

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Secretaría Académica, de Investigación e Innovación  
Dirección de Posgrado, Investigación e Innovación

**cenidet**<sup>®</sup>  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

# Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

## TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Comparación del Desempeño de un Sistema Fotovoltaico en  
Modalidades Fija y Móvil**

presentada por

**Ing. Sandra Ortiz López**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica**

Director de tesis

**Dr. Marco Antonio Oliver Salazar**

Codirector de tesis

**Dr. Mario Ponce Silva**

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2016.



Cuernavaca, Mor., 2 de junio de 2016.

OFICIO No. DIE/0119/2016  
Asunto: Aceptación de documento de tesis

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la **C. Sandra Ortiz López** con número de control **M14CE029** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Comparación del Desempeño de un Sistema Fotovoltaico en Modalidades Fija y Móvil"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Marco Antonio Oliver Salazar  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 6526083

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Mario Ponce Silva  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 3516427

REVISOR 1

Dr. Carlos Aguilar Castillo  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 3581040

REVISOR 2

Dr. Victor Hugo Olivares Peregrino  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 5999002

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Estudiante  
Expediente

CMAZ/tr





Cuernavaca, Mor., 3 de junio de 2016  
OFICIO No. SAC/190/2016

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**ING. SANDRA ORTIZ LÓPEZ  
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Comparación del Desempeño de un Sistema Fotovoltaico en Modalidades Fija y Móvil**", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DE MÉXICO"

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Expediente

GVGR/mcr



## DEDICATORIA

*A mis padres porque gracias a ellos afronto la vida con alegría, porque tengo el amor de dos seres que confían en mí y apoyan mis decisiones, gracias queridos padres por todo lo que hicieron por mí desde pequeña, los amo.*

*A mi mamá:*

*Juana López Quechuleño*

*A mi papá:*

*Crisanto Ortiz Ortiz*

## *AGRADECIMIENTOS:*

Muchas gracias a mis papás por ser un excelente ejemplo de sacrificio y esfuerzo para mí y a mis hermanos Angélica Ortiz López y Saúl Alejandro Ortiz López por inspirarme a ser mejor cada día, los amo.

A mi asesor el Dr. Marco Antonio Oliver Salazar, por su tiempo, asesorías y compartir su conocimiento para el desarrollo de este trabajo.

A mi coasesor el Dr. Mario Ponce Silva y a mis revisores el Dr. Carlos Aguilar Castillo y el Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino por sus valiosos consejos y orientación.

A los Doctores que compartieron sus conocimientos en clases: Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich, Dr. Jesús Aguayo Alquicira, Dr. Abraham Claudio Sánchez, Dr. Jesús Darío Mina Antonio.

Al Dr. Andrés Blanco Ortega, al Dr. Moisés Román Sedeno y al M.C. Fabio Gómez por su tiempo y paciencia en las asesorías.

A Verónica Cristina Tentle Ortiz por ser una buena prima, amiga, apoyarme y frecuentarme siempre.

A José Luis Salgado Doroteo por su compañía, apoyo y momentos compartidos. Te amo.

A Lorena Ruíz y Ana María Pérez por su apoyo en el proceso y trámites de titulación.

A mis familiares, amigos y compañeros por el apoyo, momentos de convivencia, comunicarse conmigo y preocuparse por mí.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico proporcionado para la realización de esta tesis.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por brindarnos programas educativos de calidad y lineamientos para llevar a cabo esta tesis.

Al Centro Nacional De Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.



# RESUMEN

---

En este trabajo se presentan dos prototipos virtuales de seguidores solares, uno de dos grados de libertad y otro de un grado de libertad, de igual manera se presentan modelos de irradiancias<sup>1</sup> y el modelado de un arreglo de tres paneles para los casos: fijo, seguidor de un eje y seguidor de dos ejes. Todo ello con el fin de comparar el porcentaje de ganancia de energía en un sistema fotovoltaico al que se le agrego un seguidor solar.

Posicionar el panel de manera perpendicular a los rayos del sol aumenta la energía disponible a la salida del panel pero reposicionar el seguidor solar consume energía, es por ello que se necesita saber la producción de energía generada y consumida en cada caso para evaluar la conveniencia de optar por un seguidor solar en un sistema fotovoltaico o no.

El bosquejo y diseño asistido por computadora se realizó con ayuda del software SolidWorks®. Una vez terminada la estructura se importó el diseño al software Adams®, en el cual se trabajó la dinámica del seguidor solar para adecuarlo a las características necesarias de control de posición de los ejes, se asignó el tipo de material a la estructura y se crearon marcas de referencia fijas y móviles que nos permiten medir la posición y velocidad de los ejes. Una vez terminado el diseño en Adams® se exportó la planta a Simulink® de Matlab® para medir la energía requerida en un día y mover el mecanismo tomando en cuenta el material y dimensiones con las que está diseñado.

El control utilizado fue un Proporcional Integral Derivativo (PID) hecho en Simulink® de Matlab® encargado de controlar la posición de los ejes, la trayectoria que deben de seguir éstos se especifica en un bloque de referencia. A la salida del sistema hay medidas de posición

---

<sup>1</sup> **Irradiancia:** Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de la radiación electromagnética emitida por el sol, su unidad de medida es  $W/m^2$  en el Sistema Internacional.

y velocidad de los ejes, esas señales se retroalimentan y comparan con la referencia para ser corregidas por el control PID.

Con el fin de evaluar un sistema fotovoltaico fijo con uno que incluya un seguidor solar, se modeló un arreglo de tres paneles en Simulink®, ya que éste es el número de paneles que soporta la estructura. Para conocer la energía promedio producida en un día por los paneles de acuerdo a la irradiancia promedio anual que hay en Cuernavaca, se hicieron los modelos de irradiancia sobre una superficie horizontal, sobre una superficie inclinada, también para un seguidor solar de un eje y un seguidor solar de dos ejes.

# ABSTRACT

---

In this work two virtual prototypes of solar trackers are presented, with one and two degrees of freedom, correspondingly. Models of irradiance and for an arrangement of three panels with fixed, one axis and two axes are presented, in order to compare the percentage of energy gain in a photovoltaic system with and without a solar tracker.

A perpendicular panel position with respect to the sun's rays increases the energy available at the output of the panel but repositioning of the solar tracker consumes energy. Therefore, it is important to know the production of energy generated and consumed for each one of the three cases (fixed, one axis and two axes) to assess the appropriateness of choosing a solar tracker in a photovoltaic system or not.

The drafting and computer-aided design was performed using the SolidWorks® software and imported into Adams® software to work out the dynamics of the solar tracker and the necessary axis position control according to the mechanical structure and the material type so that the position and velocity of the axes can be estimated. Once the plant design is completed in Adams®, it is transported to Matlab Simulink® to measure the energy required in a day to move the mechanism taking into account the material and dimensions with which it is designed.

The control of the axes position to track the sun's path was done by the use of a proportional-integral-derivative (PID) controller and implemented in Matlab Simulink®. The position and velocity of the axes are feedback and compared with their references so that the error can be corrected by the PID control.

In order to evaluate a fixed photovoltaic system with one that includes a solar tracker, an arrangement of three panels was modeled in Simulink®, as this is the number of panels supported by the proposed structure. To know the average energy produced in one day by the

panels according to the average annual irradiance in Cuernavaca, models irradiance were developed for a horizontal surface and an inclined surface in a solar tracker with one and two shafts.



# CONTENIDO

---

CONTENIDO .....	I
LISTA DE FIGURAS .....	III
LISTA DE TABLAS .....	V
ACRONIMOS.....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	2
1.2.    PROPUESTA. ....	2
1.3.    OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.    OBJETIVOS PARTICULARES. ....	3
1.5.    JUSTIFICACIÓN. ....	4
1.6.    ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
1.7.    ESTADO DEL ARTE.....	6
1.8.    CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE.....	8
1.9.    ESTRUCTURA DE LA TESIS. ....	9
<b>CAPÍTULO 2 CONSIDERACIONES DE LOS SEGUIDORES SOLARES .....</b>	<b>11</b>
2.1.    MOVIMIENTOS DEL PLANETA CON RESPECTO AL SOL. ....	11
2.2.    HORA SOLAR.....	13
2.3.    RUTA DEL SOL VISTA POR UN OBSERVADOR DESDE LA TIERRA. ....	14
2.4.    RECORRIDO DEL SOL EN CUERNAVACA. ....	16
2.5.    MODELOS DE IRRADIACIÓN SOLAR EN CUERNAVACA.....	17
2.6.    TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES. ....	20
2.7.    SELECCIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR. ....	23
2.8.    DISEÑO DE LOS SEGUIDORES SOLARES EN SOLIDWORKS®. ....	23
2.8.1.    DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	23
2.8.2.    DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE POLAR. ....	28
<b>CAPÍTULO 3 ESTUDIO CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE LAS ESTRUCTURAS EN ADAMS® Y SIMULINK® DE MATLAB® .....</b>	<b>29</b>
3.1.    PROTOTIPOS VIRTUALES EN ADAMS®. ....	29
3.2.    CONTROL DE POSICIÓN DE LOS EJES EN SIMULINK®. ....	30
3.3.    ENERGÍA CONSUMIDA POR EL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES. ....	35
3.4.    ENERGÍA CONSUMIDA POR EL SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE.....	37
<b>CAPÍTULO 4 ENERGÍA GENERADA A LA SALIDA DE LOS PANELES EN LOS CASOS FIJO, SEGUIDOR DE UN EJE Y DE DOS EJES.....</b>	<b>39</b>

4.1.	MODELADO DE PANEL FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO. ....	39
4.2.	POTENCIA DE SALIDA DEL PANEL.....	44
4.3.	POTENCIA DE SALIDA EN PANELES CON SOMBREADO PARCIAL.....	45
4.4.	ENERGÍA GENERADA A LA SALIDA DE LOS PANELES. ....	47
4.5.	EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS SFV's.....	49
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....</b>		<b>53</b>
5.1.	CONCLUSIONES. ....	53
5.2.	RECOMENDACIONES A TRABAJOS FUTUROS. ....	54
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>55</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>58</b>
ANEXO A: HOJA DE DATOS DEL PANEL SOLARTEC S60PC-250. ....		58
ANEXO B: HOJA DE DATOS DEL MOTOR WEG <i>CÓDIGO DE REFERENCIA 00236OS1P56</i> . ....		60

# LISTA DE FIGURAS

---

<i>Figura 1.1 Radiación solar diaria promedio anual en la República Mexicana.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.1 Movimiento de traslación de la tierra. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.2 Variación en la declinación por efecto del movimiento de traslación. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.3 Hora solar. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.4 Ubicación del sol.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.5 Recorrido del sol en Cuernavaca. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.6 Media anual de irradiación en un día.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.7 Seguidor solar pasivo.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.8 Seguidor solar de un eje azimutal. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.9 Seguidor solar de un eje horizontal. ....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.10 Seguidor solar de un eje polar. ....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.11 Seguidor solar de dos ejes. ....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.12 Base del seguidor solar.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.13 Base que incluye rodamientos.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.14 Mecanismo de eje azimutal.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.15 Base de eje horizontal con rodamientos.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.16 Mecanismo de eje horizontal. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.17 Seguidor solar de dos ejes. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.18 Seguidor solar de un eje polar. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.1 Diseño del seguidor en Adams®.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.2 Sistema de control en lazo cerrado en Simulink®. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.3 Sistema del péndulo controlado. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.4 Trayectoria Azimutal. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.5 Trayectoria Horizontal.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.6 Trayectoria horizontal del seguidor de un eje. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.7 Plata del seguidor de dos ejes exportada a Simulink®.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.8 Energía consumida del eje azimutal.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.9 Energía consumida por el eje horizontal. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.10 Planta del seguidor de un eje exportada a Simulink®.....</i>	<i>37</i>

<i>Figura 3.11 Energía consumida por el seguidor de un eje. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.1 Circuito equivalente a una celda fotovoltaica. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.2 Corrientes típicas en una celda fotovoltaica. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.3 Esquema de simulación de panel fotovoltaico en Simulink®. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.4 Curvas de corriente vs voltaje obtenidas en simulación variando irradiancia.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.5 Potencia de salida del panel. ....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.6 Sombreado parcial de paneles fijos con inclinación. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.7 Sombreado parcial de paneles sobre el seguidor de un eje.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.8 Sombreado parcial de paneles sobre el seguidor de dos ejes.....</i>	<i>47</i>

# LISTA DE TABLAS

---

<i>Tabla 1.1 Estado del arte.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 4.1 Parámetros del panel Solartec S60PC-250 bajo condiciones estándar de prueba.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4.2 Comparación entre panel comercial y panel modelado. ....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4.3 Ganancia de energía promedio anual generada a la salida de los paneles.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4.4 Evaluación y comparación de generación de energía de los SFV's. ....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4.5 Características del motor del seguidor de un eje polar.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 4.6 Pérdida del motor. ....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 4.7 Generación de energía del seguidor de un eje polar tomando en cuenta las pérdidas del motor y driver. .....</i>	<i>51</i>

# ACRONIMOS

---

SFV	Sistema Fotovoltaico
PID	Proporcional Integral Derivativo
CAD	Diseño Asistido por Computadora
FV	Fotovoltaico
CENIDET	Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
IER	Instituto de Energías Renovables
CONRICyT	Consortio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
TecNM	Tecnológico Nacional de México

# SIMBOLOGÍA

---

$ET$	Ecuación del tiempo
$\chi$	Ángulo de desviación
$N$	Día del año
$LI$	Longitud del tiempo
$TS$	Tiempo solar
$TC$	Tiempo civil
$d$	Ángulo de declinación de la tierra
$hs$	Ángulo horario
$h$	Ángulo de altura del sol
$L_l$	Latitud del lugar
$as$	Ángulo de azimut del sol
$\theta_a$	Ángulo formado entre la normal de la superficie y la dirección de propagación de la radiación
$G_T$	Irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación
$G_n$	Irradiancia medida sobre un plano normal a la dirección de propagación de la radiación
$\Phi$	Latitud geográfica del plano en cuestión
$B$	Pendiente del plano sobre el cual incide la radiación
$\gamma$	Azimut de la superficie
$\Omega$	Ángulo horario
$I_i$	Irradiación
$G$	Irradiancia
$l$	Longitud
$m$	Partícula
$\tau$	Torque o par
$q_1$	Un grado de libertad
$L$	Lagrangiano del sistema
$T$	Energía cinética
$V$	Energía potencial
$g$	Gravedad $9.8 \text{ m/s}^2$
$\theta$	Ángulo al que oscila $m$
$K_p$	Constante proporcional
$K_I$	Constante integral
$K_D$	Constante derivativa
$\omega_n$	Frecuencia natural del sistema
$\zeta$	Factor de amortiguamiento

$I_{ph}$	Corriente proporcional a la luz recibida
$I_d$	Corriente de diodo
$I_{sh}$	Corriente de fuga
$D$	Diodo
$R_p$	Resistencia en paralelo de la celda FV
$R_s$	Resistencia en serie de la celda FV
$I$	Corriente de la celda
$G_{ref}$	Irradiancia de referencia
$I_{sc}$	Corriente nominal de corto circuito
$V$	Voltaje
$K_I$	Constante de dependencia de $I_{sc}$
$T_{op}$	Temperatura operacional
$T_{ref}$	Temperatura de referencia
$n$	Factor de idealidad del diodo
$C$	Número de celdas en el panel
$I_s$	Corriente de saturación del diodo
$V_t$	Voltaje térmico
$K$	Constante de Boltzman
$q$	Carga del electrón
$E_g$	Brecha energética del semiconductor
$E_T$	Energía recaudada con seguimiento solar
$E_{FI}$	Energía recaudada con panel fijo inclinado
$E_c$	Energía consumida para el seguimiento del sol
$E_F$	Energía generada por el panel fijo horizontal
PM	Perdidas del motor



---

---

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

---

---

Es necesario fomentar el uso de energías renovables debido a los efectos negativos hacia el planeta tierra como lo son la lluvia acida, el efecto invernadero y el adelgazamiento de la capa de ozono. Dichos efectos son la consecuencia del uso de combustibles fósiles que producen la emisión de gases que resultan tóxicos para la vida.

El uso de un seguidor solar en un sistema fotovoltaico (SFV) aumenta la producción de energía disponible a la salida del arreglo de paneles, debido a que la eficiencia de un panel está directamente relacionada con la irradiancia que reciba éste a lo largo del día. La desventaja del uso de un seguidor solar es el consumo de energía que se necesita para reposicionar el seguidor en un lapso de tiempo y así cumpla su función de colocar de manera perpendicular el panel con respecto a los rayos del sol, ya que de esta manera estaría recibiendo el 100% de la irradiancia disponible en ese momento en el medio ambiente, es por ello que se evaluó el uso de un seguidor solar para los casos de seguidores controlados de uno y dos ejes contra un SFV fijo.

Los SFV's convierten la energía solar en energía eléctrica y son cada vez más utilizados para reemplazar el campo de la energía eléctrica generada a partir de combustibles fósiles. Nuevos métodos para mejorar la eficiencia energética y económica del SFV se desarrollan constantemente. Una de ellas consiste en agregar un sistema de rastreo para seguimiento del sol, a pesar de que los nuevos componentes aumentan el costo de todo el sistema, conviene usarlos ya que generan ganancias de energía superior al 30%, más que los sistemas fijos [1]. Los seguidores solares pueden ser de dos ejes o de uno, el de dos ejes realiza cambios de posición diarios y estacionales, el segundo solo realiza movimientos diarios.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los SFV requieren una inversión inicial relativamente alta, lo cual hace necesario aprovechar al máximo la energía que cada panel pueda proporcionar. La vida útil de los SFV es superior a los 20 años [2], por lo que un ligero incremento en el aprovechamiento de la energía se convierte en un factor muy importante a lo largo de este periodo.

Sin embargo, la energía entregada por los SFV depende de muchas variables dictadas por las condiciones climáticas y situación física del lugar donde se encuentre el sistema. En general, la potencia de salida de un módulo fotovoltaico se cambia sustancialmente de acuerdo con la irradiancia y movimiento del sol, es por ello que existen diferentes estrategias de seguimiento solar físico. Este seguimiento se puede realizar manualmente o automáticamente. En seguimiento manual, la orientación del panel fotovoltaico se cambia manualmente en el comienzo de cada temporada a un ángulo predeterminado. En el caso de seguimiento automático, el panel está montado en un mecanismo de un solo eje o mecanismo de seguimiento multi-eje y es controlado para seguir la trayectoria de los rayos del sol en todo el día.

Los rasgos generales que caracterizan a un mecanismo eficiente de seguimiento son: capacidad de cubrir una amplia trayectoria de seguimiento del sol, robustez frente a las perturbaciones del viento y bajo consumo de energía.

## 1.2. PROPUESTA.

Se estudiaron las características de los seguidores solares de dos ejes y de un eje, se hicieron prototipos virtuales de ambos con seguimiento solar astronómico para descartar el uso de sensores de irradiancia. El seguimiento solar astronómico posee rasgos que caracterizan a un mecanismo eficiente de seguimiento del sol ya que tiene capacidad de cubrir

una amplia trayectoria en el seguimiento del sol porque no depende de las condiciones climáticas, a eso le sumamos que no se consume energía para el funcionamiento de sensores.

Se modeló la irradiancia que se obtiene en un día en Cuernavaca, Morelos, sobre una superficie horizontal, sobre una superficie inclinada, la que se obtendría con un seguidor de dos ejes y un eje. Una vez que se tuvieron los modelos de irradiancia se calculó la energía disponible a la salida del arreglo de paneles, los cuales se modelaron en Simulink®, después se le restó a los seguidores la energía consumida a lo largo del día por los motores que mueven los ejes para obtener el porcentaje de ganancia de energía en comparación con un SFV fijo.

Se debe tomar en cuenta que el sistema móvil recolecta más energía pero también consumen corriente los motores para mover la estructura. De esta manera se evaluó la conveniencia de optar por alguno de estos sistemas (ya sea fijo o con seguimiento solar de uno o dos grados de libertad).

### 1.3. OBJETIVO GENERAL.

Estudio del desempeño de un sistema fotovoltaico fijo y móvil.

### 1.4. OBJETIVOS PARTICULARES.

- Modelado de un sistema fotovoltaico fijo.
- Modelado de un sistema fotovoltaico móvil.
- Simulación de resultados.
- Evaluar la conveniencia de usar un esquema móvil sobre un esquema fijo.

---

## 1.5. JUSTIFICACIÓN.

En la actualidad se buscan soluciones ante la crisis ambiental que se está presentando, el uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica o térmica disminuirá el uso de combustibles fósiles, los cuales provocan el adelgazamiento de la capa de ozono, precipitación ácida y efecto invernadero, entre otros daños ambientales.

El sol es una fuente de energía renovable que se distingue de entre las demás debido a que en un año emite sobre la tierra cuatro mil veces más energía de la que se consume a nivel global.

En Cuernavaca, Morelos, se cuenta con buenos niveles de irradiación a nivel nacional según se aprecia en la figura 1.1 [3]. Es por ello que es viable el uso de un SFV, el cual ayuda a disminuir considerablemente el pago mensual al proveedor que nos proporciona el servicio de energía eléctrica.

Un seguidor solar es un dispositivo de optimización de un SFV, su objetivo es aumentar la captación de radiación<sup>2</sup> solar y por consecuencia la energía suministrada por el SFV, su fin es posicionar de manera perpendicular los paneles con los rayos del sol.

Hay varios diseños de seguidores solares y se clasifican según su tipo de movimiento principalmente, en este trabajo se evaluó el uso de un seguidor solar en un SFV tomando en cuenta el consumo de energía de los motores que reposicionan los ejes.

---

<sup>2</sup> **Radiación:** Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. En donde la irradiación se está calculando desde el tiempo  $t_1$  hasta el tiempo  $t_2$  y la irradiación se considera función del tiempo.



La limitación en este trabajo de investigación es el hecho de que solo se cuenta con prototipos virtuales de los seguidores solares y por medio de esto se llegará a la conclusión del consumo de energía requerido para la trayectoria diaria. En los modelos de irradiancia igual se hicieron simulaciones pero se tiene como referencia las mediciones que se han hecho en el IER (Instituto de Energías Renovables) y el IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas).

## 1.7. ESTADO DEL ARTE.

Los trabajos similares realizados previamente a este trabajo de tesis fueron obtenidos de la base de datos del Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnología (CONRICyT) que permite el acceso a publicaciones de IEEE y Elsevier, de donde provienen los artículos que sirvieron de referencia a este trabajo y se muestran en la tabla 1.1.

El uso de seguidores solares implica el estudio de diversas condiciones que cambian durante todo el año, esto es lo que provoca la diferencia en el porcentaje de ganancia de energía reportado en las referencias que se muestran a continuación. Por ejemplo las comparaciones de un sistema fijo y uno con seguimiento se pueden llevar a cabo tomando en cuenta diferentes aspectos y en base a ello la comparación de la ganancia reportada puede ser mayor o menor.

Tabla 1.1 Estado del arte.

<i>Tipo de seguidor</i>	<i>Segundo eje</i>	<i>Forma de evaluación</i>	<i>Comparado con:</i>	<i>Ganancia</i>	<i>Referencia</i>	<i>Se restan energía consumida por seguidor</i>	<i>Irradiación tomada en cuenta</i>
<i>Seguidor estacional</i>	Inclinación fija	Simulación y experimentación	Inclinación fija a 40°	2.4%	[4]	No	Media anual
<i>Dos ejes</i>	-	Real	Horizontal	23%	[5]	No	Media anual
<i>Dos ejes</i>	-	Real	Fijo inclinado al sur	27.5%	[6]	No	Media anual
<i>Dos ejes</i>	-	Teórico	Seguidor de un eje polar	0%	[7]	No	Media anual
<i>Dos ejes</i>	-	Teórico	Eje horizontal N-S	26.2%	[7]	No	Media anual
<i>Dos ejes</i>	-	Teórico	Eje horizontal E-O	10.9%	[7]	No	Media anual
<i>Seguidor N-S</i>	Inclinación fija	Experimental	Fijo con inclinación	30-45 %	[8]	No	Media anual
<i>Seguidor de un eje E-O</i>	Inclinación fija	Experimental	Seguimiento completo	-5%	[9]	No	Media anual
<i>Seguidor de un eje E-O</i>	Inclinación fija	Experimental	Fijo con inclinación	30%	[10]	No	Media anual
<i>Seguidor E-O</i>	Inclinación fija	Experimental	Fijo con inclinación	40%	[11]	No	Media anual
<i>Seguidor azimutal</i>	Inclinación fija	Experimental	Fijo con inclinación	31%	[12]	No	Un día de verano

<i>Seguidor de un eje horizontal N-S</i>	Se puede ajustar según la estación del año	Simulación	Fijo con inclinación	39.78%	[13]	Si	Solsticio de verano
<i>Seguidor solar de un eje horizontal E-O</i>	Se puede ajustar según la estación del año	Simulación	Fijo con inclinación	39.42%	[14]	Si	Solsticio de verano
<i>Seguidor solar de un eje</i>	Inclinación fija	Simulación	Fijo con inclinación	39.78%	[15]	Si	Solsticio de verano
<i>Seguidor de dos ejes</i>		Experimental	Fijo con inclinación	41.34%	[16]	No	5 días del mes de mayo

## 1.8. CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE.

En base a la revisión del estado del arte se tomó la decisión de comparar los sistemas móviles con un SFV fijo que tienen los paneles inclinados con el ángulo equivalente al de la latitud del lugar. Ésta es la manera conveniente de colocarlos ya que así recaudan más energía y no de manera horizontal. Algunas comparaciones en las referencias están hechas con la energía recaudada por un panel horizontal, esto provoca que la ganancia reportada de los seguidores aumente debido a que los paneles horizontales recaudan menos energía que los inclinados.

También se hizo el cálculo del porcentaje de ganancia de energía en base a la irradiación<sup>3</sup> solar diaria promedio anual. Los días del año en los que se recauda más irradiación son los equinoccios de primavera y otoño, en los solsticios de verano e invierno hay menor

---

<sup>3</sup> **Irradiación:** Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. En dónde la irradiación se está calculando desde el tiempo  $t_1$  hasta el tiempo  $t_2$  y la irradiancia se considera función del tiempo.

irradiación, es por esto que la irradiación tomada en cuenta para el cálculo será una media anual.

Otra decisión tomada en base a las referencias es la de estudiar el uso de seguidores solares controlados con actuadores eléctricos debido a que son los que reportan en la literatura mayor ganancia de energía.

En la mayoría de los trabajos no se tomó en cuenta la energía consumida por los actuadores que mueven el seguidor, ni las pérdidas eléctricas de dichos dispositivos. Esta energía impacta de manera negativa la ganancia de energía que se busca obtener con un seguidor solar, es por ello que en este trabajo de tesis se tomaron en cuenta esos aspectos para no idealizar el uso de seguidores solares y obtener resultados confiables.

Para este trabajo de tesis es importante tomar una decisión de la conveniencia de optar por un sistema móvil o uno fijo, es por ello que se toman en cuenta aspectos que no se contemplaron en trabajos anteriores y de esta manera saber si conviene agregarle un seguidor solar a un SFV o no y en caso de que si convenga bajo qué condiciones y características ayudaría en la optimización del sistema.

## 1.9. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

A continuación se explica de manera resumida el contenido de cada capítulo con el fin de que el lector pueda abordar temas en específico que sean de su interés. Organización de la tesis:

Capítulo 2. En este apartado se muestran las consideraciones a tomar en cuenta en un seguidor solar, tales como el recorrido del sol diario y por qué varía durante todo el año. También se muestran los modelos de irradiación solar diaria promedio anual en Cuernavaca que se tienen en una superficie horizontal, en una superficie inclinada con un ángulo

equivalente al de la latitud del lugar, seguidor de un eje y de seguidor de dos ejes. Estos modelos de irradiación solar son necesarios para conocer la cantidad de energía disponible a la salida del panel a lo largo del día dependiendo de la irradiancia disponible en cada caso. También se muestran los tipos de seguidores solares y se justifica la decisión de la selección del tipo de seguidor de un eje, que se comparan con el seguidor de dos ejes y el caso fijo. Al final de este capítulo se muestra el diseño asistido por computadora (CAD) que se realizó con ayuda del software SolidWorks® para el diseño del seguidor de uno y dos grados de libertad.

Capítulo 3. Una vez que se terminó el diseño del seguidor en SolidWorks® se exportó al software Adams®, el cual nos permitió simular mecanismos para predecir el comportamiento cinemático y dinámico, se adecuó el mecanismo a los requerimientos necesarios de control y después se exportó la planta a Simulink® de Matlab® en donde se controlaron los movimientos del seguidor para que siguieran una trayectoria especificada. De esta manera es como se calculó la energía necesaria para mover los ejes, todo ello se describe en este capítulo.

Capítulo 4. En este capítulo se muestra el modelado de un panel de 250 W y la estimación de energía generada a la salida de un arreglo de tres paneles en los casos: horizontal, inclinado con ángulo de la latitud de la ubicación, seguidor de un eje y seguidor de dos ejes. Para esto se utilizaron los modelos de irradiancia mostrados en el capítulo dos. También se muestran graficas de la potencia de salida de los SFV's en caso de que haya sombreado parcial en el arreglo de paneles. Por ultimo en este capítulo se compara la generación de energía de los SFV's con y sin seguidor solar.

Capítulo 5. Aquí se explican las conclusiones a las que se llegó con este trabajo y se mencionan algunas recomendaciones para trabajos futuros similares a éste.

---

---

# CAPÍTULO 2 CONSIDERACIONES DE LOS SEGUIDORES SOLARES

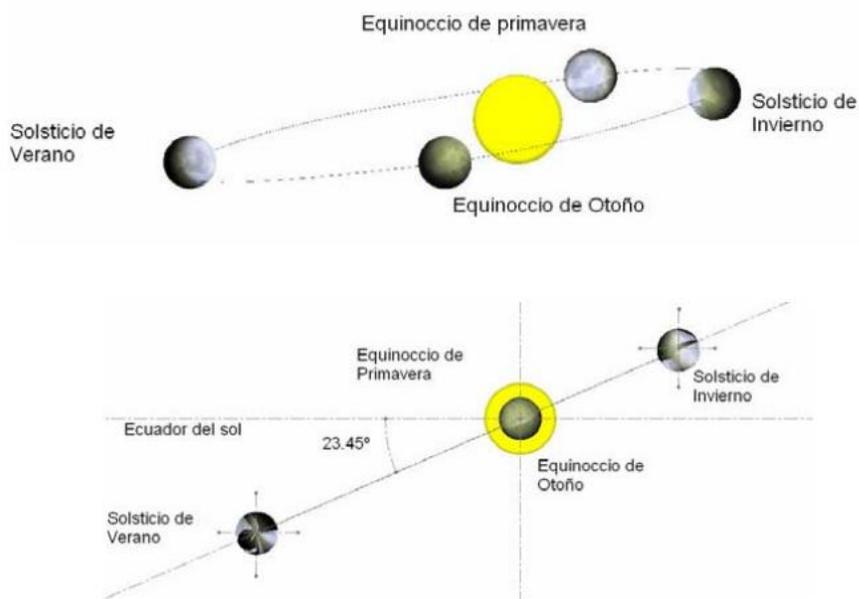
---

---

Se necesita tener en cuenta algunos conceptos y cálculos para modelar un seguidor solar, como el movimiento del planeta alrededor de su eje y el que hace alrededor del sol. También se debe conocer el lugar que ocupa, es decir sus coordenadas terrestres, todo ello está sujeto a las leyes de la dinámica celeste. Tomaremos en cuenta para nuestro estudio aquellos movimientos en los que se ve envuelta la tierra con respecto al sol, del cual depende toda la vida que existe. **MOVIMIENTOS DEL PLANETA CON RESPECTO AL SOL.**

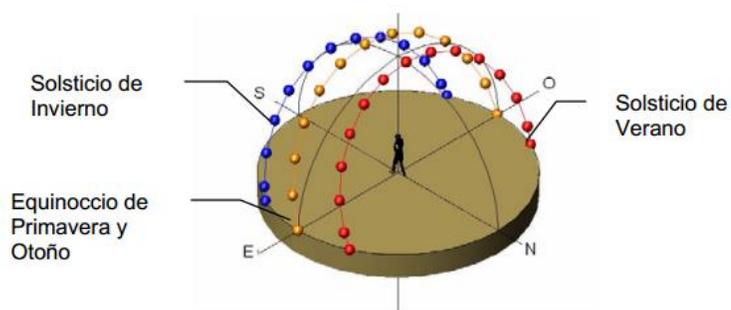
La tierra realiza dos movimientos que inciden en la posición relativa de un punto en su superficie con respecto al sol, el movimiento que más afecta esta posición es el de rotación, movimiento que realiza la tierra sobre su propio eje con una duración que se ha sintetizado a 24 horas, así se da lugar al día y la noche ya que durante el giro la mitad de la tierra está iluminada y la otra mitad está en penumbra [17].

El segundo movimiento que realiza la tierra es el de traslación que se refiere al movimiento que realiza la tierra alrededor del sol. El movimiento de traslación tarda en realizarse 365 días, 5 horas, 48 minutos y 45 segundos, esto se redondea a 365 días, 6 horas es por ello que cada cuatro años (año bisiesto) se redondea en 366 días. Durante el recorrido la tierra presenta una trayectoria elíptica alrededor del sol. La trayectoria elíptica de la tierra alrededor del sol tiene un ángulo con respecto a la horizontal del Ecuador solar de  $23.45^\circ$  como se ilustra en la figura 2.1.



**Figura 2.1** Movimiento de traslación de la tierra [17].

El movimiento de traslación de la tierra genera que la trayectoria aparente del sol, ocasionada por el movimiento de rotación, presente una variación diaria durante todo el año en el ángulo de declinación, como se muestra en la figura 2.2, con respecto al observador.



**Figura 2.2** Variación en la declinación por efecto del movimiento de traslación [17].

## 2.2. HORA SOLAR.

Un día solar es el tiempo que tarda el sol en pasar dos veces por el mismo punto, tiene una duración aproximada de 24 horas y siempre a las 12 horas el sol se relacionará con el meridiano correspondiente. La aplicación exacta de este tiempo sería poco práctica, por lo que se estandarizó a 24 horas y se crearon los husos horarios para que comunidades cercanas cuenten con el mismo horario, obteniéndose la hora civil, es posible calcular la hora solar con la hora civil, con lo que se puede saber la posición exacta del sol. Para calcular la hora solar es necesario calcular la ecuación del tiempo [17].

$$ET = 12 + (0.1236 \sin x - 0.0043 \cos x) + (0.1583 \sin 2x + 0.0608 \cos 2x) \quad (2.1)$$

En donde  $x$  es el ángulo de desviación de acuerdo al día  $N$  del año:

$$x = \frac{360 (N - 1)}{365.2422} \quad (2.2)$$

La longitud del tiempo estándar del lugar está determinada por:

$$LI = (\text{longitud del lugar} - \text{meridiano de referencia})/15^\circ \quad (2.3)$$

El valor del meridiano de referencia corresponde al del uso horario del lugar donde se desea realizar el cálculo. Para finalmente calcular el tiempo solar (TS) se tiene:

$$TS = TC - ET - LI \quad (2.4)$$

donde TC es tiempo civil.

La diferencia entre la hora civil y la hora solar presenta un valor distinto a lo largo del año. La figura 2.3 nos indica la cantidad de minutos de diferencia de la hora solar con la hora civil a las 12 horas. El eje de los minutos nos indica la cantidad de minutos que hay que sumar al reloj de la hora civil para saber cuándo es las 12 (hora solar), en función de los minutos que corresponden según el número de día del año.

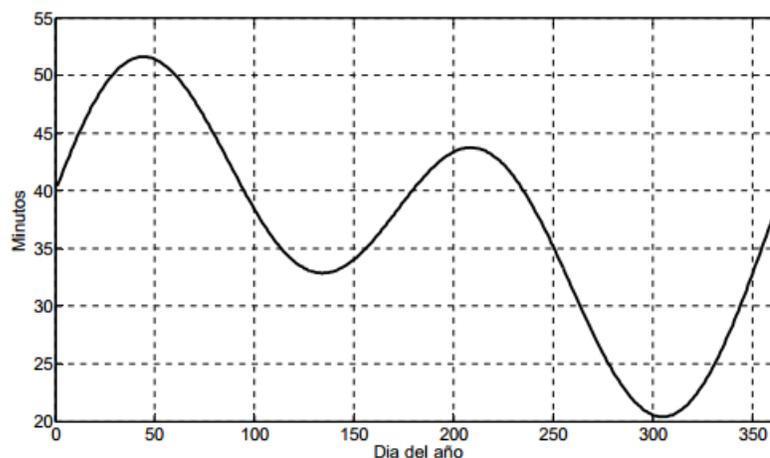


Figura 2.3 Hora solar [17].

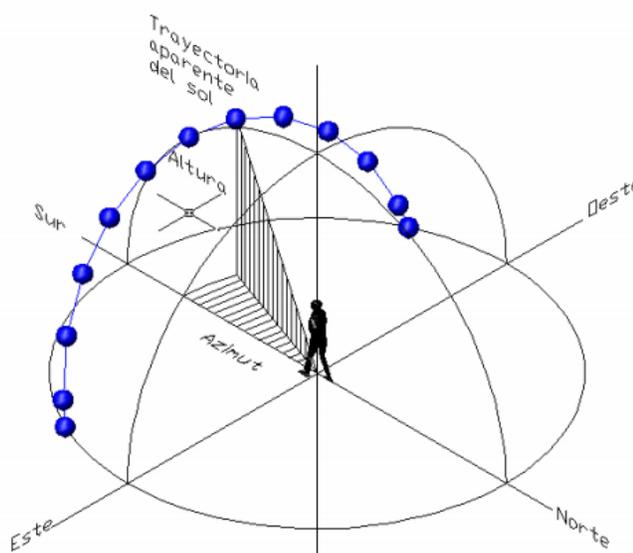
### 2.3. RUTA DEL SOL VISTA POR UN OBSERVADOR DESDE LA TIERRA.

Para ubicar la trayectoria solar primero debemos conocer nuestra ubicación en la tierra. Para localizar un punto en la tierra se utilizan los ángulos de latitud y longitud propios del lugar, el ángulo de latitud nos indica que tan retirados estamos del Ecuador y el ángulo de longitud establece la posición de acuerdo al meridiano de Greenwich (plano de referencia internacional para medir el huso horario civil).

Un observador sobre una superficie plana llamada horizonte, vería el desplazamiento del sol describiendo orbitas circulares paralelas, a lo largo de todo el año, sobre una esfera transparente denominada bóveda celeste, donde cualquier rayo, sin importar la posición del sol, estará dirigido hacia el centro de la esfera. Estas trayectorias constituyen lo que se conoce como la ruta del sol.

Al punto vertical más alto de la bóveda celeste imaginaria se le denomina CENIT. Para localizar al sol, en la bóveda celeste se emplean dos coordenadas llamadas ALTURA y AZIMUT.

La altura es el ángulo del sol con respecto al plano horizontal y el azimut se mide en sentido horario a partir del sur hasta la proyección del sol en el plano horizontal como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4 Ubicación del sol [17].**

Los valores de los ángulos de altura y azimut están en función de la hora, día del año y latitud del lugar. Primero se calcula el ángulo de declinación de la tierra ( $d$ ) debido al movimiento de traslación:

$$d = 23.45 \sin\left[(284 + N) \frac{360}{365}\right] \quad (2.5)$$

Donde  $N$  es el día consecutivo del año que se desea conocer. El ángulo horario ( $hs$ ) es el ángulo comprendido entre el meridiano local y la hora de estudio, es decir, es el ángulo que se forma entre el medio día solar y la hora de referencia, se obtiene por:

$$hs = (12 - \text{hora deseada}) \times 15 \quad (2.6)$$

Con estos datos se obtiene el ángulo de la altura del sol ( $h$ ):

---

$$\sin h = \cos(L_l) \cos(d) \cos(hs) + \sin(L_l) \sin(d) \quad (2.7)$$

Donde  $L_l$  es la latitud del lugar.

Y el ángulo de azimut del sol ( $as$ ) es:

$$\sin(as) = \frac{\cos(d) \sin(hs)}{\cos(h)} \quad (2.8)$$

## 2.4. RECORRIDO DEL SOL EN CUERNAVACA.

En la figura 2.5 se puede ver el recorrido azimutal (eje de las abscisas) y de altura (eje de las ordenadas) máximo que se presenta en los equinoccios de primavera y otoño, y mínimo los cuales son los solsticios de verano e invierno y son representados por las líneas negras. La latitud que corresponde para Cuernavaca es de  $18.91^\circ$  y una longitud de  $-99.21^\circ$ .

Mediante el giro del eje horizontal, el seguidor se adaptará a la altura solar y con el giro vertical, el seguidor se adaptará al ángulo azimutal.

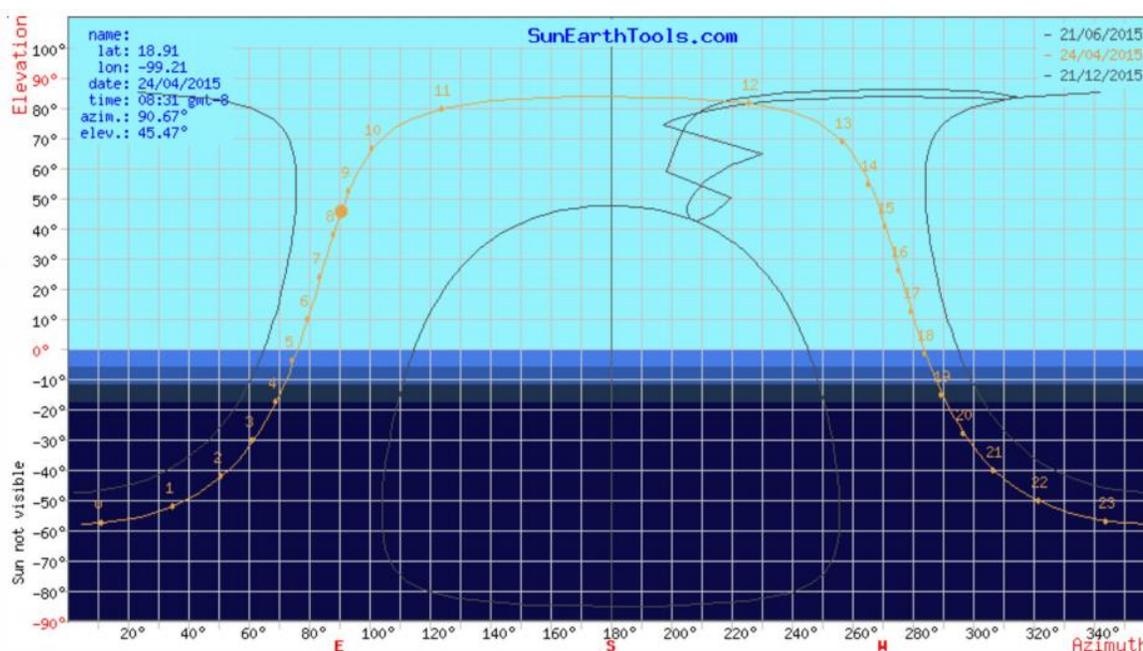


Figura 2.5 Recorrido del sol en Cuernavaca [18].

## 2.5. MODELOS DE IRRADIACIÓN SOLAR EN CUERNAVACA.

El flujo de energía sobre una superficie determinada depende no solo de la irradiancia que exista, sino también de la orientación que tenga la superficie en cuestión respecto de la dirección de propagación de la radiación. La irradiancia será máxima sobre un plano que esté en posición normal a la dirección de propagación de la radiación. La intensidad de radiación sobre la superficie dependerá pues, del ángulo  $\theta_a$  que forme la normal de la superficie, respecto de la dirección de la propagación de la radiación. Este ángulo  $\theta_a$  se conoce con el nombre de ángulo de incidencia. Entonces, la irradiancia incidente sobre la superficie será:

$$G_T = G_n \cos \theta_a \quad (2.9)$$

En donde  $G_T$  se refiere a la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación (del inglés "tilted") y  $G_n$  se refiere a la irradiancia medida sobre un plano normal a la dirección de propagación de la radiación. Si se conoce la irradiancia normal y se conoce el ángulo  $\theta_a$

mediante la ecuación anterior se puede calcular la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación. Como el sol describe un movimiento aparente a lo largo del día (de oriente a poniente), y otro a lo largo del año (de sur a norte y viceversa), el valor del ángulo  $\theta_a$  varía con la fecha y la hora, además de hacerlo con la orientación del plano, su inclinación respecto de la horizontal y la latitud geográfica del lugar donde se encuentre el plano en cuestión. Emplearemos la siguiente nomenclatura:

$\phi$ : Simboliza la latitud geográfica, esto es la posición angular del lugar en donde se encuentre el plano en cuestión, respecto del ecuador terrestre, positivo en el hemisferio norte.  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ .

$\delta$ : Declinación solar, la posición angular del sol al medio día solar, respecto del plano del ecuador, positivo hacia el norte. La declinación solar es cero el día que comienza la primavera y el día que comienza el otoño (equinoccios). En estos días, el sol se encuentra en el ecuador celeste, que es la extrapolación del ecuador celeste en la bóveda celeste. La declinación es máxima en el solsticio de verano ( $23^\circ 27'$ ) y mínima en el solsticio de invierno ( $-23^\circ 27'$ ). La declinación solar puede calcularse aproximadamente mediante la ecuación.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + N}{365}\right) \quad (2.10)$$

Donde N es el número del día del año.

$\beta$ : Pendiente del plano sobre el cual incide la irradiación. Una azotea horizontal tendría  $\beta = 0$ , mientras que para una pared vertical  $\beta = 90^\circ$ .

$\gamma$ : Azimut de la superficie, el ángulo que forma la normal a la superficie, respecto del meridiano local.  $\gamma = 0$  Corresponde al sur. Hacia el este se consideran valores negativos y hacia el oeste valores positivos. Por ejemplo, una ventana que "ve" al poniente, tiene  $\gamma = 90^\circ$ , mientras que una hacia el norte, tiene  $\gamma = 180^\circ$ .

$\omega$ : Ángulo horario, esto es, el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local, debido a la rotación de la tierra a la velocidad angular de  $15^\circ$  por hora ( $360^\circ$  en 24 horas). Negativo por la mañana y positivo por la tarde. Por ejemplo si el medio día solar es a las 12 hrs., a las 10 hrs. corresponde  $\omega = -30^\circ$ , mientras que a las 16 hrs. corresponde  $\omega = 60^\circ$ . El medio día solar es por definición  $\omega = 0^\circ$

La siguiente ecuación relaciona el ángulo  $\theta_a$  con los ángulos anteriores [19].

$$\begin{aligned} \cos \theta_a = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.11)$$

La relación entre la irradiación y la irradiancia está dada por la expresión:

$$I_i = \int_{t_1}^{t_2} G(t) dt \quad (2.12)$$

En dónde la irradiación se está calculando desde el tiempo  $t_1$  hasta el tiempo  $t_2$  y la irradiancia se considera función del tiempo. La energía producida por la irradiancia sobre el panel se obtiene integrando las curvas. En la figura 2.6 se aprecia la media anual de irradiación en un día que hay en Cuernavaca, Morelos, México. Con esta figura podemos estimar la ganancia de los sistemas fijos y móviles sin considerar la potencia del sistema de movimiento. Se modelaron cuatro casos con las ecuaciones descritas anteriormente. Panel fijo horizontal (línea azul), panel fijo inclinado con el ángulo de latitud (línea verde), seguidor de un eje polar (línea roja), seguidor de dos ejes (línea morada). En la página web del IER (Instituto de Energías Renovables) se corroboraron los datos de la figura 2.6 que se muestra a continuación [20].

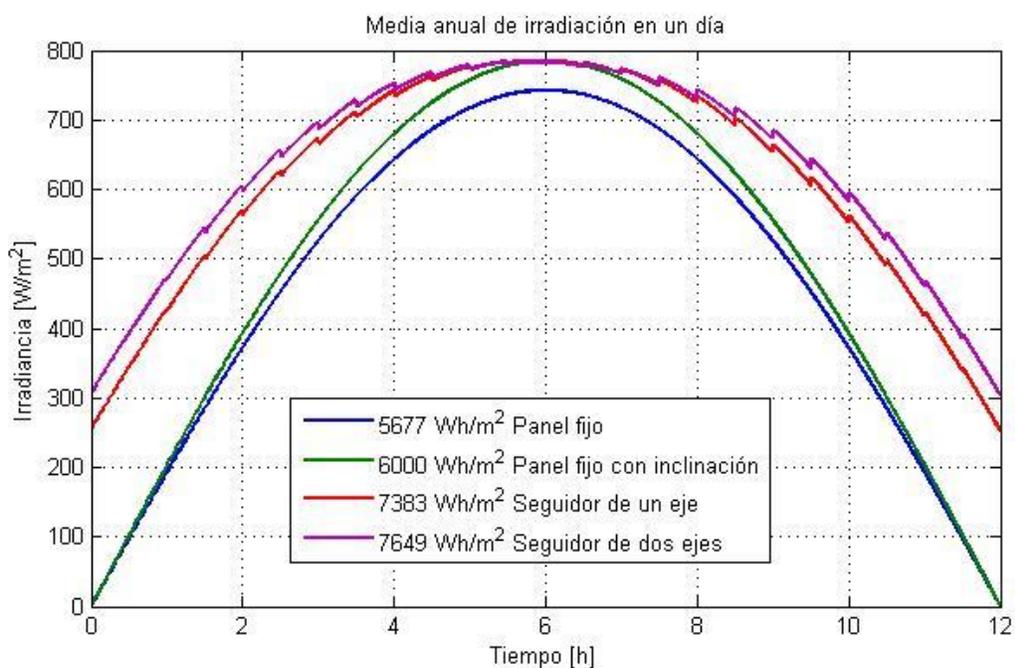


Figura 2.6 Media anual de irradiación en un día.

## 2.6. TIPOS DE SEGUIDORES SOLARES.

**Seguidor solar pasivo.-** Es un seguidor de un eje polar que carece de un control electrónico para su funcionamiento, su funcionamiento se basa en el cambio de densidad de un líquido, de bajo punto de ebullición, regularmente freón. El líquido se encuentra en dos tanques alineados de este a oeste e interconectados entre sí. Cuando recibe los rayos solares el líquido contenido se evapora y la diferencia de pesos provoca el movimiento, los paneles se colocan de manera tal que se encuentra balanceado el peso y adicionalmente se colocan amortiguadores hidráulicos para contrarrestar la fuerza del viento, este seguidor se muestra en la figura 2.7.

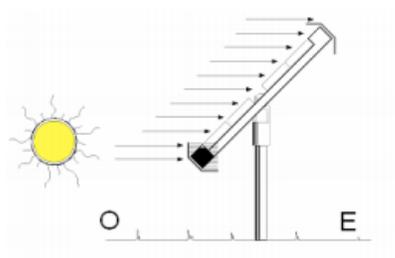


Figura 2.7 Seguidor solar pasivo [17].

**Seguidor solar de un eje, azimutal.**- Éste gira sobre un eje vertical y la superficie de los módulos tiene una inclinación igual a la latitud del lugar para obtener un mejor rendimiento a lo largo del año. El movimiento es determinado por el valor de ángulo de azimut del sol. La curva que dibuja en el espacio presenta siempre la misma altitud con un volumen de trabajo reducido en comparación con los demás seguidores, el seguidor de un eje azimutal se muestra en la figura 2.8.

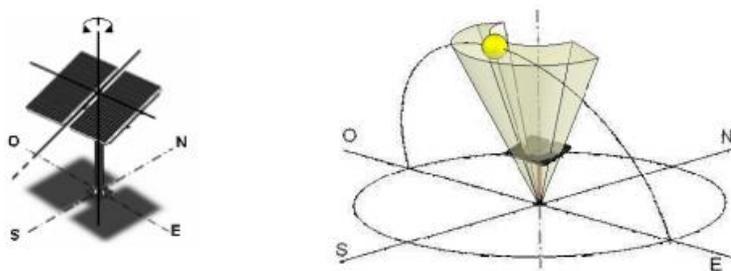


Figura 2.8 Seguidor solar de un eje azimutal [17].

**Seguidor solar de un eje, horizontal.**- El seguidor gira sobre un eje horizontal norte-sur, los módulos son colocados de manera paralela al eje de giro. La trayectoria dibujada es siempre un arco de este a oeste perpendicular al plano horizontal, que difiere de la trayectoria solar en la inclinación que tiene, figura 2.9.

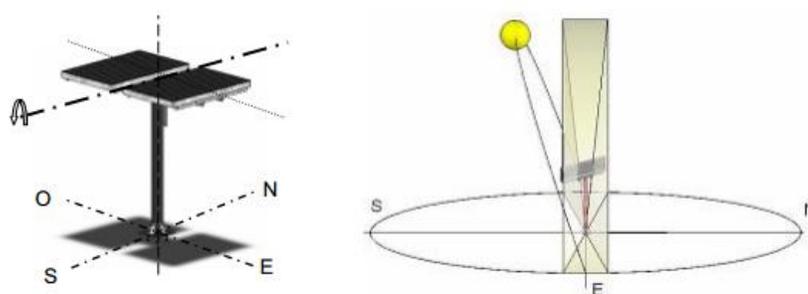


Figura 2.9 Seguidor solar de un eje horizontal [17].

**Seguidor solar de un eje, polar.-** El seguidor solar gira sobre un eje orientado en dirección norte-sur y con una inclinación del eje igual a la de la latitud del lugar, los módulos se colocan paralelos al eje de giro, la velocidad de giro es de aproximadamente  $15^\circ$  por hora, debido a que tiene que recorrer  $180^\circ$ , en 12 horas. Muy parecido al seguidor horizontal pero su inclinación provee una mejor ganancia por año con respecto a aquel ya que corrige un poco la declinación de la trayectoria. La trayectoria descrita coincide fielmente en el equinoccio de primavera y otoño, figura 2.10.

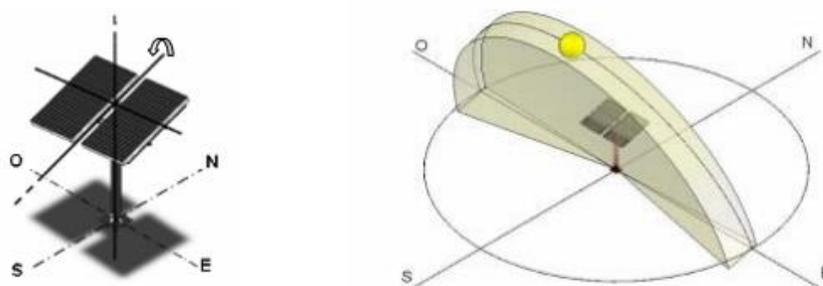


Figura 2.10 Seguidor solar de un eje polar [17].

**Seguidor solar de dos ejes.-** Gracias a los dos grados de libertad que éste posee, satisface la trayectoria solar en su totalidad durante todo el año, figura 2.11.

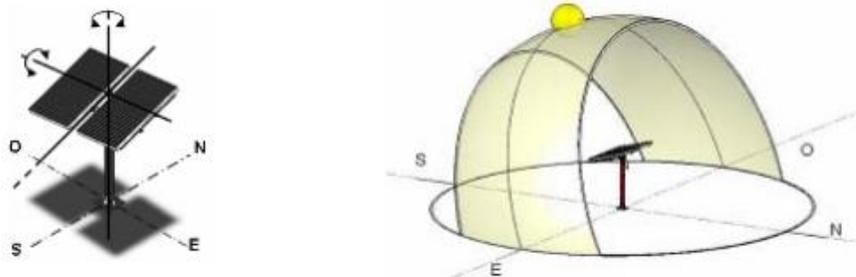


Figura 2.11 Seguidor solar de dos ejes [17].

## 2.7. SELECCIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR.

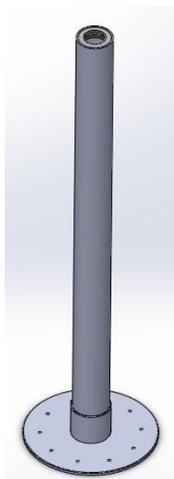
El seguidor solar de un eje considerado es el seguidor solar de un eje polar, debido a que dentro de los seguidores solares de un eje es el que más satisface la trayectoria solar. También se tomará en cuenta el seguidor solar de dos ejes para hacer comparaciones no solo entre sistemas fijos y móviles sino también comparar seguidores solares entre ellos mismos, tomando en cuenta que implica un gasto de energía mover la estructura del seguidor y los paneles. De esta manera se pretende tener un panorama más amplio en la comparación de los sistemas fotovoltaicos fijos y móviles.

## 2.8. DISEÑO DE LOS SEGUIDORES SOLARES EN SOLIDWORKS®.

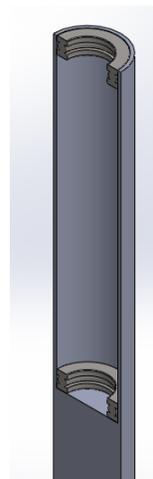
### 2.8.1. DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES.

Se utilizó el software SolidWorks® para realizar los dibujos de las piezas de la estructura y mecanismos que conforman el seguidor solar. La estructura se divide en 3 partes fundamentales que a su vez se subdividen en piezas, éstas son: Base, la cual se muestra en la figura 2.12, la unión de giro del eje azimutal, la cual se ilustra en la figura 2.14 y la parte superior del seguidor solar donde ocurre el giro del eje horizontal, mostrado en la figura 2.16. En la siguiente figura se muestra la base, la cual está conformada por una base circular, un

tubo que mide 1.5 metros, éste a su vez cuenta con una perforación de 0.5 metros de profundidad que incluye dos rodamientos, uno al fondo y otro arriba para facilitar el giro del eje azimutal, figura 2.13.



**Figura 2.12 Base del seguidor solar.**



**Figura 2.13 Base que incluye rodamientos.**

El eje Azimutal se muestra a continuación, en la figura 2.14 el cual está compuesto por: Motor, soportes del motor, engrane del motor, engrane del eje azimutal, tubo del eje azimutal, estructura de soporte del eje azimutal y en la figura 2.15 la estructura de soporte del eje horizontal que incluye rodamientos.

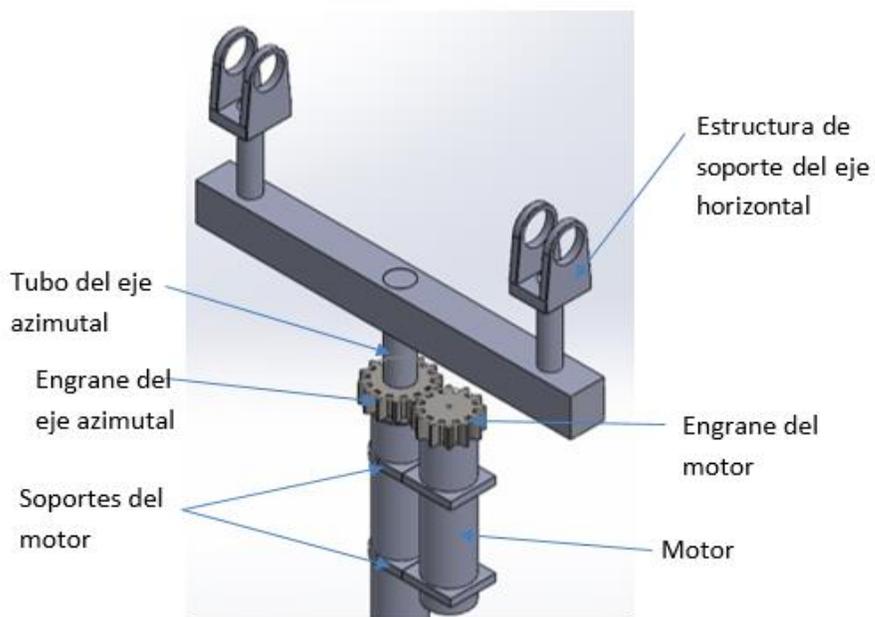


Figura 2.14 Mecanismo de eje azimutal.

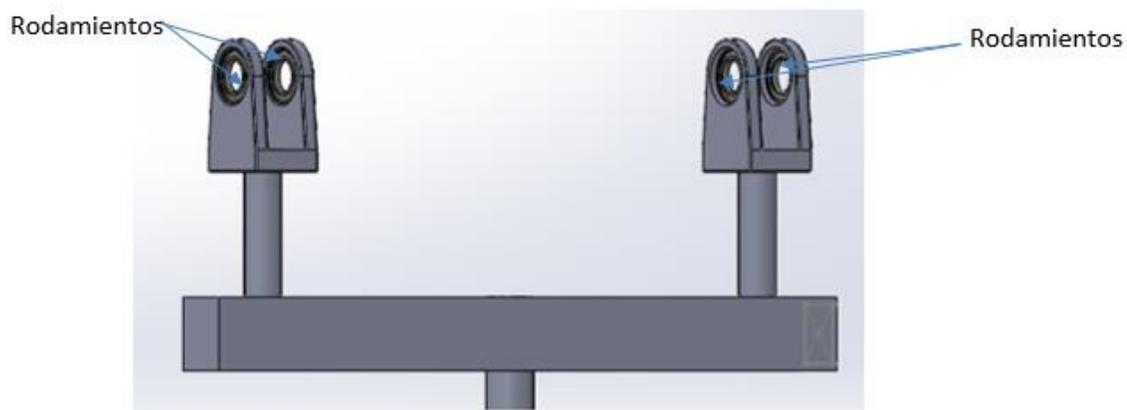
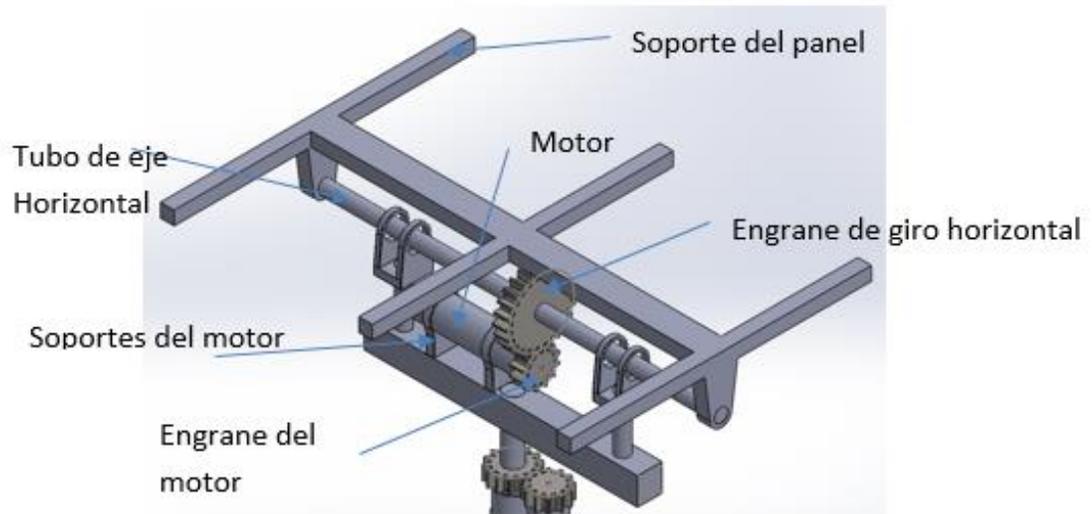


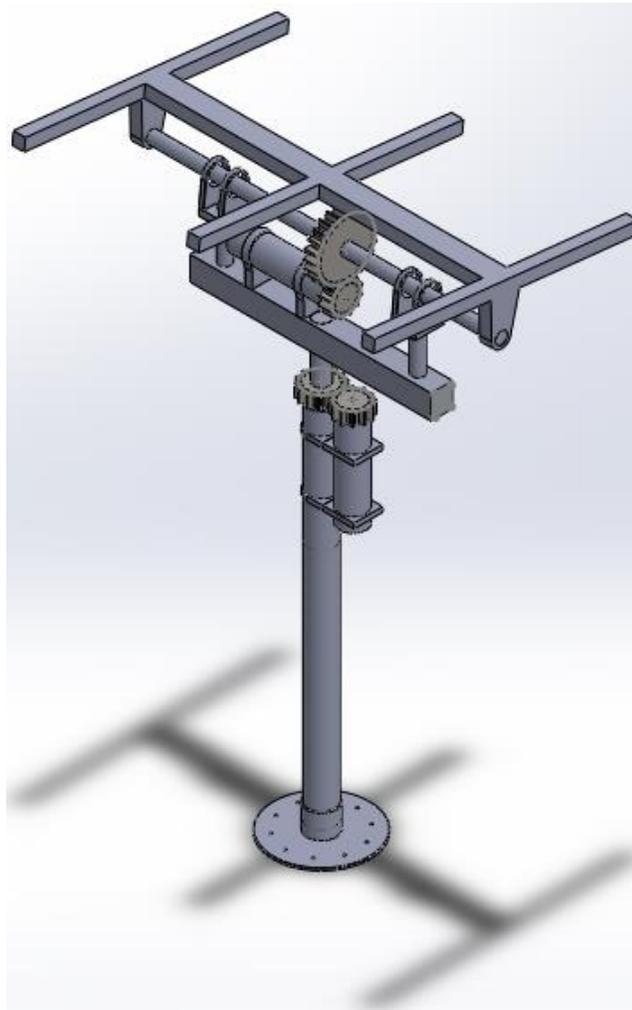
Figura 2.15 Base de eje horizontal con rodamientos.

En la figura 2.16 se muestra como está conformado el eje horizontal: Motor, engrane del motor, engrane de giro horizontal, soportes del motor, tubo del eje horizontal y soporte del panel.



**Figura 2.16 Mecanismo de eje horizontal.**

A continuación se muestra el seguidor solar completo, el cual fue diseñado en base a la configuración existente de seguidores solares de dos ejes explicados en la literatura [17], figura 2.17.



**Figura 2.17 Seguidor solar de dos ejes.**

### 2.8.2. DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE POLAR.

Para un seguidor solar de un eje polar se quitó el mecanismo del eje azimutal y se le agregó una inclinación equivalente a la de la latitud del lugar, la cual corresponde a  $18.91^\circ$  para Cuernavaca, el cual fue diseñado en base a la configuración existente de seguidores solares de un eje explicados en la literatura [17], figura 2.18.

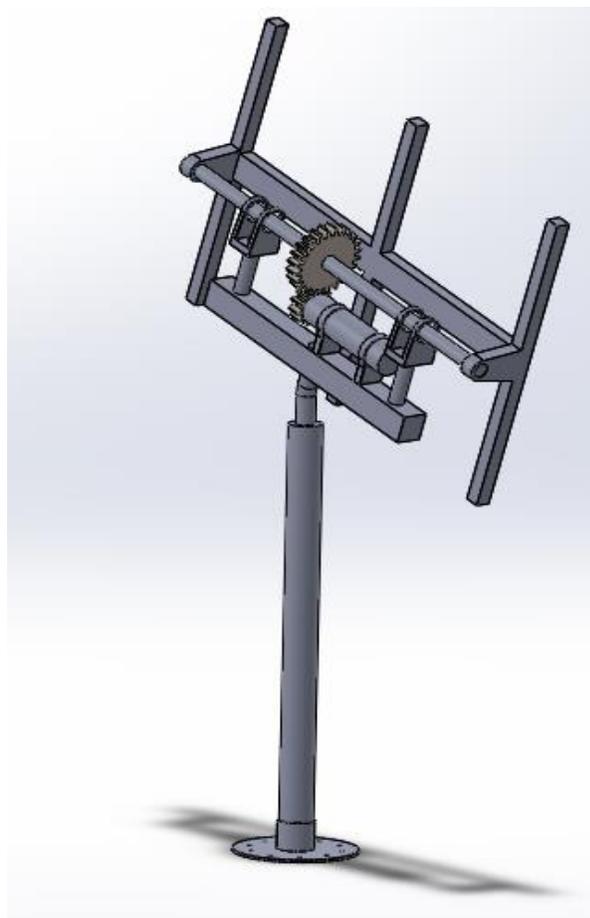


Figura 2.18 Seguidor solar de un eje polar.

---

# CAPÍTULO 3 ESTUDIO CINEMÁTICO Y DINÁMICO DE LAS ESTRUCTURAS EN ADAMS® Y SIMULINK® DE MATLAB®

---

## 3.1. PROTOTIPOS VIRTUALES EN ADAMS®.

Una vez terminados los diseños de los seguidores solares en SolidWorks®, se exportaron al programa Adams® para empezar a trabajar en el control de los motores, los cuales se van a encargar de mover y posicionar los ejes del seguidor en el ángulo deseado.

Una vez importado el diseño a Adams® se unieron algunas de las piezas hasta que la estructura quedó conformada por 5 partes, las cuales son: Motor azimutal, motor horizontal, base, eje azimutal y eje horizontal para el caso del seguidor solar de dos ejes. El seguidor solar de un eje quedó configurado de la siguiente manera: Motor del eje horizontal, eje horizontal y base. Después se les asignó el aluminio como material con el que están hechas las estructuras, ya que es resistente y manejable, además de que es más económico en comparación con otros materiales que son poco pesados y resistentes (por ejemplo fibra de carbono).

Después se crearon las marcas de referencia fija y móvil, las cuales son las encargadas de hacer mediciones de posición (ángulo en grados) y velocidad de los ejes, figura 3.1.

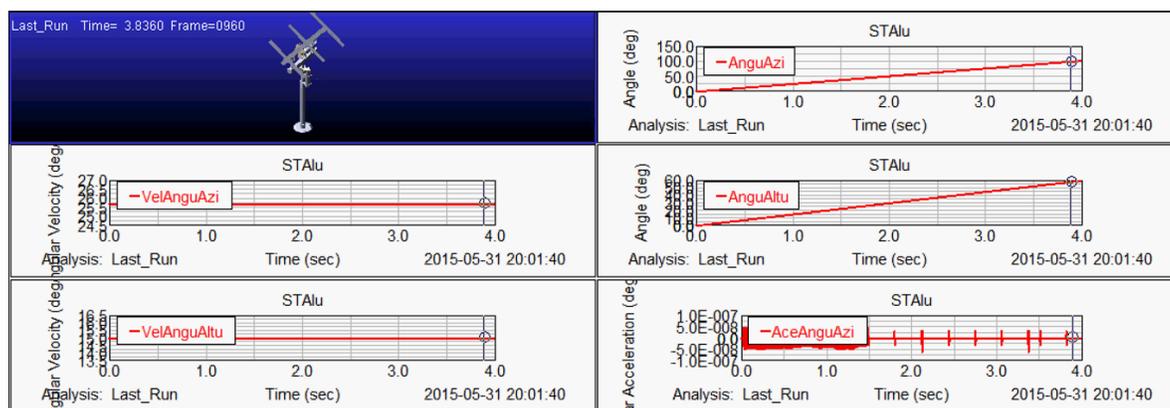


Figura 3.1 Diseño del seguidor en Adams®.

### 3.2. CONTROL DE POSICIÓN DE LOS EJES EN SIMULINK®.

Generalmente se quiere tener la respuesta de un sistema bajo ciertas condiciones, es decir, controlar el sistema para obtener una respuesta deseada. En este caso lo que se desea controlar es la posición de los ejes del seguidor solar por medio de la variable de control, la cual es el torque que proporcionan los motores. Se utilizará el control PID para ello.

Un sistema de control en lazo cerrado usa una medición de la salida y la retroalimentación de esta señal para compararla con la salida deseada, como se ve en la figura 3.2, este sistema de control en lazo cerrado es utilizado en Simulink® para controlar el prototipo virtual, en el bloque de referencias se describe la trayectoria que deben seguir los ejes, en el bloque de control se multiplican las constantes del control PID por el error de posición y velocidad, en el tercer bloque (planta del seguidor solar) se encuentra la planta del seguidor solar exportada de Adams® a Simulink® y nos muestra a la salida la posición y velocidad de los ejes, esa información se envía multiplexada al bloque de control para calcular el error. Es así como se maneja el sistema de control en lazo cerrado.

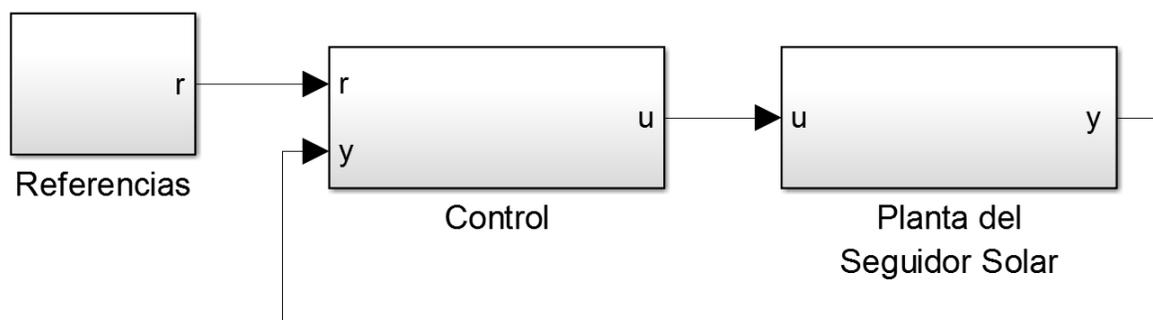


Figura 3.2 Sistema de control en lazo cerrado en Simulink®.

El sistema del péndulo controlado es utilizado en el bloque de control. Considere el sistema de péndulo controlado que se muestra en la figura 3.3, éste es utilizado para determinar las ganancias del controlador  $(k_p, k_i, k_d)$ , las cuales corrigen el error de posición y velocidad de los ejes del seguidor. El sistema de péndulo controlado consiste de una cuerda rígida de longitud  $l$  y de una partícula de masa  $m$  que oscila a un ángulo  $\theta$ . La entrada de control del sistema es el torque  $\tau$  proporcionado por un motor.

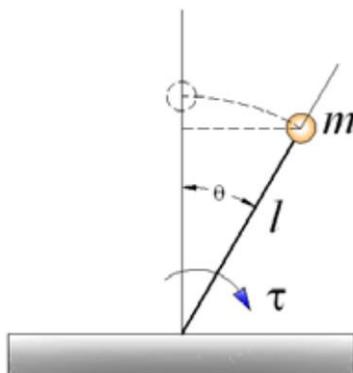


Figura 3.3 Sistema del péndulo controlado [21].

El modelo matemático, que rige la dinámica del péndulo simple, puede ser obtenido al aplicar el formulismo de Euler-Lagrange como se muestra a continuación [21]. El sistema es de un grado de libertad  $q_1 = \theta$ , por lo que la ecuación de Euler-Lagrange queda dada por:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (3.1)$$

Donde  $L$  es el lagrangiano del sistema y está definido como la diferencia entre la energía cinética  $T$  y la energía potencial  $V$  del sistema. La energía cinética, potencial y el lagrangiano están determinados como:

$$T = \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta}^2 \quad (3.2)$$

$$V = mgh = mgl(1 + \cos \theta) \quad (3.3)$$

$$L = \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta}^2 - mgl(1 + \cos \theta) \quad (3.4)$$

Derivando el lagrangiano (3.4) para obtener cada uno de los términos de la ecuación de Euler-Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m l^2 \ddot{\theta} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = mgl \sin \theta \quad (3.6)$$

Finalmente, la ecuación que representa la dinámica del sistema del péndulo simple no actuado está dada por la ecuación (3.7).

$$m l^2 \ddot{\theta} - mgl \sin \theta = \tau \quad (3.7)$$

La ecuación de la dinámica del péndulo controlado, mostrado en la ecuación 3.7, es no lineal. Para diseñar una ley de control se despejará la variable con derivada de mayor orden y posteriormente se realizará un cambio de variables proponiendo una nueva entrada de control para que el sistema de ecuación resultante sea una ecuación lineal.

$$ml^2\ddot{\theta} - mgl \sin \theta = \tau \quad (3.8)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau}{ml^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = v \quad (3.9)$$

$$\ddot{\theta} = v \quad (3.10)$$

Donde el control real que se deberá aplicar al sistema se obtiene de (3.9) y está dado por:

$$\tau = vml^2 - mgl \sin \theta \quad (3.11)$$

Para la ecuación 3.10 que resulta en una ecuación diferencial de doble integrador, se propondrá una ley de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) de manera que el péndulo sea capaz de seguir una trayectoria de referencia pre-especificada.

$$v = -k_p(\theta - \theta_d) - k_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - k_i \int (\theta - \theta_d) d\theta \quad (3.12)$$

Sustituyendo la nueva entrada de control en la ecuación 3.12

$$\ddot{\theta} = -k_p(\theta - \theta_d) - k_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - k_i \int (\theta - \theta_d) d\theta \quad (3.13)$$

Definiendo el error como la diferencia de la posición angular real y la deseada, y obteniendo sus derivadas como:

$$e = \theta - \theta_d \quad (3.14)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta} - \dot{\theta}_d \quad (3.15)$$

$$\ddot{e} = \ddot{\theta} - \ddot{\theta}_d \quad (3.16)$$

$$\ddot{e} = \ddot{\theta} - \ddot{\theta}_d \quad (3.17)$$

Se puede expresar la ecuación 3.13 en términos del error. Por lo que la dinámica del error está dada por la ecuación:

$$\ddot{\theta} + k_p \dot{e} + k_d \ddot{e} + k_i e = 0 \quad (3.18)$$

$$\ddot{e} + k_p \dot{e} + k_d \ddot{e} + k_i e = 0 \quad (3.19)$$

Como se desea que el error tienda a cero, se obtendrá el polinomio característico y se igualará a un polinomio de manera que las raíces se tengan en el semiplano complejo izquierdo para que la respuesta sea asintóticamente estable. El polinomio característico de la ecuación dinámica del error es:

$$S^3 + k_d S^2 + k_p S + k_i = 0 \quad (3.20)$$

Igualando a un polinomio de Hurwitz:

$$S^3 + [(2\zeta\omega_n + 1)S^2] + [(w_n^2 + 2\zeta\omega_n)S] + w_n^2 = 0 \quad (3.21)$$

Se determinan las ganancias del controlador, las cuales quedan definidas como:

$$k_d = 2\zeta\omega_n + 1 \quad (3.22)$$

$$k_p = w_n^2 + 2\zeta\omega_n \quad (3.23)$$

$$k_i = w_n^2 \quad (3.24)$$

De esta manera se calculó el valor de las constantes que se encargaran de corregir el error entre el valor medido y el deseado. Las referencias que debe seguir el seguidor de dos ejes son las que se ilustran en la figura 3.4 (trayectoria azimutal) y figura 3.5 (trayectoria horizontal).

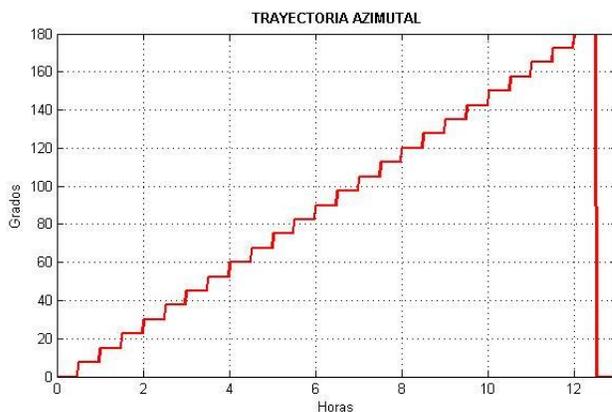


Figura 3.4 Trayectoria Azimutal.

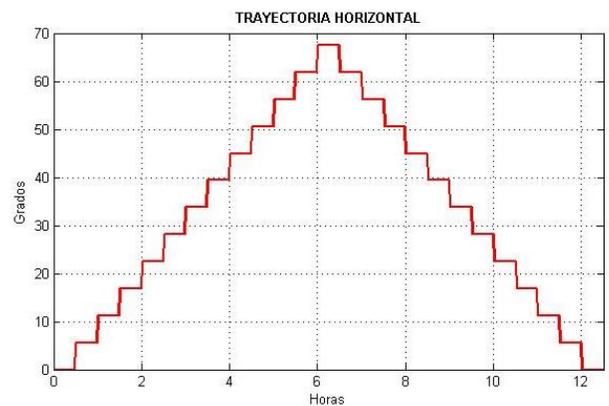


Figura 3.5 Trayectoria Horizontal.

La trayectoria del seguidor de un eje se puede ver en la figura 3.6.

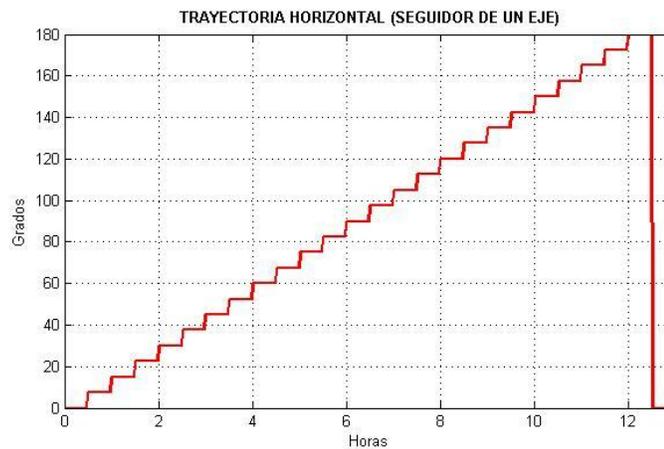


Figura 3.6 Trayectoria horizontal del seguidor de un eje.

### 3.3. ENERGÍA CONSUMIDA POR EL SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES.

Una vez que se tuvo completado el bloque de referencias y control del diagrama de bloques del sistema de control en lazo cerrado, el cual se mostró en la figura 3.2, se procedió a exportar la planta del seguidor solar realizado en Adams® a Simulink® para poder medir la energía consumida por el seguidor a lo largo del día. La energía consumida durante todo el día por el seguidor de dos ejes se obtuvo integrando el producto del torque o par por la velocidad de los motores que mueven los ejes, figura 3.7.

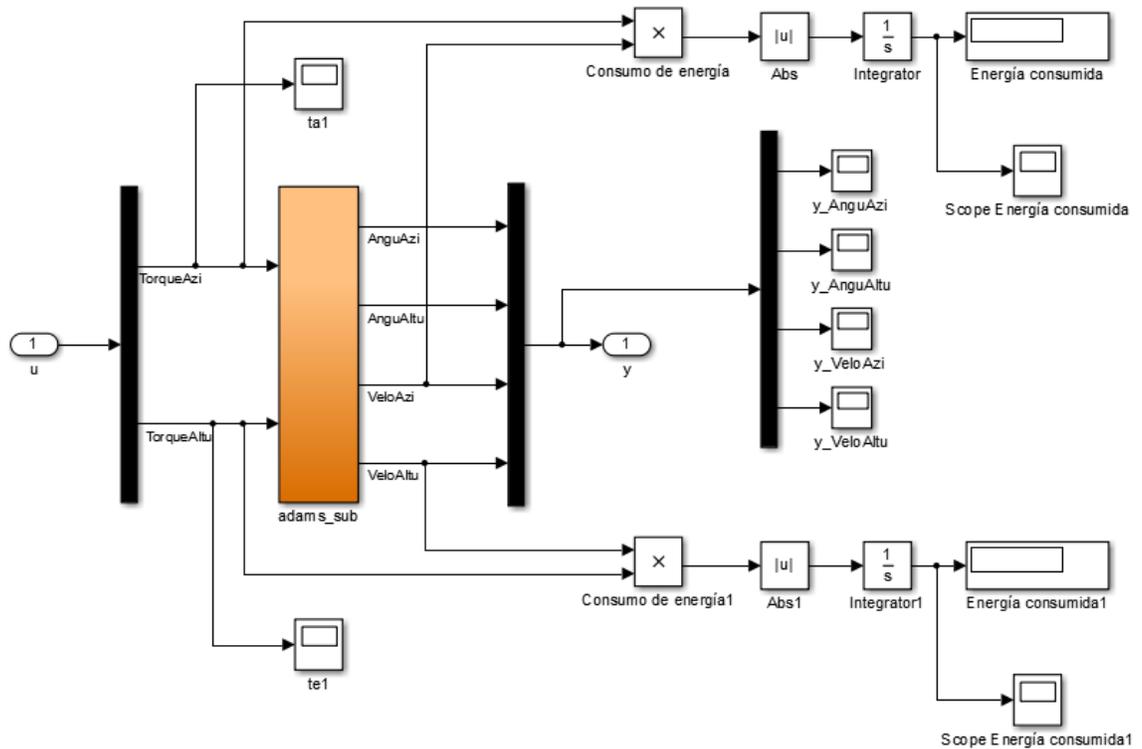


Figura 3.7 Plata del seguidor de dos ejes exportada a Simulink®.

En la figura 3.8 y figura 3.9 se puede ver la energía consumida en todo el día por ambos ejes, en el eje azimutal se consumió en todo el día 1414.67 Wh/día y en el eje horizontal 118.93 Wh/día.

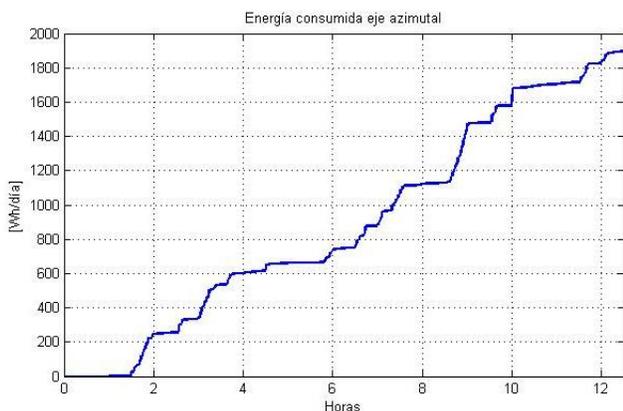


Figura 3.8 Energía consumida del eje azimutal.

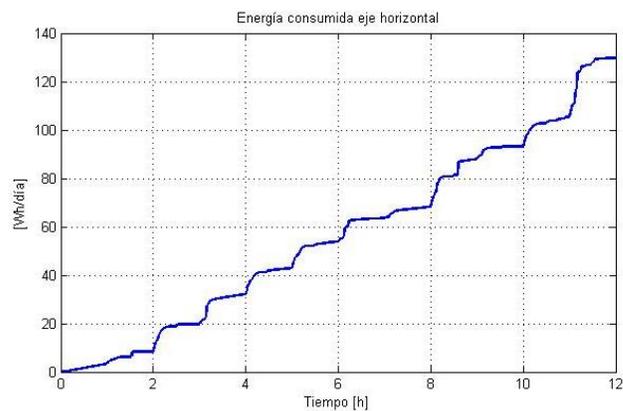


Figura 3.9 Energía consumida por el eje horizontal.

### 3.4. ENERGÍA CONSUMIDA POR EL SEGUIDOR SOLAR DE UN EJE.

En la figura 3.10 se muestra que la energía consumida para el movimiento del eje se obtuvo integrando el producto del par o torque por la velocidad del motor, la cual corresponde a 255.01 Wh/día y se muestra en la figura 3.11.

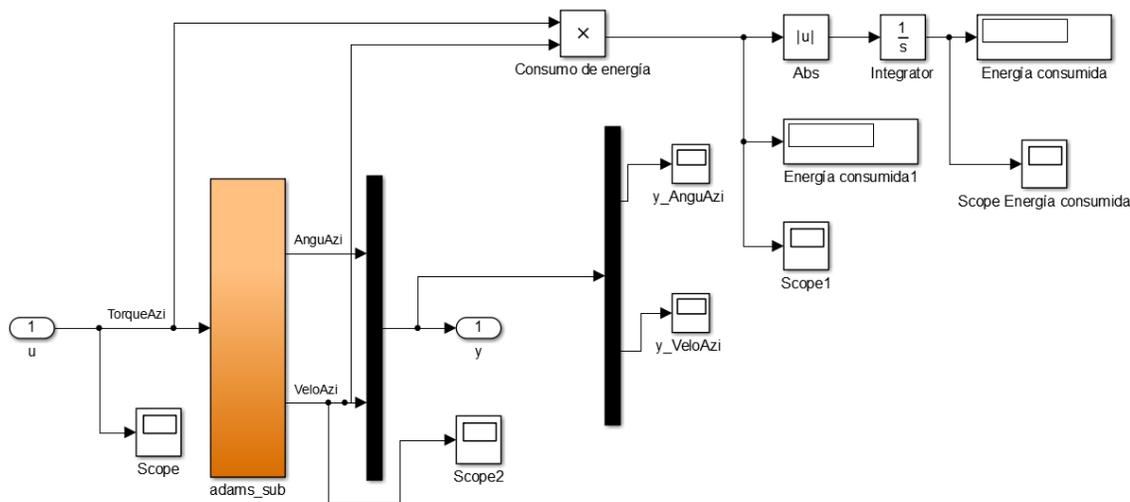
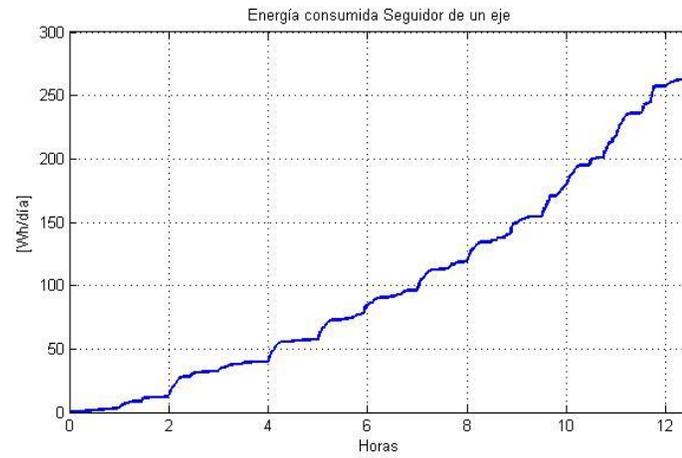


Figura 3.10 Planta del seguidor de un eje exportada a Simulink®.

A continuación, en la figura 3.11 se ve la energía consumida por el seguidor de un eje con la trayectoria que se le asignó.



**Figura 3.11** Energía consumida por el seguidor de un eje.

---

# CAPÍTULO 4 ENERGÍA GENERADA A LA SALIDA DE LOS PANELES EN LOS CASOS FIJO, SEGUIDOR DE UN EJE Y DE DOS EJES

---

## 4.1. MODELADO DE PANEL FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO.

La figura 4.1 muestra el circuito equivalente de una celda fotovoltaica. Consiste en una fuente de corriente dependiente en paralelo con un diodo y dos resistencias equivalentes internas. La corriente generada por la fuente,  $I_{ph}$ , es proporcional a la energía solar recibida por el panel [22-24].

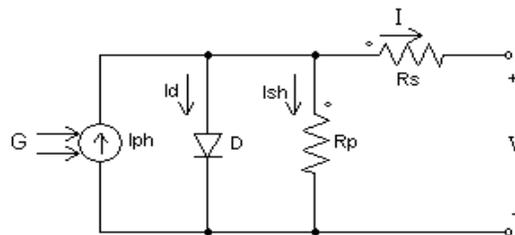


Figura 4.1 Circuito equivalente a una celda fotovoltaica [24].

Cuando el panel no recibe luz ( $G$ ), la celda solar no es un dispositivo activo, se comporta como un diodo. Aunque no produce corriente ni voltaje por sí misma, si se le aplica un voltaje externo, a través de ella fluye una corriente  $I_d$ . La curva característica de una celda fotovoltaica depende de esta corriente, como se observa en la figura 4.2.

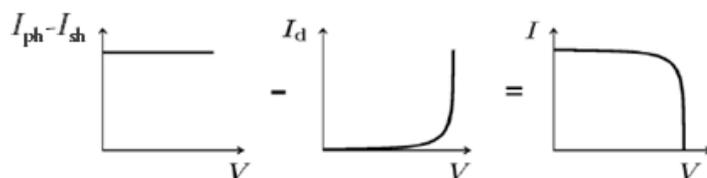


Figura 4.2 Corrientes típicas en una celda fotovoltaica [23].

Las resistencias  $R_s$  y  $R_p$  son intrínsecas a la celda y producen pérdidas internas debido al flujo de corriente.  $R_s$  es la resistencia serie equivalente del contacto entre los distintos materiales y  $R_p$  corresponde a la corriente de fuga y suele presentarse por ligeros defectos en la fabricación. Idealmente,  $R_s \approx 0$  y  $R_p \approx \infty$ . Para una correcta aproximación del modelo a la celda física, es necesario tomar en cuenta que las corrientes en el circuito se ven afectadas por la temperatura operacional de la celda.

Las ecuaciones que definen el circuito antes mostrado son las siguientes:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (4.1)$$

Donde  $I$  es la corriente total producida por la celda,  $I_{ph}$  es la corriente proporcional a la luz recibida,  $I_d$  es la corriente del diodo e  $I_{sh}$  es la corriente de fuga. La ecuación que describe a  $I_{ph}$  es

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left( I_{sc} + k_I (T_{op} - T_{ref}) \right) \quad (4.2)$$

Donde  $G$  y  $G_{ref}$  son la irradiancia recibida y la irradiancia de referencia (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ), respectivamente.  $I_{sc}$  es la corriente nominal de corto circuito, es decir, la corriente máxima producida por el panel que se da con la condición  $V=0$ .  $k_I$  es la constante de dependencia de  $I_{sc}$  a la temperatura de operación (porcentaje de cambio por cada grado por arriba o por debajo de  $25^\circ\text{C}$ ) y  $T_{op}$  y  $T_{ref}$  son la temperatura operacional y de referencia, respectivamente.

$I_d$  está definida por la ecuación del diodo de Shockley.

$$I_d = \left( e^{\frac{V+I R_s}{n V_t C}} - 1 \right) I_s \quad (4.3)$$

donde  $n$  es el factor de idealidad del diodo, que es una medida de la proximidad con que el diodo en la celda sigue la ecuación del diodo ideal.  $C$  es el número de celdas en el panel,  $I_s$  es la corriente de saturación del diodo y  $V_t$  es el voltaje térmico, dado por

$$V_t = \frac{k T_{op}}{q} \quad (4.4)$$

en donde  $k$  es la constante de Boltzman ( $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K) y  $q$  es la carga del electrón ( $1.60217646 \times 10^{-19}$  C). La ecuación que define a  $I_s$  es

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{q E_g}{n k} \left( \frac{1}{T_{op}} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (4.5)$$

$E_g$  es la brecha energética del semiconductor (1.12 eV para el silicio policristalino a 25° C) e  $I_{rs}$  está dada por

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\frac{V_{oc} q}{e^{k C T_{op} n} - 1}} \quad (4.6)$$

Por último, la corriente de fuga,  $I_{sh}$ , se define como

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (4.7)$$

Todas estas ecuaciones están implementadas en Simulink® para modelar los paneles fotovoltaicos [25].

Se utilizaron estas ecuaciones con los parámetros del panel comercial de la marca Solartec S60 P-250 [26], mostrados en la tabla 4.1, en un circuito de prueba simple y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.2.

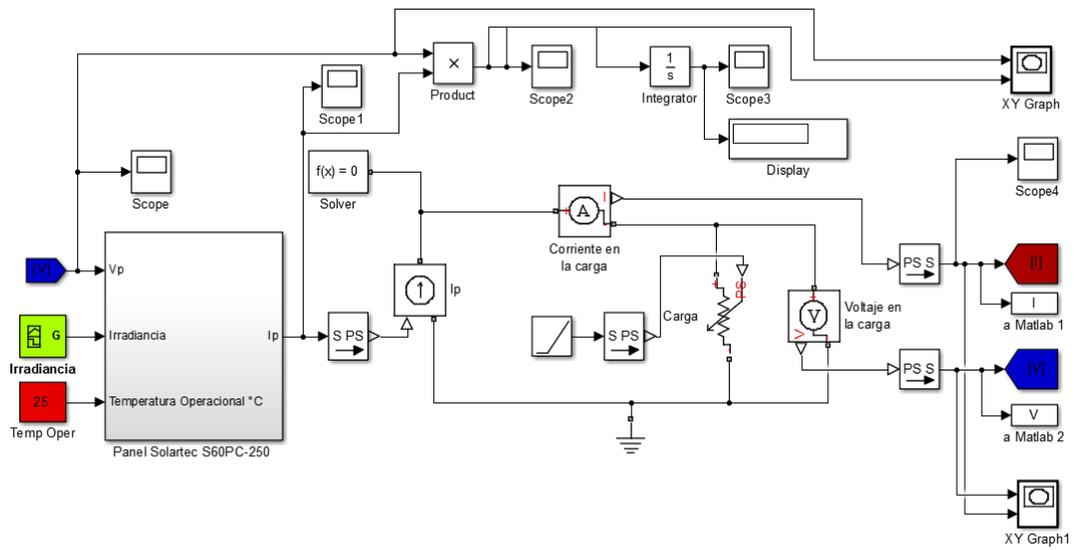
Tabla 4.1 Parámetros del panel Solartec S60PC-250 bajo condiciones estándar de prueba.

	Datos del fabricante
<i>Potencia máxima</i>	250 W
<i>Número de celdas</i>	60
<i>Voltaje <math>V_{oc}</math></i>	37.85 V
<i>Corriente <math>I_{sc}</math></i>	8.65 A
<i>Voltaje en PMP</i>	30.12 V
<i>Corriente en PMP</i>	8.3 A
<i>Coefficiente de temperatura de <math>I_{sc}</math></i>	+0.062%/°C

Tabla 4.2 Comparación entre panel comercial y panel modelado.

	Datos del fabricante	Valores obtenidos en la simulación
<i>Potencia máxima</i>	250 W	248.79 W
<i>Voltaje en PMP</i>	30.12 V	30.26 V
<i>Corriente en PMP</i>	8.3 A	8.23 A

Como puede observarse, los resultados de simulación son muy similares a los resultados reportados por el fabricante, por lo que se puede concluir que el modelo es una representación aproximada de un panel real.



**Figura 4.3 Esquema de simulación de panel fotovoltaico en Simulink®.**

En la figura 4.4 se muestran las curvas características de corriente vs voltaje ante diferentes valores de irradiancia, obtenidas en la simulación.

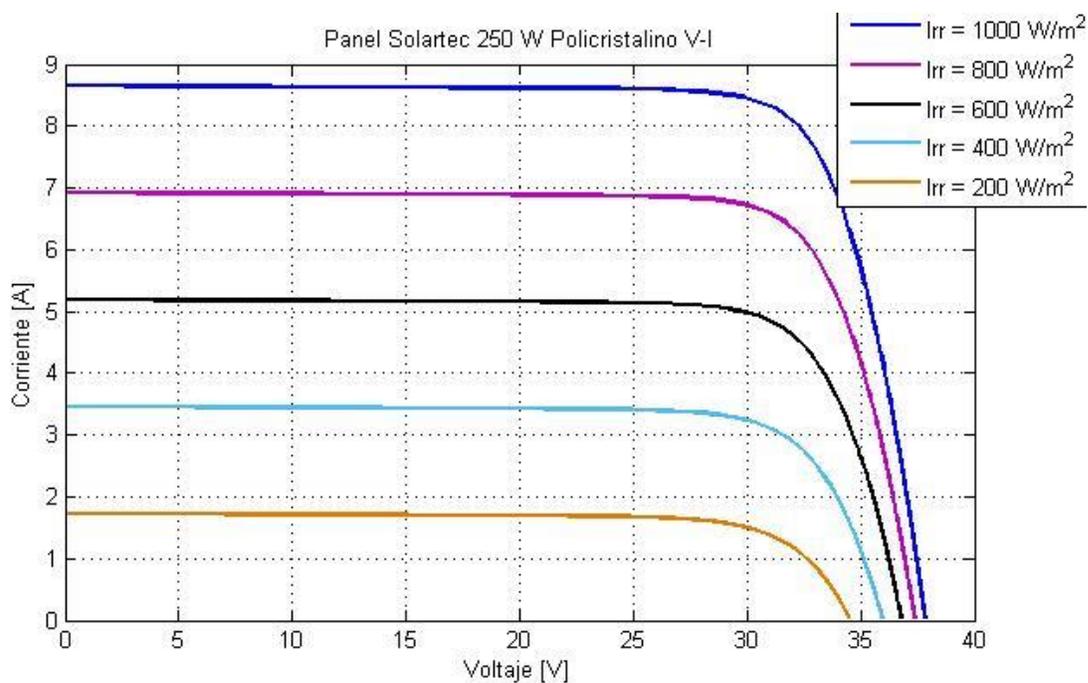
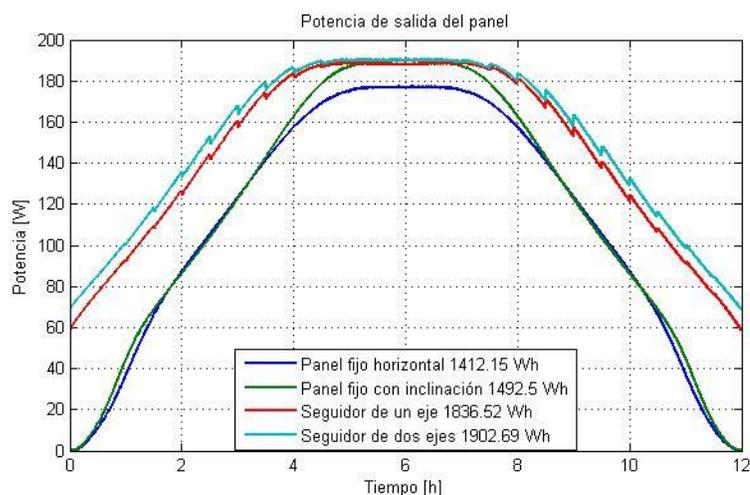


Figura 4.4 Curvas de corriente vs voltaje obtenidas en simulación variando irradiancia.

## 4.2. POTENCIA DE SALIDA DEL PANEL.

Una vez modelado el panel fotovoltaico en Simulink® se hicieron simulaciones para obtener las curvas de potencia a la salida del panel con la irradiancia promedio anual que se recolecta durante el día en los casos fijos y móviles, mostrado en el capítulo 2 figura 2.6. A continuación en la figura 4.5 se muestra la potencia de salida del panel a lo largo del día para los casos considerados en esta tesis, se obtuvo la energía generada por los paneles integrando la curva de potencia.



**Figura 4.5 Potencia de salida del panel.**

Se obtuvo en el panel fijo horizontal 1412.15 Wh, en el panel fijo con inclinación 1492.5 Wh, en el panel montado sobre el seguidor de un eje polar 1836.52 Wh y por último en el panel sobre el seguidor de dos ejes 1902.69 Wh.

### 4.3. POTENCIA DE SALIDA EN PANELES CON SOMBREADO PARCIAL.

Se hizo una simulación en la que se conectaron 3 paneles en serie con sombreado parcial, esto se hizo disminuyendo el porcentaje de irradiancia incidente en cada panel. La energía generada se obtiene integrando las curvas de potencia. El primer panel tiene el 80% de la irradiancia, el segundo el 90% y el tercero el 100%, esto se simuló para los casos fijo con inclinación, mostrado en la figura 4.6, paneles en seguidor de un eje, mostrado en la figura 4.7 y paneles en seguidor de dos ejes, figura 4.8.

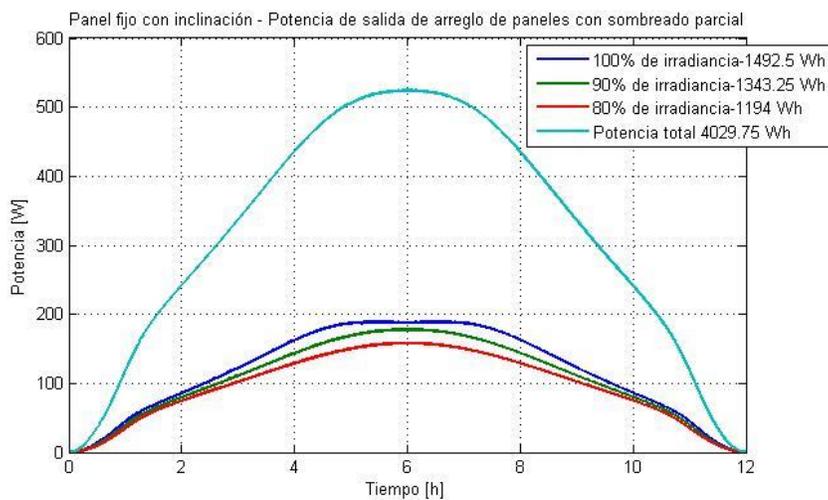


Figura 4.6 Sombreado parcial de paneles fijos con inclinación.

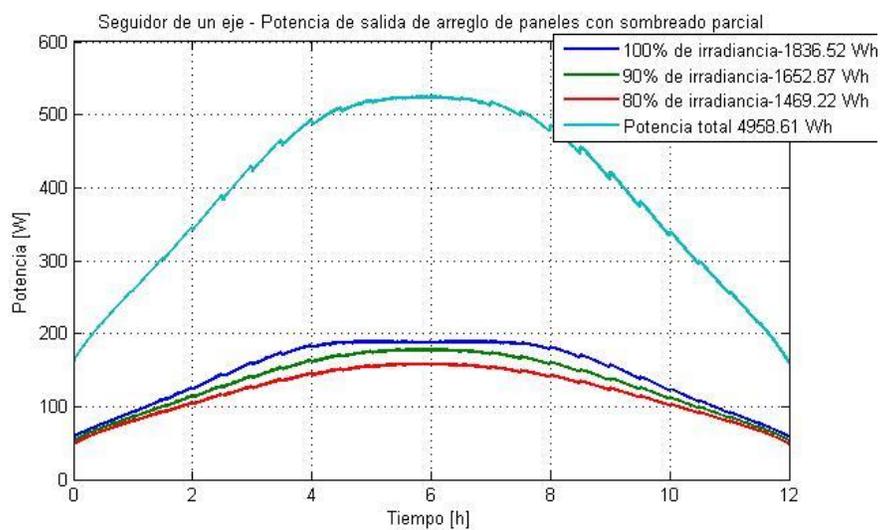


Figura 4.7 Sombreado parcial de paneles sobre el seguidor de un eje.

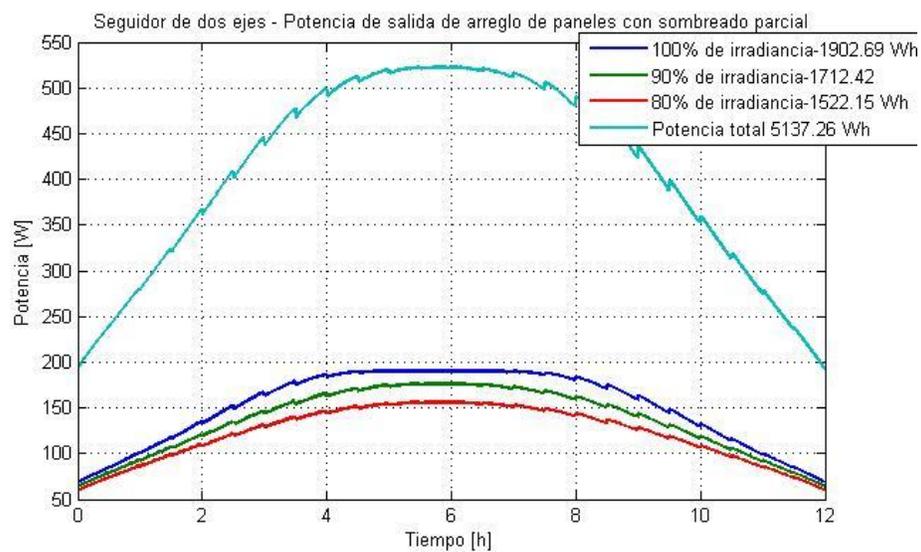


Figura 4.8 Sombreado parcial de paneles sobre el seguidor de dos ejes.

#### 4.4. ENERGÍA GENERADA A LA SALIDA DE LOS PANELES.

Teniendo en cuenta la superficie activa ( $1,63 \text{ m}^2$  / módulo), el rendimiento de conversión (15.29%), y el número de módulos (3), la energía generada a la salida de los paneles en todos los casos se muestra en la tabla 4.3, sin tomar en cuenta los motores que reposicionan los ejes de los seguidores (eso se mostrará en las tablas siguientes). También se muestra el porcentaje de ganancia de energía de los seguidores con respecto al caso fijo tomando en cuenta el panel horizontal y con inclinación.

La energía eléctrica generada por los paneles en cada caso se mostró de manera gráfica en la figura 4.5.

Tabla 4.3 Ganancia de energía promedio anual generada a la salida de los paneles.

<b>Casos</b>	<b>Panel fijo horizontal</b>	<b>Panel fijo con inclinación</b>	<b>Seguidor de un eje</b>	<b>Seguidor de dos ejes</b>
<i>Irradiación</i>	5677 Wh/m <sup>2</sup>	6000 Wh/m <sup>2</sup>	7383 Wh/m <sup>2</sup>	7649 Wh/m <sup>2</sup>
<i>Área de panel</i>	1.63 m <sup>2</sup>	1.63 m <sup>2</sup>	1.63 m <sup>2</sup>	1.63 m <sup>2</sup>
<i>Energía Solar</i>	9235.8 Wh	9761.28 Wh	12011.26 Wh	12444.01 Wh
<i>Eficiencia panel</i>	15.29%	15.29%	15.29%	15.29%
<i>Energía eléctrica</i>	1412.15 Wh	1492.5 Wh	1836.52 Wh	1902.69 Wh
<i>Ener_Elec 3 paneles</i>	4236.46 Wh	4477.5 Wh	5509.56 Wh	5708.07 Wh
<i>Ganancia de energía respecto a panel fijo horizontal</i>	-	-	30.05 %	34.74 %
<i>Ganancia de energía respecto a panel fijo inclinado</i>	-	-	23.05 %	27.48 %

Se puede observar en la tabla que el porcentaje de ganancia de energía del seguidor de un eje en comparación con el panel fijo horizontal es de 30.05 % y para el de dos ejes es de 34.74 %, el porcentaje de ganancia de energía en comparación con el panel fijo inclinado es de 23.05% para el seguidor de un eje, y de 27.48 % para el seguidor de dos ejes. Se nota que

---

disminuye la ganancia debido a que el panel fijo inclinado (con el ángulo equivalente al de la latitud del lugar) recolecta más energía. Es por ello que esa manera es la correcta para colocar paneles fijos y por lo tanto esa es la referencia con la que se estará comparando la ganancia de energía de los seguidores, una vez que se tome en cuenta el consumo de energía debido al reposicionamiento de los ejes.

#### 4.5. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS SFV's.

Se determinó la energía consumida a través del análisis dinámico de los modelos mecatrónicos virtuales (capítulo 3). Esto se calculó mediante la integración de la curva de consumo de energía mostrado en la figuras 3.8 y figura 3.9. Desde el punto de vista energético, la cadena fotovoltaica con seguimiento es eficiente si se logra la siguiente condición,  $E = (E_T - E_{FI}) - E_C \gg 0$  donde el  $E_T$  es la energía eléctrica producida por la cadena fotovoltaica con seguimiento,  $E_{FI}$  es la energía producida por la misma cadena sin el seguimiento (fijo con inclinación), y  $E_C$  es el consumo de energía para el seguimiento.

En estos términos, la síntesis del balance energético de la cadena fotovoltaica se presenta en la tabla 4.4, donde la ganancia de energía se calcula en relación con el caso fijo con inclinación, ya que es la manera correcta en la que se posicionaría un panel en un sistema fijo. Se puede observar que en (a) se tiene una pérdida energética. En (b) el sistema PV si proporcionaría una ganancia de energía.

Tabla 4.4 Evaluación y comparación de generación de energía de los SFV's.

Casos	Energía entregada por el arreglo de 3 paneles (Wh/día) $E_{T/FI/F}$	Energía consumida (Wh/día) $E_C$	$E$ $= (E_T - E_{FI}) - E_C$	Ganancia de energía (%)
(a) Seguidor de 2 ejes	5708.07	1414.67+118.93=1533.6	-303.03	-6.77
(b) Seguidor de 1 eje	5509.56	255.01	777.05	17.35
(c) Panel fijo con inclinación	<b>4477.5</b>	-	-	-
(d) Panel fijo horizontal	4236.46	-	-	-

Donde:

$E_T$  es la energía generada por los seguidores de uno y dos ejes.

$E_{FI}$  es la energía generada por el panel fijo con inclinación.

$E_F$  es la energía generada por el panel fijo horizontal.

$E_c$  es la energía consumida para mover el seguidor.

El seguidor de un eje polar tiene una ganancia de energía de 17.35 % y el seguidor de dos ejes tiene una pérdida de 6.77 %. Para tener un resultado más certero se tomaran en cuenta las pérdidas del motor que se ocuparía en caso de una implementación. Debido a que el seguidor solar de dos ejes resulta ser ineficiente queda descartado su uso, es por ello que solo se analizara el porcentaje de ganancia de energía del seguidor de un eje polar tomando

en cuenta la eficiencia nominal del motor que requeriría y el driver. En la tabla 4.5 se muestran las características del motor que se ocuparía el cual es de la marca weg [27].

**Tabla 4.5 Características del motor del seguidor de un eje polar.**

<b>Par del motor</b>	< 150 N*m
<b>Velocidad angular</b>	< 8 rad/s

Los datos del par del motor y la velocidad del motor se observaron en la simulación que se hizo en Simulink® donde se exporto la planta de Adams® mostrado en la figura 3.10. A partir de esos datos se obtuvo la potencia del motor en KW, la potencia del motor en HP y en base a la eficiencia nominal del motor observada en la hoja de datos del fabricante se calculó la pérdida del motor, tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Pérdida del motor.**

<b>Potencia del motor [KW]</b>	<b>Potencia del motor [HP]</b>	<b>Eficiencia nominal %</b>	<b>Energía requerida para mover el seguidor de un eje [Wh/día]</b>	<b>Pérdida total del motor [Wh/día]</b>
<b>1.2</b>	1.6	72	255.01	71.4

Suponiendo una eficiencia en el driver de 95%, la pérdida de éste sería de 12.75 Wh/día.

A la ganancia que se tenía para el seguidor solar de un eje polar en la tabla 4.4 se le descontará la pérdida del motor que es de 71.4 Wh/día más las pérdidas generadas por el driver 12.75 Wh/día para tener un resultado más aproximado a la realidad, tabla 4.7.

Tabla 4.7 Generación de energía del seguidor de un eje polar tomando en cuenta las pérdidas del motor y driver.

<b>Casos</b>	<b>Energía entregada por el arreglo de 3 paneles (Wh/día)</b>	<b>Energía consumida (Wh/día) <math>E_C</math></b>	<b><math>E = (E_T - E_{FI}) - E_C</math></b>	<b>Pérdida del motor más driver (PM) [Wh/día]</b>	<b><math>EF = E - PM</math></b>	<b>Ganancia de energía final (%)</b>
<i>Seguidor de un eje polar</i>	5509.56	255.01	777.05	84.15	692.9	<b>15.48</b>

La ganancia de energía diaria promedio anual del seguidor solar de un eje polar por día es de 15.48%, esta estimación de ganancia de energía se obtuvo por medio de un prototipo virtual y simulaciones pero no por ello está idealizado. Ya que no solo se basa en la recaudación de energía del seguidor a como se vio en la tabla 4.3, sino que también se le resta la energía que requiere el motor para mover el eje, además de restarle las pérdidas del motor y driver del motor, con todo esto se pretende tener una idea cercana a lo que se obtendría si se llegara a implementar este diseño de seguidor solar.

---

---

# CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

---

---

## 5.1. CONCLUSIONES.

Se concluye que el seguidor solar de dos ejes diseñado en esta tesis no es eficiente ya que produce pérdidas de energía como se ve en la tabla 4.4. A pesar de que la irradiación recolectada por este seguidor es mayor que la recolectada por el seguidor solar de un eje polar (tabla 4.3). Por estas razones se concluye que se debe tomar en cuenta el modelo del seguidor solar que se ocuparía.

Es importante tomar en cuenta la irradiación media anual ya que la irradiación varía todo el año, los trabajos que toman en cuenta la irradiación disponible en los equinoccios reportan más porcentaje de ganancia debido a que son las temporadas del año en las que hay más irradiación.

En un SFV fijo los paneles deben estar inclinados con un ángulo equivalente al de la latitud del lugar, si están horizontales recaudan menos energía. Es por ello que la comparación no se hizo con lo recaudado por los paneles horizontales, de haber sido así el porcentaje de ganancia de energía hubiera sido mucho mayor.

Las zonas en las que se recomienda usar el seguidor solar diseñado en esta tesis es en los lugares donde hay irradiación media y alta, éstas zonas del país son mostradas en la figura 1.1, ya que las zonas de baja irradiación disminuirían considerablemente el porcentaje de ganancia de energía calculado. Cuernavaca se considera una zona de irradiación media por lo tanto es un buen lugar para colocar sistemas fotovoltaicos.

Las condiciones bajo las que se recomienda en esta tesis agregarle al SFV un seguidor solar es cuando hay limitaciones de espacio y se requiere que el sistema entregue más energía, si se dispone de un área mayor a la necesaria es preferible colocar un panel más y así evitar gastos de implementación y mantenimiento.

## 5.2. RECOMENDACIONES A TRABAJOS FUTUROS.

El modelo del seguidor solar de dos ejes que se hizo en esta tesis necesitaría ser mejorado para que sea utilizable y no solo eso, tendría que ser mucho más eficiente que el de un eje para que sea viable su implementación ya que no convendría aumentar gastos de implementación y mantenimiento en un eje más, si va a recaudar lo mismo.

El seguidor solar de un eje polar que se propuso en esta tesis de igual manera podría ser mejorado para que sea más eficiente, por ejemplo se podría cambiar el material que se propuso (aluminio) por uno menos denso e igual o más resistente, con ello se lograría que pesara menos y por lo tanto se gastaría menos energía para reposicionarlo.

---

---

# BIBLIOGRAFÍA

---

---

- [1] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, and A. Sharifi, "A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1800-1818, 10// 2009.
- [2] G. Carr, "Alternative energy will no longer be alternative," *The Economist [en línea]*, pp. disponible en: <http://www.economist.com/news/21566414-alternative-energy-will-no-longer-be-alternative-sunny-uplands>, Accesado en enero de 2015.
- [3] IIE, "Radiación solar diaria primedio anual," p. <http://www.iie.org.mx/inicio.html>, [Accesado en enero de 2015].
- [4] I. M. Michaelides, S. A. Kalogirou, I. Chrysis, G. Reditis, A. Hadjiyianni, H. D. Kambezidis, *et al.*, "Comparison of performance and cost effectiveness of solar water heaters at different collector tracking modes in Cyprus and Greece," *Energy Conversion and Management*, vol. 40, pp. 1287-1303, 8// 1999.
- [5] M. A. M. Shaltout, A. Ghetas, and M. Sabry, "V-trough concentrator on a photovoltaic full tracking system in a hot desert climate," *Renewable Energy*, vol. 6, pp. 527-532, 7// 1995.
- [6] A. Şenpinar and M. Cebeci, "Evaluation of power output for fixed and two-axis tracking PVarrays," *Applied Energy*, vol. 92, pp. 677-685, 4// 2012.
- [7] S. A. Kalogirou, "Solar thermal collectors and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, pp. 231-295, // 2004.
- [8] M. M. Abu-Khader, O. O. Badran, and S. Abdallah, "Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 864-873, 4// 2008.
- [9] V. Poulek and M. Libra, "A very simple solar tracker for space and terrestrial applications," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 60, pp. 99-103, 1/15/ 2000.

- 
- [10] K. S. Karimov, M. A. Saqib, P. Akhter, M. M. Ahmed, J. A. Chattha, and S. A. Yousafzai, "A simple photo-voltaic tracking system," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 87, pp. 49-59, 5// 2005.
- [11] V. Poulek and M. Libra, "New solar tracker," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 51, pp. 113-120, 2/24/ 1998.
- [12] S. Abdallah and O. O. Badran, "Sun tracking system for productivity enhancement of solar still," *Desalination*, vol. 220, pp. 669-676, 3/1/ 2008.
- [13] C. Alexandru and C. Pozna, "Virtual prototype of a dual-axis tracking system used for photovoltaic panels," in *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 1598-1603.
- [14] C. Alexandru, "The design and optimization of a photovoltaic tracking mechanism," in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2009. POWERENG '09. International Conference on*, 2009, pp. 436-441.
- [15] N. I. Tatu and C. Alexandru, "Modeling and simulation of the tracking mechanism for a PV string," in *Automation Quality and Testing Robotics (AQTR), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 428-433.
- [16] S. Abdallah and S. Nijmeh, "Two axes sun tracking system with PLC control," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 1931-1939, 7// 2004.
- [17] M. C. M. J. B. Adán, "Prototipo fotovoltaico con seguimiento del Sol para procesos electroquímicos," Tesis de Maestría en Ciencias, Coordinación de Mecatrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México, 2007.
- [18] T. SOLAR, "sunearthtools," p. [http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=es](http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es), [Accesado en enero de 2015].
- [19] J. A. Manrique, "Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas " *Ed. Harla*, 1984.
- [20] I. d. E. R. (IER). (Accesado en agosto de 2015). *Estación Meteorológica y Solarimétrica, Promedio Mensual de la Insolación \*Global Horizontal. (MJ/m<sup>2</sup>)*. Available: [http://xml.cie.unam.mx/xml/se/cs/datos\\_rad.xml](http://xml.cie.unam.mx/xml/se/cs/datos_rad.xml)

- 
- [21] D. A. B. ORTEGA, "DINÁMICA DE PROTOTIPOS VIRTUALES: PÉNDULO CONTROLADO," D. D. I. MECÁNICA, Ed., ed. Cuernavaca, MOR., 2014, p. 12.
- [22] S. A. Mahmoud, M. M. Alsari, E. I. Reda, and R. M. Alhammadi, "MATLAB modeling and simulation of photovoltaic modules," in *Circuits and Systems (MWSCAS), 2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on*, 2012, pp. 786-789.
- [23] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, pp. 1198-1208, 2009.
- [24] S. Pukhrem, "A Photovoltaic Panel Model in Matlab Simulink," *Faculty of Electrical Engineering, Wroclaw University of Technology*, p. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/255721161\\_A\\_PHOTOVOLTAIC\\_PANEL\\_MODEL\\_IN\\_MATLABSIMULINK](https://www.researchgate.net/publication/255721161_A_PHOTOVOLTAIC_PANEL_MODEL_IN_MATLABSIMULINK).
- [25] M. C. E. J. N. Rodríguez, "Sistema Fotovoltaico con Seguimiento del Punto de Máxima Potencia y Regulación de Tensión Bajo Condiciones de Sombreado Parcial," *Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET*, 2016.
- [26] S. S.A., "Hoja de datos de panel fotovoltaico S60PC-250," [Accesado en Agosto, 2014] 2014.
- [27] weg, "Motores monofásicos," "Hoja de datos del motor monofásico, código de referencia 00236OS1P56", p. [www.weg.net](http://www.weg.net).

# ANEXOS

## Anexo A: Hoja de datos del panel Solartec S60PC-250.



**Solartec**  
Energía Renovable

**240 – 260 W SOLAR PANEL**  
EXCEPTIONAL EFFICIENCY AND PERFORMANCE /  
EFICIENCIA Y DESEMPEÑO EXCEPCIONAL

POLYCRYSTALLINE

<http://tsolarmex.com/attachments/File/pdf/S60PC.pdf>

## S60PC

60 Cell Modules  
S60PC-240, S60PC-245, S60PC-250,  
S60PC-255, S60PC-260



**BENEFITS / BENEFICIOS**

**High Efficiency / Alta Eficiencia**  
High cell efficiency of up to 14.8%.  
Líder en la industria con una eficiencia de las células superior.

**More Power / Mayor Potencia**  
Delivers up to 50% more power per unit area than conventional solar panels and 100% more than thin film solar panels.  
Ofrece hasta un 50% más de potencia por unidad de área a comparación de los paneles solares convencionales y un 100% más que los paneles solares de película delgada.

**Reduces Installation Cost / Reducción en Costos de Instalación.**  
More power per unit means fewer modules per installation. This saves both time and money.  
Más potencia por paneles representa menos módulos por instalación. Esto ahorra tanto tiempo como dinero.

**Reliable and Robust Design / Diseño Robusto y Confiable**  
Certified materials, tempered front glass, and a sturdy anodized frame allows the module to operate reliably in multiple mounting configurations.  
Materiales certificados, cristal templado y un robusto marco anodizado el cual permite al módulo operar sin problemas alguno y en múltiples configuraciones de montaje.



Solartec 240 – 260W solar modules provide industry leading efficiency and performance.  
Utilizing 60 next generation solar cells and an optimized module design, Solartec S60PC solar modules deliver and unprecedented conversion efficiency. Solartec 240 – 260W modules reduced voltage – temperature coefficient, and exceptional low – light performance attributes, provide far higher energy delivery at peak power than conventional modules.

Los módulos solares Solartec de 240 – 260 W proveen un liderazgo incomparable en la industria gracias a su eficiencia y desempeño.

El módulo solar S60PC utiliza 60 células solares de última generación, aunado al óptimo diseño del módulo, permitiéndole ofrecer una eficiencia superior. El reducido valor del coeficiente de voltaje-temperatura, y su desempeño excepcional en condiciones de baja iluminación permiten a los módulos de 240 – 260W entregar mucha mayor energía en condiciones de potencia máxima, en comparación con los módulos convencionales.

Tested Operating Conditions / Condiciones de Operación	
Temperature / Temperatura	-40° C to +60° C (-40F to +144° F)
Max load / Carga Máxima	50 psf (2400 pascals) front and back
Impact Resistance / Resistencia al Impacto	Hail ø- 25mm (1 in.) at 23 m/s (52mph)
Complies with / Normado con	IEC 61215 / IEC 61730 / NMX-J 618

## S60PC

[www.solartec.mx](http://www.solartec.mx)



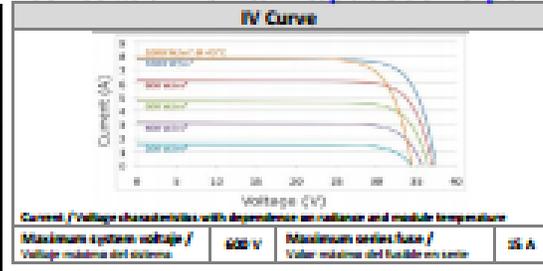
**240 – 260 W SOLAR PANEL**

EXCEPTIONAL EFFICIENCY AND PERFORMANCE /  
EFICIENCIA Y DESEMPEÑO EXCEPCIONAL

POLYCRYSTALLINE

<http://solarmex.com/attachments/File/pdf/S60PC.pdf>

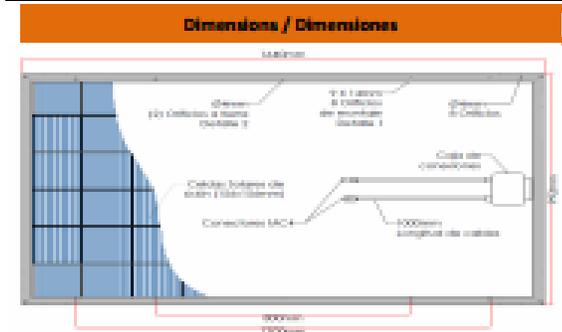
Specifications / Especificaciones	
Number of cells / Número de celdas	60 (6 x 10)
Module dimensions / Dimensiones del módulo	1640mm x 993mm
Weight / Peso	22.5 kg.
Cable / Cable	1000mm long double XLPE layer, TUV Certified, 4.0mm <sup>2</sup>
Connection / Conexión	IP68 Type IV Junction Box with 4 Bypass Diodes, MC4 type Plug, TUV Certified
Back Sheet / Hoja Trasera	white/black/fluor TPT or Glass
Frame / Marco	Aluminium (60 mm) or Without frame
Fire Rating / Clasificación de Fuego	Class C



**156mm Polycrystalline Silicon Cells Solar Module / Panel Solar con Celdas de 156mm de Silicio Policristalino**

Model / Modelo	S60PC-240		S60PC-245		S60PC-250		S60PC-255		S60PC-260	
	STC	NOCT								
Open circuit voltage (Voc) / Voltaje de circuito abierto	35.70 V	35.54 V	36.20 V	35.88 V	36.30 V	35.84 V	36.4 V	36.13 V	36.70 V	36.36 V
Optimum operating voltage (Vmp) / Voltaje en el punto de máxima potencia	30.00 V	31.00 V	30.40 V	31.32 V	30.40 V	31.32 V	30.70 V	31.56 V	30.90 V	31.72 V
Short circuit current (Isc) / Corriente de cortocircuito	6.57 A	6.85 A	6.63 A	6.90 A	6.71 A	6.96 A	6.80 A	7.04 A	6.89 A	7.13 A
Optimum operating current (Imp) / Corriente en el punto de máxima potencia	6.00 A	6.40 A	6.05 A	6.44 A	6.17 A	6.54 A	6.30 A	6.64 A	6.42 A	6.74 A
Maximum power (Pmax) / Potencia máxima	180 W	181 W	245 W	246 W	250 W	250 W	255 W	256 W	260 W	258 W
Module efficiency / Eficiencia del módulo	14.75%		15.05%		15.36%		15.67%		15.98%	

Temperature Coefficients / Coeficientes de Temperatura					
Of Isc / de Isc (α)	+0.061% / °C	Of Voc / de Voc (β)	-0.330% / °C	Of Pmax / de Pmax (γ)	-0.45% / °C



**Garantías / Garantías**

Módulo completo fotovoltaico módulo con sus partes defectos due to the manufacturing process for 30 years.

Los materiales que componen las partes fotovoltaicas y las partes defectos que se deben al proceso de la fabricación con un periodo de 30 años.

At least 80% output power provided by the photovoltaic module over 30 years.

Garantía mínima del 80% de la potencia de salida nominal del módulo a los 30 años.

At least 85% output power provided by the photovoltaic module over 25 years.

Garantía mínima del 85% de la potencia de salida nominal del módulo a los 25 años.

Measured under standard test conditions and normal operating cell temperature (STC: 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5, 1000h/yr, 48°C, 1000h/yr)

Módulo bajo condiciones de prueba estándar y bajo condiciones de temperatura de operación nominal de la celda (STC: 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5, 1000h/yr, 48°C, 1000h/yr)

The electrical characteristics of each photovoltaic module are individually monitored during the module assembly (in accordance with the manufacturer's tolerance ±5%.

Las características eléctricas de cada módulo fotovoltaico son monitorizadas individualmente durante las pruebas de fabricación del módulo. Tolerancia Garantizada ±5%.



- Applications / Aplicaciones**
- Building Integration
  - Integration industrial
  - Solar Power kits and Plants
  - Plants de energía solar
  - Solar Pumping Systems
  - Sistemas de bombeo solar
  - Energy Bill Savings
  - Reducción de costos en energía

**Distributed by / Distribuido por**



Contact / Contacto: Carretera Libramiento Norte Km 4.6  
Lote No. 9, Parque Industrial Apolo  
Irapuato, Gto. México CP 36826  
info@solartec.mx  
Phone Number: +52 (462) 625 9828



[www.solartec.mx](http://www.solartec.mx)

Anexo B: Hoja de datos del motor weg código de referencia 00236OS1P56.

<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-monofasicos-mercado-mexicano-catalogo-espanol.pdf>



www.weg.net 

**Motores Monofásicos**  
Armazón 48 & 56

Los motores monofásicos WEG son construídos de acuerdo a las especificaciones NEMA.

<p><b>Características Generales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▫ Motor Tipo Jaula de Ardilla.</li> <li>▫ Armazue con Capacitor.</li> <li>▫ Rodamientos de Bolas.</li> <li>▫ Aislante a Prueba de Goteo (APG / ODP) - IP21.</li> <li>▫ Rallamiento Clase B.</li> <li>▫ Tamaño 127V y 127/220V.</li> <li>▫ Armazue de Lámina Rollada.</li> <li>▫ Servicio Continuo</li> <li>▫ Color Negro</li> </ul>	<p><b>Ventajas Tecnológicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▫ Armazue Suave.</li> <li>▫ Protección Térmica.</li> <li>▫ Más silencioso.</li> <li>▫ Más ligero.</li> <li>▫ Alto rendimiento eléctrico.</li> <li>▫ Mejores en sistemas de ventilación.</li> <li>▫ Diseño mecánico optimizado (estilo americano).</li> </ul>
--	---

**Certificación** 

**Modelos**

<p><b>Uso General</b></p> 	<p><b>Uso Bomba</b> NEMA / Dynamic Pump</p> 
--	--

