



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**MASTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA**



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

**TESIS**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MECANISMO PARA UN SEGUIDOR  
SOLAR DE USO DOMÉSTICO**

Que para obtener el Grado de  
**Maestro en Ingeniería Mecánica**

Presenta

**Ing. Pedro Francisco Hernández Pérez**

**G12070989**

Director de Tesis

**M. C. Marco Antonio Olguín Amador**

Co-director de Tesis

**M. C. Eduardo Vega Vázquez**

Cd. Madero, Tamaulipas

Junio 2021



# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero  
Subdirección Académica  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Cd. Madero, Tam. **11 de junio de 2021**

OFICIO No. : U.061/21  
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE  
IMPRESIÓN DE TESIS

C. PEDRO FRANCISCO HERNÁNDEZ PÉREZ  
No. DE CONTROL G12070989  
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MECANISMO PARA UN SEGUIDOR SOLAR DE USO DOMESTICO”**

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

|                    |                                      |
|--------------------|--------------------------------------|
| PRESIDENTE:        | MTRO. MARCO ANTONIO OLGUÍN AMADOR    |
| SECRETARIO:        | MTRO. EDUARDO VEGA VÁZQUEZ           |
| VOCAL:             | MTRO. RICARDO LÓPEZ DE LARA GONZÁLEZ |
| SUPLENTE:          | MTRA. MARCELA CASTILLO JUÁREZ        |
| DIRECTOR DE TESIS: | MTRO. MARCO ANTONIO OLGUÍN AMADOR    |
| CO-DIRECTOR:       | MTRO. EDUARDO VEGA VÁZQUEZ           |

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*

*"Por mi patria y por mi bien"*

MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo  
MACG 'mdcoa'



Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos,  
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. 01 (833) 357 48 20, ext. 3110  
e-mail: depi\_cdmadero@tecnm.mx  
tecnm.mx | cdmadero.tecnm.mx



# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo 1. Introducción .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Objetivos .....   | 2         |
| 1.1.1 Objetivo general.....   | 2         |
| 1.1.2 Objetivos específicos .....   | 2         |
| 1.2 Justificación .....   | 3         |
| 1.3 Hipótesis .....   | 4         |
| 1.4 Alcances .....  | 4         |
| 1.5 Contenido.....  | 4         |
| <br>  |           |
| <b>Capítulo 2. Antecedentes.....</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1 Antecedentes históricos de la energía solar .....   | 5         |
| 2.2 Mecanismos .....  | 15        |
| 2.2.1 Grados de libertad .....  | 16        |
| 2.2.2 Par cinemático .....  | 17        |
| 2.3 Energía solar.....  | 17        |
| 2.4 Paneles fotovoltaicos .....   | 20        |
| 2.5 Estructura de soporte de los paneles solares .....  | 22        |
| 2.6 Seguidor solar .....  | 23        |
| 2.7 Momento de inercia de masas .....   | 32        |
| 2.7.1 Teorema de ejes paralelos .....   | 35        |
| 2.7.2 Determinación del momento de inercia de un cuerpo tridimensional<br>mediante integración.....   | 37        |
| 2.7.3 Momentos de inercia de cuerpos compuestos.....  | 37        |
| 2.8 Momento angular .....   | 38        |
| 2.9 Aspectos climatológicos de la región .....  | 40        |
| <br>  |           |
| <b>Capítulo 3. Metodología de la investigación .....</b>  | <b>44</b> |
| 3.1 Selección del material y las dimensiones principales de la estructura del<br>seguidor solar ..... | 45        |
| 3.2 Obtención de los ángulos de altura solar .....  | 46        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3 Selección de los materiales de las tiras bimetálicas .....                           | 47        |
| 3.4 Obtención del desplazamiento de masas en los extremos de las tiras bimetálicas ..... | 49        |
| 3.5 Bosquejo del seguidor solar y su modelado.....                                       | 51        |
| 3.6 Cálculo de la inercia rotacional .....   | 51        |
| 3.7 Cálculo del momento de torsión.....  | 52        |
| 3.8 Estudio estático de la estructura del seguidor solar .....                           | 53        |
| 3.9 Estudio dinámico del seguidor solar.....   | 54        |
| <b>Capítulo 4. Modelo analítico, diseño y su simulación.....</b>                         | <b>56</b> |
| 4.1 Estructura del seguidor solar .....  | 56        |
| 4.2 Seguimiento de la altura solar.....  | 58        |
| 4.3 Amortiguamiento .....  | 59        |
| 4.4 Materiales de las tiras bimetálicas y radio de curvatura.....                        | 59        |
| 4.5 Desplazamiento de masas en los extremos de las tiras bimetálicas.....                | 63        |
| 4.6 Modelado del seguidor solar .....  | 65        |
| 4.7 Simulación estática del seguidor solar .....   | 67        |
| 4.8 Simulación del movimiento del seguidor solar .....                                   | 70        |
| 4.9 Inercia rotacional de la estructura móvil del seguidor solar.....                    | 76        |
| 4.10 Momento de torsión del sistema .....  | 78        |
| 4.11. Aceleración angular del sistema .....  | 80        |
| <b>Capítulo 5. Resultados y análisis.....</b>  | <b>82</b> |
| 5.1. Resultados de la simulación estática .....  | 82        |
| 5.2. Resultados de la simulación dinámica .....  | 87        |
| 5.3. Seguimiento del Sol .....   | 90        |
| <b>Capítulo 6. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros .....</b>                | <b>96</b> |
| 6.1. Conclusiones.....   | 96        |
| 6.2. Recomendaciones .....   | 97        |
| 6.3. Trabajos futuros .....  | 97        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo 1. Introducción .....</b>                                     | <b>1</b>  |
| <b>Capítulo 2. Antecedentes.....</b>                                      | <b>5</b>  |
| <b>Capítulo 3. Metodología de la investigación .....</b>                  | <b>44</b> |
| <b>Capítulo 4. Modelo analítico, diseño y su simulación.....</b>          | <b>56</b> |
| <b>Capítulo 5. Resultados y análisis.....</b>                             | <b>82</b> |
| <b>Capítulo 6. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros .....</b> | <b>96</b> |
| <b>Bibliografías.....</b>   | <b>98</b> |

# Capítulo 1. Introducción

La generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles es la más utilizada en la actualidad. En el mundo, el 80 % del consumo energético proviene de combustibles fósiles. En el caso de la electricidad, el 60% se genera a partir de combustibles fósiles, con un 16 % generado con energía nuclear y otro tanto con hidroeléctrica. En México el porcentaje de energía eléctrica generada a partir de combustible fósiles es del 80% (Agencia Internacional de Energía, 2017). El uso de combustibles fósiles está siendo cuestionado, fundamentalmente por la producción de óxido de carbono (CO) que se emite en la atmósfera, lo que contribuye a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI).

La creación de tecnologías que permiten utilizar la energía solar como fuente de energía renovable ha tenido un gran auge en las últimas décadas, ya que representa una de las alternativas más viables para obtener energía útil y limpia para realizar labores. Por esta razón, los sistemas dedicados a captar y utilizar dicha energía para producir electricidad, calor o luz son mejorados continuamente procurando que su funcionamiento sea más eficiente y económico.

Uno de los métodos más conocidos para este propósito y más estudiados actualmente, es la utilización de celdas fotovoltaicas para generar electricidad a partir de la radiación solar.

Ésta ha sido la rama de mayor desarrollo e investigación, pues esta manera de generación de electricidad es de las más limpias que existen: su producción no genera desechos ni emisiones, la fuente de energía es prácticamente inagotable, además de obtenerse directamente la forma de energía más popular y práctica para las necesidades humanas: la energía eléctrica.

La potencia y orientación de la radiación solar varía según el día del año, la hora, las condiciones atmosféricas y la latitud del lugar de la posición del panel solar. Debido a estos cambios en la orientación, en las industrias que se dedican a usar la energía solar como fuente de energía se ha buscado la implementación de seguidores solares diseñados para que los paneles capturen durante más tiempo

la radiación directa del Sol durante el día. Se ha comprobado que la energía solar obtenida por paneles situados sobre seguidores solares es un 30% superior a la obtenida por paneles fijos en un año.

En el presente trabajo se presenta un seguidor solar diseñado para que pueda ser utilizado residencialmente, o en su caso, en comunidades rurales, para mejorar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos; para cumplir con este objetivo se debe considerar que el seguidor solar sea lo más económico posible. Una vez hecho el diseño, se realizó la simulación del mecanismo en un software de diseño mecánico, en donde se elaboraron los análisis de esfuerzos en la estructura del seguidor solar y se demostró el movimiento del mecanismo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Diseñar y simular un mecanismo aplicado en un panel fotovoltaico para que pueda seguir la elevación y el azimut del Sol y así logre obtener una mayor cantidad de energía.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

1. Diseñar el mecanismo que será utilizado para seguir la elevación y el azimut del sol.
2. Modelar en un software de diseño el mecanismo propuesto.
3. Determinar los esfuerzos y deformaciones de la estructura mediante un análisis estático.
4. Demostrar el movimiento del mecanismo seguidor a través de un análisis dinámico.

## 1.2 Justificación

El precio de la energía eléctrica va en aumento conforme pasan los años. En la página de la Comisión Federal de Electricidad se puede comparar el aumento en las cifras de los últimos años.

Las centrales termoeléctricas son la principal fuente de energía eléctrica en el mundo, estos sistemas necesitan de la quema de combustibles fósiles para producir electricidad. Las centrales térmicas que usan combustión liberan a la atmósfera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), considerado el principal gas responsable del calentamiento global.

En todo el mundo se está buscando optar por el uso de la energía renovable, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT, 2015) ha publicado una guía a este respecto y en ella subraya sobre todo tres beneficios que se obtienen del uso de la energía renovable:

- Ventajas ambientales: producción de energía cuyo resultado no daña al medio ambiente por emisión de Gases de efecto invernadero (GEI) pues prácticamente no lo emiten y tampoco emiten otros contaminantes.
- Ventajas económicas: reducción de tarifas en consumo de energía, generación de empleos directos (personal de instalación, trabajadores de construcción, desarrolladores, fabricantes de equipo, etc.).
- Ventajas sociales: posibilidad de llevar energía a comunidades remotas lo cual favorece a su desarrollo.

Una manera de aumentar el uso de las energías renovables para la producción de energía eléctrica es mejorando la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. Con ayuda de seguidores solares, los paneles fotovoltaicos obtienen mayor radiación directa del Sol durante más tiempo. En este trabajo se optó por diseñar un seguidor solar económico, que pueda ser de uso doméstico para que cada vez sean más los usuarios que opten por las energías renovables.

### **1.3 Hipótesis**

¿El mecanismo propuesto será capaz de seguir la trayectoria del Sol, la elevación y el azimut?

### **1.4 Alcances**

En esta investigación se propone un seguidor solar pasivo para uso doméstico, se tomó en cuenta que el seguidor se use para un panel solar. Se elaboró el estudio de cargas estáticas de la estructura y el análisis de movimiento con ayuda del programa *SolidWorks*.

En este trabajo no se considera la fabricación de algún tipo de prototipo físico.

Se utilizan las condiciones meteorológicas de la Zona Metropolitana de Tampico por lo que, si se requiere usar este dispositivo en otra región, se deben analizar las condiciones del clima de la zona en la que se llegara a usar para considerar las modificaciones necesarias.

### **1.5 Contenido**

Este trabajo se encuentra organizado como se indica a continuación. En el capítulo 2 se describen los antecedentes y la historia del arte referentes a seguidores solares. En el capítulo 3 se muestra la metodología de la investigación. En el capítulo 4 se presenta el modelo analítico, diseño y simulación. En el capítulo 5 se muestran los resultados y análisis. Por último, en el capítulo 6 se indican las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

## Capítulo 2. Antecedentes

### 2.1 Antecedentes históricos de la energía solar

El ser humano ha buscado el aprovechamiento de la energía solar a través de la historia. A medida que las civilizaciones han ido evolucionando, también han ido mejorando las técnicas para aprovechar la energía proveniente del Sol.

El Sol es un elemento indispensable para el desarrollo de la vida en el planeta. Una gran cantidad de civilizaciones antiguas conocían la importancia del Sol y desarrollaron religiones que giraban en torno a este astro solar, en muchos casos, la arquitectura también guardaba una estrecha relación con el Sol. Algunas de estas civilizaciones son Grecia, Egipto, Mesopotamia, el Imperio Inca y el Imperio Azteca.

Los griegos fueron los primeros en diseñar sus casas para aprovechar la luz del sol, aproximadamente en el año 400 a. C. (Solar-Energía, 2018).

Arquímedes (287-212 a. C.) un físico, inventor, científico y matemático griego, durante el asedio de Siracusa por los romanos, en el año 212 a. C., incendió las naves enemigas con ayuda de un espejo ustorio, el cual concentraba el calor del Sol en un punto. Los cronistas Plutarco y Livio hablan de este hecho.

También indica Plutarco, en tiempos de Numa Pompilio (714-671 a. C.), las vestales encendían el fuego sagrado con ayuda de copas metálicas de forma cónica, en las que se concentraban los rayos del Sol.

Parece ser también que, de manera semejante, los incas utilizaron un reflector de calor para preparar el ágape sagrado.

Hans Rau (1980) en su libro “Energía solar, aplicaciones prácticas” realiza una recopilación histórica sobre los espejos ustorios y cómo la humanidad ha aprovechado la energía solar.

Anastasio Kircher (1601-1680), sacerdote, erudito y científico, intentó repetir y mejorar el experimento del espejo ustorio de Arquímedes. Su intención no era incendiar naves, sino comprobar desde qué distancia podía incendiarse un haz de leña con ayuda de espejos ustorios. Además, en su obra del año 1671, *Ars magna lucis et umbrae* describe varios artilugios relacionados con la luz y las sombras, entre ellos varios diseños fantásticos de relojes solares.

Los florentinos Averani y Targioni realizaron en 1694 ensayos con espejos ustorios con la intención de llegar a volatizar diamantes. Buscaban ser los primeros en lograr la “muerte de un diamante”.

Ehrenfried Water von Tschirnhaus (1651-1708), matemático alemán miembro de la Academia de Ciencias de Francia, logró fundir masas cerámicas con ayuda de lentes ustorios de 80 cm de diámetro, es decir, lentes de mayor tamaño que las que en aquella época se empleaban para los telescopios. El Duque de Orleans se hizo enviar en 1699 uno de estos espejos ustorios de von Tschirnhaus, con el que el médico de cabecera del duque, Homberg, realizó los primeros ensayos de fusión de oro y platino. Ensayos similares, aunque con hierro, estaño y cobre, los realizó posteriormente Geoffroy.

Estimulado por estos resultados, el naturalista francés Georges Leclerc Buffon (1707-1788) efectuó en 1747 ensayos con un aparato compuesto por 360 espejos planos. Con un dispositivo menor, que comprendía 168 de estos espejos, cada uno de ellos de 15 X 15 cm, Buffon logró incendiar un haz de leña desde una distancia de 60 metros, experimento que realizó en los jardines reales. Con este aparato consiguió además fundir plomo desde una distancia de 39 m, y plata desde 18 m. De los resultados de estos ensayos, llegó a la conclusión de que Arquímedes pudo haber incendiado las naves enemigas desde una distancia de 30 a 42 m. Buffon consideró sus experimentos como ensayos necesarios para rebatir las afirmaciones de colegas contemporáneos, entre los que se contaba Descartes (1596-1650), que consideraban lo realizado por Arquímedes como pura leyenda. Más tarde, en sus experimentos Buffon utilizó espejos parabólicos, logrando con ellos fundir plomo desde una distancia de 100 m. Por su titánica

labor científica al escribir su famosa "*Histoire Naturelle*", una obra de 44 tomos, Luis XV le concedió el título de conde.

El físico francés Claude Servais Pouillet (1791-1868), ya conocido por sus estudios sobre pirheliómetros, calculó la energía calórica útil aprovechable del Sol sobre un metro cuadrado de superficie terrestre, entre el ecuador y el paralelo 43 de latitud norte o sur, obteniendo un valor de 690 Joules/segundo, lo que corresponde evidentemente al valor medio obtenido actualmente, de 700 W/m<sup>2</sup>.

En 1770, el naturalista suizo Nicolas de Saussure (1740-1799) construyó por primera vez una caja térmica típica, consistente en cinco semicubos dispuestos de manera que las superficies limítrofes se hallaban separadas por un espacio de aire. De Saussure comprobó que un espacio de aire aumentaba considerablemente el efecto térmico, mientras que con el empleo de más de dos capas de vidrio no se alcanza la absorción térmica deseada, resultando así un sistema antieconómico. Los cubos de vidrio se dispusieron sobre un tablero ennegrecido, rodeado por una caja térmica aislada. Los termómetros acusaron una temperatura exterior de +87 °C. De Saussure utilizó este dispositivo para el calentamiento de alimentos, logrando así el primer calentador solar.

El sabio francés Laurent Lavoisier (1743-1794), fundador de la química científica y muy conocido por sus trabajos fundamentales sobre la composición del aire y la importancia del hidrógeno, había incluido también la energía solar en sus investigaciones. En colaboración con la fábrica de vidrio St. Gobain empleó en 1772 una lente cóncava de 1.30 m de diámetro y 3.20 m de distancia focal. Esta enorme lente estaba llena de alcohol. Para reducir el foco, Lavoisier antepuso una lente más pequeña de 15 cm de diámetro. El conjunto mencionado iba montado sobre una placa de apoyo abatible, giratorio en un plano horizontal para poder seguir los movimientos del Sol. El ajuste se realizaba con volantes que accionaban largos tornillos de regulación. Con este dispositivo logró alcanzar Lavoisier temperaturas suficientes para fundir metales, incluso el platino (+ 1,773 °C).

En la figura 2.1 se puede ver un dibujo del experimento llamado “la lente de quemar” de Lavoisier. Dibujo en perspectiva de una gran lupa formada por dos espejos curvados, construido según diseño de la Academia Real de Ciencias, bajo la dirección de Mr. De TRUDAIXE, académico honorario de la misma, a la vista de los Srs. de Montigny. Macquer, Brisson, Cadet y Lavoisier, nombrados comisarios de La Academia.

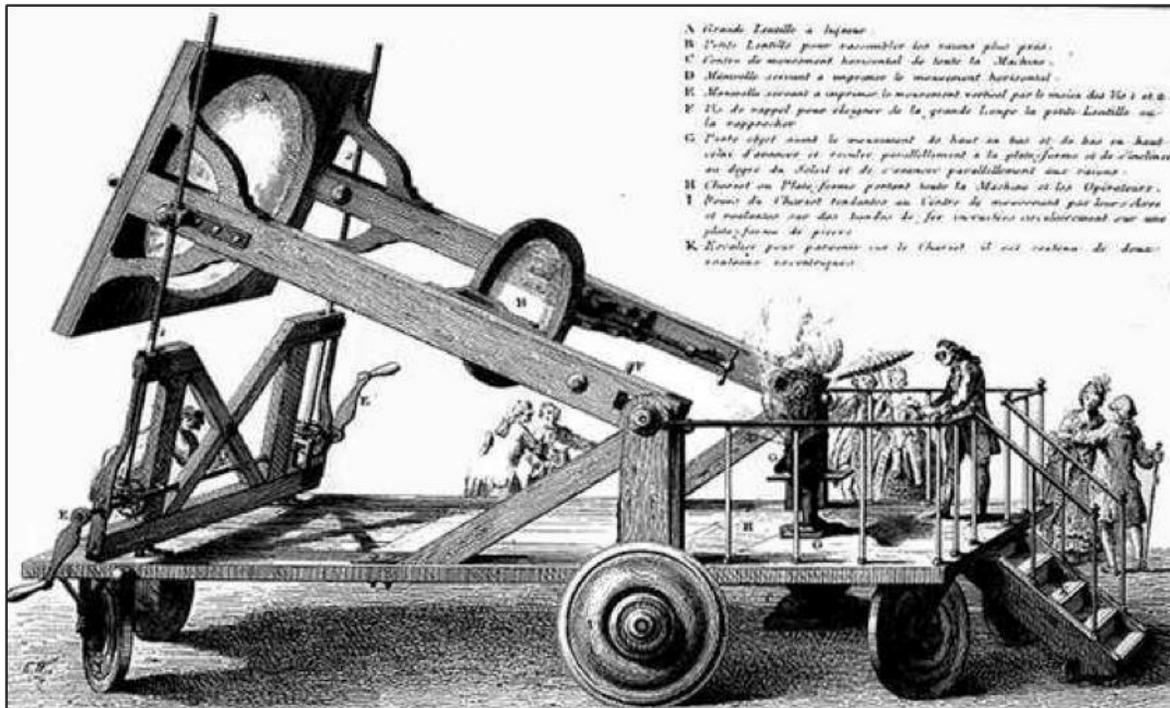


Figura 2.1. Dibujo en perspectiva del experimento “la lente de quemar”. Extraído de “Lavoisier en el año uno de la Revolución”, Smartt, 2013.

Además, por aquellas fechas Lavoisier había ya anunciado que los combustibles convencionales irían algún día en declive y que habría que optar por la energía solar por resultar más ventajosos los dispositivos ustorios solares y mucho más limpia, sin contaminación, esta fuente de calor. “El fuego de las estufas usuales es menos limpio que el obtenible por radiación solar” – escribe Lavoisier en sus memorias. Sus notables trabajos – muchos de los cuales los realizó en condiciones de vacío parcial – fueron trágicamente interrumpidos por la

Revolución Francesa. No pudo liberarse de la guillotina. Sus “jueces” lo condenaron a la pena capital alegando que la “República no necesitaba científicos”.

El espejo ustorio del astrónomo francés Jacques Cassini, tenía un diámetro de 1.10 m, por lo que se le denominó “espejo real”. Según apuntes del Observatorio de París, en 1744 este espejo cóncavo fue presentado a Luis XV y con él se alcanzaron temperaturas de más de 1,000 °C. En su fabricación se empleó una aleación de cobre, estaño y arsénico. Con ayuda de este se pudo fundir hierro de forja en dos segundos y la plata adquiriría una temperatura tal, que al ser sumergida en agua ofrecía el aspecto de “una araña blanca”.

Sir Henry Bessemer (1813-1898), inventor del procedimiento para la obtención del acero, construyó en 1868 una especie de “horno solar” cuyo espejo cóncavo, de un diámetro total de tres metros, estaba compuesto por 100 segmentos individuales. Con ayuda de este espejo fundió Bessemer grandes cantidades de cobre y zinc.

Casi por las mismas fechas, el físico francés C. L. A. Callier publicó libros sobre la explotación de la energía solar, obras que reflejaban un gran conocimiento de esta materia por parte de su autor, aunque no contenían datos concretos sobre los experimentos realizados por él.

Stock y Heynemann realizaron ensayos con espejos ustorios, en Alemania. En dichos ensayos se situó el foco de un recipiente de vidrio, en el que se había practicado un alto vacío, donde se hallaba la sustancia a fundir dispuesta en un pequeño cristal de óxido de magnesio. Stock y Heynemann utilizaron una lente de cristal plano-cóncava de 80 cm de diámetro, con una distancia focal de 50 cm. Con este aparato se logró fundir rápidamente pequeñas muestras de cobre y hierro, así como de manganeso.

El astrónomo inglés John Frederick Herschel construyó en 1837 una caja térmica que emplazó en el Cabo de Buena Esperanza. La caja era de caoba y como aislamiento optó por enterrarla en arena, dejando que sobresaliera únicamente su

parte superior. Con este aparato pudo cocer carne y verduras, alcanzando temperaturas de hasta +115 °C. En una expedición al Monte Whitney en California, el físico americano Samuel Pierpont Langley ensayó una caja térmica similar. A pesar de que el terreno se hallaba cubierto de nieve, la caja pudo utilizarse perfectamente para fines culinarios. Las elevadas pérdidas térmicas de la caja, debidas a la baja temperatura del aire, quedaron ampliamente compensadas por la gran intensidad de la radiación solar, propia de las grandes alturas (Rau H. 1980).

En 1838 el francés Alexandre Edmond Bequerel descubrió el efecto fotovoltaico. Bequerel estaba experimentando con una pila electrolítica con electrodos de platino y se dio cuenta que al exponerlos al Sol subía la corriente. Era el inicio de la energía solar fotovoltaica.

El ingeniero eléctrico inglés Willoughby Smith descubre el efecto fotovoltaico en sólidos en 1873. En este caso sobre el Selenio.

Pocos años más tarde, en 1877, el inglés William Grylls Adams profesor de Filosofía Natural en la King College de Londres, junto con su alumno Richard Evans Day, descubrieron que cuando exponían selenio a la luz generaba electricidad. De esta forma, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio.

Agustín Mouchot (1825-1911), profesor de física en Tours, construyó en colaboración con el inventor francés Abel Pifre, un aparato con reflector metálico troncocónico y una caldera tubular de hierro, con tubos de vidrio dispuestos en su foco. Con este aparato pudo prepararse un asado. Posteriormente se utilizó este mismo reflector para fundir plomo y zinc. En la exposición mundial de París, en 1878, exhibió una prensa tipográfica accionada por un “motor solar”. El reflector utilizado tenía un diámetro de cinco metros y reflejaba la radiación solar sobre la caldera de una máquina de vapor que impulsaba la citada prensa. Con ayuda de esta prensa tipográfica pudo imprimir en una hora 500 ejemplares de una hoja de divulgación que tituló “*Le Soleil*”. En colaboración con Pifre fundó la “*Société centrale des utilisateurs de la chaleur solaire*”. Sus experiencias con las

instalaciones que construyó se hallan contenidas en la obra “*La chaleur solaire et ses applications industrielles*”, publicada en París en el año 1879 (Rau H. 1980).

En 1883 el inventor norteamericano Charles Fritts construye la primera celda solar con una eficiencia del 1%. La primera celda solar fue construida utilizando como semiconductor el Selenio con una muy delgada capa de oro. Debido al alto costo de esta celda se utilizó para usos diferentes a la generación de electricidad. Las aplicaciones de la celda de Selenio fueron para sensores de luz en la exposición de cámaras fotográficas.

La celda de Silicio que hoy día utilizan proviene de la patente del inventor norteamericano Russell Ohl. Fue construida en 1940 y patentada en 1946.

En 1953, Calvin Fuller, Gerald Pearson y Daryl Chapin, descubrieron la célula solar de silicio. Esta célula fotovoltaica produce suficiente electricidad y es lo suficientemente eficiente para hacer funcionar pequeños dispositivos eléctricos.

La primera utilización práctica de la generación de energía con celdas fotovoltaicas fue en los dos primeros satélites geoestacionarios de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) y Estados Unidos de América (USA).

Los avances logrados con la celda de silicio en 1954 contribuyeron a la producción comercial, lográndose una eficiencia del 6%.

La URSS lanzó su primer satélite espacial en el año 1957, y los Estados Unidos un año después el 1 de febrero de 1958. En el diseño de este se usaron células solares creadas por Peter Iles en un esfuerzo encabezado por la compañía *Hoffman Electronics*.

La primera nave espacial que usó paneles solares fue el satélite norteamericano Vanguard 1, lanzado el 17 de marzo del año 1958. En la figura 2.2 se muestra un modelo del satélite Vanguard 1 y en la figura 2.3 una ilustración con sus componentes principales (Drew Ex Machina, 2018).

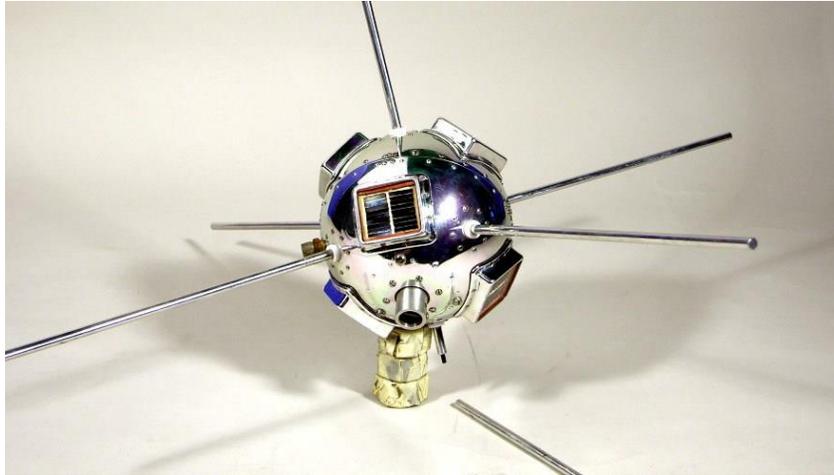


Figura 2.2. Modelo del satélite Vanguard 1. Reproducido de “*Vanguard 1: The Little Satellite That Cloud*”. Andrew LePage. 2018. Drew Ex Machina (<https://www.drewexmachina.com/2018/03/17/vanguard-1-the-little-satellite-that-could/>).

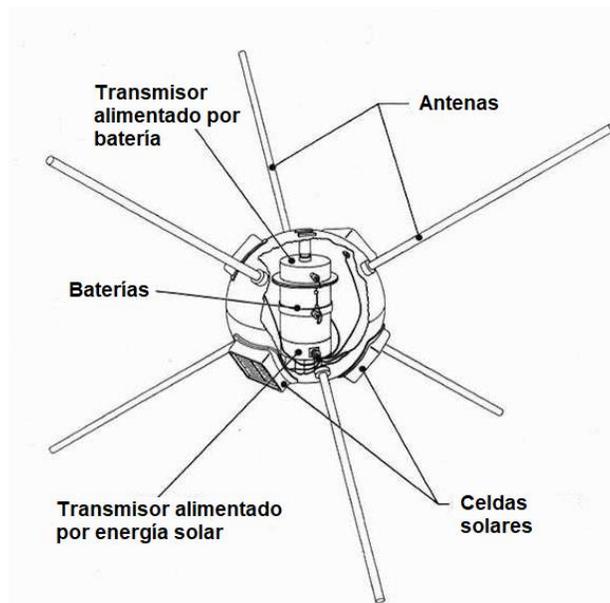


Figura 2.3. Dibujo en corte del satélite Vanguard 1. Adaptado de “*Vanguard 1: The Little Satellite That Cloud*”. Andrew LePage. 2018. Drew Ex Machina (<https://www.drewexmachina.com/2018/03/17/vanguard-1-the-little-satellite-that-could/>).

Este evento generó un gran interés en la producción y lanzamiento de satélites geoestacionarios para el desarrollo de las comunicaciones, en los que la energía provendría de un dispositivo de captación de la luz solar (Energiza, 2018).

Fue un desarrollo de gran importancia que estimuló la investigación buscando paneles cada vez más eficientes y motivó a la industria de tecnología. El primer mercado de los paneles fotovoltaicos fue entonces dirigido al sector aeroespacial.

Los resultados positivos de la misión Vanguard 1 marcaron una pauta en el desarrollo de las comunicaciones y los paneles fotovoltaicos.

En 1970 entra la celda de Silicio en el escenario de la industria y empieza el desarrollo de tecnologías en la producción. Se buscaba crear paneles más eficientes. La primera célula solar con heteroestructura de arseniuro de galio (GaAs) y altamente eficiente se desarrolló en la Unión Soviética por Zhore Alferov y su equipo de investigación.

La energía solar fotovoltaica para uso doméstico aparece en 1970 en una calculadora y algunos pequeños paneles para el techo. En los años 80 se van conociendo más aplicaciones de la energía solar fotovoltaica y se comienzan a utilizar en los techos de granjas y áreas rurales. Con la mejora de la eficiencia energética de los paneles solares y la disminución del costo hacen que sean más utilizados tanto en zonas rurales como urbanos y para actividades comerciales, así como también en viviendas particulares.

Un seguidor solar es un dispositivo mecánico que sigue el movimiento del Sol. El primer seguidor solar de dos ejes fue introducido en 1962 por Finster y era totalmente mecánico. Un año más tarde, Saavedra presenta un mecanismo, pero ya con control electrónico automático (Roth, P., 2005).

El seguidor de un solo eje horizontal ha evolucionado comercialmente desde la década de los ochenta, cuando se construyeron en diferentes plantas de energía termo solar de seguimiento de un solo eje horizontal en el desierto de Mojave, en el estado de California, Estados Unidos.

A principios de la década de 2000, hubo mucho debate sobre si la tecnología de seguimiento o la opción de inclinación fija eran mejor para la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. Los desarrolladores se mostraron escépticos de cambiar a una nueva tecnología en gran medida por preocupaciones de mantenimiento. Sin embargo, la tecnología de seguimiento se continuó desarrollando como una alternativa viable a la inclinación fija para mejorar la eficiencia de las plantas solares.

Varios componentes del seguidor solar como motores, controladores y sensores se hicieron cada vez más pequeños. Los sistemas de seguimiento también se optimizaron para reducir los requisitos de componentes. Los engranajes se volvieron más eficientes; los sensores se volvieron más compactos, usando *softwares* de control y tecnología de monitoreo. Toda la configuración se volvió más elegante, más simple de instalar sin el requisito de muchas herramientas especializadas.

Al-Mohamad (2004), con el propósito de mejorar la potencia diaria de un módulo fotovoltaico, propuso un sistema de seguimiento a un eje mediante PLC. Consiste en dos sensores fotoresistentes separados por una barrera que proporciona sombra a cada uno. Al aumentar la intensidad de radiación, la resistividad del sensor disminuye. Las señales de salida de cada fotoresistencia son transmitidas al PLC y comparada, con el fin de emitir la señal de salida adecuada para activar un sistema de seguimiento de tipo electromecánico.

Los seguidores solares han evolucionado continuamente para ser mejores y más eficientes. Desde los seguidores de eje único hasta los de eje doble, y desde los seguidores pasivos hasta los activos, los seguidores de hoy están equipados con funciones inteligentes que garantizan una mejor salida.

## 2.2 Mecanismos

Los mecanismos son elementos destinados a transmitir y transformar fuerzas y movimientos desde un elemento motriz (motor) a un elemento conducido. Permiten al ser humano realizar determinados trabajos con mayor comodidad y con menos esfuerzo. Se clasifican en dos grupos: mecanismos de transmisión del movimiento y mecanismos de transformación del movimiento.

En los mecanismos de transmisión del movimiento, el tipo de movimiento que tenga el elemento de entrada del mecanismo (elemento motriz) coincide con el tipo de movimiento que tenga el elemento de salida (elemento conducido).

En los mecanismos de transformación del movimiento, el tipo de movimiento que tenga el elemento de entrada del mecanismo es diferente del tipo de movimiento que tenga el elemento de salida.

Existen tres tipos de movimiento diferentes:

- Movimiento circular o rotatorio.
- Movimiento lineal o rectilíneo.
- Movimiento alternativo o de vaivén.

Los mecanismos de transmisión pueden ser, a su vez, agrupados en dos grandes grupos:

Mecanismos de transmisión circular: En este caso, el elemento de entrada y el elemento de salida tienen movimiento circular, un ejemplo serían los sistemas de engranajes.

Mecanismos de transmisión lineal: En este caso, el elemento de entrada y el elemento de salida tienen movimiento lineal, por ejemplo, la palanca.

Los mecanismos de transformación pueden ser, a su vez, agrupados en dos grandes grupos:

Mecanismos de transformación circular-lineal: En este caso, el elemento de entrada tiene movimiento circular, mientras que el elemento de salida tiene movimiento lineal. El mecanismo piñón-cremallera es un ejemplo de este tipo de mecanismo.

Mecanismos de transformación circular-alternativo: En este caso, el elemento de entrada tiene movimiento circular, mientras que el elemento de salida tiene movimiento alternativo, por ejemplo, el mecanismo de biela-manivela.

Es de señalar, que algunos de los mecanismos de transformación son reversibles. Así también, por ejemplo, el mecanismo biela-manivela se puede considerar, también, un mecanismo de transformación alternativo-circular, pues el elemento de entrada puede ser el que tiene movimiento alternativo, mientras que elemento circular lo tiene el elemento conducido (Aprendemos tecnología, 2018).

### **2.2.1 Grados de libertad**

Por grado de libertad se entiende el número de entradas independientes requeridas para determinar la posición de todos los eslabones del mecanismo respecto a tierra en cualquier instante.

En muchos casos resulta posible conocer la movilidad de un mecanismo a partir del número de eslabones y la cantidad y tipo de los pares que los enlazan. El criterio de Grübler para mecanismos planos establece que la movilidad está dada por:

$$G = 3(N - 1) - 2P_I - P_{II}$$

En donde:

G= grados de libertad.

N= número de miembros del mecanismo.

$P_I$ = número de pares binarios de un grado de libertad.

$P_{II}$ = número de pares binarios de dos grados de libertad.

Si  $G < 0$  significa que se tiene una estructura estáticamente indeterminada (hiperestática).

Si  $G = 0$  se tiene una estructura estáticamente determinada (isostática).

Si  $G = 1$  el mecanismo es desmodrómico. Dada la posición de un elemento se conoce al resto.

Si  $G = 2$  el mecanismo es diferencial.

Si  $G > 2$  se tiene un mecanismo de  $n$  grados de libertad.

### **2.2.2 Par cinemático**

Sistema de unión entre sólidos rígidos que permite ciertos movimientos relativos y restringe otros.

Existen muchos tipos distintos de pares cinemáticos, en función de qué movimientos restringen y cuáles permiten. Es habitual clasificarlos en dos grandes grupos:

- Pares cinemáticos inferiores: aquellos que establecen una unión entre los eslabones a través de una superficie
- Pares cinemáticos superiores: aquellos que establecen una unión entre los eslabones a través de un contacto teórico según una arista o un punto.

## **2.3 Energía solar**

La energía solar es una fuente de energía renovable que se obtiene del aprovechamiento de la radiación solar y con la que se pueden generar calor y electricidad. Los principales captadores de la energía solar son las células fotoeléctricas, los heliostatos y los colectores solares.

La radiación del Sol que incide en una superficie varía dependiendo del día, la hora, las condiciones meteorológicas, o la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal.

Los principales movimientos de la Tierra son el de rotación, y el de traslación; el primero de ellos se efectúa alrededor de un eje que pasa por los polos, el eje polar, siendo la duración media de una vuelta completa de 23 horas 54 minutos; y el segundo, describe una trayectoria elíptica con una duración de 365.24 días. La figura 2.4 muestra el movimiento de traslación de la Tierra con respecto al Sol. La excentricidad de la órbita terrestre hace variar la distancia entre la Tierra y el Sol en el transcurso de un año. A primeros de enero la Tierra alcanza su máxima proximidad al Sol, este evento es llamado perihelio. A principios de julio llega a su máxima lejanía, este suceso es llamado afelio. La distancia entre la Tierra y el Sol en el perihelio es de 142.700.000 kilómetros y la distancia Tierra-Sol en el afelio es de 151.800.000 kilómetros.

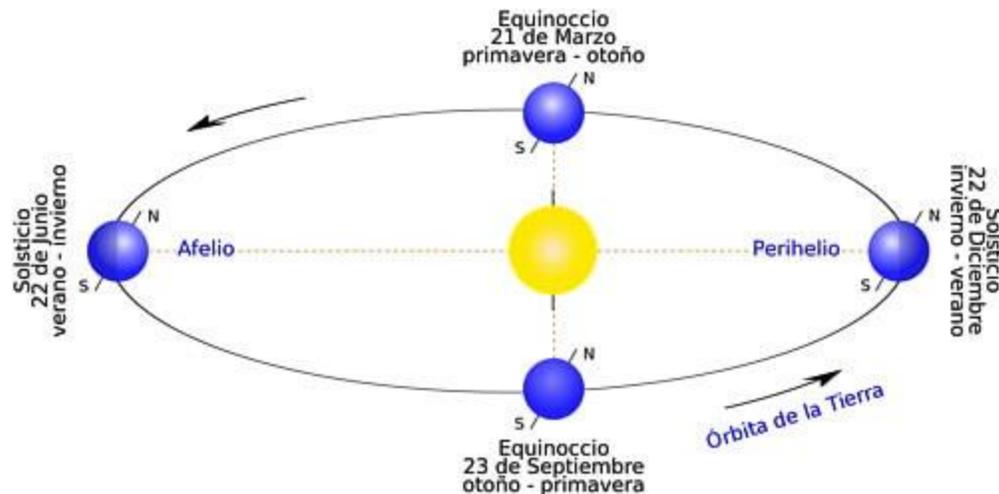


Figura 2.4. Diagrama del movimiento de traslación de la Tierra con respecto al Sol. Reproducido de "Movimientos de la Tierra". 2018. Astronomía (<https://www.astromia.com/tierraluna/movtierra.htm>).

El equinoccio es el momento del año en el que el día y la noche tienen la misma duración debido a que el Sol se encuentra sobre el Ecuador del planeta Tierra. El

equinoccio tiene lugar dos veces al año, entre el 20 y el 21 de marzo y entre el 22 y 23 de septiembre.

La rotación casi circular de la tierra alrededor del Sol se realiza en un año en un plano llamado eclíptica. El eje polar mantiene un ángulo de  $23,45^\circ$  con el eje de la eclíptica durante el movimiento de la Tierra.

La oblicuidad de la eclíptica es la responsable del diferente calentamiento de la Tierra al variar su posición a lo largo de la órbita y de la diferente duración del día y de la noche a lo largo del año. Así, por ejemplo, cuando es verano en el hemisferio Norte, los rayos solares inciden con un ángulo menor respecto a la normal a la superficie que en un lugar del hemisferio Sur con la misma latitud. De este modo, la componente normal de los rayos solares a un plano horizontal es mayor en el hemisferio Norte que en el Sur. Esto produce un mayor calentamiento en el hemisferio Norte durante el verano.

El movimiento aparente del Sol es diferente dependiendo del día del año y de la ubicación del lugar en donde se ve el astro. Para analizar este movimiento se utilizan dos ángulos: la altura solar y el azimut.

- Altura solar: es el ángulo que forma la horizontal del lugar con la posición aparente del Sol. Su valor varía entre  $0$  y  $90^\circ$ .
- Azimut: El azimut solar es el ángulo medido en el sentido de las agujas del reloj entre el punto cardinal Sur (en el hemisferio norte) o Norte (en el hemisferio sur) y la proyección sobre el plano horizontal local de la recta que une la Tierra al Sol. El ángulo se mide en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte y en el sentido contrario en el hemisferio sur, utilizando las proyecciones sobre el plano horizontal del punto de observación. El azimut solar es negativo por la mañana (dirección Este), nulo o igual a  $180^\circ$  a mediodía y positivo por la tarde (dirección Oeste), en todo el planeta. El azimut geográfico se mide siempre en el sentido de las agujas del reloj a partir del Norte, independientemente del punto de observación (Beckers, 2004).

En la figura 2.5 se puede ver un diagrama que describe la posición del Sol con respecto a un punto con ayuda del ángulo del azimut y el ángulo de la altura solar.

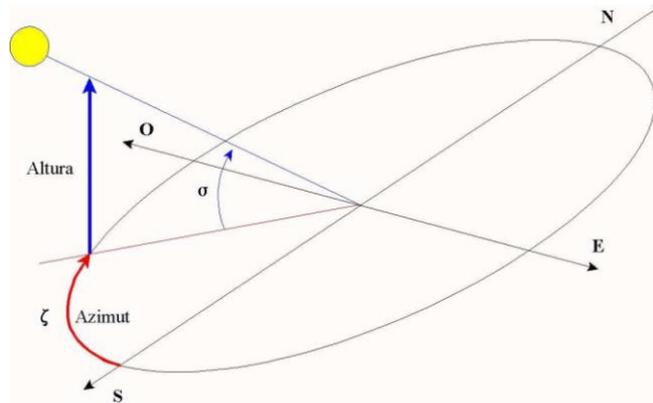


Figura 2.5. Representación de la altura solar ( $\sigma$ ) y el azimut ( $\zeta$ ) que describen el movimiento aparente del Sol en la Tierra. Adaptado de “El diagrama solar”. Beckers. 2004.

## 2.4 Paneles fotovoltaicos

La creación de tecnologías que permiten utilizar la energía solar como fuente de energía renovable ha tenido un gran auge en las últimas décadas, ya que representa una de las alternativas más viables para obtener energía útil y limpia para realizar labores. Por esta razón, los sistemas dedicados a captar y utilizar dicha energía para producir electricidad, calor o luz son mejorados continuamente procurando que su funcionamiento sea más eficiente y económico.

Uno de los métodos más conocidos para este propósito y más estudiados actualmente, es la utilización de celdas fotovoltaicas para generar electricidad a partir de la radiación solar.

Los paneles fotovoltaicos están formados por numerosas celdas que convierten la luz en electricidad. Las celdas a veces son llamadas células fotovoltaicas. Estas celdas dependen del efecto fotovoltaico por que la energía lumínica produce

cargas positiva y negativa en dos semiconductores próximos de diferente tipo, produciendo así un campo eléctrico capaz de generar una corriente.

Los materiales para celdas solares suelen ser silicio cristalino o arseniuro de galio. Los cristales de arseniuro de galio se fabrican especialmente para uso fotovoltaico, mientras que los cristales de silicio están disponibles en lingotes normalizados, más baratos, producidos principalmente para el consumo de la industria microelectrónica. El silicio policristalino tiene una menor eficacia de conversión, pero también menor coste.

Cuando se expone a luz solar directa, una celda de silicio de 6 cm de diámetro puede producir una corriente de alrededor 0,5 A a 0,5 V (equivalente a un promedio de 90 W/m<sup>2</sup>, en un campo de normalmente 50-150 W/m<sup>2</sup>, dependiendo del brillo solar y la eficiencia de la celda). El arseniuro de galio es más eficaz que el silicio, pero también más costoso.

Las células de silicio más empleadas en los paneles fotovoltaicos se pueden dividir en tres subcategorías:

- Las células de silicio monocristalino están constituidas por un único cristal de silicio. Este tipo de células presenta un color azul oscuro uniforme.
- Las células de silicio policristalino (también llamado multicristalino) están constituidas por un conjunto de cristales de silicio, lo que explica que su rendimiento sea algo inferior al de las células monocristalinas. Se caracterizan por un color azul más intenso.
- Las células de silicio amorfo. Son menos eficientes que las células de silicio cristalino, pero también más baratas. Este tipo de células es, por ejemplo, el que se emplea en aplicaciones solares como relojes o calculadoras.

Los lingotes cristalinos se cortan en discos finos como una oblea, pulidos para eliminar posibles daños causados por el corte. Se introducen dopantes — impurezas añadidas para modificar las propiedades conductoras— en las obleas, y se depositan conductores metálicos en cada superficie: una fina rejilla en el lado donde da la luz solar y usualmente una hoja plana en el otro. Los paneles solares

se construyen con estas celdas agrupadas en forma apropiada. Para protegerlos de daños, causados por radiación o por el manejo de éstos, en la superficie frontal se los cubre con una cubierta de vidrio y se pegan sobre un sustrato —el cual puede ser un panel rígido o una manta blanda—. Se hacen conexiones eléctricas en serie-paralelo para fijar el voltaje total de salida. El pegamento y el sustrato deben ser conductores térmicos, ya que las celdas se calientan al absorber la energía infrarroja que no se convierte en electricidad. Debido a que el calentamiento de las celdas reduce la eficacia de operación es deseable minimizarlo. Los ensamblajes resultantes se llaman paneles solares.

## **2.5 Estructura de soporte de los paneles solares**

Cuando se utiliza una estructura de soporte de los módulos solares, conviene emplear materiales que presenten buenas propiedades mecánicas, además de una gran durabilidad, teniendo en cuenta la larga vida útil de las instalaciones. Normalmente, los elementos de soporte son de alguno de los siguientes materiales:

- Aluminio anodizado, material de poco peso y gran resistencia.
- Hierro galvanizado, apropiado para grandes cargas.
- Acero inoxidable, para ambientes muy corrosivos, es el de mayor calidad y precio más elevado.

También existe la posibilidad de realizar las estructuras de los módulos fotovoltaicos con madera, debidamente tratada; con unas operaciones mínimas de mantenimiento, presentando unas condiciones aceptables para este uso. Las piezas de fijación, como los tornillos, deberían ser siempre de acero inoxidable (Panel fotovoltaico, 2018).

En el hemisferio norte la estructura del panel solar suele estar orientadas hacia el sur y con una cierta inclinación que optimiza la captación de radiación.

La cantidad de energía eléctrica que puede producir un panel fotovoltaico depende directamente de la manera en que reciba el suministro de radiación solar. (*California Energy Commission*, 2001). Una buena posición para los paneles fotovoltaicos debe estar libre de obstrucciones que bloqueen la luz solar, y debe cumplir esa condición a lo largo de todo el día.

La superficie de los paneles fotovoltaicos es limitada, y por tanto es deseable que se aprovechen de manera óptima, recibiendo la mayor cantidad de radiación posible sobre ella. La fracción de energía total radiante emitida por el Sol, que alcanza la superficie de la celda solar, se puede expresar como un factor de vista, y este factor es dependiente de la posición en que se encuentre el objeto receptor, un máximo factor se da cuando ambas superficies se encuentran totalmente de frente, es decir, no existe diferencia de ángulo entre sus normales (Cengel y Boles, 2006). La posición del Sol varía a lo largo del día, y también en las distintas épocas del año, es por ello que la detección de la posición del Sol y la construcción de dispositivos que puedan direccionar los diferentes tipos de paneles perpendicularmente al Sol juegan un papel fundamental en el desempeño de los mismos, al colocar los paneles en dirección a los rayos solares, la radiación que pueden captar se hace máxima; la mejora en la eficiencia es muy significativa pues va de un 25% a un 40% más en comparación con un panel estático (Pérez L., 2004),(Clifford & Eastwood, 2004). El dispositivo que sirve para realizar esta labor se llama seguidor solar.

## **2.6 Seguidor solar**

Un seguidor solar es un dispositivo conformado básicamente por una parte fija y una móvil, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar, para lo cual cuenta con una superficie de captación que debe permanecer perpendicular a los rayos del Sol durante el día y dentro de su rango de movimiento (Escobar Mejía et al., 2010).

Un seguidor ideal sería aquel que permitiese que en todo momento el módulo solar apuntase con precisión hacia el Sol, compensando tanto los cambios en el ángulo de altitud del Sol (durante todo el día), el desplazamiento latitudinal del Sol (durante los cambios de estación) y los cambios en el ángulo de azimut. Los sistemas de seguimiento solar pueden clasificarse atendiendo a dos criterios: los ejes del plano que forma el módulo y que se mueven con el propósito de seguir la trayectoria del Sol y los sistemas de control que permiten el seguimiento del Sol.

Respecto a los tipos de seguidores que existen en función del eje o ejes del plano que formarían los paneles y que son capaces de variar su posición en función del recorrido solar se tienen:

- Seguimiento solar a un eje: tiene un grado de libertad proporcionado por un eje de rotación, el cual comúnmente se encuentra alineado con el norte. Actualmente se usan tres tipos de seguidores solares a un eje, los cuales son los siguientes:
  - El seguimiento de forma oblicua, o en el eje polar, es aquel que se realiza con el eje de giro orientado al sur y una inclinación fija.
  - El seguidor azimutal es aquel que gira sobre un eje en disposición vertical y el ángulo coincidente con la latitud.
  - El seguidor horizontal, que sigue el Sol de este a oeste a lo largo del día en el eje de inclinación u horizontal. Esto lo realiza con el eje en la dirección Sur-Norte y variando su inclinación a lo largo del día. En la figura 2.6 se identifican cada uno de estos seguidores solares a un eje.
- Seguimiento solar a dos ejes: su objetivo es orientar de manera continua los paneles, de tal manera que la radiación solar incida de manera perpendicular sobre los mismos, optimizando así la captación de energía. En la figura 2.7 se encuentra un ejemplo del seguidor solar a dos ejes. En la actualidad existen numerosos seguidores comerciales de este tipo.

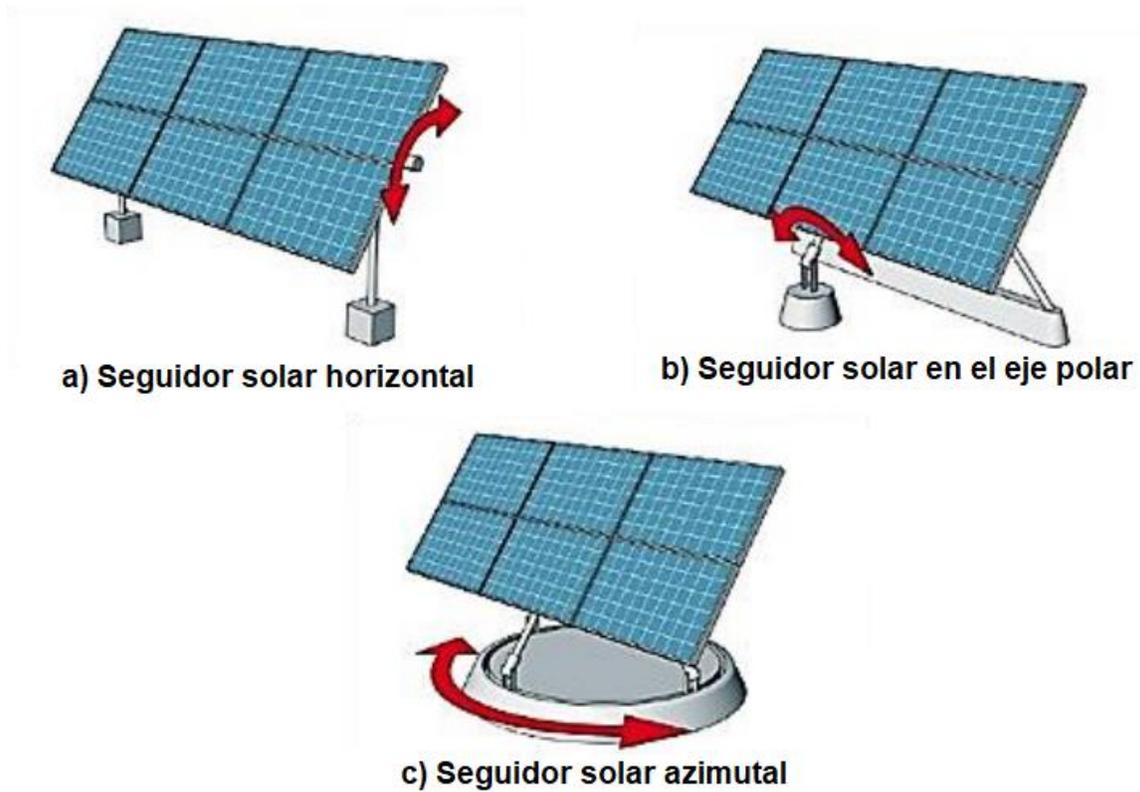


Figura 2.6. Seguidores solares a un eje, a) horizontal, b) en el eje polar, c) azimutal. Adaptado de “Solar tracker market expected to grow”. 2015. Evolve India (<http://evolveindia.in/blog/2015/10/24/solar-tracker-market-expected-to-grow/>).

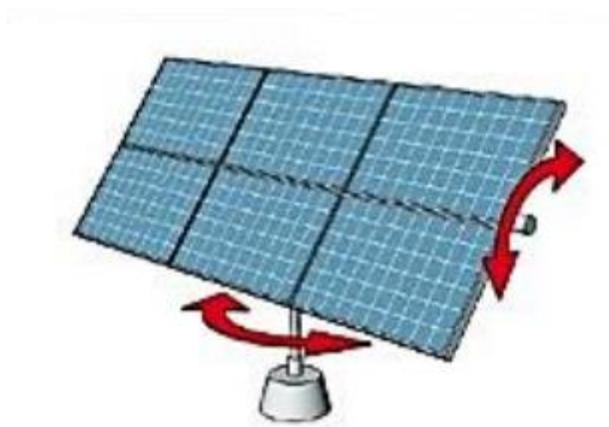


Figura 2.7. Esquema de un seguidor solar a dos ejes. Adaptado de “Solar tracker market expected to grow”. 2015. Evolve India (<http://evolveindia.in/blog/2015/10/24/solar-tracker-market-expected-to-grow/>).

En cuanto a los tipos de seguidores en función del sistema de control del seguimiento, se clasifican en activos y pasivos. Reyes A. (2013) presentó en su artículo los tipos de seguidores que más se utilizan.

Los seguidores activos pueden clasificarse en función del sistema electrónico de control de estos. Así, se tienen seguidores controlados mediante un microprocesador y una unidad electro-óptica, por celdas solares bifaciales auxiliares, astronómicos que van en función de la hora y la fecha, y una combinación de estos tres sistemas.

En los seguidores basados en un microprocesador y un sensor electro-óptico la señal de control se consigue gracias a la diferencia de iluminación en el sensor a lo largo del día. Un solo controlador es capaz de determinar la posición que deben adoptar un gran número de paneles. Se suelen utilizar sensores electro-ópticos para llevar a cabo la auto calibración del sistema. Requieren una instalación muy precisa y están destinados principalmente para centrales en las que se genera electricidad por concentración.

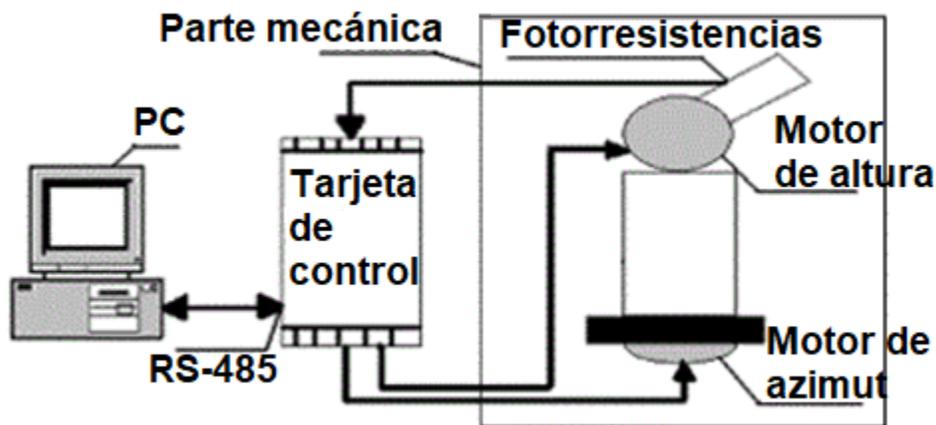


Figura 2.8. Esquema de seguidor solar con microprocesador y fotorresistencias. Adaptado de “Seguidor solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar” Machado et al. 2015.

Por ejemplo, el seguidor solar por punto luminoso que se muestra en la figura 2.8 utiliza un microprocesador para ordenar el movimiento del seguimiento del Sol. En esta figura se observa que presenta dos bloques principales: el de la tarjeta controladora y el de la parte mecánica.

La tarjeta controladora es la que realiza el control del sistema en general, ya que en esta se encuentra el microcontrolador, el cual es el encargado de realizar todas las tareas necesarias para lograr un seguimiento directo al Sol. Además, se encuentran los bloques de entrada de la medición de los fotosensores y los actuadores usados en el control de los motores de pasos.

La parte mecánica consta de los elementos necesarios como bases, plataformas, cilindros, engranajes, entre otros, donde van acoplados los motores de pasos y las fotorresistencias (Machado et al, 2015).

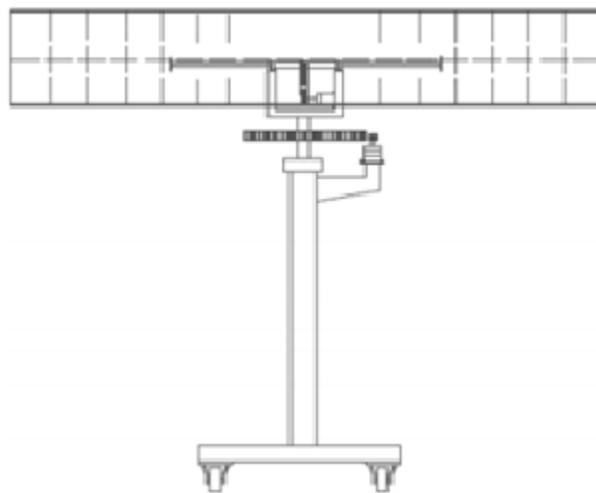


Figura 2.9. Diagrama del seguidor solar astronómico propuesto por Lemus. Reproducido de “Diseño y construcción de un sistema seguidor de Sol con modelo astronómico”. Lemus C. 2011.

Los seguidores solares astronómicos son aquellos controlados a través de la posición solar que es una función de fecha y hora. En estos, una computadora calcula la posición del Sol a partir de algoritmos a partir de la hora, fecha y

coordenadas geográficas para enviar señales a un motor o motores eléctricos. No obstante, en muchas ocasiones se hace uso de sensores para definir una posición específica.

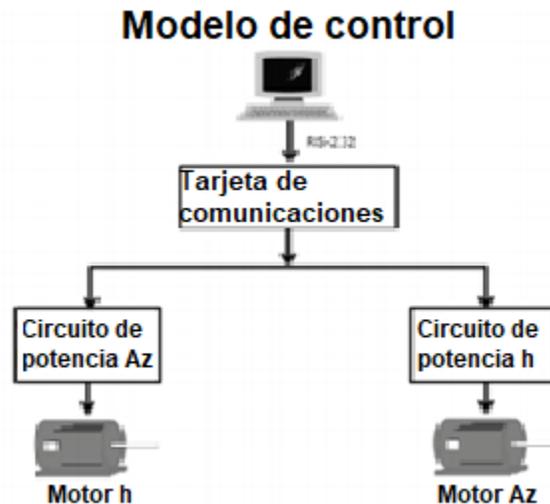


Figura 2.10. Esquema de la interfaz de usuario de un seguidor solar astronómico propuesto por Lemus. Reproducido de “Diseño y construcción de un sistema seguidor de Sol con modelo astronómico”. Lemus C. 2011.

En la figura 2.9 se ilustra la estructura de un seguidor solar por modelo astronómico propuesto por Andrés Lemus, en la figura 2.10 se encuentra el esquema de la interfaz de usuario de este seguidor. (Lemus C., 2011). A partir de la configuración de fecha y hora del PC y las coordenadas geográficas del lugar suministradas por el usuario y en función del ángulo de paso de los motores, el programa determina la cantidad de pulsos necesarios para lograr que la normal al plano del panel alcance los ángulos de posición actuales del Sol en los dos ejes de seguimiento. Esta información se envía por el puerto serie del PC a una tarjeta de comunicaciones, cuyo componente principal es un microcontrolador. Esta tarjeta transmite los pulsos a los motores a través de dos circuitos de potencia que amplifican la capacidad de corriente del microcontrolador y lo aíslan de los motores mediante optoacopladores. Los motores, acoplados mediante engranes a

los ejes de giro de la estructura, guían el movimiento del panel fotovoltaico instalado sobre esta de manera que la incidencia de la luz solar sobre su superficie sea perpendicular durante todo el día.

Los seguidores pasivos son capaces de seguir el movimiento aparente del Sol sin la necesidad de un control electrónico o un motor. Normalmente este tipo de seguidores tiene un menor costo de mantenimiento sobre los seguidores activos, pero pueden dejar de trabajar en condiciones de bajas temperaturas y días con una alta nubosidad. En este tipo de seguidores se encuentran los que se basan en la expansión térmica de un fluido y los que tienen un actuador con memoria de forma.

Los seguidores que utilizan la expansión térmica de un fluido para conseguir el movimiento consisten en una tubería a modo de marco interconectada sobre la que se sitúa el o los módulos. En el interior de la tubería se aloja un fluido, suele ser Freón. Cuando el panel está desalineado, el Sol calienta el Freón en un lado del marco más que en el otro. Esa diferencia de temperatura hace que el Freón calentado se evapore. Este gas puede empujar un pistón o simplemente fluir al otro lado del marco y mover todo el panel por gravedad. La compañía *Zomeworks Corporation* diseñó un seguidor solar pasivo con estas características. En la figura 2.11 se muestran diagramas del funcionamiento del seguidor “*Universal Track Rack*” de *Zomeworks Corporation*. A la salida del Sol (figura 2.11 a) El “*Track Rack*” (seguidor fotovoltaico / solar) comienza el día mirando hacia el oeste. A medida que el Sol sale por el este, calienta el recipiente del lado oeste sin sombra, enviando al líquido al recipiente del lado del este sombreado. A medida que el líquido se mueve a través de un tubo de cobre hacia el bote del lado este, el seguidor gira de manera que mira hacia el este. Durante la mañana (figura 2.11 b) el calentamiento del líquido es controlado por las placas de aluminio que dan sombra. Cuando un recipiente se expone al Sol más que el otro, su presión de vapor aumenta, lo que obliga al líquido a pasar al área más fría y sombreada. El peso cambiante del líquido hace que la rejilla gire hasta que los recipientes estén sombreados por igual. A medida que el Sol se mueve (figura 2.11 c), la rejilla sigue

inclinándose (aproximadamente a 15 grados por hora), buscando continuamente el equilibrio a medida que el líquido se mueve de un lado del seguidor al otro. Al anochecer (figura 2.11 d) la rejilla completa su ciclo diario orientado al oeste. Permanece en esta posición durante la noche hasta que es "despertada" por el Sol naciente a la mañana siguiente. (Zomeworks Corporation, 2018).

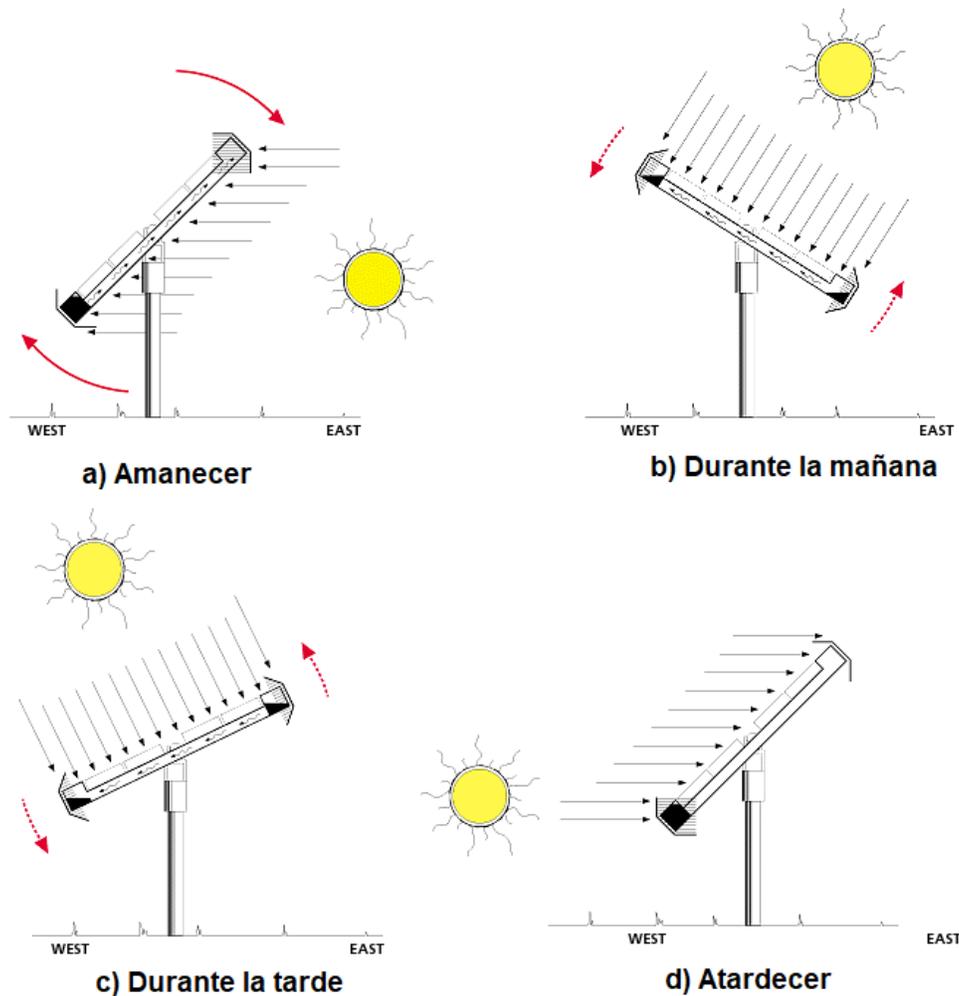


Figura 2.11. Diagramas del funcionamiento del seguidor “*Universal Track Rack*” de la empresa *Zomeworks Corporation*. Adaptado de “*How do trackers work?*”. 2018. Zomeworks Corporation (<https://zomeworks.com/track-racks>).

Un ejemplo de un seguidor solar con actuadores con memoria de forma es el diseñado por Poulek (1994), el cual usa dos cables metálicos fácilmente deformables a temperaturas relativamente bajas, que pueden recobrar su forma original cuando son calentados por encima de la temperatura de transformación, estos son los actuadores, que, a su vez, están unidos a una lámina metálica que funciona a modo de estator y a un rotor que transmite el movimiento a un eje. De esta manera, en cada ciclo de contracción y dilatación de los actuadores, se produce un movimiento de giro, y, por lo tanto, un trabajo mecánico que permite la orientación de los paneles fotovoltaicos. En la figura 2.12 se presenta el diagrama de los actuadores con memoria de forma que se utilizan en el seguidor diseñado por Poulek (a) antes de ser orientado y (b) después de ser orientado.

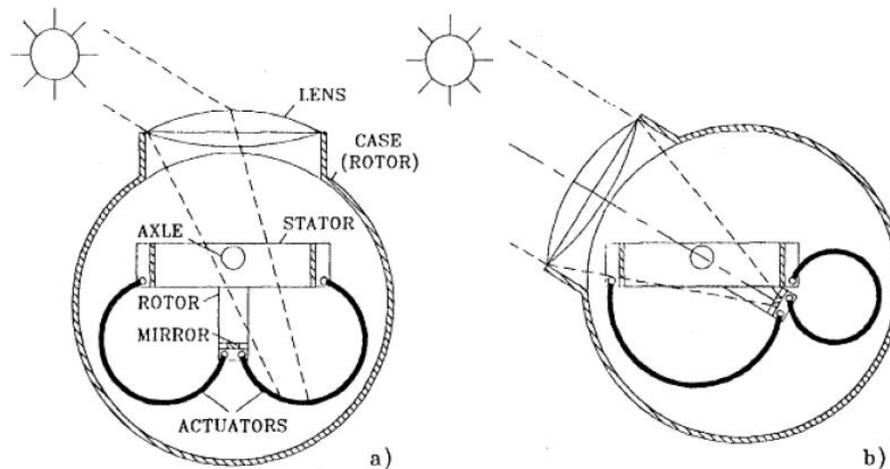


Figura 2.12. Diagrama del seguidor solar diseñado por Poulek que utiliza actuadores con memoria de forma. Reproducido de “*Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors*”. Poulek V. 1994.

Otro tipo de seguidor solar pasivo es uno que utiliza tiras bimetálicas en sus extremos para realizar el movimiento. Al unir longitudinalmente dos tiras metálicas de diferentes materiales con un coeficiente de dilatación distinto se obtiene la tira bimetálica que es un dispositivo sencillo que se puede utilizar para convertir incrementos de temperatura en desplazamiento mecánico. Esto se debe a que, si

existe algún cambio de temperatura, los materiales que conforman la tira bimetalica sufren un cambio en sus dimensiones por efecto de la dilatación térmica; el material con mayor coeficiente de dilatación sufre aumentos o decrementos de sus medidas mayores comparadas con los del material con menor coeficiente de dilatación. Al tener una diferencia en su longitud, las tiras se ven forzadas a curvarse para mantener la condición de unión. Balam (2010) realizó un prototipo de un seguidor solar pasivo impulsado por el par torsional generado por tiras bimetalicas en los extremos del seguidor. En la figura 2.13 se aprecia el esquema general del prototipo hecho por David Balam.

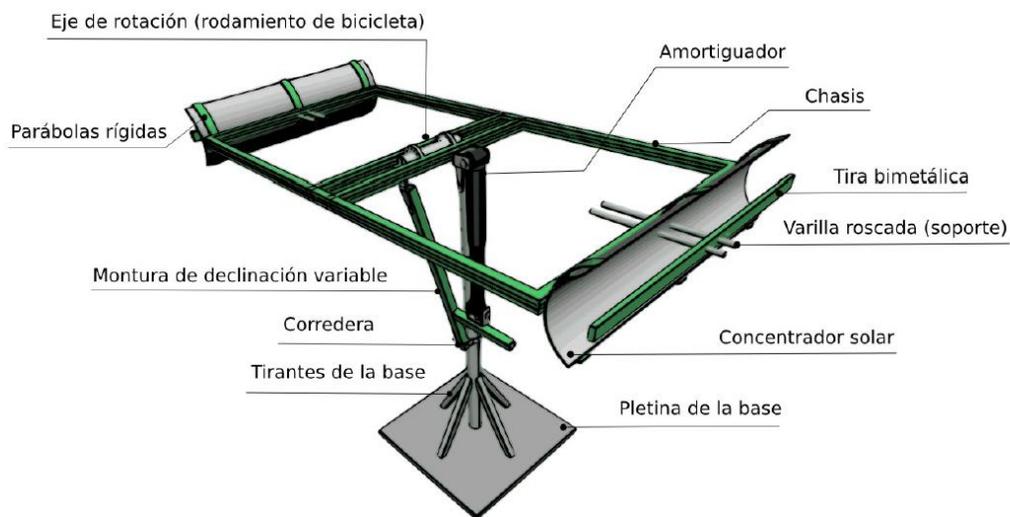


Figura 2.13. Prototipo de seguidor solar pasivo por tiras bimetalicas. Reproducido de “Diseño de un seguidor solar pasivo para su uso con diversos paneles de captación de energía solar”. Balam D. 2010.

## 2.7 Momento de inercia de masas

Se considera una pequeña masa  $\Delta m$  montada sobre una barra de masas insignificante que puede girar libremente alrededor de un eje AA' (figura 2.14 a). Si se le aplica un par al sistema, la barra y la masa, supuestas inicialmente en reposo, empezará a girar alrededor de AA'. El tiempo requerido para que el sistema alcance una velocidad de rotación determinada es proporcional a la masa

$\Delta m$  y al cuadrado de la distancia  $r$ . Por lo tanto, el producto  $r^2\Delta m$  proporciona una medida de la inercia del sistema, esto es, una medida de la resistencia que el sistema ofrece cuando se intenta ponerlo en movimiento. Por esta razón, el producto  $r^2\Delta m$  recibe el nombre de momento de inercia de la masa  $\Delta m$  con respecto al eje  $AA'$  (Beer, et al, 2010).

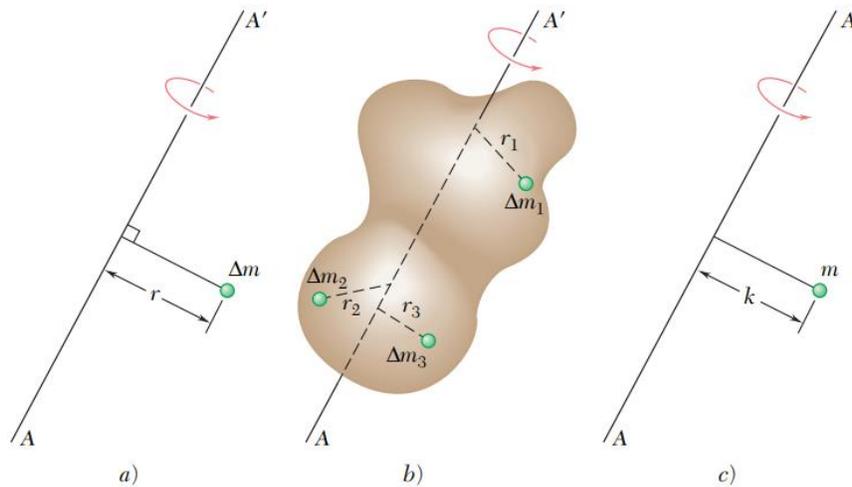


Figura 2.14. Momento de inercia de la masa  $\Delta m$  con respecto a un eje  $AA'$ . Reproducido de “Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica”. Beer F. et al. 2010.

Considérese ahora un cuerpo de masa  $m$  que girará alrededor de un eje  $AA'$  (figura 2.14 b). Al dividir el cuerpo en elementos de masa  $\Delta m_1$ ,  $\Delta m_2$ , etc., se encuentra que la resistencia del cuerpo que se va a girar se mide por la suma  $r_1^2\Delta m_1 + r_2^2\Delta m_2 + \dots$ . Esta suma define el momento de inercia del cuerpo con respecto al eje  $AA'$ . Al aumentar el número de elementos, se encuentra que el momento de inercia es igual, en el límite, a la integral

$$I = \int r^2 dm \quad (1)$$

El radio de giro  $k$  del cuerpo con respecto al eje  $AA'$  se define mediante la relación

$$I = k^2 m \quad \text{o} \quad k = \sqrt{\frac{I}{m}} \quad (2)$$

El radio de giro  $k$  representa, en consecuencia, la distancia a la cual la masa completa del cuerpo debe concentrarse si el momento de inercia con respecto a  $AA'$  va a permanecer sin cambio (figura 2.14 c). Ya sea que conserve su forma original (figura 2.14 b) o si se concentra como se muestra en la figura 2.14 c, la masa  $m$  reaccionará de la misma manera a una rotación, o giro, alrededor de  $AA'$ .

Si se utilizan unidades del Sistema Internacional (SI), el radio de giro  $k$  se expresa en metros y la masa  $m$  en kilogramos y, por ello, la unidad que se emplea para el momento de inercia de una masa es  $kg\ m^2$ .

El momento de inercia de un cuerpo con respecto a un eje de coordenadas puede expresarse con facilidad en términos de las coordenadas  $x, y$  y  $z$  del elemento de masa  $dm$ , como se muestra en la figura 2.15. Al advertir, por ejemplo, que el cuadrado de la distancia  $r$  del elemento  $dm$  hasta el eje  $y$  es  $z^2 + x^2$ , se expresa el momento de inercia del cuerpo con respecto al eje  $y$  como

$$I_y = \int r^2 dm = \int (z^2 + x^2) dm \quad (3)$$

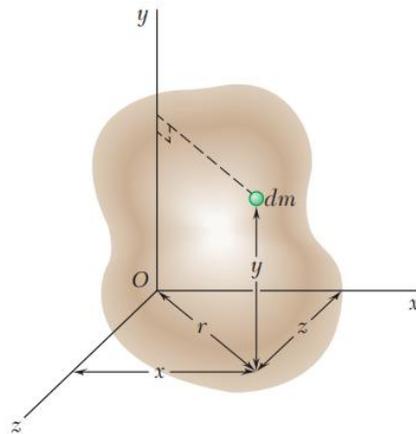


Figura 2.15. Momento de inercia de un cuerpo con respecto a un eje de coordenadas. Reproducido de “Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica”. Beer F. et al. 2010.

Es posible obtener expresiones similares para los momentos de inercia con respecto a los ejes  $x$  y  $z$ . Se escribe

$$I_x = \int (y^2 + z^2) dm \quad (4)$$

$$I_z = \int (x^2 + y^2) dm \quad (5)$$

### 2.7.1 Teorema de ejes paralelos

Considérese un cuerpo de masa  $m$ . Sea  $Oxyz$  un sistema de coordenadas rectangulares cuyo origen está en el punto arbitrario  $O$ , y  $Gx'y'z'$  un sistema de ejes centroidales paralelos, esto es, un sistema cuyo origen está en el centro de gravedad  $G$  del cuerpo y cuyos ejes  $x'$ ,  $y'$  y  $z'$  son paralelos a los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente como se ve en la figura 2.16. Denotando con  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  y  $\bar{z}$  las coordenadas de  $G$  con respecto a  $Oxyz$ , se escriben las siguientes relaciones entre las coordenadas  $x$ ,  $y$  y  $z$  de elemento  $dm$  con respecto a  $Oxyz$  y sus coordenadas  $x'$ ,  $y'$  y  $z'$  con respecto a los ejes centroidales  $Gx'y'z'$ :

$$x = x' + \bar{x} \quad y = y' + \bar{y} \quad z = z' + \bar{z}$$

Con respecto a las ecuaciones del momento de inercia con respecto a los ejes coordenados, es posible expresar el momento de inercia del cuerpo con respecto al eje  $x$  de la forma siguiente:

$$I_x = \int (y^2 + z^2) dm = \int [(y' + \bar{y})^2 + (z' + \bar{z})^2] dm$$

$$I_x = \int (y'^2 + z'^2) dm + 2\bar{y} \int y' dm + 2\bar{z} \int z' dm + (\bar{y}^2 + \bar{z}^2) \int dm$$

La primera integral en esta expresión representa el momento de inercia  $I_{x'}$  del cuerpo con respecto al eje centroidal  $x'$ ; la segunda y tercera integrales

representan el primer momento del cuerpo con respecto a los planos  $z'x'$  y  $x'y'$ , respectivamente, y, puesto que ambos planos contienen  $G$ , las dos integrales son cero; la última integral es igual a la masa total  $m$  del cuerpo. Por lo tanto, se escribe,

$$I_x = \bar{I}_{x'} + m(\bar{y}^2 + \bar{z}^2) \quad (6)$$

Y de manera similar,

$$I_y = \bar{I}_{y'} + m(\bar{z}^2 + \bar{x}^2) \quad (7)$$

$$I_z = \bar{I}_{z'} + m(\bar{x}^2 + \bar{y}^2) \quad (8)$$

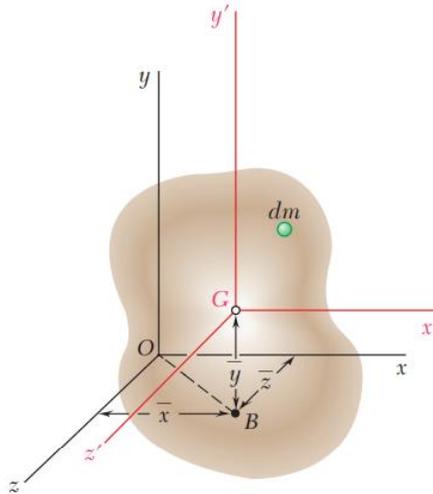


Figura 2.16. Centro de gravedad  $G$  en ejes paralelos al sistema de coordenadas regulares. Reproducido de “Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica”. Beer F. et al. 2010.

De la figura 2.16 se ve fácilmente que la suma  $\bar{z}^2 + \bar{x}^2$  representa el cuadrado de la distancia  $OB$ , entre los ejes  $y$  y  $y'$ . De manera similar,  $\bar{y}^2 + \bar{z}^2$  y  $\bar{x}^2 + \bar{y}^2$  representan los cuadrados de la distancia entre los ejes  $x$  y  $x'$  y los ejes  $z$  y  $z'$ , respectivamente. Al denotar por  $d$  la distancia entre un eje arbitrario  $AA'$  y el eje centroidal paralelo  $BB'$ , se puede, en consecuencia, escribir la siguiente relación

general entre el momento de inercia  $I$  del cuerpo con respecto a  $AA'$  y su momento de inercia  $\bar{I}$  con respecto a  $BB'$

$$I = \bar{I} + md^2 \quad (9)$$

Al expresar los momentos de inercia en términos de los radios de giro correspondientes, también se puede escribir

$$k^2 = \bar{k}^2 + d^2 \quad (10)$$

Donde  $k$  y  $\bar{k}$  representan los radios de giro del cuerpo alrededor de  $AA'$  y  $BB'$ , respectivamente.

### **2.7.2 Determinación del momento de inercia de un cuerpo tridimensional mediante integración**

El momento de inercia de un cuerpo tridimensional se obtiene evaluando la integral  $I = \int r^2 dm$ . Si el cuerpo está hecho de material homogéneo de densidad  $\rho$ , el elemento de masa  $dm$  es igual al  $\rho dV$  y se puede escribir  $I = \rho \int r^2 dV$ . Esta integral depende sólo de la forma del cuerpo. De tal modo, para calcular el momento de inercia de un cuerpo tridimensional, por lo general es necesario efectuar una integración triple, o al menos doble.

Sin embargo, si el cuerpo posee dos planos de simetría, es posible determinar el momento de inercia del cuerpo con una sola integración al elegir un elemento de masa  $dm$  una placa delgada que es perpendicular a los planos de simetría.

### **2.7.3 Momentos de inercia de cuerpos compuestos**

Los momentos de inercia de unas cuantas formas comunes se muestran en la figura 2.17. Para un cuerpo consistente en varias de estas formas simples, el momento de inercia del cuerpo con respecto a un eje dado puede obtenerse

calculando primero los momentos de inercia de sus partes componentes alrededor del eje deseado y después sumándolos en conjunto.

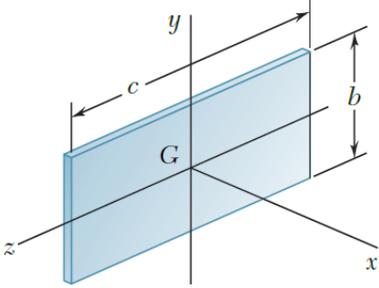
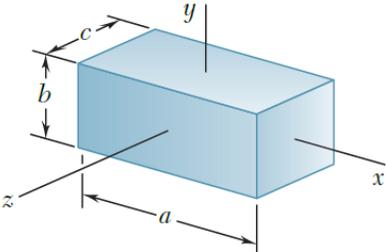
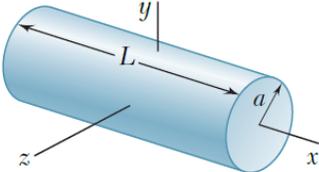
|                           |  |  |
|---------------------------|--|--|
| Placa rectangular delgada |   | $I_x = \frac{1}{12}m(b^2 + c^2)$ $I_y = \frac{1}{12}mc^2$ $I_z = \frac{1}{12}mb^2$                 |
| Prisma rectangular        |   | $I_x = \frac{1}{12}m(b^2 + c^2)$ $I_y = \frac{1}{12}m(c^2 + a^2)$ $I_z = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2)$ |
| Cilindro circular         |  | $I_x = \frac{1}{2}ma^2$ $I_y = I_z = \frac{1}{12}m(3a^2 + L^2)$                                    |

Figura 2.17. Momentos de inercia de masa de formas geométricas comunes. Reproducido de “Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica”. Beer F. et al. 2010.

## 2.8 Momento angular

El momento angular de un sólido rígido que rota con respecto a uno de sus ejes principales de inercia viene dado por:

$$\vec{L} = I\vec{\omega} \quad (11)$$

Donde  $I$  es el momento de inercia del sólido y  $\omega$  es su velocidad angular.

La variación del estado de rotación de un sólido viene determinada por la variación de su velocidad angular por lo que, si se quiere describir el movimiento de rotación, se necesita encontrar una ecuación que permita calcular la aceleración angular del mismo.

Al derivar la ecuación (11) se puede obtener una ecuación relacionada con la aceleración angular

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt}(I\vec{\omega}) = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} = I\vec{a} \quad (12)$$

La variación del momento angular de un sistema de partículas (y, por tanto, de un sólido) es igual al momento de las fuerzas externas que actúan sobre el sistema.

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum \vec{M}_{ext} = \sum \vec{r} \times \vec{F}_{ext} \quad (13)$$

Igualando las ecuaciones (12) y (13).

$$\sum \vec{r} \times \vec{F}_{ext} = I\vec{a} \quad (14)$$

Ésta es la ecuación del movimiento de rotación de un sólido rígido que es análoga a la segunda Ley de Newton.

La segunda ley de Newton proporciona un modo de calcular la aceleración de una partícula (o del centro de masas de un sistema de partículas) conociendo las fuerzas que actúan sobre ella. La ecuación del movimiento de rotación de un sólido permite determinar su aceleración angular calculando el momento de las fuerzas externas que actúan sobre él.

Para que un cuerpo rote (para que tenga aceleración angular) no basta con que actúen fuerzas externas sobre él, sino que estas fuerzas han de tener movimiento resultante no nulo.

Para un momento de fuerzas dado, cuanto mayor sea el movimiento de inercia del sólido, menor será su aceleración angular, por lo que la velocidad angular del mismo variará más lentamente.

$$\vec{a} = \frac{1}{I} \sum \vec{r} \times \vec{F}_{ext} \quad (15)$$

El vector aceleración angular es paralelo a la resultante de los momentos de las fuerzas externas, del mismo modo que la aceleración de una partícula es paralela a la resultante de las fuerzas que actúan sobre ella.

Cuanto mayor sea el módulo de esta resultante, mayor será el módulo de la aceleración angular (Beer, et al, 2010).

## 2.9 Aspectos climatológicos de la región

Debido a que el seguidor solar a diseñar operará al aire libre, se deben considerar ciertos factores para su diseño, tales como las características de la ubicación geográfica, las condiciones climáticas y el movimiento aparente del Sol en el lugar.



Figura 2.18. Datos de irradiación solar y potencial fotovoltaico en la Zona Metropolitana de Tampico. Adaptado de Global Solar Atlas. 2019. PVOUT map. (<https://globalsolaratlas.info/?c=22.322448,-97.716522,11&s=22.24398,-97.873077>).

La ubicación geográfica tomada para esta investigación es la Zona Metropolitana de Tampico, localizada en los estados mexicanos de Tamaulipas y Veracruz, abarca los municipios de Tampico, Altamira, Ciudad Madero, Pueblo Viejo y Pánuco. Sus coordenadas geográficas son: 22°15'19"Norte 97°52'07"Oeste.

En la Zona Metropolitana de Tampico la irradiación horizontal global (GHI) es de 5.099 kWh/m<sup>2</sup> al día, y el potencial fotovoltaico (PVOUT) es de 4.129 kWh/kWp al día. Estos datos son extraídos de la página Global Solar Atlas (2019), como se muestra en la figura 2.18.

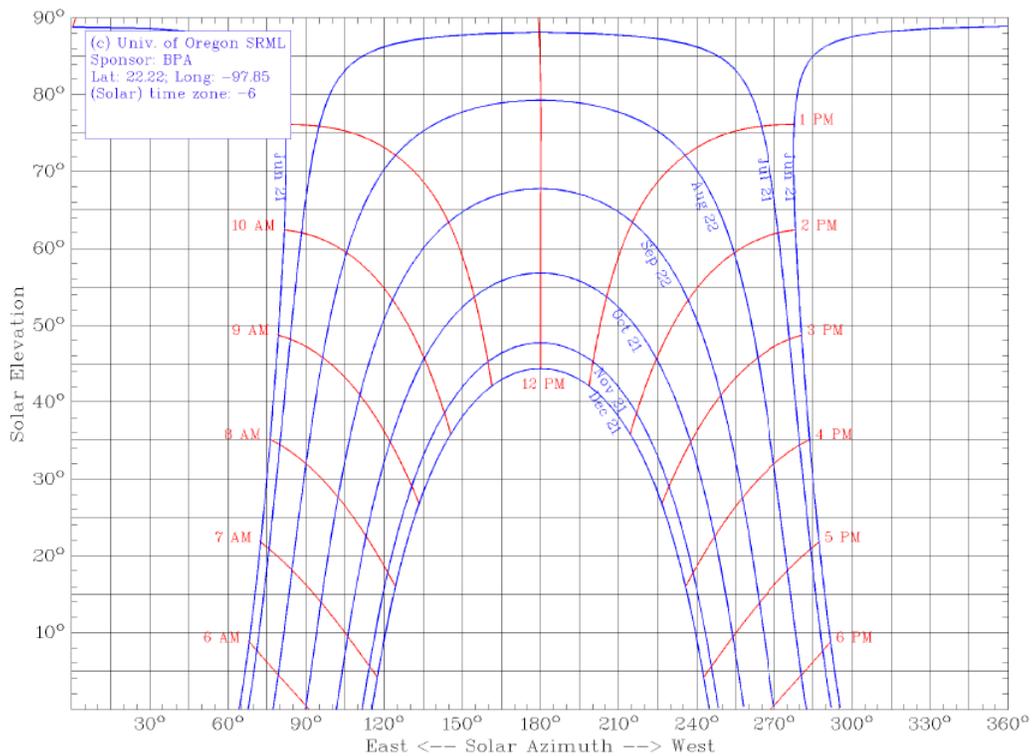


Figura 2.19. Diagrama del movimiento aparente del Sol en la Zona Metropolitana de Tampico en el periodo de junio a diciembre. Obtenido de *Sun path chart program*. University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratory. 2007. (<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>).

Para que el seguidor solar cumpla su función se debe conocer el movimiento aparente del Sol. Para la región ya mencionada, el Sol tiene el movimiento azimutal y el de altura solar mostrada en las gráficas de la figura 2.19 y 2.20., estos datos se obtuvieron de un programa de gráfico solar hecho por el *Solar Radiation Monitoring Laboratory* de la Universidad de Oregon (2007).

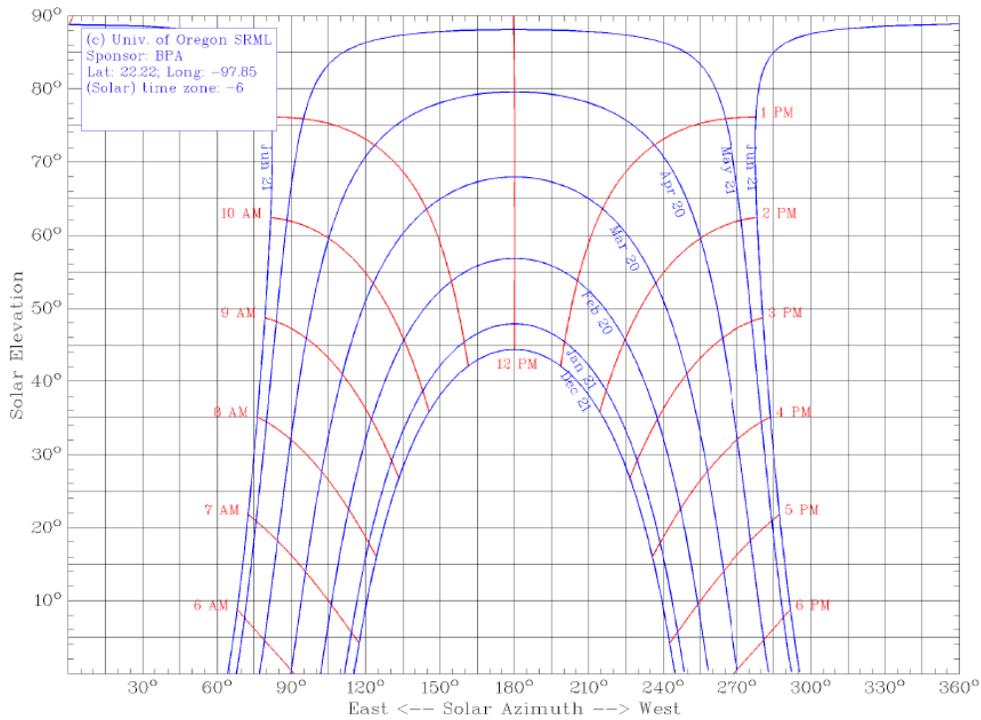


Figura 2.20. Diagrama del movimiento aparente del Sol en la Zona Metropolitana de Tampico en el periodo de diciembre a junio. Obtenido de *Sun path chart program*. University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratory. 2007. (<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>).

La Zona Metropolitana de Tampico se encuentra cerca del puerto, por lo que la humedad en esta región es muy alta en todo el año, siendo aproximadamente del 70% de humedad.

En la Zona Metropolitana de Tampico, el promedio del porcentaje del cielo cubierto con nubes varía considerablemente en el transcurso del año. La parte más

despejada del año en Tampico comienza aproximadamente el 18 de octubre; dura 7,9 meses y se termina aproximadamente el 15 de junio. El 16 de mayo, el día más despejado del año, el cielo está despejado, mayormente despejado o parcialmente nublado el 69 % del tiempo y nublado o mayormente nublado el 31 % del tiempo. La parte más nublada del año comienza aproximadamente el 15 de junio; dura 4,1 meses y se termina aproximadamente el 18 de octubre. El 6 de septiembre, el día más nublado del año, el cielo está nublado o mayormente nublado el 72 % del tiempo y despejado, mayormente despejado o parcialmente nublado el 28 % del tiempo.

El viento de cierta ubicación depende en gran medida de la topografía local y de otros factores; y la velocidad instantánea y dirección del viento varían más ampliamente que los promedios por hora. La velocidad promedio del viento por hora en Tampico tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año.

La parte más ventosa del año dura 8,3 meses, del 20 de octubre al 30 de junio, con velocidades promedio del viento de más de 14,3 kilómetros por hora. El día más ventoso del año fue el 26 de abril, con una velocidad promedio del viento de 16,7 kilómetros por hora. El tiempo más calmado del año dura 3,7 meses, del 30 de junio al 20 de octubre. El día más calmado del año fue el 30 de agosto, con una velocidad promedio del viento de 12,0 kilómetros por hora (Estos datos son del vector de viento promedio por hora del área ancha a 10 metros sobre el suelo, extraídos de *Weatherspark*).

## Capítulo 3. Metodología de la investigación

En este capítulo se describen el conjunto de procedimientos que se utilizaron para el diseño del seguidor solar propuesto en este trabajo. Se optó por diseñar un seguidor solar pasivo de dos ejes capaz de seguir al Sol usando el mecanismo de las tiras bimetálicas, el cual realiza el movimiento con ayuda de un torque generado por un desplazamiento de masas provocado por el incremento de temperaturas en una de las dos tiras bimetálicas unidas a los extremos del seguidor solar. La tira bimetálica está construida de dos materiales con distintos coeficientes de dilatación lineal, cuando la tira se calienta un material se expande más rápido que el otro, generando así un radio de curvatura.

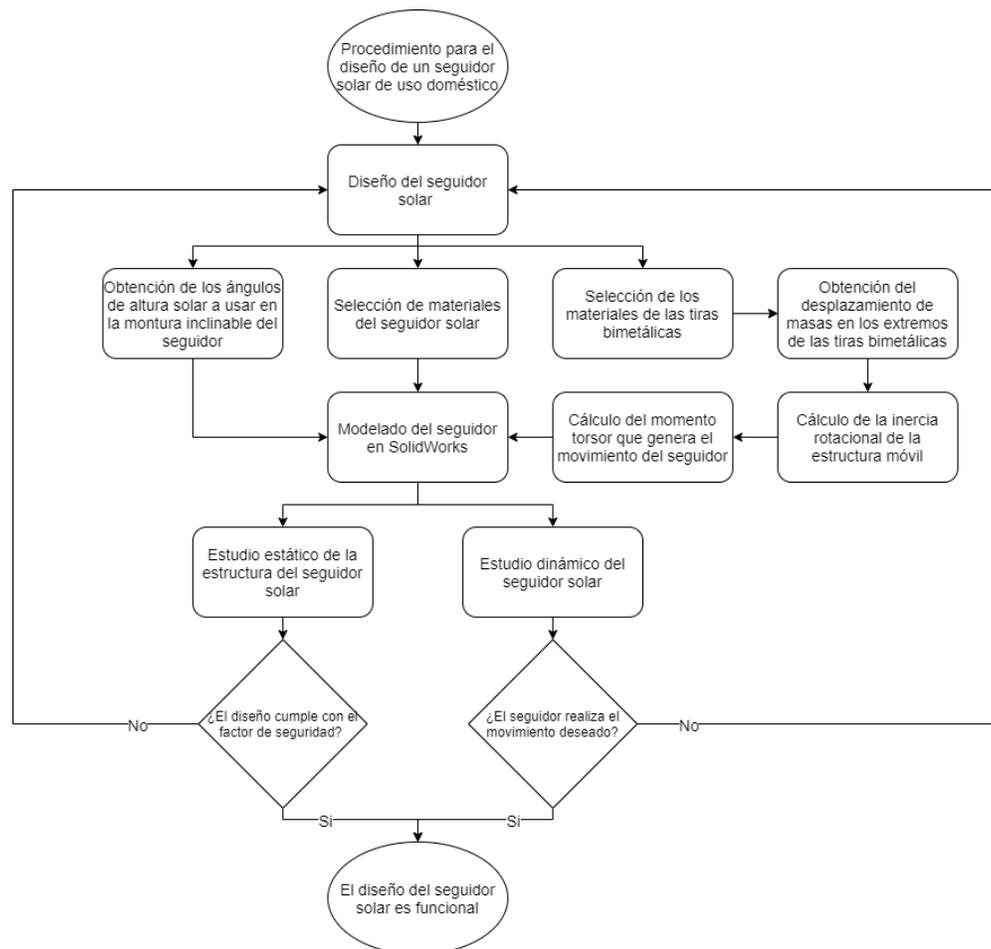


Figura 3.1. Diagrama de flujo del procedimiento usado para el diseño del seguidor solar.

En la figura 3.1 se presenta el diagrama de flujo que se siguió para el diseño del seguidor solar de uso doméstico. En los siguientes apartados se describen detalladamente cada uno de estos procedimientos.

### 3.1 Selección del material y las dimensiones principales de la estructura del seguidor solar

Tal como se ilustra en la sección 2.5 de esta investigación, las estructuras de soporte de los paneles solares se hacen principalmente de aluminio anodizado, hierro galvanizado o acero inoxidable. Se tomaron en cuenta los materiales disponibles en la región, así como los costos y sus características principales para seleccionar el material más adecuado para el seguidor solar. Debido a que esta estructura estará expuesta a la intemperie, se deben considerar factores del viento, la resistencia a la corrosión y la exposición al Sol.

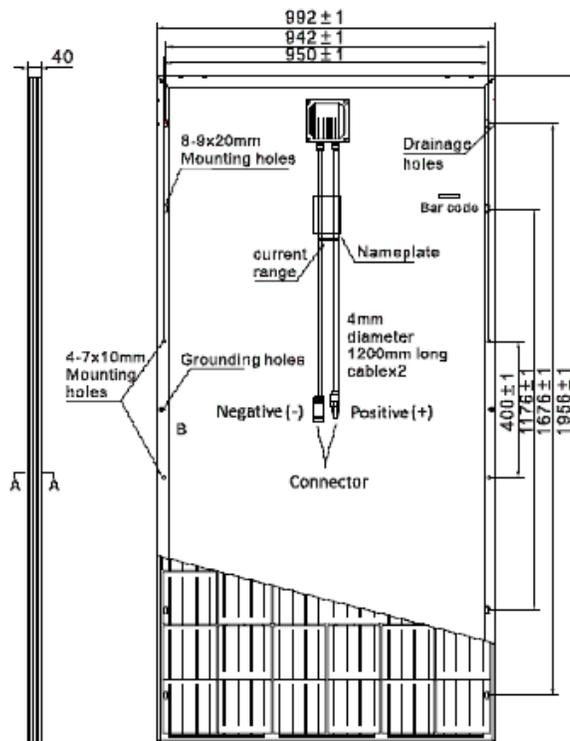


Figura 3.2. Dimensiones de panel fotovoltaico modelo RSM72-6-330M. Reproducido de “Risen Solar Technology”. 2017. Risen Energy.

Para seleccionar las dimensiones principales de la estructura de soporte se tomaron como base las características de un panel fotovoltaico modelo RSM72-6-330M, el cual es parecido a los que comúnmente se usan en la región. En la figura 3.2 se aprecia el diagrama del panel fotovoltaico, sus dimensiones son de 1956 x 992 x 40 mm, y pesa 24 kg.

### **3.2 Obtención de los ángulos de altura solar**

Se ha propuesto diseñar un seguidor solar pasivo a dos ejes, el primer eje efectuará el movimiento con ayuda de las tiras bimetálicas; y el segundo eje contará con un actuador lineal, el cual se accionará dependiendo la época del año.

Con ayuda de los diagramas del movimiento aparente del Sol, mostrados en la sección 2.8, se ha decidido tomar dos ángulos distintos para que se pueda cumplir con el seguimiento de la altura solar con ayuda del actuador lineal. En la tabla 3.1 se describen los ángulos de la altura solar que predominan durante el año en la Zona Metropolitana de Tampico.

Se propone que se haga el cambio del ángulo de altura solar del seguidor aproximadamente cada seis meses, para que éste tenga una inclinación más próxima hacia el Sol dependiendo de la estación del año. Para cumplir esto, se propone usar en el seguir solar los ángulos de inclinación con respecto a la horizontal mostrados en la tabla 3.2.

Tabla 3.1. Aproximación del ángulo de la altura solar máxima en la Zona Metropolitana de Tampico dependiendo el mes.

| Mes        | Altura solar máxima (Aprox. 12:00 P. M.) |
|------------|--|
| Enero      | 45°                                      |
| Febrero    | 51°                                      |
| Marzo      | 60°                                      |
| Abril      | 72°                                      |
| Mayo       | 83°                                      |
| Junio      | 89°                                      |
| Julio      | 89°                                      |
| Agosto     | 86°                                      |
| Septiembre | 76°                                      |
| Octubre    | 65°                                      |
| Noviembre  | 53°                                      |
| Diciembre  | 46°                                      |

Tabla 3.2. Propuesta del ángulo de inclinación que tendrá el seguidor solar dependiendo de la inclinación solar en el mes indicado.

| Temporada        | Altura solar aproximada | Ángulo de inclinación |
|------------------|-------------------------|-----------------------|
| Octubre-Marzo    | 60°                     | 30°                   |
| Abril-Septiembre | 85°                     | 5°                    |

### 3.3 Selección de los materiales de las tiras bimetálicas

Para lograr que las tiras bimetálicas generen el movimiento en el seguidor solar se deben seleccionar los materiales que se unirán para crearla. Una característica importante en esto es el radio de curvatura en las tiras bimetálicas, ya que este depende de los módulos de elasticidad y los coeficientes de dilatación térmica de

ambos materiales. El radio de curvatura  $r$ , al pasar de una temperatura  $T_1$  a otra  $T_2$  viene dado por (Pallas, R. 2008):

$$r = \frac{e \left[ 3(1+m)^2 + (1+mn) \left( m^2 + \frac{1}{mn} \right) \right]}{6(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)(1+m)^2} \quad (16)$$

Dónde:

$e$  es el espesor total de la pieza

$n$  es la relación entre módulos de elasticidad  $= \frac{E_B}{E_A}$

$m$  es la relación de espesores  $= \frac{e_B}{e_A}$

$\alpha_A, \alpha_B$  son los coeficientes de dilatación lineal.

Si se emplean materiales con módulos de elasticidad y espesores similares ( $m \approx 1$ ,  $n \approx 1$ ), que es lo habitual, la expresión (16) se reduce a

$$r \approx \frac{2e}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)} \quad (17)$$

Este radio de curvatura es de gran importancia para el diseño, ya que la distancia generada con la expansión térmica de las tiras bimetálicas, junto con una masa en los extremos de las tiras, generan un par torsional que provoca el movimiento del seguidor solar.

Debido a que el radio de curvatura depende de la relación de espesores de las tiras bimetálicas, las temperaturas, los módulos de elasticidad y los coeficientes de dilatación térmica, se investigaron las propiedades de distintos materiales y se hicieron pruebas para seleccionar los materiales que generen un menor radio de curvatura, ya que a menor radio será mayor la distancia horizontal generada por la expansión térmica de las tiras bimetálicas.

También se tomaron en cuenta para la elección del material a usar en las tiras bimetálicas la disponibilidad de los materiales y su costo.

### 3.4 Obtención del desplazamiento de masas en los extremos de las tiras bimetálicas

Las masas colocadas en los extremos de las tiras bimetálicas junto con el desplazamiento obtenido por la expansión térmica de las mismas pueden producir un cambio de distribución de masas, que resulta en el movimiento de todo el seguidor solar.

Este desplazamiento lineal en los extremos de las tiras depende de su longitud y del radio de curvatura obtenido.

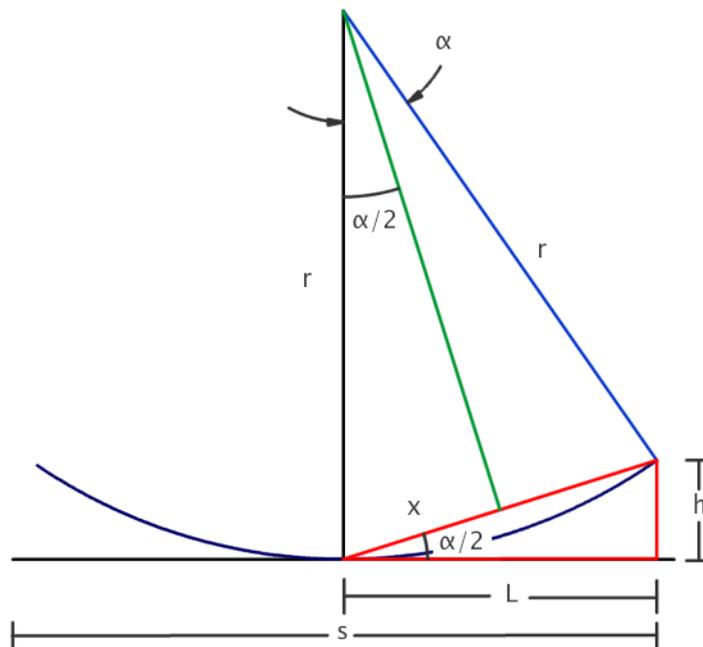


Figura 3.3. Geometría de la curva y desplazamiento lineal de la tira bimetálica.

Se calculó una fórmula para obtener el desplazamiento lineal con la longitud de arco de un círculo y en el diagrama de la geometría de la curva que se presenta en la figura 3.3. En esta figura  $r$  representa el radio de curvatura de la tira bimetálica,  $s$  su longitud normal en reposo y, si el incremento se desprecia, la longitud de arco de la tira curvada.  $L$  es la mitad de la longitud de arco y  $h$  es el

desplazamiento lineal obtenido en el extremo de las tiras bimetálicas al ser curvadas.

La longitud de arco de un círculo se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{2\pi r \alpha}{360^\circ} \quad (18)$$

Si  $L = \frac{s}{2}$  y en base a la ecuación (18) la relación que describe el ángulo  $\alpha$  se muestra en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{90s}{\pi r} \quad (19)$$

Si se toma un triángulo con hipotenusa  $r$ , un ángulo  $\alpha/2$  y el cateto opuesto a ese ángulo  $x$ , la medida de este segmento  $x$  se da como

$$x = r \cdot \text{sen} \frac{\alpha}{2} \quad (20)$$

Considerando el triángulo rojo de la figura 3.3 de catetos  $L$  y  $h$  e hipotenusa  $2x$ , se puede establecer una relación entre el desplazamiento lineal y los valores del radio y el ángulo  $\alpha$ .

$$h = 2x \cdot \text{sen} \frac{\alpha}{2} \quad (21)$$

$$h = 2 \left( r \cdot \text{sen} \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \text{sen} \frac{\alpha}{2}$$

$$h = 2r \cdot \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$h = 2r \cdot \text{sen}^2 \frac{45s}{\pi r} \quad (22)$$

Esta ecuación se puede usar para obtener el desplazamiento lineal en base a la longitud de la tira bimetálica y el radio de curvatura.

### 3.5 Bosquejo del seguidor solar y su modelado

Se dibujó y modeló el seguidor solar propuesto con ayuda del *software SolidWorks*, el cual es un *software* de Diseño Asistido por Computadora (CAD) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado por *SolidWorks Corp.* Este programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos los planos técnicos y toda la información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en traspasar las ideas principales del diseñador directamente al sistema CAD, “construyendo virtualmente” la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera automatizada.

Una vez realizado el modelado, se pueden llevar a cabo análisis de esfuerzos y deformaciones con ayuda de las herramientas de simulación del mismo *software*. También se pueden hacer estudios del movimiento simulando los mecanismos que lo generen.

### 3.6 Cálculo de la inercia rotacional

Con ayuda de las fórmulas de inercia rotacional mencionadas en la sección 2.7, se procedió a realizar el cálculo del momento de inercia o inercia rotacional de la estructura móvil del seguidor solar. La estructura móvil del seguidor solar será la que efectúe el movimiento rotacional, se deben conocer sus dimensiones para hacer este cálculo. Se plantea que esta estructura está compuesta por perfil tubular galvanizado, si consideramos cada perfil tubular como cuatro placas planas, y basados en la figura 2.18, se puede calcular el momento de inercia de una placa plana con las siguientes ecuaciones:

$$I_x = \frac{1}{12} m(b^2 + c^2) \quad (23)$$

$$I_y = \frac{1}{12} mc^2 \quad (24)$$

$$I_z = \frac{1}{12}mb^2 \quad (25)$$

También se usaron las ecuaciones anteriores para calcular el momento de inercia del panel solar considerándolo como una placa plana, así mismo se calcularon los momentos de las tiras bimetálicas que se agregarán a la estructura móvil.

Las masas agregadas en los extremos de las tiras se consideran como masas puntuales y su momento de inercia se encuentra con la ecuación

$$I = mr^2 \quad (26)$$

Aplicando el teorema de ejes paralelos y sumando cada momento de inercia de todas las partes que integran la estructura móvil del seguidor solar se puede calcular el momento de inercia de la estructura.

### 3.7 Cálculo del momento de torsión

El momento de torsión varía en el seguidor solar dependiendo del estado en el que se encuentren las tiras bimetálicas en sus extremos.

Debido a que el eje se encuentra en el centro de masas, coincidente con el centro de gravedad, habrá equilibrio rotacional a menos que alguna de las tiras bimetálicas produzca alguna modificación en la distribución de masas. Si se produce la modificación en las tiras bimetálicas se generará un par torsor que originará el movimiento del seguidor solar.

Si una de las tiras bimetálicas se curva con la máxima deflexión posible y la otra tira se encuentra completamente relajada se producirá el momento de torsión máximo. El valor del momento de torsión se encuentra con la relación:

$$\vec{M} = (r + h_1)F \cos \theta - (r + h_2)F \cos \theta \quad (27)$$

En donde:

$r$  es la distancia desde el eje hasta el punto de colocación de las tiras bimetálicas,

$h_n$  es el desplazamiento lineal obtenido en el extremo de cada una de las tiras bimetálicas al ser curvadas. Si  $h_1 = h_2$  entonces el momento de torsión será cero,

F es la fuerza ejercida, en este caso la fuerza es igual a la masa  $m$  colocada en el extremo de las tiras bimetálicas multiplicada por la aceleración de la gravedad  $g$ ,

$\theta$  es el ángulo en el que se encuentra el seguidor con respecto al horizonte.

Si el seguidor se encuentra totalmente horizontal, el ángulo será de  $0^\circ$  por lo tanto el momento de torsión será máximo. Para ángulos cercanos a la vertical, el valor del momento torsor será mínimo con valores cercanos a cero. Por estos motivos es necesario restringir el rango del movimiento angular del seguidor solar.

### **3.8 Estudio estático de la estructura del seguidor solar**

Una vez modelado el seguidor solar en el *software* de diseño asistido por computadora (CAD) *SolidWorks*, y ensamblado con todas sus partes principales, se usó el complemento de "*SolidWorks simulation*", el cual sirve para realizar simulaciones de esfuerzos y deformaciones resultantes al aplicarles fuerzas a los prototipos virtuales. Se requiere hacer este análisis estático para determinar si la estructura propuesta puede ser completamente funcional al soportar las cargas que se le aplican en condiciones de trabajo normales.

La principal carga a la que estará sometida el seguidor solar es el propio peso de la estructura y el peso del panel solar. Se eligió un modelo de panel solar de 24 kg de masa. El peso de los componentes del seguidor solar puede ser calculado mediante el mismo programa ya que al aclarar el material del que está hecho la pieza, el software calcula su masa con la densidad del material y las dimensiones del componente.

Se aplicó el criterio del esfuerzo máximo de Von Mises para calcular el factor de seguridad. Este criterio declara que un material dúctil empieza a ser flexible

cuando el esfuerzo de Von Mises alcanza el límite elástico del material, el cual es una propiedad del material.

Lo ideal es que los resultados del análisis estático tengan un factor de seguridad mayor de 1 ya que esto indicaría que el material no cede ante las fuerzas que actúan sobre la estructura, por lo tanto, el material no se deforma. Aunque sea solamente necesario que sea mayor de 1, lo ideal es que se tenga un factor de seguridad de al menos 2.

### **3.9 Estudio dinámico del seguidor solar**

Para revisar que el prototipo virtual del seguidor solar realice el movimiento que se busca (tanto el movimiento de la altura solar como el azimutal) se comprobó en la herramienta de “Estudio de movimiento en *SolidWorks motion*” dentro del mismo programa la capacidad que tiene el prototipo de efectuar los movimientos.

Se empleó un actuador lineal para lograr que el panel solar instalado en el seguidor tenga una inclinación favorable con respecto al Sol sin importar la época del año, ya que, como se mencionó en los apartados anteriores, la altura solar va variando durante el año y con respecto a la latitud y longitud del lugar en donde se instale el seguidor solar, esto es debido al movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. Se tomaron en cuenta como principales ángulos de inclinación sobre la horizontal los ángulos de 60° y 85°. En la herramienta de Estudio de movimiento de *SolidWorks* se comprobará que el seguidor solar realice estos movimientos sin ningún problema con ayuda del actuador. Cuando el actuador lineal se encuentre en estado retraído la inclinación que debe tener el panel es de 30° y cuando el actuador esté en estado extendido, la inclinación del panel debe ser de 5° con respecto a la horizontal.

Se propuso que el movimiento azimutal del seguidor solar sea realizado con el mecanismo de las tiras bimetálicas, el cual consiste en dos tiras de distinto material con distinto coeficiente de dilatación lineal unidas a los extremos del

seguidor; en cada uno de los extremos de las tiras se agrega un peso extra. Cuando la tira bimetálica de uno de los extremos del seguidor se calienta, se provocará una curvatura en las tiras, la cual ocasiona un desplazamiento lineal en el peso agregado en el extremo del seguidor, lo que en teoría genera un momento torsor o torque.

Tal como se describe en la sección anterior, el momento de torsión que genera este movimiento azimutal, depende directamente del desplazamiento lineal generado al calentarse la tira en uno de los extremos del seguidor y de la masa que se agrega en las puntas de las tiras. Por esto será necesario realizar varias pruebas de movimiento para decidir el valor la masa que se agregará en los bordes de las tiras bimetálicas. Una vez definido este valor, también usando el mismo análisis de movimiento se buscó calcular la temperatura mínima que producirá el movimiento buscado.

## Capítulo 4. Modelo analítico, diseño y su simulación

### 4.1 Estructura del seguidor solar

Se propuso realizar un seguidor solar pasivo de dos ejes, por lo que se busca que el seguidor solar realice dos movimientos: el movimiento que servirá para cambiar el nivel de inclinación del seguidor según la altura solar, y el movimiento del seguimiento del azimut. Es necesario que el mecanismo del seguidor solar tenga dos grados de libertad, capaz de rotar libremente en ambos sin interferir en el movimiento del otro. Cada una de las partes que componen el seguidor se describen a continuación.

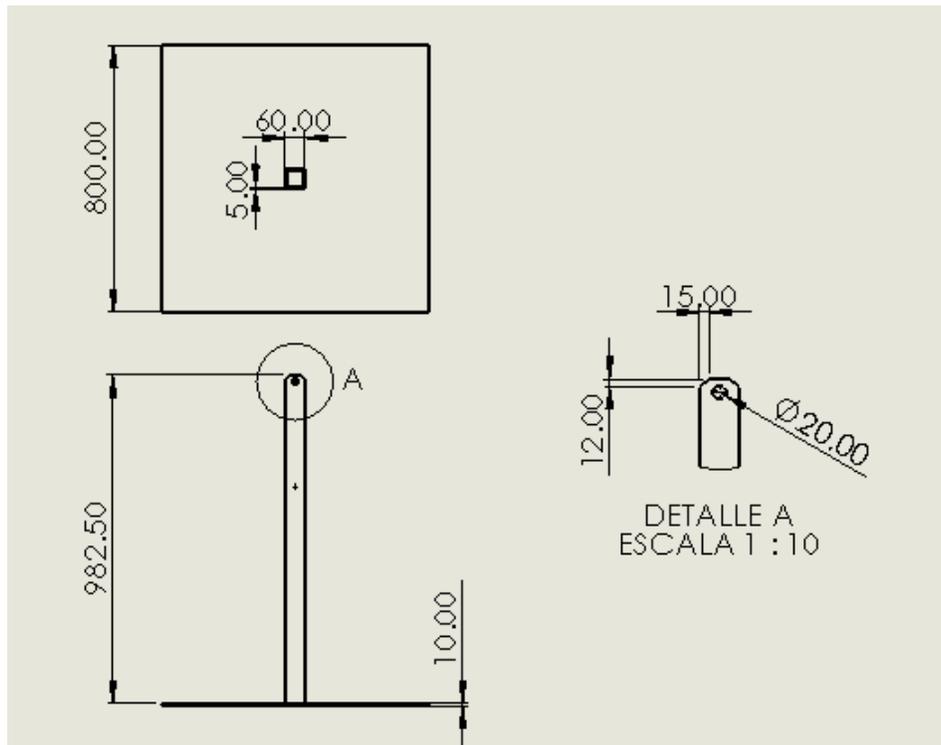


Figura 4.1. Dibujo de la base del seguidor solar. Unidades en milímetros.

Para la base del seguidor solar se usó un eje central de 60 mm de largo y ancho, de aluminio anodizado, este eje está soldado sobre una placa plana de 800 mm de lado y 10 mm de espesor. En la figura 4.1 se describen detalladamente las

dimensiones de esta base, las unidades se expresan en milímetros. En la parte superior se realiza un corte de 12 mm de alto y 15 mm de ancho en cada uno de sus lados, esto sirve para evitar limitar el movimiento de la parte móvil del seguidor solar. La base se debe anclar al suelo o a la superficie en la que se instalará el seguidor.

Sobre la base del seguidor se montó un eje como el que se muestra en el dibujo de la figura 4.2, este eje tiene una doble función, primeramente se acopla sobre la base del seguidor solar con ayuda de un rodamiento, esto es para que el seguidor varíe su inclinación dependiendo la temporada del año para que el panel solar esté orientado hacia el ángulo de altura solar que le proporcione una mayor cantidad de radiación solar; también sobre este eje se acopla la estructura móvil del seguidor solar, la cual con ayuda de las tiras bimetálicas realiza el seguimiento azimutal.

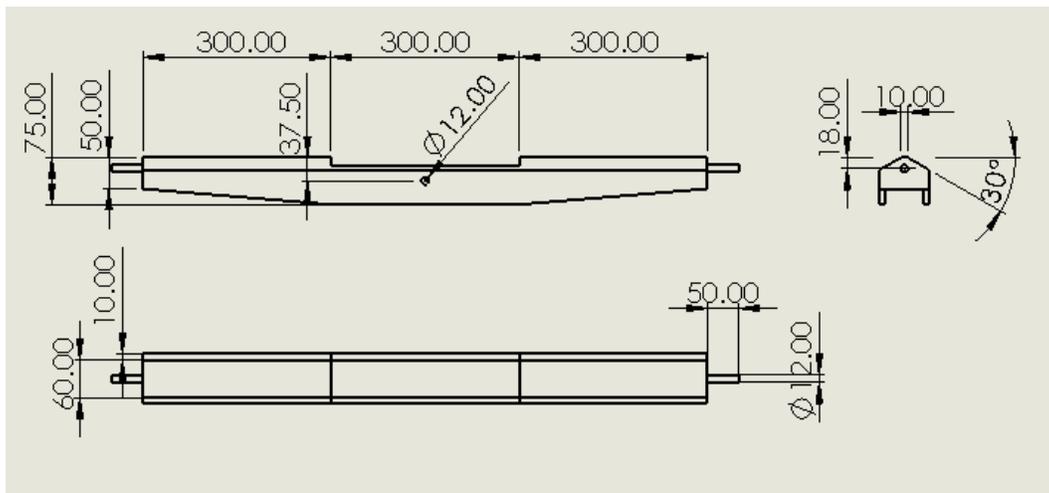


Figura 4.2. Dibujo del eje de altura solar. Unidades en milímetros.

Debido a las características del panel fotovoltaico modelo RSM72-6-330M mostrado en la sección 3.1, se ha decidido que la estructura móvil en la que se apoya el panel solar tenga dimensiones de 1.96 metros de largo por 1 metro de ancho. Se optó por realizar una estructura de perfil tubular de aluminio anodizado 6063-T52 de 40 cm de largo y ancho, y 1.5 mm de espesor. La unión debe

hacerse con soldadura por arco. En la figura 4.3 se presenta un diagrama de dicha estructura.

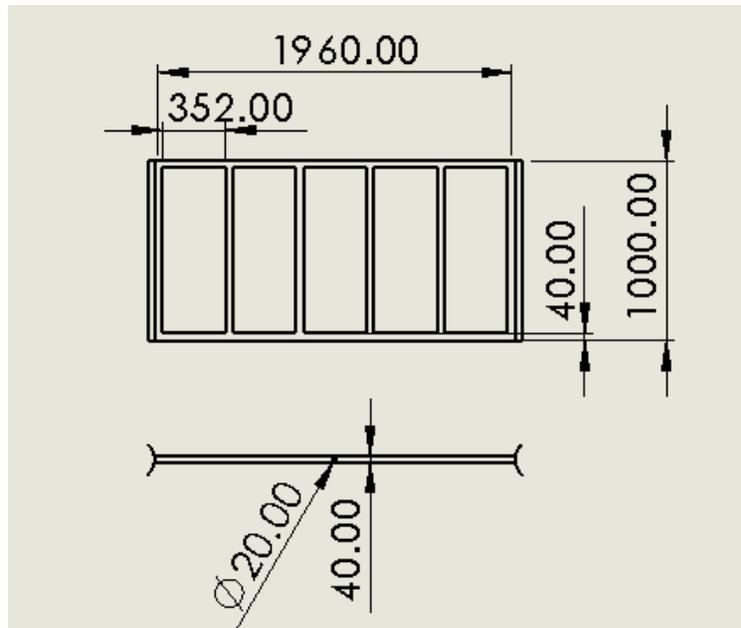


Figura 4.3. Estructura móvil del seguidor solar. Unidades en milímetros.

En sus extremos laterales son unidas dos soleras con curvas parabólicas como se aprecia en la figura 4.3, que tienen la función de ser concentradores solares que reflejan la luz del Sol a las tiras bimetálicas, estos son hechos con soleras de lámina reflectante y son remachadas a la estructura móvil.

## 4.2 Seguimiento de la altura solar

Para que el seguidor solar propuesto tenga una inclinación norte-sur dependiendo la altura solar máxima durante el año, se ha decidido usar los dos ángulos principales de  $60^\circ$  y  $85^\circ$  con respecto al eje horizontal. Para efectuar este movimiento se requiere el uso de un actuador lineal de 800N de carga y 12 volts de corriente directa. Para el prototipo del seguidor solar se usó un actuador lineal de 320 milímetros de longitud cuando está en reposo. Se consideró que el

actuador tiene una longitud de carrera de 180 mm. Se necesita comprobar en el modelado sólido que el actuador realice el movimiento deseado del panel solar con la longitud de carrera indicada.

### **4.3 Amortiguamiento**

Todos los sistemas de seguimiento solar son propensos a volverse inestables debido a que se encuentran en la intemperie y están expuestos a las corrientes fuertes de viento y las vibraciones, no importa el tipo de seguidor que sea, se debe acoplar un amortiguador externo. En la actualidad incluso existen fabricantes de amortiguadores especializados en aplicaciones del seguimiento solar.

En el seguidor solar doméstico a diseñar se propone usar un amortiguador hidráulico común, como los que se emplean en un automóvil Sedán ligero. Se debe comprobar que el amortiguador realice su función de amortiguamiento y al mismo tiempo no limite demasiado el movimiento de rotación del seguidor.

### **4.4 Materiales de las tiras bimetálicas y radio de curvatura**

Para la selección de los materiales que se usan en las tiras bimetálicas se consideran dos propiedades esenciales en esta aplicación: el módulo de elasticidad del material y el coeficiente de dilatación térmica. En la tabla 4.1 se agrupan los materiales considerados para las tiras bimetálicas del seguidor solar, así como sus módulos de elasticidad y coeficientes de dilatación lineal.

Con estos materiales se realizó una serie de cálculos del radio de curvatura obtenido con el par de materiales seleccionados, este radio de curvatura se calcula con la ecuación (16) mostrada en la sección 3.3.

Tabla 4.1 Materiales a considerar para las tiras bimetálicas y sus propiedades.

| Material          | Módulo de elasticidad<br>(GPa) | Coefficiente de dilatación lineal<br>( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) |
|-------------------|--------------------------------|---|
| Acero estructural | 210                            | 12  |
| Acero inoxidable  | 190-210                        | 10.1-17.3   |
| Aluminio          | 70                             | 23  |
| Cobre             | 110                            | 17  |
| Invar             | 140-150                        | 1.7   |
| Latón             | 110                            | 18  |

Se ha considerado usar una temperatura inicial  $T_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ , que es la temperatura ambiente; y una temperatura final  $T_2 = 45^\circ$  que será la temperatura máxima que alcanza la tira bimetálica cuando está expuesto directamente a los rayos del Sol.

Tabla 4.2 Resultados de radios de curvatura según el par de materiales usado en las tiras bimetálicas.

| Material A        | Material B        | Radio de curvatura (m) |
|-------------------|-------------------|------------------------|
| Acero estructural | Acero inoxidable  | 117.66                 |
| Acero estructural | Latón             | 34.23                  |
| Acero estructural | Cobre             | 41.08                  |
| Acero estructural | Invar             | 19.58                  |
| Aluminio          | Acero estructural | 19.70                  |
| Aluminio          | Cobre             | 56.28                  |
| Acero inoxidable  | Aluminio          | 23.12                  |
| Acero inoxidable  | Cobre             | 62.00                  |
| Latón             | Aluminio          | 47.11                  |

También se ha propuesto un espesor total  $e = 6 \text{ mm}$ , se realizaron los cálculos con una relación de espesores  $m = 1$ , lo que quiere decir que el espesor de cada material es el mismo ( $3 \text{ mm}$ ).

En la tabla 4.2 se observan los resultados del cálculo del radio de curvatura dependiendo de los materiales a usar en las tiras bimetálicas.

Un menor radio de curvatura significa que la tira bimetálica se curvará más, con lo que se generará con mayor facilidad el par torsor necesario para mover el seguidor solar. Debido a los radios de curvatura menores obtenidos, y con la disponibilidad de materiales y sus propiedades, se ha elegido usar como materiales para las tiras bimetálicas el acero estructural y el aluminio.

En el mercado estos materiales se producen por soleras, por sus medidas estándar se eligieron soleras de acero estructural y aluminio de  $3.2 \text{ mm}$  de espesor y  $12.7 \text{ mm}$  de ancho. A continuación, se muestra el procedimiento del cálculo del radio de curvatura y el resultado obtenido si se toma una temperatura final de  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Material A: Aluminio. Material B: Acero estructural.

$$e = 0.0064 \text{ m}$$

$$n = \frac{E_B}{E_A} = \frac{210 \text{ GPa}}{70 \text{ GPa}} = 3$$

$$m = \frac{e_B}{e_A} = \frac{0.0032 \text{ m}}{0.0032 \text{ m}} = 1$$

$$\alpha_A = 2.3 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\alpha_B = 1.2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$r = \frac{e \left[ 3(1+m)^2 + (1+mn)\left(m^2 + \frac{1}{mn}\right) \right]}{6(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)(1+m)^2} \quad (16)$$

$$r = \frac{(0.0064 \text{ m}) \left[ 3(1+1)^2 + [1 + (1)(3)] \left[ (1)^2 + \frac{1}{(1)(3)} \right] \right]}{6(2.3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} - 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(45 \text{ } ^\circ\text{C} - 25 \text{ } ^\circ\text{C})(1+1)^2}$$

$$r = 21.01 \text{ m}$$

Debido a que el radio de curvatura varía conforme aumenta la temperatura de la tira bimetálica al exponerse a los rayos del sol, se expresa la siguiente función del radio dependiendo de la variable  $T_2$ :

$$r = \frac{41600}{99(T_2 - 25)} \quad (28)$$

En la figura 4.4 se muestran los resultados del radio de curvatura con respecto a la variable de temperatura  $T_2$ , la temperatura inicial se tomó como temperatura ambiente  $T=25 \text{ } ^\circ\text{C}$ , la cual es la temperatura en la que se unen las tiras bimetálicas, en otras palabras, la temperatura del estado en reposo de las tiras bimetálicas, por eso en la gráfica se tiene la asíntota horizontal, que indica que las tiras se encuentran totalmente rectas. El radio de curvatura negativo indicaría que las tiras tomarían una curvatura en dirección contraria.

Se puede aumentar la temperatura que alcanza la tira bimetálica al recibir directamente los rayos del Sol si a la parte de aluminio se le aplica una capa de pintura color negro mate, esto es debido a que se le aumenta la absorptividad del material, la cual indica la fracción de irradiación recibida que es absorbida por el cuerpo. La absorptividad del aluminio es de 0.1, mientras que con la capa de pintura color negro mate se alcanza una absorptividad de 0.9. Para términos de esta investigación se va a considerar que con estos cambios la temperatura final que alcanza la tira bimetálica puede ser hasta  $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Usando la ecuación anterior, el radio de curvatura máximo que puede alcanzar en esta temperatura es de  $r = 12.01 \text{ m}$ .

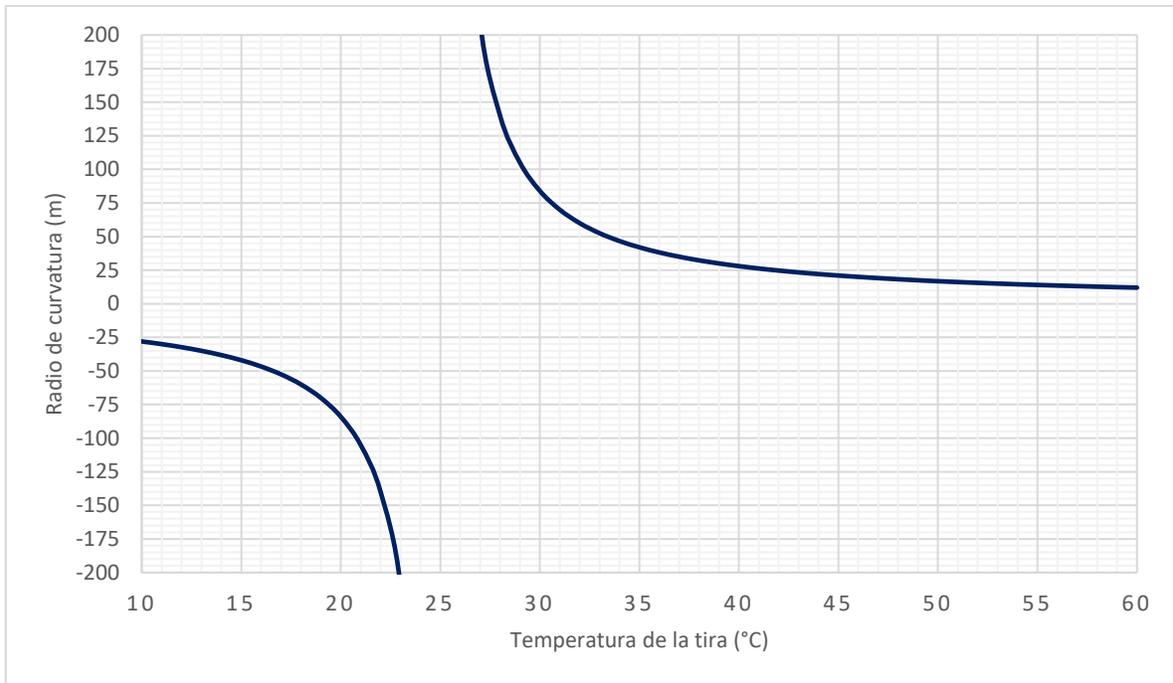


Figura 4.4. Gráfica del radio de curvatura según la temperatura en la que se encuentre la tira bimetálica.

#### 4.5 Desplazamiento de masas en los extremos de las tiras bimetálicas

Como se comentó en la sección 3.4, se puede usar la ecuación (22) para encontrar el desplazamiento lineal en los extremos de las tiras bimetálicas. Este incremento de distancia “h” en una de las tiras bimetálicas rompe el equilibrio en el que se encuentra la estructura móvil del seguidor solar debido a que se genera un momento torsor que produce el movimiento azimutal del seguidor.

La ecuación (22) está en función de la longitud de la tira bimetálica (s) y del radio de curvatura (r). Considerando que se usaron tiras de una longitud de 1 metro, la ecuación queda simplificada solo en función del radio de curvatura de la siguiente manera:

$$h = 2r \cdot \text{sen}^2 \frac{45}{\pi r} \quad (29)$$

En la sección 4.3 se obtuvo la ecuación (28), para obtener el radio de curvatura en función de la temperatura final  $T_2$ , de ambas ecuaciones se obtiene lo siguiente:

$$h = \frac{83200}{99(T_2 - 25)} \cdot \text{sen}^2 \left( \frac{891(T_2 - 25)}{8320\pi} \right) \quad (30)$$

Los resultados de esta ecuación se resumen en la gráfica de la figura 4.5, en donde se puede observar que, si la temperatura a la que llega la tira bimetálica es de 40 °C, el radio de curvatura es de 28.01 m y el desplazamiento lineal es de 0.00446 m o 4.46 mm. Si la tira bimetálica alcanza una temperatura de 60 °C, el radio de curvatura será de 12.01 m y su desplazamiento lineal se incrementaría hasta 0.0104 m que son 10.4 mm.

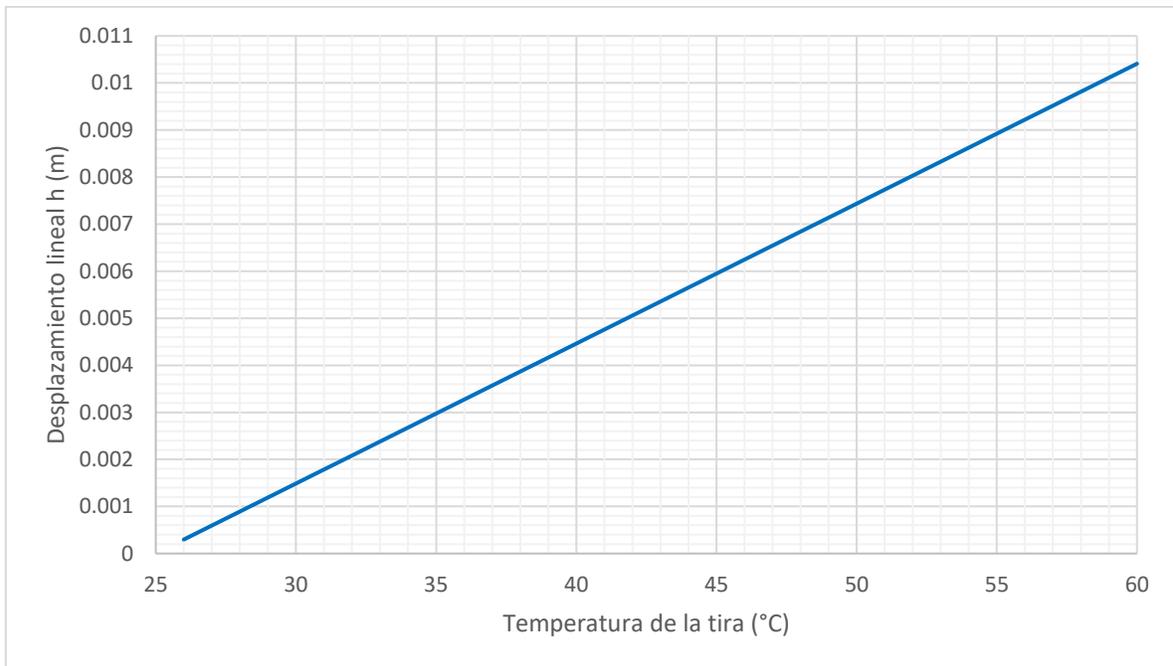


Figura 4.5. Gráfica del desplazamiento lineal h según la temperatura de la tira bimetálica

## 4.6 Modelado del seguidor solar

Se ha modelado el prototipo del seguidor solar en el software de diseño asistido por computadora *SolidWorks*. Se realizan por separado los sólidos de la base fija, la parte móvil compuesta por el eje de altura solar y la estructura móvil que corresponde al eje azimutal. Después se unen los componentes mediante un ensamblaje de las tres piezas; se agregan también los accesorios como son los rodamientos, algunos pernos, los soportes para el actuador lineal y para el amortiguador. En los extremos de la estructura azimutal se ensamblan las tiras bimetálicas que son las que generarán el movimiento en este eje cuando produzcan un momento torsor al ser calentadas en solo un lado del seguidor.

El actuador lineal a utilizar tiene una altura de 0.32 m y una longitud de carrera de 0.18 m, con ayuda del modelado sólido de toda la estructura del seguimiento solar se comprobó que los soportes del actuador lineal se deben instalar a 0.485 m de altura sobre la placa de la base y en el extremo liso del eje de la altura solar para que cuando el actuador se encuentre retraído, el panel solar esté inclinado a  $60^\circ$  con respecto a la horizontal; y cuando el actuador se encuentre extendido, el panel esté inclinado a  $85^\circ$  con respecto a la horizontal.

Con ayuda del modelado sólido también se puede comprobar la limitación que tendría el seguidor solar en el eje azimutal con el amortiguador externo. Para instalar el amortiguador se usan soportes auxiliares que puedan rotar, ya que se tiene que instalar apoyado sobre la base y sobre la estructura móvil que tiene dos grados de libertad. Considerando que el amortiguador tiene una altura máxima de 0.18 m y una altura mínima de 0.08 m, y que se quiere que el movimiento azimutal del seguidor solar sea de  $20^\circ$  con respecto a la horizontal hacia cada lado, el soporte de la base se debe colocar a 0.65 m de altura sobre la base.

El seguidor solar propuesto modelado en el software *SolidWorks* se muestra en las figuras 4.6 y 4.7 donde ya se encuentra ensamblado con todas sus partes. Dentro de este mismo software se realizan las pruebas de simulación.

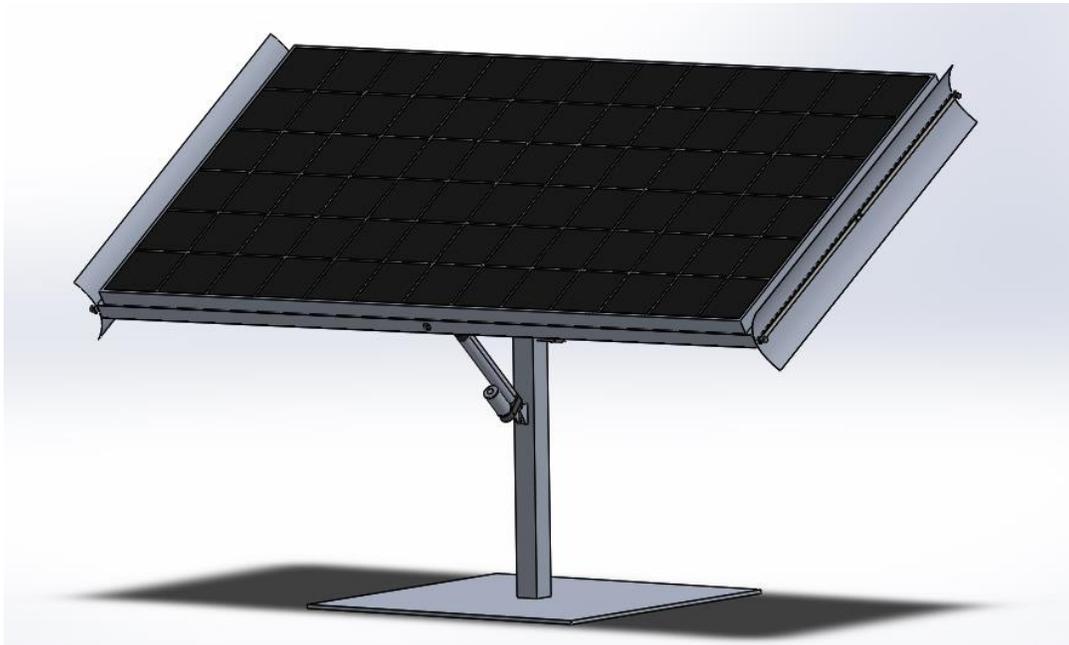


Figura 4.6. Modelo del seguidor solar propuesto modelado en *SolidWorks*. Vista frontal.

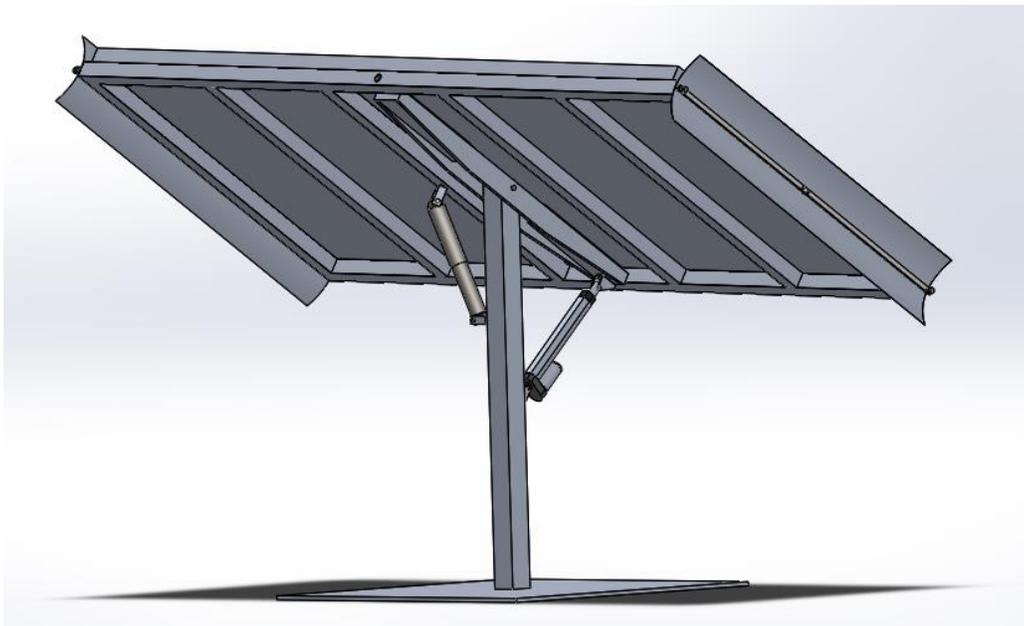


Figura 4.7. Modelo del seguidor solar propuesto modelado en *SolidWorks*. Vista trasera.

## 4.7 Simulación estática del seguidor solar

Se realizaron estudios de simulación estática de la estructura del seguidor solar en el complemento “*SolidWorks simulation*”, en donde se aplica el método del elemento finito para definir los esfuerzos internos que tiene la estructura cuando se le aplican cargas determinadas. Estos análisis se usan para revisar que la estructura soporte las cargas que se le aplican en condiciones normales.

Se realiza un análisis estático de esfuerzos y deformaciones a la estructura móvil del seguidor solar la cual soporta la carga del panel solar, cuya masa es de 24 kg, al multiplicarla por la constante de la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) se obtiene su peso que es de 235.44 N. Esta estructura está hecha de aluminio anodizado 6063-T52. El límite elástico del material es de 145 MPa.

En la simulación estática se le aplicó a la estructura móvil la fuerza de 240 N sobre la cara externa de la estructura y se tomaron como sujeciones las caras internas de los agujeros en los costados de la estructura, en donde estará sujeta al eje de altura solar. La figura 4.8 ilustra la configuración usada para el análisis estático de la estructura móvil, en donde las flechas verdes indican las sujeciones y las flechas rosas las fuerzas externas aplicadas.

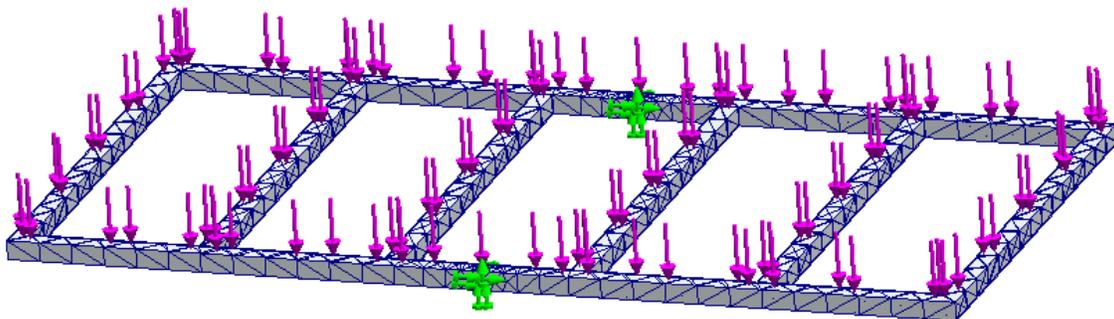


Figura 4.8. Configuración usada para el análisis estático de la estructura móvil del seguidor.

De la misma manera se configuró el análisis estático del eje de altura solar, el cual está hecho de aleación de aluminio y tiene un límite elástico de 145 MPa. Este eje tiene que cargar tanto al panel solar como a la estructura móvil del seguidor solar. La masa de la estructura móvil es de 6 kg, por lo que su peso es de 58.86 N; sumándolo con el peso del panel solar se calcula que el eje de altura solar tiene una carga de 294.3 N, se redondeó en el análisis esta carga a 300 N y se aplicaron estas fuerzas en donde ocurre el contacto con la estructura móvil. La figura 4.9 muestra la configuración aplicada en el análisis estático del eje de altura solar, se definieron las sujeciones en las caras internas de los agujeros de ese eje, ya que es donde se ubica el perno que lo conecta a la base.

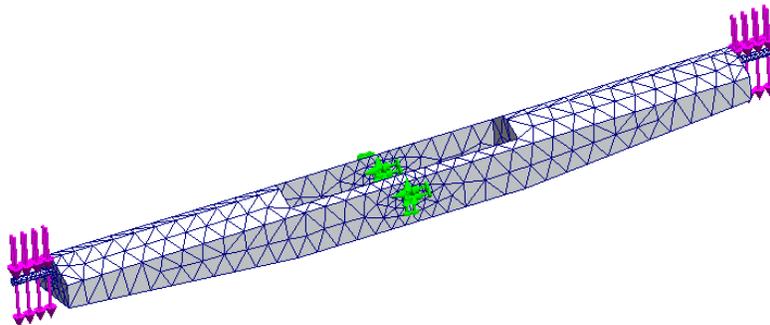


Figura 4.9. Configuración usada para el análisis estático del eje de altura solar.

Así mismo se realizó el análisis de esfuerzos y deformaciones de la base del seguidor solar. Como la base soporta todos los componentes del seguidor solar, tanto los ejes ya mencionados, el actuador y el amortiguador, como el panel solar, se estima que carga 40 kilogramos, el peso estimado es de 392.4 N, para el análisis estático se usó una carga de 400 N aplicada sobre la base. El límite elástico del material es de 145 MPa. La base tiene que ir anclada al suelo o a la superficie en la que se instalará el seguidor por lo que en la prueba está sujeto en la parte inferior. En la figura 4.10 se observa la configuración aplicada para la base del seguidor.

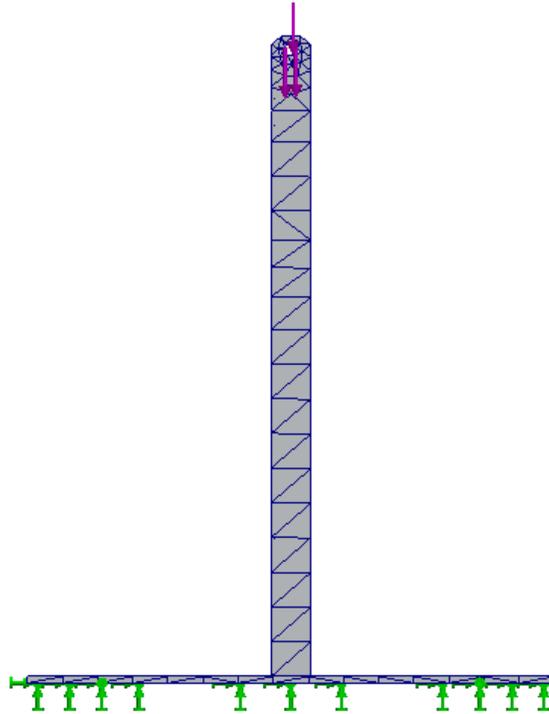


Figura 4.10. Configuración usada para el análisis estático de la base del seguidor solar.

Se calcularon las distribuciones de presiones debidas a la acción del viento sobre la estructura estática del seguidor solar. Para esto se usó el complemento de *SolidWorks Flow simulation* para calcular la presión que ejerce el viento sobre el prototipo. Esta prueba se hizo con el viento corriendo por el eje global z con una velocidad de 90 km/h o 25 m/s, se especificó el aire como el fluido pasando por la estructura. La figura 4.11 ilustra el resultado de la prueba de corriente de aire. El diagrama de la izquierda muestra velocidades del viento (ilustradas en los planos de corte) y el diagrama de la derecha las presiones ejercidas sobre la estructura, se observa que la presión máxima producida por este flujo de viento es de 104089.01 Pa.

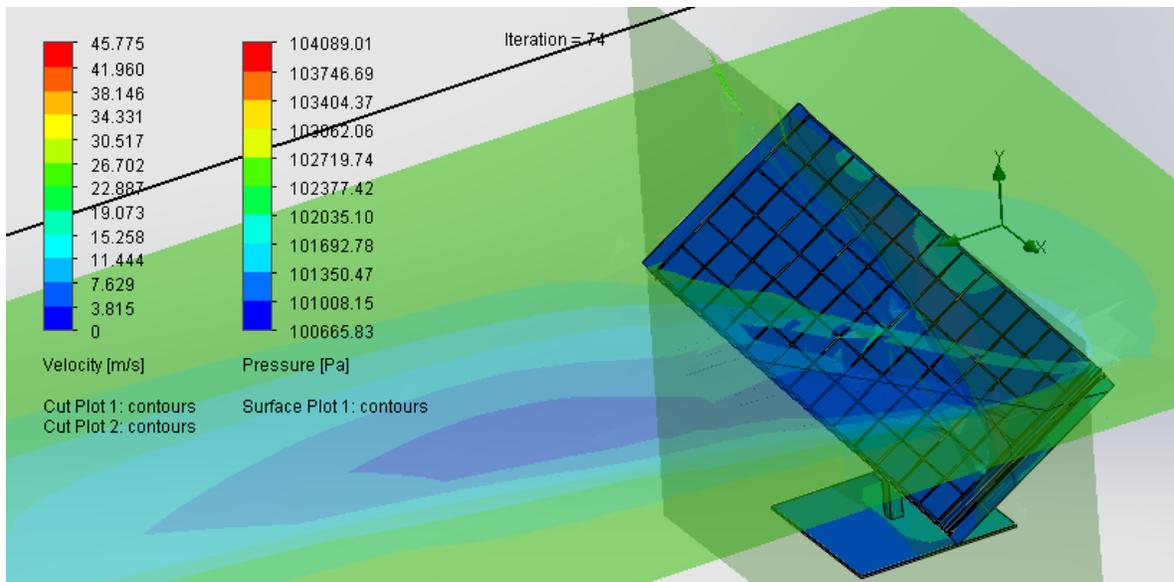


Figura 4.11. Prueba de flujo de viento realizado sobre la estructura del seguidor solar.

#### 4.8 Simulación del movimiento del seguidor solar

Se realizaron distintas simulaciones al prototipo modelado en el programa *SolidWorks* para comprobar que el seguidor solar realice el movimiento deseado. Estas pruebas se hicieron en la herramienta *SolidWorks motion* dentro del mismo software de diseño asistido por computadora.

Para que el seguidor haga el seguimiento de la altura solar se instaló un actuador lineal de 800 N de carga y 12 volts de corriente directa. El peso del panel solar seleccionado para este prototipo es de 24 kg y el peso de la estructura del eje de altura solar es de 6.5 kg, por lo que la carga que tendrá el actuador es aproximadamente de 32 kg considerando otros accesorios.

Una vez instalado el actuador lineal en el modelado del seguidor solar, se crea un nuevo estudio de movimiento dentro de *SolidWorks motion* para agregarle al actuador la característica de un motor lineal con la longitud de carrera de 180 mm ya elegida previamente. Se requiere que cuando el actuador esté retraído, el

ángulo de inclinación del panel solar con respecto a la horizontal sea de  $30^\circ$ , debido a que el seguidor se pondría en esta posición cuando la altura solar se encuentre aproximadamente a  $60^\circ$  con respecto a la horizontal; también es necesario que si el actuador se encuentra extendido el ángulo de inclinación del panel solar con respecto a la horizontal debe ser de  $5^\circ$ , esto porque es ideal que el panel solar se encuentre en esta posición cuando la altura solar sea aproximadamente de  $85^\circ$  con respecto a la horizontal. El estudio de movimiento comprobó que se realizaran estos movimientos al inicio y final de carrera del actuador.

Conforme a lo descrito en la sección 3.2, para que el panel solar obtenga la mayor irradiación solar posible según la altura solar durante los meses del año, en la temporada que corresponde entre octubre y marzo se debe tener el actuador lineal en estado retraído, mientras que, en la temporada entre abril y septiembre, el actuador se debe mantener en estado extendido.

En la figura 4.12 a) se puede apreciar la inclinación que tiene la estructura móvil del seguidor solar cuando el actuador lineal está retraído, asimismo en la figura 4.12 b) se observa la inclinación que tiene la estructura móvil cuando el actuador está extendido. Esta inclinación afecta completamente el eje del giro de la estructura móvil.

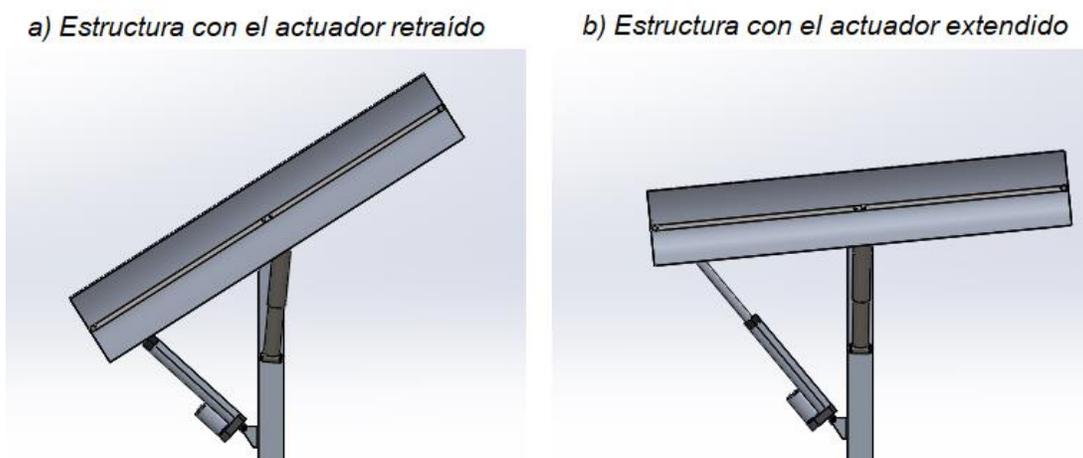


Figura 4.12. a) Estructura del seguidor solar con el actuador lineal retraído, b) estructura con el actuador lineal extendido.

Para que el seguidor solar ejecute el movimiento azimutal se decidió usar el mecanismo de las tiras bimetálicas. Este mecanismo depende de un torque generado por el desplazamiento lineal producido por la expansión térmica de una de las tiras bimetálicas ensambladas en los extremos laterales del seguidor.

Desde el amanecer hasta aproximadamente las 10 de la mañana los rayos del Sol inciden en la tira bimetálica unida a uno de los extremos del panel solar, provocando que se caliente esta tira, se produce una curvatura en la misma debido a que los materiales que la componen tienen distinto coeficiente de dilatación térmica.

Se realizó un análisis térmico no lineal en la herramienta *SolidWorks simulation* para comprobar que se genere la curvatura en la tira bimetálica cuando se calienta debido a la radiación solar. Se necesitó hacer un análisis no lineal porque la tira se va deformando conforme aumenta la temperatura. Se hicieron pruebas con temperaturas distintas, en la figura 4.13 a) se muestra el modelo de la tira bimetálica, compuesta de una tira de aluminio y otra de acero estructural remachadas, la tira se encuentra completamente recta a temperatura ambiente (25 °C). En la figura 4.13 b) se ilustra el resultado de un análisis no lineal realizado con un aumento de temperatura desde 25 °C hasta 35 °C, el gráfico en su costado izquierdo muestra la deformación resultante en el eje z. En el gráfico también se ilustra que el desplazamiento lineal en los extremos de las tiras es de 2.227 milímetros.

Lamentablemente el análisis no lineal falló al intentar realizar pruebas a una temperatura mayor a 40 °C, se desconocen las causas de esto, pero las pruebas a temperaturas menores a 40 °C demostraron la curvatura que presenta la tira al ser calentada y el desplazamiento lineal generado en estos análisis es aproximadamente el calculado en la sección 4.5, por lo que se seguirán tomando en cuenta los cálculos de esa sección para continuar con el análisis del movimiento azimutal.

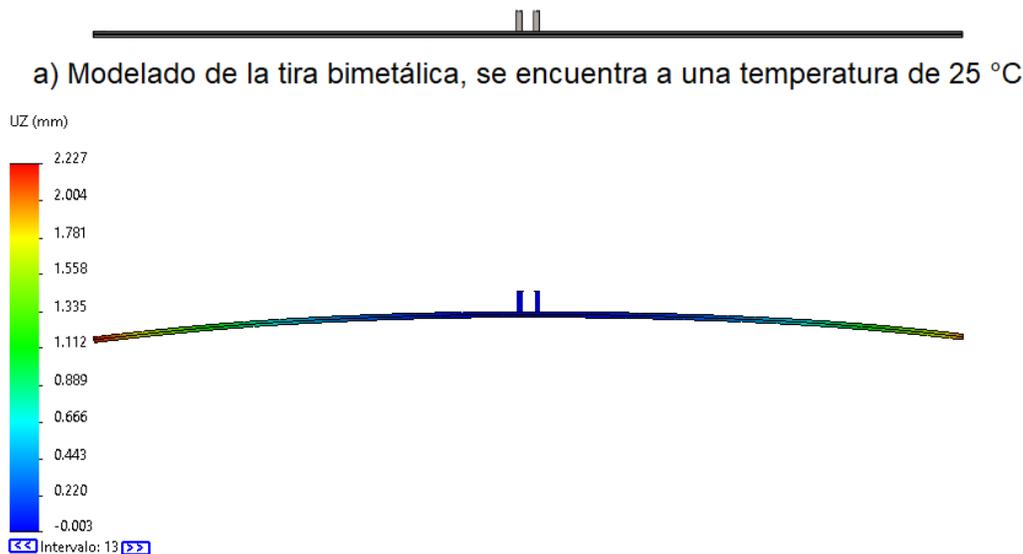


Figura 4.13 a) Modelado de la tira bimetálica en reposo, a una temperatura de 25 °C, b) resultado del análisis térmico no lineal aplicando a la tira bimetálica un incremento de temperatura de 25 °C a 35 °C.

Para hacer los estudios de movimiento fue necesario modelar tiras bimetálicas distintas con radio de curvatura distinto, cada tira bimetálica con un radio de curvatura específico en función de la temperatura que alcanza a calentarse con la exposición a los rayos del Sol, se eligió basarse en los radios de curvatura que se generarían si la tira alcanzara las temperaturas de 35 °C, 40 °C y 45 °C respectivamente. El radio de curvatura está directamente relacionado con el desplazamiento lineal generado, como se demostró en el apartado 4.5.

Se ejecutaron entonces distintos estudios de movimiento para analizar el movimiento azimuthal que se desea que realice el seguidor solar. Como estado inicial se orienta el panel en dirección oeste y se hace la prueba como si la tira bimetálica del lado derecho del panel fuera la que recibiera los rayos del Sol al amanecer y durante la mañana, por lo que esta tira se calienta y se empieza a deformar, generando así un radio de curvatura y a su vez un desplazamiento

lineal. Aunque se hicieron varias pruebas con las tiras bimetálicas modeladas con distintos radios de curvatura, se considera más importante la tira que se calentó a 45 °C, a esta temperatura tiene un radio de curvatura de 21.01 metros y un desplazamiento lineal de 6 milímetros. La tira del lado izquierdo no recibe la irradiación solar durante la mañana por lo que en el análisis se usa una tira completamente recta. Sobre los extremos de las tiras se ubican pequeñas pesas, en el seguidor real podrían ser varios tornillos, tuercas y arandelas que agreguen peso a los extremos de las tiras bimetálicas; para el estudio de movimiento se desprecia la forma que tengan, siendo el valor de su masa lo más importante en estas pruebas, el cual se consideró como una variable dentro del experimento. Como referencia se tomó que cada uno de los extremos de las tiras bimetálicas tiene una pequeña pieza cúbica (para facilitar el redimensionamiento de esta pieza, y así, su masa) de acero al carbón con una densidad de masa de 7858 kg/m<sup>3</sup>.

Estas pruebas se hicieron con el actuador lineal en estado retraído ya que si la estructura realiza el movimiento azimutal en este estado significa que lo puede realizar también con el actuador extendido, debido a que el torque es generado por un peso, y al tener el eje de giro una inclinación con respecto a la horizontal, ese peso es relativamente menor cuando se encuentra el actuador retraído.

Se realizan estudios de movimiento por gravedad, con todas las condiciones descritas y especificando los contactos de todos los sólidos, se omitió el amortiguador en estos estudios.

En la figura 4.14 se observa el seguidor solar al inicio de la prueba azimutal, con el panel orientado supuestamente hacia el oeste, y suponiendo al Sol en el amanecer o durante la mañana (por el este). En este experimento se ensambló a la derecha del panel una tira bimetálica ya curvada, suponiendo que se calentó por la mañana hasta una temperatura de 45 °C, a la izquierda del panel se ensambla una tira bimetálica recta. Los extremos de las tiras llevan un peso de 0.2 kg en cada una de las puntas.

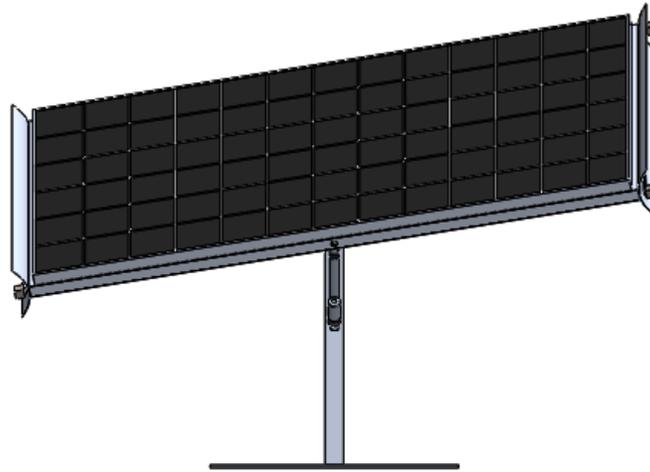


Figura 4.14. Seguidor solar orientado hacia el oeste. Posición inicial del análisis de movimiento por gravedad.

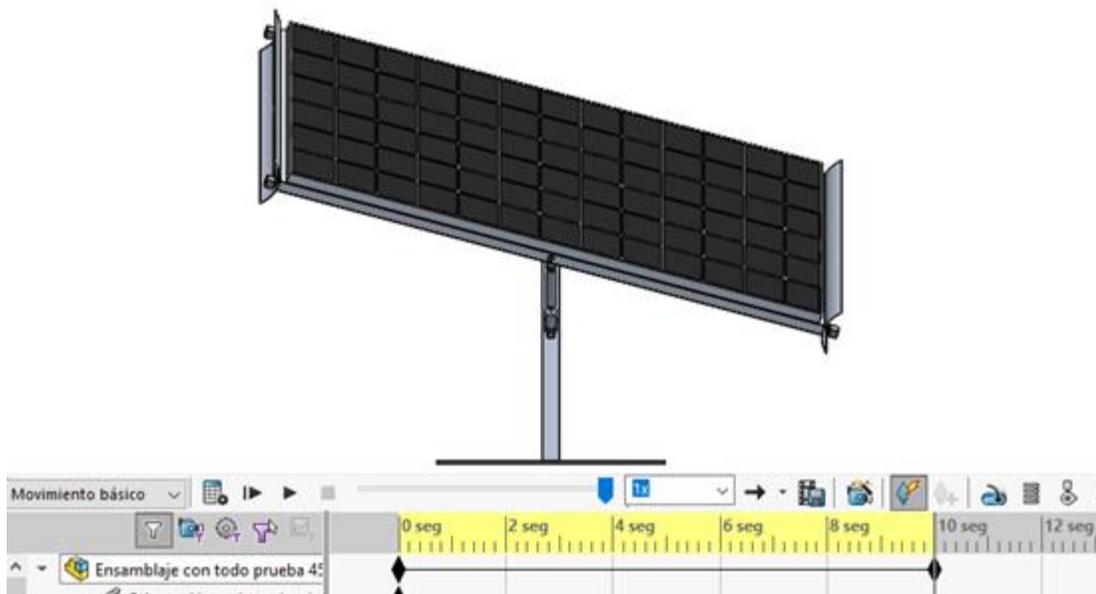


Figura 4.15. Posición final de una prueba de movimiento por gravedad. El seguidor solar comienza orientado al oeste y termina orientado hacia el este.

La figura 4.15 muestra el resultado al final de la prueba de movimiento por gravedad, demostrando que en simulación sí se obtuvo el resultado deseado. Si se agregara más peso en los extremos de las tiras, el seguidor comenzaría el movimiento más rápidamente, aunque esto podría considerarse como un movimiento brusco el amortiguador desempeña su función reduciendo esos tipos de movimientos y controlando la velocidad de reacción azimutal del seguidor solar.

#### **4.9 Inercia rotacional de la estructura móvil del seguidor solar**

Se calculó el momento de inercia de todos los componentes que realizan el movimiento azimutal con respecto al eje de giro. Se usaron las ecuaciones de la sección 3.6 y el teorema de ejes paralelos para encontrar el momento con respecto al eje z, que es el eje de giro que tendrá la estructura móvil junto con el panel solar.

La estructura móvil se dividió en 32 placas planas, están hechas de aluminio anodizado por lo que su densidad es de  $2700 \text{ kg/m}^3$ .

Las tiras bimetálicas son placas planas de acero y de aluminio. El panel solar también se consideró como una placa plana cuyas dimensiones son 0.04 m de ancho, 0.992 m de alto y 1.956 m de largo, su masa es de 24 kg.

Se calculó el momento de inercia de cada uno de estos componentes con respecto a su centro de masa, y después, aplicando el teorema de ejes paralelos con las medidas que tienen el centro de cada parte con respecto al eje central, se obtuvo el momento de inercia con respecto al eje de giro. Los resultados de cada uno de estos cálculos se resumen en la tabla 4.3.

Se determinó que el momento de inercia sobre el eje de giro  $I_z$  es de  $12.49 \text{ kg m}^3$ .

Tabla 4.3. Tabla de masas y momentos de inercia con respecto al eje de giro obtenidos para cada componente del eje azimutal.

| Componente              | Masa (kg) | Momento sobre el eje de giro Iz (kg m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------|-----------|--|
| Barra 1                 | 0.324     | 0.10804  |
| Barra 2                 | 0.324     | 0.10813  |
| Barra 3                 | 0.324     | 0.10813  |
| Barra 4                 | 0.324     | 0.10804  |
| Barra 5                 | 0.324     | 0.10813  |
| Barra 6                 | 0.324     | 0.10813  |
| Barra 7                 | 0.311     | 0.09558  |
| Barra 8                 | 0.311     | 0.09558  |
| Barra 9                 | 0.162     | 0.16202  |
| Barra 10                | 0.162     | 0.15567  |
| Barra 11                | 0.162     | 0.15567  |
| Barra 12                | 0.162     | 0.16202  |
| Barra 13                | 0.162     | 0.15567  |
| Barra 14                | 0.162     | 0.15567  |
| Barra 15                | 0.149     | 0.13734  |
| Barra 16                | 0.149     | 0.13734  |
| Barra 17                | 0.149     | 0.05496  |
| Barra 18                | 0.149     | 0.05159  |
| Barra 19                | 0.149     | 0.04822  |
| Barra 20                | 0.149     | 0.05159  |
| Barra 21                | 0.149     | 0.00692  |
| Barra 22                | 0.149     | 0.00580  |
| Barra 23                | 0.149     | 0.00467  |
| Barra 24                | 0.149     | 0.00580  |
| Barra 25                | 0.149     | 0.00467  |
| Barra 26                | 0.149     | 0.00580  |
| Barra 27                | 0.149     | 0.00692  |
| Barra 28                | 0.149     | 0.00580  |
| Barra 29                | 0.149     | 0.04822  |
| Barra 30                | 0.149     | 0.05159  |
| Barra 31                | 0.149     | 0.05496  |
| Barra 32                | 0.149     | 0.05159  |
| Panel solar             | 24.000    | 7.68840  |
| Tira acero 1            | 0.317     | 0.32645  |
| Tira acero 2            | 0.317     | 0.32645  |
| Tira aluminio 1         | 0.109     | 0.11226  |
| Tira aluminio 2         | 0.109     | 0.11226  |
| Solera 1                | 0.270     | 0.30000  |
| Solera 2                | 0.270     | 0.30000  |
| Masas extremo izquierdo | 0.400     | 0.40000  |
| Masas extremo derecho   | 0.400     | 0.40000  |
| Total                   | 32.4134   | 12.48608   |

#### 4.10 Momento de torsión del sistema

La ecuación (27) de la sección 3.7 se puede usar para calcular el momento de torsión que se genera gracias a la curvatura de las tiras bimetálicas cuando son expuestas a la radiación solar; el momento torsor generado depende directamente del desplazamiento lineal  $h$  en el que se encuentren las tiras bimetálicas. Se consideran como constantes los siguientes valores:

- La distancia  $r$  del eje de giro hasta el punto de colocación de las tiras bimetálicas es de 1.01 m.
- En cada punta de los extremos de las tiras bimetálicas se colocan tornillos, tuercas, arandelas u algún objeto pequeño que se pueda insertar. Se consideró que cada extremo de la tira se le agregaba una masa de 0.2 Kg, en total el valor de la masa  $m$  colocada en las tiras es de 0.4 Kg.
- La aceleración de la gravedad  $g$  es de 9.81 m/s<sup>2</sup>.

También se debe tomar en cuenta que la fuerza obtenida con el peso agregado se ve afectado por la posición del actuador lineal, cuando está en estado retraído el eje de giro tiene una inclinación mayor que cuando el actuador se encuentra extendido, por lo que el componente de la fuerza que actúa sobre el eje de giro es menor. El diagrama de la figura 4.16 ilustra cómo esta posición modifica el valor de la fuerza obtenida por la masa y la aceleración de la gravedad. El eje coordenado se traza sobre el eje de giro que tendrá la estructura móvil del seguidor.

El componente de la fuerza  $F$  que actúa sobre el eje de giro está dado por lo siguiente:

$$F_Y = m g \cos \varphi \quad (31)$$

En donde  $\varphi$  es el ángulo de inclinación que tiene el panel solar.

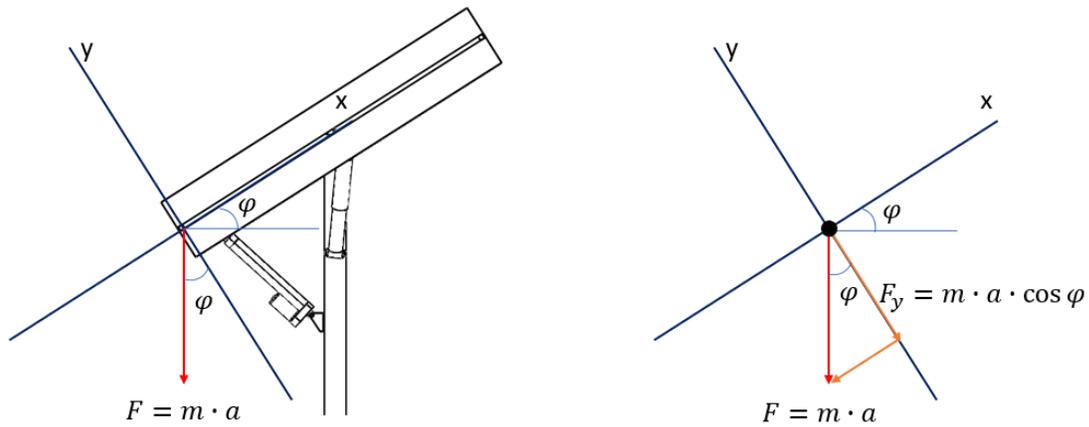


Figura 4.16. Diagrama de cuerpo libre representando la fuerza que actúa sobre la tira bimetálica debida al peso agregado.

Cuando el actuador está retraído el ángulo de inclinación del panel es de  $30^\circ$ , por lo que la fuerza que actúa sobre el eje de giro es de:

$$F_Y = (0.4 \text{ kg}) (9.81 \text{ m/s}^2) \cos 30^\circ$$

$$F_Y = 3.4 \text{ N}$$

Si el actuador se encuentra extendido el ángulo de inclinación del panel es de  $5^\circ$ , en este caso la fuerza que actúa sobre el eje de giro es de:

$$F_Y = (0.4 \text{ kg}) (9.81 \text{ m/s}^2) \cos 5^\circ$$

$$F_Y = 3.9 \text{ N}$$

Para obtener el momento torsor generado con el peso en los extremos de las tiras se tomó el valor de  $F_Y = 3.4 \text{ N}$  ya que es el valor mínimo que tendrá la fuerza sobre el eje de giro. Sustituyendo este dato en la ecuación (27 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\vec{M} = (1.01 + h_1)(3.4) \cos \theta - (1.01 + h_2)(3.4) \cos \theta \quad (32)$$

Al amanecer el panel está orientado hacia el oeste mientras que el Sol sale por el este. La tira bimetalica del lado este de la estructura se calienta durante la mañana, mientras que la tira del lado oeste de la estructura se mantiene completamente recta porque esta no está expuesta a la irradiación solar. El desplazamiento lineal  $h_1$  de la tira bimetalica lateral derecha estará variando durante la mañana según se va calentando la tira bimetalica. En este periodo de tiempo también se considera que el desplazamiento lineal  $h_2$  de la tira bimetalica ubicada en el lado izquierdo es igual a cero.

El movimiento azimutal del panel está limitado a  $\pm 20^\circ$  con respecto a la horizontal, esto gracias principalmente a la estructura del eje altura solar, también se apoya en el amortiguador colocado en el seguidor. Con esta limitación se puede decir que el ángulo  $\theta$  máximo que tiene el seguidor es de  $20^\circ$ . Tomando en cuenta las consideraciones normales en las que se busca que el seguidor solar genere el movimiento azimutal, la ecuación del momento torsor (en  $N \cdot m$ ) se simplifica a esta manera:

$$\vec{M} = (1.01 + h_1)(3.4) \cos 20^\circ - (1.01)(3.4) \cos 20^\circ$$

$$\vec{M} \approx 3.195 h_1 \quad (33)$$

#### 4.11. Aceleración angular del sistema

Se utilizó la ecuación (15) de la sección 2.8 para conocer el comportamiento de la aceleración angular del sistema y así tener una descripción teórica del movimiento conseguido con el mecanismo de las tiras bimetalicas. La aceleración angular se calcula con la siguiente ecuación:

$$\vec{a} = \frac{\vec{M}}{I} \quad (34)$$

Conociendo el momento de inercia del sistema con respecto al eje de giro que es de  $12.49 \text{ kg m}^2$ , y tomando lo descrito en la sección 4.8 sobre el momento torsor

resultante, la ecuación de la aceleración angular se determina de la siguiente manera:

$$\vec{a} = \frac{(1.01 + h_1)(3.4) \cos \theta - (1.01 + h_2)(3.4) \cos \theta}{12.49} \quad (35)$$

Esta ecuación describe el movimiento angular de la estructura móvil del seguidor solar que efectúa el movimiento azimutal, dependiendo directamente de un desplazamiento lineal ocasionado por la curvatura de las tiras bimetálicas al ser calentadas.

## Capítulo 5. Resultados y análisis

### 5.1. Resultados de la simulación estática

Los análisis de esfuerzos y deformaciones de las piezas principales que componen el seguidor solar se utilizan para comprobar si se soportan las cargas que actúan sobre la estructura. En este apartado se revisan los resultados obtenidos en la simulación estática de las piezas principales que componen el seguidor solar.

Los esfuerzos resultantes del análisis estático efectuado en la estructura móvil del seguidor se muestran en la figura 5.1, siendo de 14.71 MPa el esfuerzo máximo obtenido.

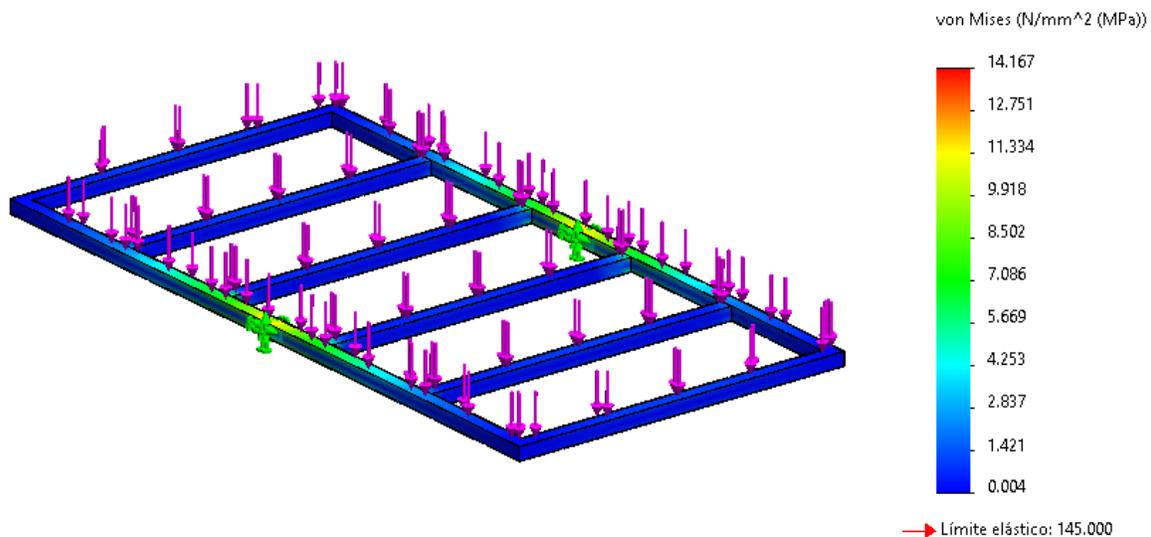


Figura 5.1. Resultado del análisis de esfuerzos en la estructura móvil del seguidor solar.

La figura 5.2 ilustra los resultados del análisis de deformaciones aplicado a la estructura móvil, las siglas URES se refieren al desplazamiento resultante en toda la pieza. En la figura se alcanza a apreciar que la pieza tiene una deformación máxima de 2.204 mm, la cual ocurre en los extremos de esta.

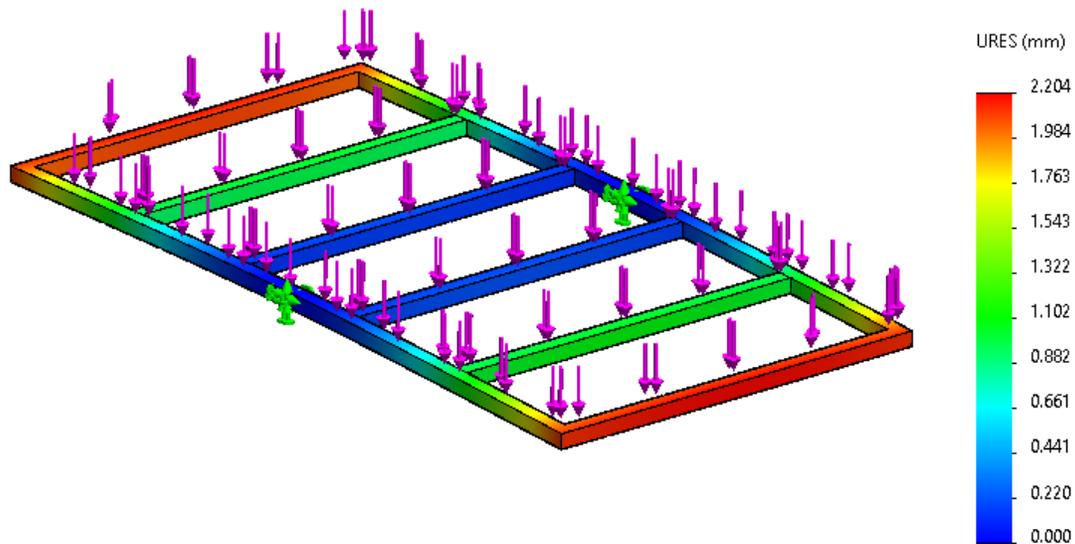


Figura 5.2. Resultado del análisis de deformaciones en la estructura móvil del seguidor solar.

En la figura 5.3 se presentan los resultados obtenidos del análisis de esfuerzos aplicado al eje de altura solar. La parte crítica de la estructura se presenta únicamente en los extremos de esta, donde este eje tiene menor área y mayor carga, ya que en ellos se sostiene la estructura móvil. El esfuerzo máximo obtenido en estos puntos críticos es de 92.7 MPa.

El resultado del análisis de deformaciones del eje de altura solar se puede observar en la figura 5.4, al aplicar la carga descrita anteriormente, la deformación máxima resultante en los extremos de este eje es de 0.678 mm.

La figura 5.5 muestra el resultado del análisis de esfuerzo de la base del seguidor. El esfuerzo máximo obtenido es de 3.478 MPa y este ocurre en el corte de la sección circular. El resultado del análisis de deformaciones se ilustra en la figura 5.6. donde la deformación máxima obtenida fue de 0.011 mm.

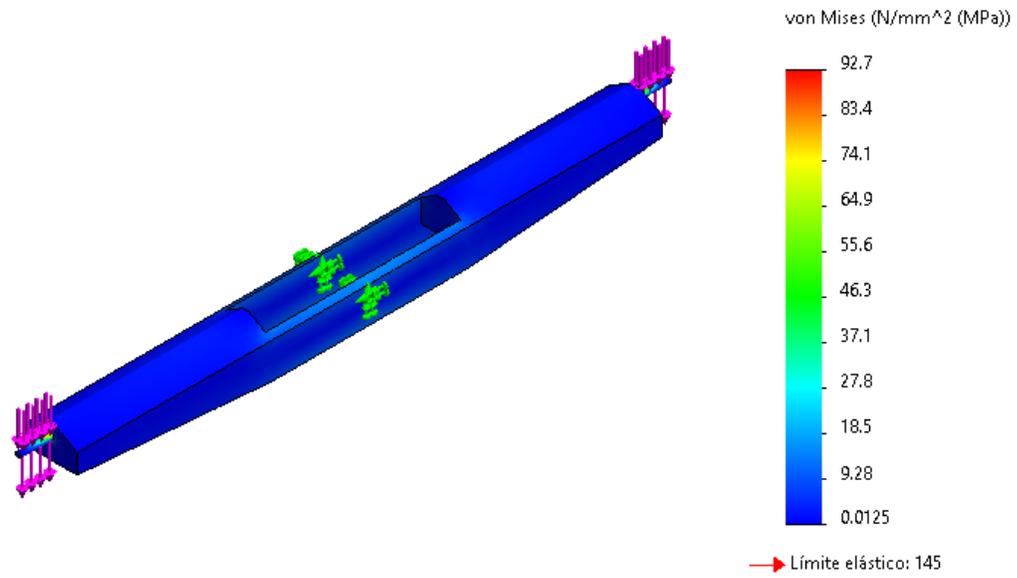


Figura 5.3. Resultado del análisis de esfuerzos del eje de altura solar.

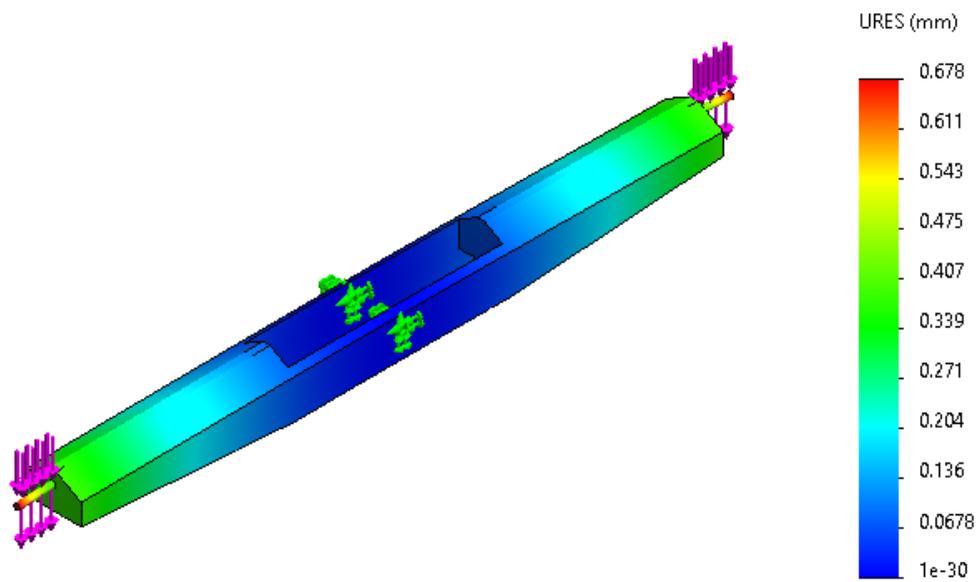


Figura 5.4. Resultado del análisis de deformaciones del eje de altura solar.

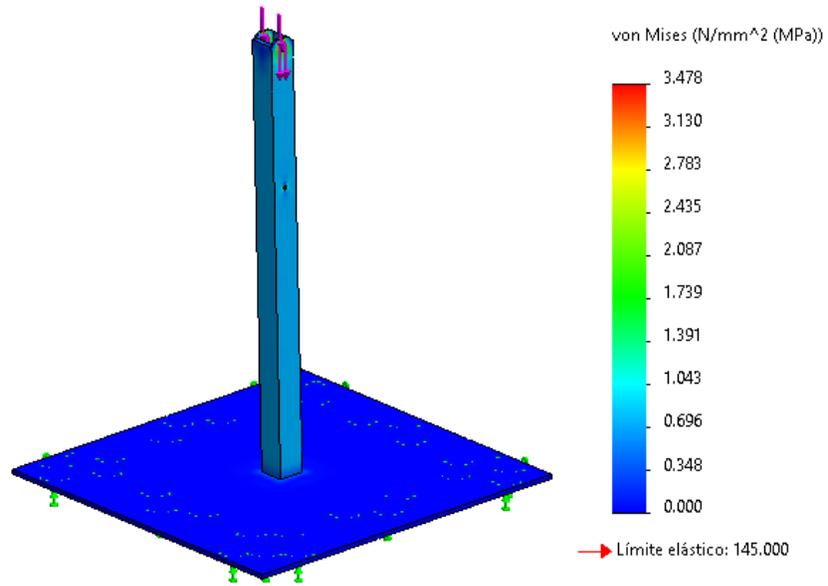


Figura 5.5. Resultado del análisis de esfuerzos de la base del seguidor solar.

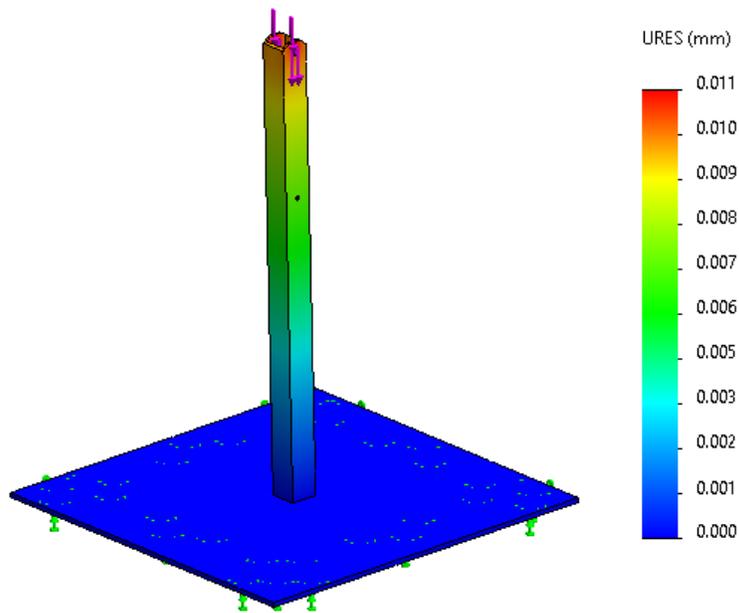


Figura 5.6. Resultado del análisis de deformaciones de la base del seguidor solar.

En base a los esfuerzos resultantes obtenidos de los análisis estáticos efectuados a las piezas del seguidor solar se calcula el factor de seguridad que tienen estos componentes, la herramienta de *SolidWorks simulation* tiene la característica de facilitar el cálculo del factor de seguridad en cada punto dividiendo el límite elástico del material entre el esfuerzo equivalente en ese punto. Para que la estructura soporte las cargas el factor de seguridad debe ser mayor de 1. La tabla 5.1 presenta los resultados del factor de seguridad de cada una de las tres piezas principales del seguidor solar.

Tabla 5.1. Factor de seguridad obtenido en cada pieza principal del seguidor solar.

| Pieza               | Límite elástico del material | Esfuerzo máximo | Factor de seguridad |
|---------------------|------------------------------|-----------------|---------------------|
| Estructura móvil    | 145 MPa                      | 14.167 MPa      | 10.0                |
| Eje de altura solar | 145 MPa                      | 92.700 MPa      | 1.6                 |
| Base del seguidor   | 145 MPa                      | 3.478 MPa       | 41.7                |

La estructura móvil del seguidor solar tiene un factor de seguridad de 10.0. Esto significa que la estructura tiene una capacidad en exceso de soportar las cargas que se le aplican. Aunque el componente esté sobredimensionado en este caso es necesario que sea así ya que el panel solar se atornilla sobre la estructura móvil por lo que no podría tener dimensiones menores del panel solar seleccionado.

En la pieza del eje de altura solar el factor de seguridad obtenido es de 1.6, lo suficiente para soportar las cargas. En la parte escalonada de la pieza es en donde se concentran los esfuerzos máximos. El análisis de esfuerzos se realizó con la pieza sencilla, se sabe que la pieza debe llevar un redondeo en esa parte escalonada que disminuirá la concentración de esfuerzos en donde ocurrió el esfuerzo máximo.

En la base del seguidor solar se obtuvo el factor de seguridad de 41.7. La parte tiene una capacidad excedente de soportar las fuerzas aplicadas. No obstante, el diseño de la base tiene como objetivo principal dar estabilidad al seguidor. Este trabajo está mayormente orientado en el estudio del movimiento del seguidor que en el dimensionamiento de las piezas que lo componen.

## **5.2. Resultados de la simulación dinámica**

La simulación dinámica del prototipo del seguidor solar se hizo en la herramienta *SolidWorks motion*. Un actuador lineal es el encargado del movimiento del seguidor que modifica ángulo en el que se ubica el panel solar con respecto a la altura solar, el estudio de movimiento del actuador lineal con una longitud de carrera de 180 mm efectuó el movimiento deseado correctamente sin ningún inconveniente.

Las figuras 5.7 y 5.8 ilustran los estados inicial y final en el análisis de movimiento del actuador lineal que modifica la inclinación del panel para que capte mejor la irradiación según la altura solar. Se alcanza a apreciar el ángulo de inclinación que tiene el panel al inicio y al final de la prueba. Cuando el actuador lineal está retraído el panel tiene un ángulo de inclinación de  $32.33^\circ$ , este se recomienda que se use en la temporada del año que comprende entre octubre y marzo, ya que la altura solar en esta época es en promedio de  $60^\circ$  y se requiere que el panel este orientado hacia el Sol. Cuando el actuador se encuentra extendido, el ángulo de inclinación del panel es de  $5.55^\circ$ , este ángulo es recomendado en la temporada del año comprendido entre abril y septiembre, época en la que la altura solar se encuentra en promedio a  $85^\circ$ .

Estos ángulos de inclinación afectan tanto al eje de altura solar como al eje azimutal y el panel solar, por lo que el movimiento azimutal es ligeramente influenciado por el estado del actuador, aunque no limita su movimiento.



Figura 5.7. Estado inicial del análisis de movimiento del actuador lineal sobre el seguidor. El ángulo de inclinación del panel es de 32.23°.

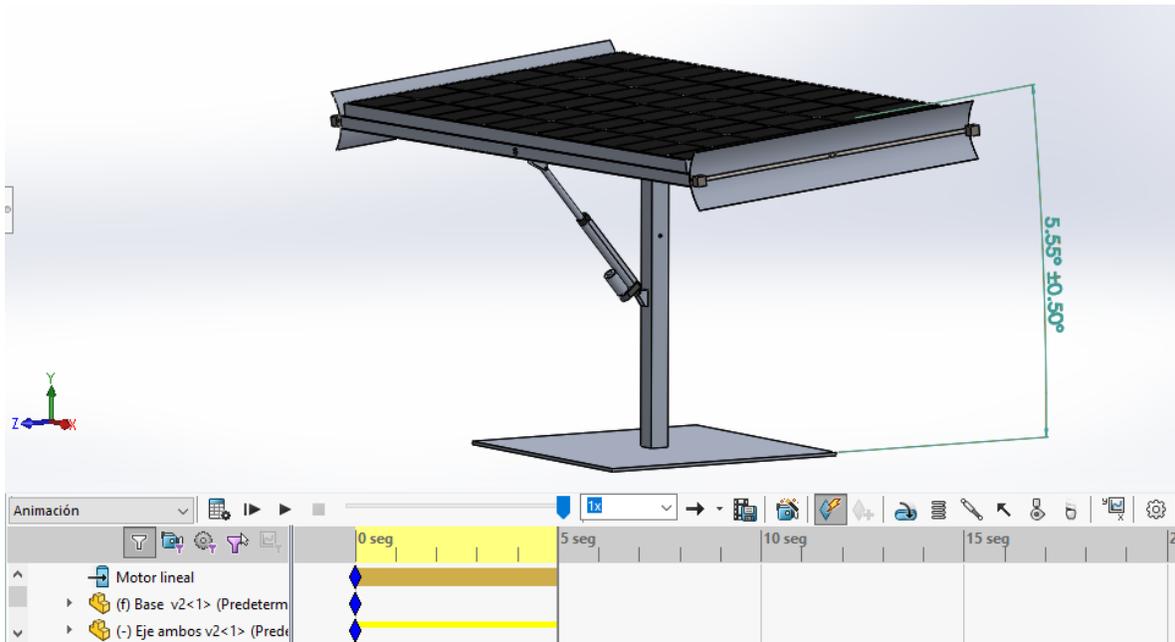


Figura 5.8. Estado final del análisis de movimiento del actuador lineal sobre el seguidor. El ángulo de inclinación del panel es de 5.55°.

El mecanismo de las tiras bimetálicas es el encargado de efectuar el movimiento azimutal en el seguidor solar. Los resultados del estudio de movimiento descrito en la sección 4.7 indican que en teoría el mecanismo es viable ya que si genera el movimiento buscado con un peso en los extremos de 0.2 kg y al calentarse la tira bimetálica de un lado del seguidor a 45 °C.

En las figuras 5.9 y 5.10 se ilustran el estado inicial y final de un análisis de movimiento por gravedad y con los datos de prueba ya mencionados, en la que se considera que la tira bimetálica del lado derecho está curvada, debido a una expansión térmica obtenida por la irradiación solar que el astro le brindaría al salir por el este. Los ángulos máximos están descritos con respecto al plano medio del eje de giro.



Figura 5.9. Estado inicial del análisis de movimiento azimutal por gravedad.

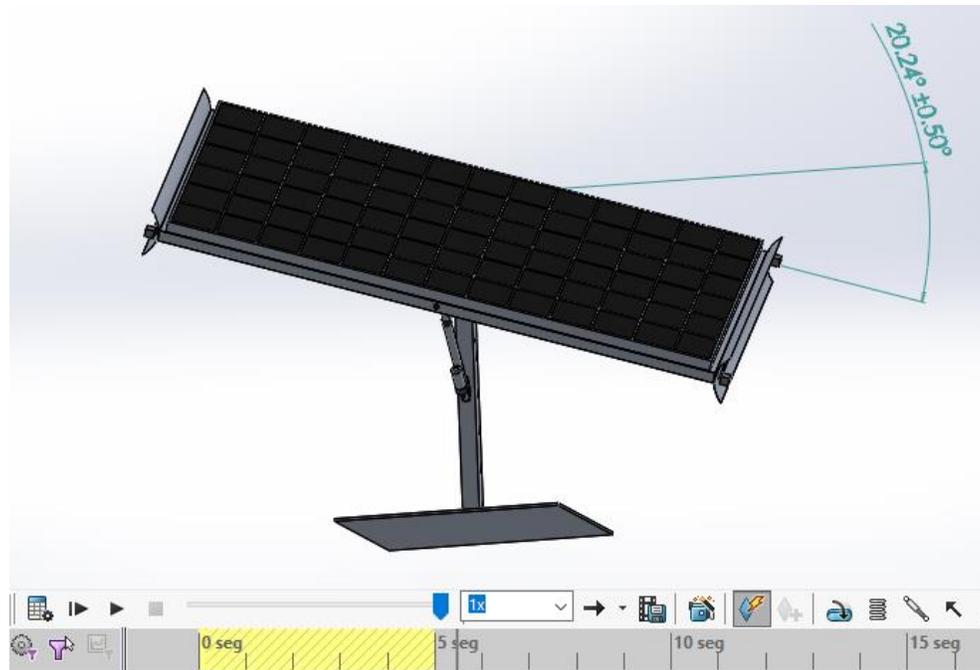


Figura 5.10. Estado final del análisis de movimiento azimutal por gravedad.

### 5.3. Seguimiento del Sol

Se efectuó un análisis del seguimiento solar en el mismo *software SolidWorks* ya que este permite agregar al modelo vistas del Sol y realizar un estudio de acceso solar durante todo el año. El programa ya tiene una base de datos con el movimiento aparente que realiza el Sol, solo se deben especificar la latitud y longitud del lugar en el que se hace este estudio. Se insertan los datos de la ciudad de Tampico, Tamaulipas, México (latitud: 22.15, longitud: -97.83) para simular el movimiento aparente del Sol en esta región; asimismo se especifica la dirección norte al agregar la vista del Sol, el modelo del seguidor solar está diseñado para que el panel se encuentre ligeramente inclinado hacia el sur, cambiando el ángulo de inclinación con el actuador lineal, por lo que este está ubicado hacia el sur.

Se eligieron como prueba dos fechas del día para cada estado del actuador lineal que realiza el seguimiento de la altura solar. Se usó la fecha del primero de marzo

como prueba de seguimiento solar cuando el actuador está retraído, temporada en la que la altura solar a medio día es aproximadamente de  $60^\circ$ . Para la prueba de seguimiento cuando el actuador se encuentra extendido se empleó la fecha del primero de agosto, en este periodo la altura solar a medio día está alrededor de los  $86^\circ$ . En las imágenes siguientes se describen los resultados obtenidos de los estudios de acceso solar.

Al iniciar el día el panel se encuentra orientado hacia el oeste, durante la mañana los rayos del Sol calientan la tira bimetálica ubicada en el extremo derecho del seguidor, lo cual, como ya se describió anteriormente, produce una curvatura en la tira, por lo tanto, un desplazamiento lineal en los extremos. Con ese desplazamiento de masas, cuando la tira se caliente lo suficiente se genera el torque necesario para producir el movimiento azimutal del seguidor. En la figura 5.11 se ilustra el momento por la mañana en el que ocurre esto, esta ilustración se tomó del estudio de acceso solar realizado con el movimiento aparente del Sol que tendrá el día 1 de marzo.

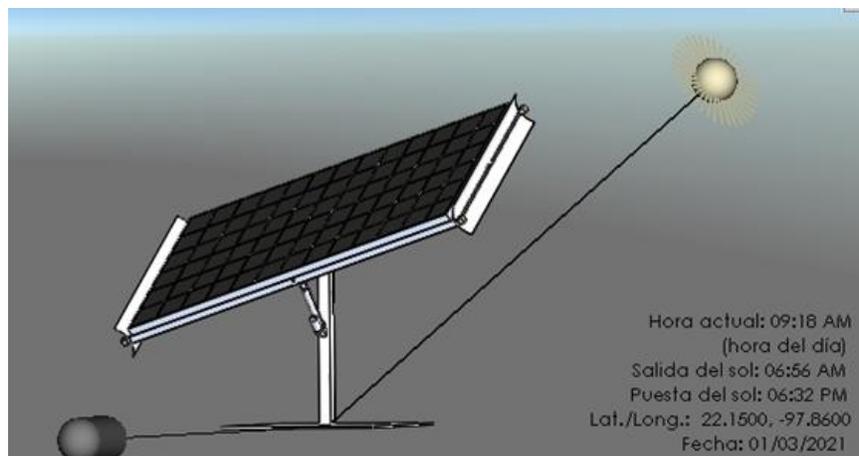


Figura 5.11. Estudio de acceso solar del seguidor. Realizado el día 1 de marzo a las 9:18 A. M.

Al calentarse la tira bimetálica lo suficiente como para generar un desplazamiento lineal adecuado para generar el momento torsor requerido, el panel realiza su

movimiento de rotación levemente hasta terminar orientado hacia el este. Como se observa en la figura 5.12, este estado favorece la cantidad irradiación solar que capta el panel solar durante el resto de la mañana hasta el mediodía.

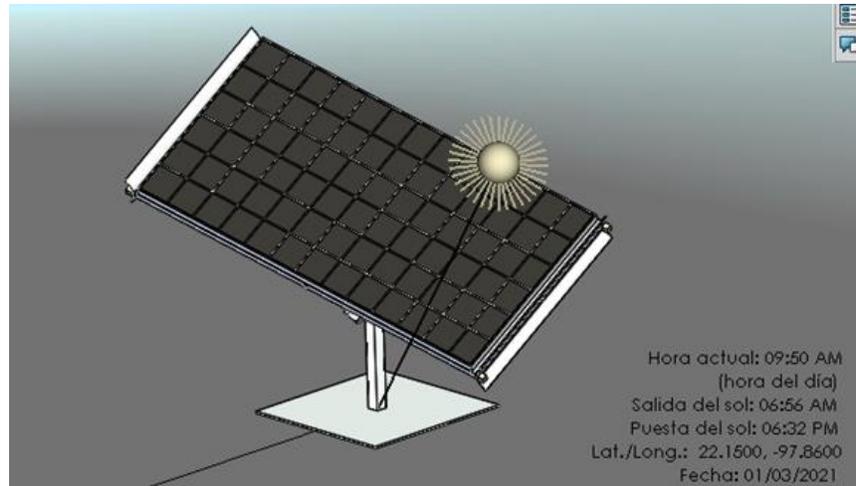


Figura 5.12. Estudio de acceso solar del seguidor. Realizado el día 1 de marzo a las 9:50 A. M.

Alrededor del mediodía, cuando el Sol se encuentra aparentemente sobre la estructura del seguidor solar, como se ilustra en la figura 5.13, si el panel se encuentra ubicado hacia el este, gracias a la forma de los concentradores solares los rayos del Sol solo alcanzarán la tira bimetálica del lado izquierdo.

La figura 5.14 muestra una vista desde arriba de la estructura del seguidor solar cuando el panel está orientado hacia el este donde se puede observar que la tira bimetálica del lado izquierdo está expuesta a la irradiación solar, mientras que el concentrador le produce sombra a la tira del lado derecho. Por lo tanto, en este periodo de tiempo la tira del lado izquierdo se calienta con la irradiación solar.

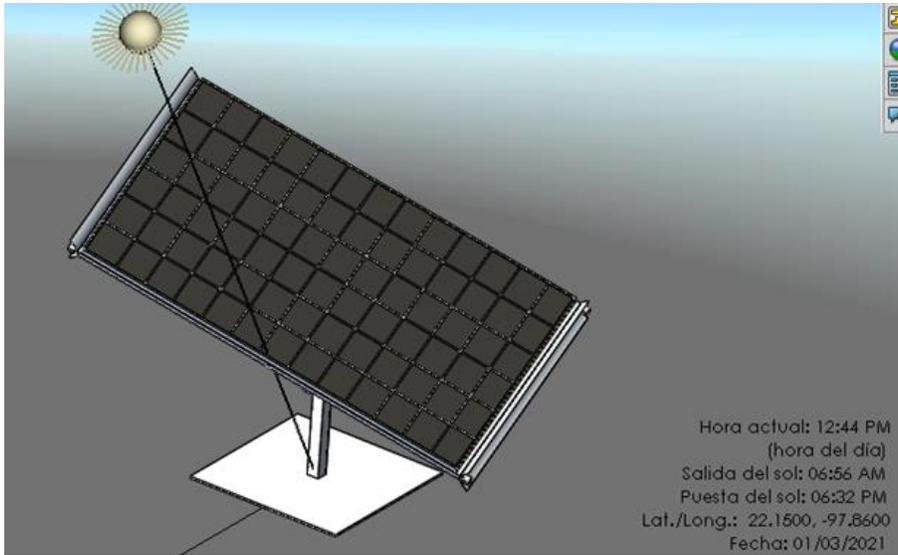


Figura 5.13. Estudio de acceso solar del seguidor. Realizado el día 1 de marzo a las 12:44 P. M.

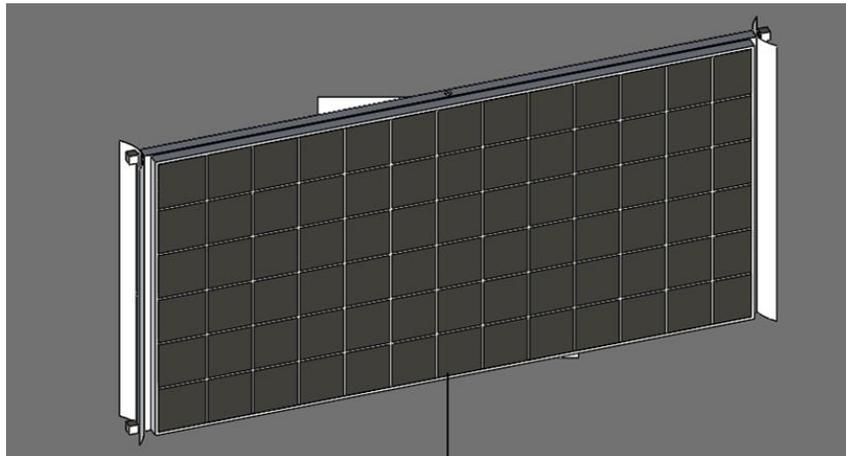


Figura 5.14. Estructura del seguidor solar vista desde arriba con el panel orientado al este.

El calentamiento ocurrido únicamente en la tira del lado izquierdo, al alcanzar la temperatura adecuada genera el momento torsor para que la estructura realice la rotación azimutal, terminando orientada nuevamente hacia el oeste. Esto debería

ocurrir después del medio día. En la figura 5.15 se aprecia que cuando el panel se vuelve a orientar hacia el oeste es mayor la irradiación solar que recibe durante la tarde y hasta el anochecer.

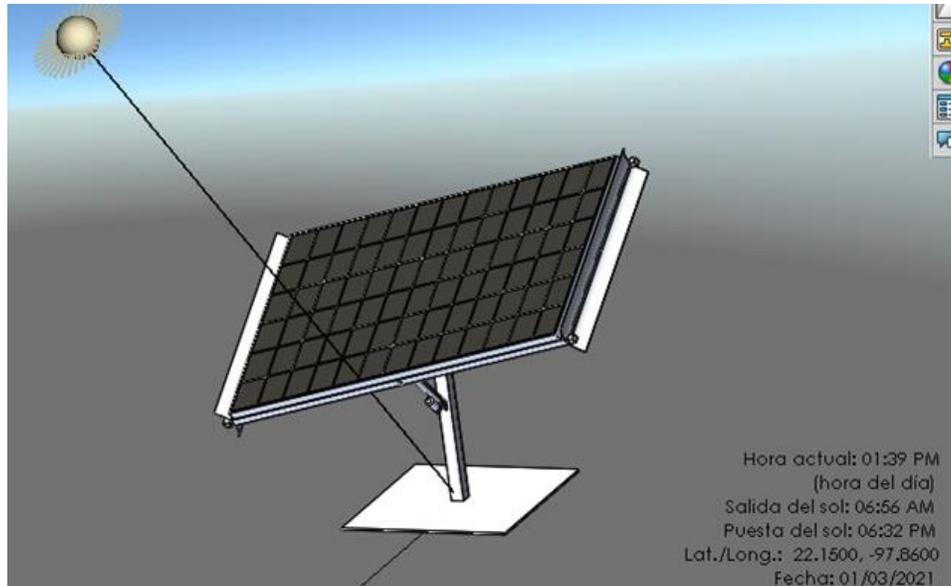


Figura 5.15. Estudio de acceso solar del seguidor. Realizado el día 1 de marzo a la 1:39 P. M.

Las figuras 5.16 y 5.17 muestran dos estados del resultado del estudio de acceso solar del seguidor realizado el primero de agosto, donde el ángulo de altura solar es aproximadamente de  $86^\circ$ . En estos estudios el actuador lineal se encuentra en estado extendido.

Tanto el estudio de acceso solar realizado en marzo como el estudio efectuado para agosto demuestran que el prototipo planteado del seguidor solar si es capaz de cumplir su función de seguir la trayectoria solar, tanto la altura solar como el azimut.

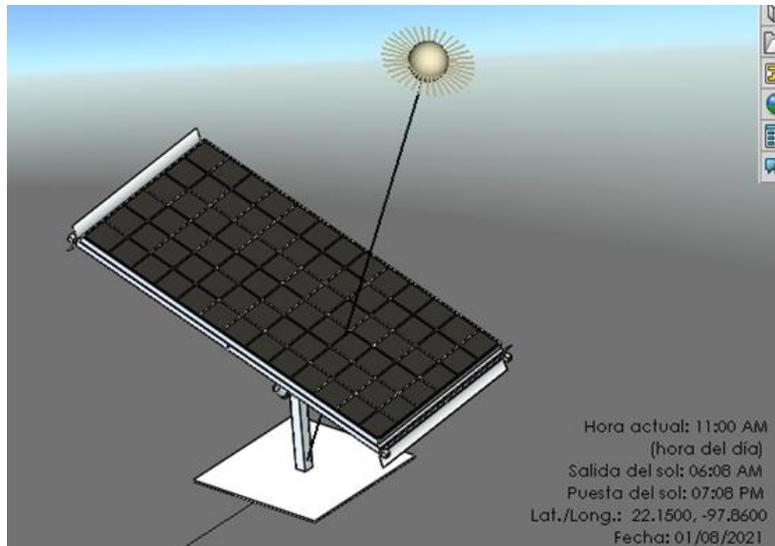


Figura 5.16. Estudio de acceso solar del seguidor. Realizado el día 1 de agosto a las 11:00 A. M.

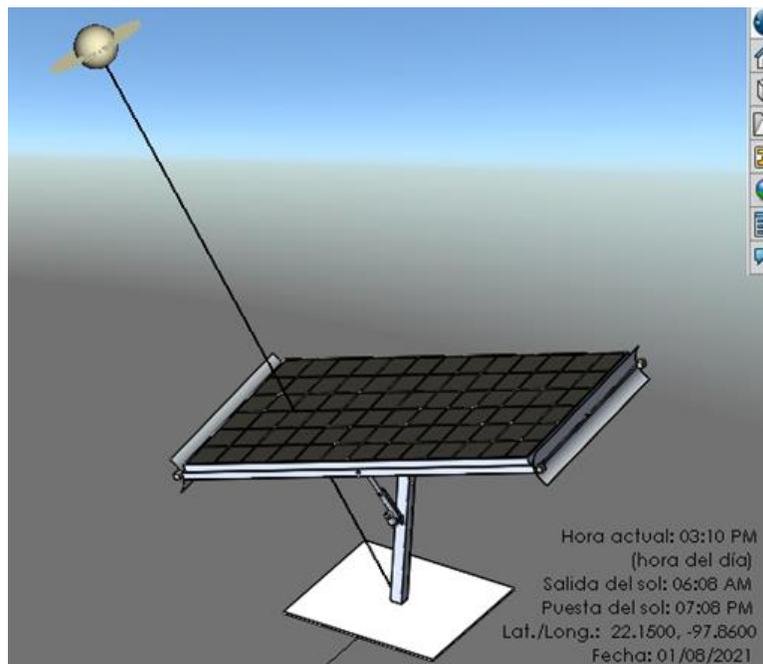


Figura 5.17. Estudio de acceso solar del seguidor. Realizado el día 1 de agosto a las 3:10 P. M.

## Capítulo 6. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

### 6.1. Conclusiones

Este trabajo presenta un seguidor solar de dos ejes que realiza su movimiento azimutal con el mecanismo de las tiras bimetálicas, se planteó usar este mecanismo pasivo debido a que este usa menos componentes mecánicos y electrónicos, por lo que requiere menor trabajo de mantenimiento y es más económico que otros tipos de seguidores solares.

Se propone que este seguidor solar sea para uso doméstico y para zonas rurales, ya que mejorar el rendimiento del panel solar a un menor costo que otros sistemas de seguimiento. Aun así, se debe hacer una valoración con el costo extra con respecto a la cantidad de mejora de rendimiento que tiene el panel solar para decidir si es conveniente usar este seguidor.

Se utilizaron las distintas herramientas de *SolidWorks* para demostrar que el mecanismo propuesto si realiza el movimiento adecuado, por lo que el seguimiento pasivo por medio del mecanismo de las tiras bimetálicas en los extremos si es viable.

El uso de las herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) proporcionan una gran ventaja al momento de realizar nuevos diseños y optimizarlos, sin embargo, este trabajo debe ser completado con el prototipo físico del seguidor solar, ya que usa como variable datos de la naturaleza, por ejemplo, el calor obtenido por la irradiación solar en las tiras es un factor que no es una constante en sí, no se puede saber con exactitud la temperatura a la que se calienta la tira bimetálica en un tiempo determinado. Aunque en teoría y en el modelado el diseño propuesto es factible, la fiabilidad de este trabajo depende directamente del tiempo en que se caliente la tira bimetálica en uno de los extremos del seguidor y el incremento lineal que se genere en esta.

## 6.2. Recomendaciones

Los estudios realizados en este trabajo se hicieron sin considerar la influencia que tiene el amortiguador en el movimiento azimutal realizado con el mecanismo de las tiras bimetálicas. Tal vez sea necesario aumentar el peso en los extremos de las tiras, o mejorar el desplazamiento lineal aumentando el radio de curvatura de las tiras calentadas dependiendo el coeficiente de amortiguamiento que se elija para dar seguridad al seguidor solar.

Se recomienda también llevar a cabo el análisis de rachas de vientos extremos en las temporadas de huracanes sobre el seguidor solar, para verificar la seguridad del seguidor en estas épocas. Con los resultados del análisis estático y estos resultados se pueden hacer modificaciones a la estructura base y los ejes del seguidor para optimizarlo.

## 6.3. Trabajos futuros

Se puede dar continuidad al presenta trabajo con las siguientes propuestas:

- Usar otros materiales para las tiras bimetálicas que tengan mayor diferencia en sus coeficientes de dilatación lineal, podría ser el caso de algunos tipos de polímeros avanzados. Si es mayor este coeficiente, el radio de curvatura es menor, por lo que el desplazamiento lineal de las tiras aumentaría a un menor cambio de temperatura.
- Realizar un seguidor solar “hibrido” que use el mecanismo de las tiras bimetálicas como seguimiento pasivo y algún otro mecanismo de seguimiento activo, para usar solamente en casos en donde el seguidor pasivo no genere el movimiento, como será en ambientes fríos, cuando el día esté completamente nublado, o que se realice un retorno durante la noche.
- Determinar si es factible aplicar el mecanismo pasivo propuesto para una red de seguimiento solar.

## Bibliografías

Agencia Internacional de Energía. World Energy Outlook 2017. Guía de programas de fomento a la generación de energía con recursos renovables.

Al-Mohamad A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a suntracking system. Applied Energy 2004.

Aprendemos tecnología (2018). Máquinas y mecanismos. Extraído de: <https://aprendemostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/>

Astronomía (2018). Movimientos de la Tierra. Extraído de: <https://www.astromia.com/tierraluna/movtierra.htm>

Balam David. (2010). Diseño de un seguidor solar pasivo para su uso con diversos paneles de captación de energía solar.

Beckers Benoit. (2004). El diagrama solar. Reporte técnico, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. Recuperado de: <http://www.heliodon.net/>

Beer F., Johnston E., Cornwell P. (2010). Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica. Mc Graw Hill. Novena edición. México.

California Energy Commission (2001). A guide to photovoltaic (PV) system design and installation. Consultant report Version 1.0.

Cengel, Yunus A; Boles, Michael (2006). Termodinámica. Mc Graw Hill. Quinta Edición. EUA.

Clifford M. J., Eastwood D. (2004). Design of a novel passive solar tracker. Solar Energy No. 77, pp. 269-280.

Computation path of the sun. (2019). Obtenido de: <https://www.suncalc.org>

Drew Ex Machina (2018). *Vanguard 1: The Little Satellite That Cloud*. Andrew LePage. Extraído de: <https://www.drewexmachina.com/2018/03/17/vanguard-1-the-little-satellite-that-could/>

Energiza (2018). Historia de la energía solar fotovoltaica. Extraído de: [https://www.energiza.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=624&catid=22&Itemid=111](https://www.energiza.org/index.php?option=com_content&view=article&id=624&catid=22&Itemid=111)

Evolve India (2015). *Solar tracker market expected to grow*. Obtenido de: <http://evolveindia.in/blog/2015/10/24/solar-tracker-market-expected-to-grow/>

Global Solar Atlas. (2019). PVOUT map. Extraído de: <https://globalsolaratlas.info/?c=22.322448,-97.716522,11&s=22.24398,-97.873077>

Lemus C. Andrés. (2011). Diseño y construcción de un sistema seguidor de Sol con modelo astronómico.

Machado N., Lussón A., Oro L., Bonzon J., Escalona O., (2015). Seguidor solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar. Cuba.

Pallas Ramón (2008). Sensores acondicionadores de señal. Cuarta edición. México, p. 30-33.

Panel fotovoltaico (2018). Solar-energía. Recuperado de: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/panel-fotovoltaico>

Perez Lorenzo, Ezpeleta E., Acedo A. (2002). Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis. Progress in Photovoltaics No.10, pp. 533 – 543.

Poulek V. (1994). Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors. Conference Record of the Twenty Fourth; IEEE Photovoltaic Specialists Conference.

Rau Hans (1980). Energía solar. Aplicaciones prácticas. Marcombo, Boixareu Editores. España.

Reyes José (2013). Diseño de un seguidor solar para cubierta a dos ejes y modular.

Risen Energy (2017). Risen Solar Technology.

Roth P, Georgiev A, Boudinov H. (2005). Cheap two-axis sun following device. Energy Conversion and Management.

SEMARNAT, (2015). Guía de programas de fomento a la generación de energía con recursos renovables. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/47854/Guia\\_de\\_programas\\_de\\_fomento.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/47854/Guia_de_programas_de_fomento.pdf)

Smartt Bell Madison (2013). Lavoisier en el año uno de la Revolución. Antoni Bosh Editor. España.

Solar-Energía (2018). Historia de la energía solar. Extraído de: <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/historia###targetText=En%201838%20aparece%20la%20energ%C3%ADa,al%20Sol%20sub%C3%ADa%20la%20corriente.>

University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratory. (2007). Sun path chart program. Extraído de: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>

Weather Spark. (2019). El clima promedio en Tampico. Extraído de: <https://es.weatherspark.com/y/7900/Clima-promedio-en-Tampico-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Zomeworks. (2018). How do trackers work? Zomeworks Corporation. Extraído de: <https://zomeworks.com/track-racks>