
spa->timezone);

spa->sunset = dayfrac_to_local_hr(sun_rise_and_set(m_rts, h_rts,
delta_prime, spa->latitude, h_prime, h0_prime, SUN_SET),
spa->timezone);

} else spa->srha= spa->ssha= spa->sta= spa->suntransit= spa->sunrise=
spa->sunset= -99999;

}

////////////////////////////////////
// Calculate all SPA parameters and put into structure
// Note: All inputs values (listed in header file) must
//already be in structure
////////////////////////////////////
int spa_calculate(spa_data *spa)
{
    int result;

    result = validate_inputs(spa);

    if (result == 0)
    {
        spa->jd = julian_day (spa->year, spa->month, spa->day,
        spa->hour, spa->minute, spa->second, spa->delta_ut1, spa->timezone);
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
calculate_geocentric_sun_right_ascension_and_declination (spa);

spa->h = observer_hour_angle (spa->nu, spa->longitude, spa->alpha);
spa->xi = sun_equatorial_horizontal_parallax (spa->r);

right_ascension_parallax_and_topocentric_dec (spa->latitude,
spa->elevation, spa->xi, spa->h, spa->delta, &(spa->del_alpha),
&(spa->delta_prime));

spa->alpha_prime = topocentric_right_ascension (spa->alpha,
spa->del_alpha);
spa->h_prime = topocentric_local_hour_angle (spa->h,
spa->del_alpha);

spa->e0 = topocentric_elevation_angle (spa->latitude,
spa->delta_prime, spa->h_prime);
spa->del_e = atmospheric_refraction_correction (spa->pressure,
spa->temperature, spa->atmos_refract, spa->e0);
spa->e = topocentric_elevation_angle_corrected
(spa->e0, spa->del_e);

spa->zenith = topocentric_zenith_angle (spa->e);
spa->azimuth_astro = topocentric_azimuth_angle_astro
(spa->h_prime, spa->latitude, spa->delta_prime);
spa->azimuth = topocentric_azimuth_angle (spa->azimuth_astro);

if ((spa->function == SPA_ZA_INC) || (spa->function == SPA_ALL))
    spa->incidence = surface_incidence_angle (spa->zenith,
    spa->azimuth_astro, spa->azm_rotation, spa->slope);

if ((spa->function == SPA_ZA_RTS) || (spa->function == SPA_ALL))
    calculate_eot_and_sun_rise_transit_set (spa);
}

return result;
}
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////Libreria .h del algoritmo////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

#ifndef __solar_position_algorithm_header
#define __solar_position_algorithm_header

//enumeration for function codes to select desired final outputs from SPA
enum {
    SPA_ZA,           //calculate zenith and azimuth
    SPA_ZA_INC,      //calculate zenith, azimuth, and incidence
    SPA_ZA_RTS,      //calculate zenith, azimuth,
                    //and sun rise/transit/set values
    SPA_ALL,         //calculate all SPA output values
};

typedef struct
{
    //-----INPUT VALUES-----

    int year;
    // 4-digit year, valid range: -2000 to 6000, error code: 1
    int month;
    // 2-digit month, valid range: 1 to 12, error code: 2
    int day;
    // 2-digit day, valid range: 1 to 31, error code: 3
    int hour;
    // Observer local hour, valid range: 0 to 24, error code: 4
    int minute;
    // Observer local minute, valid range: 0 to 59, error code: 5
    double second;
    // Observer local second, valid range: 0 to <60, error code: 6

    double delta_ut1;
    // Fractional second difference between UTC and UT which is used
    // to adjust UTC for earth's irregular rotation rate and is derived
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
// from observation only and is reported in this bulletin:  
// http://maia.usno.navy.mil/ser7/ser7.dat,  
// where delta_ut1 = DUT1  
// valid range: -1 to 1 second (exclusive), error code 17
```

```
double delta_t;  
// Difference between earth rotation time and terrestrial time  
// It is derived from observation only and is reported in this  
// bulletin: http://maia.usno.navy.mil/ser7/ser7.dat,  
// where delta_t = 32.184 + (TAI-UTC) - DUT1  
// valid range: -8000 to 8000 seconds, error code: 7
```

```
double timezone;  
// Observer time zone (negative west of Greenwich)  
// valid range: -18 to 18 hours, error code: 8
```

```
double longitude;  
// Observer longitude (negative west of Greenwich)  
// valid range: -180 to 180 degrees, error code: 9
```

```
double latitude;  
// Observer latitude (negative south of equator)  
// valid range: -90 to 90 degrees, error code: 10
```

```
double elevation;  
// Observer elevation [meters]  
// valid range: -6500000 or higher meters, error code: 11
```

```
double pressure;  
// Annual average local pressure [millibars]  
// valid range: 0 to 5000 millibars, error code: 12
```

```
double temperature;  
// Annual average local temperature [degrees Celsius]  
// valid range: -273 to 6000 degrees Celsius, error code; 13
```

```
double slope;  
// Surface slope (measured from the horizontal plane)  
// valid range: -360 to 360 degrees, error code: 14
```

```
double azm_rotation;
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
// Surface azimuth rotation (measured from south to projection of
//     surface normal on horizontal plane, negative east)
// valid range: -360 to 360 degrees, error code: 15

double atmos_refract;
// Atmospheric refraction at sunrise and sunset (0.5667 deg is typical)
// valid range: -5 to 5 degrees, error code: 16

int function;
// Switch to choose functions for desired output (from enumeration)

//-----Intermediate OUTPUT VALUES-----

double jd;
//Julian day
double jc;
//Julian century

double jde;
//Julian ephemeris day
double jce;
//Julian ephemeris century
double jme;
//Julian ephemeris millennium

double l;
//earth heliocentric longitude [degrees]
double b;
//earth heliocentric latitude [degrees]
double r;
//earth radius vector [Astronomical Units, AU]

double theta;
//geocentric longitude [degrees]
double beta;
//geocentric latitude [degrees]

double x0;
//mean elongation (moon-sun) [degrees]
double x1;
//mean anomaly (sun) [degrees]
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
double x2;  
    //mean anomaly (moon) [degrees]  
double x3;  
    //argument latitude (moon) [degrees]  
double x4;  
    //ascending longitude (moon) [degrees]  
  
double del_psi;  
    //nutration longitude [degrees]  
double del_epsilon;  
    //nutration obliquity [degrees]  
double epsilon0;  
    //ecliptic mean obliquity [arc seconds]  
double epsilon;  
    //ecliptic true obliquity [degrees]  
  
double del_tau;  
    //aberration correction [degrees]  
double lamda;  
    //apparent sun longitude [degrees]  
double nu0;  
    //Greenwich mean sidereal time [degrees]  
double nu;  
    //Greenwich sidereal time [degrees]  
  
double alpha;  
    //geocentric sun right ascension [degrees]  
double delta;  
    //geocentric sun declination [degrees]  
  
double h;  
    //observer hour angle [degrees]  
double xi;  
    //sun equatorial horizontal parallax [degrees]  
double del_alpha;  
    //sun right ascension parallax [degrees]  
double delta_prime;  
    //topocentric sun declination [degrees]  
double alpha_prime;  
    //topocentric sun right ascension [degrees]  
double h_prime;
```

## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
//topocentric local hour angle [degrees]

double e0;
//topocentric elevation angle (uncorrected) [degrees]
double del_e;
//atmospheric refraction correction [degrees]
double e;
//topocentric elevation angle (corrected) [degrees]

double eot;
//equation of time [minutes]
double srha;
//sunrise hour angle [degrees]
double ssha;
//sunset hour angle [degrees]
double sta;
//sun transit altitude [degrees]

//-----Final OUTPUT VALUES-----

double zenith;
//topocentric zenith angle [degrees]
double azimuth_astro;
//topocentric azimuth angle (westward from south) [for astronomers]
double azimuth;
//topocentric azimuth angle (eastward from north)
[for navigators and solar radiation] double incidence;
//surface incidence angle [degrees]

double suntransit;
//local sun transit time (or solar noon) [fractional hour]
double sunrise;
//local sunrise time (+/- 30 seconds) [fractional hour]
double sunset;
//local sunset time (+/- 30 seconds) [fractional hour]

} spa_data;

//Utility functions for other applications (such as NREL's SAMPA)-----
double deg2rad(double degrees);
double rad2deg(double radians);
```



## A.1 Algoritmo de Posicionamiento Solar (SPA)

---

```
double limit_degrees(double degrees);
double third_order_polynomial(double a, double b,
double c, double d, double x);
double geocentric_right_ascension(double lamda,
double epsilon, double beta);
double geocentric_declination(double beta,
double epsilon, double lamda);
double observer_hour_angle(double nu, double longitude,
double alpha_deg);
void right_ascension_parallax_and_topocentric_dec(double latitude,
double elevation, double xi, double h, double delta,
double *delta_alpha, double *delta_prime);
double topocentric_right_ascension(double alpha_deg,
double delta_alpha);
double topocentric_local_hour_angle(double h,
double delta_alpha);
double topocentric_elevation_angle(double latitude,
double delta_prime, double h_prime);
double atmospheric_refraction_correction(double pressure,
double temperature, double atmos_refract, double e0);
double topocentric_elevation_angle_corrected(double e0,
double delta_e);
double topocentric_zenith_angle(double e);
double topocentric_azimuth_angle_astro(double h_prime,
double latitude, double delta_prime);
double topocentric_azimuth_angle(double azimuth_astro);

//Calculate SPA output values (in structure)
based on input values passed in structure
int spa_calculate(spa_data *spa);

#endif
```