

**DISEÑO DE UN SEGUIDOR SOLAR  
PARA CUBIERTA A DOS EJES Y  
MODULAR**

**JOSÉ REYES AMIL**

Trabajo para optar al  
Máster en Energías Renovables Distribuidas

Profesor/es Tutor/es:

**D. RAFAEL LÓPEZ LUQUE**

**Dña. MARTA MARÍA VARO MARTÍNEZ**

Córdoba, 3 de Diciembre, 2013

© 2013, José Reyes Amil



# **DISEÑO DE UN SEGUIDOR SOLAR PARA CUBIERTA A DOS EJES Y MODULAR**

**JOSÉ REYES AMIL**

Trabajo Fin de Máster presentado a la Comisión integrada por los profesores:

Para completar las exigencias del Máster  
en Energías Renovables Distribuidas

Córdoba, 3 de Diciembre, 2013



## AUTORIZACIÓN DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

D. Rafael López Luque, Profesor/a Titular, del Departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Córdoba y Dña. Marta María Varo Martínez, Profesora Contratada Doctora del Departamento de Física Aplicada, autorizan a D. José Reyes Amil, con DNI 30954320-T a presentar el trabajo titulado Diseño de un seguidor solar para cubierta a dos ejes y modular, como Trabajo Fin de Máster del Programa Oficial de Energías Renovables Distribuidas de la Universidad de Córdoba.

El Trabajo Fin de Máster se presenta con carácter de Trabajo de Investigación.

<b>Asimismo solicitan sea admitido para su defensa en la Convocatoria:</b>			
Curso: 2012/2013			
Ordinaria:	Junio/Julio <input type="checkbox"/>	Septiembre <input type="checkbox"/>	Extraordinaria: Diciembre <input checked="" type="checkbox"/>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Convocatoria Ordinaria, llamamiento de Junio:</i><ul style="list-style-type: none"><li>a. <i>Solicitud de defensa de TFM: hasta el 20 de Junio</i></li><li>b. <i>Exposición y defensa de TFM: entre el 1 y el 10 de Julio</i></li></ul></li><li>• <i>Convocatoria Ordinaria, llamamiento de Septiembre:</i><ul style="list-style-type: none"><li>a. <i>Solicitud de defensa de TFM: hasta el 10 de Septiembre</i></li><li>b. <i>Exposición y defensa de TFM: entre el 21 y el 30 de Septiembre</i></li></ul></li><li>• <i>Convocatoria Extraordinaria, llamamiento de Diciembre:</i><ul style="list-style-type: none"><li>a. <i>Solicitud de defensa de TFM: hasta el 5 de Diciembre</i></li><li>b. <i>Exposición y defensa de TFM: entre el 16 y el 23 de Diciembre</i></li></ul></li></ul>			

Córdoba, a 3 de Diciembre de 2013

El Director

La Directora

Fdo:

Fdo:



## INFORME DEL DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER

En el presente trabajo se ha llevado a cabo un estudio en profundidad del estado del arte en cuanto a sistemas de seguimiento solar utilizados para optimizar la captación de radiación. El alumno ha realizado un estudio de radiación donde queda justificado la mayor captación por parte de las instalaciones con seguimiento y la separación necesaria entre colectores. A partir de estos conocimientos y los adquiridos en el Máster, ha propuesto un seguidor a dos ejes modular utilizando el software de diseño mecánico SolidWorks. Se trata de un diseño adaptable a todo tipo de cubiertas, económico, duradero, fácilmente motorizable y sencillo de montar y mantener.

Se ha simulado el comportamiento de las partes que componen el seguidor frente a las posibles acciones a las que puede verse sometido en su puesta en servicio. Esto ha permitido seleccionar las piezas en sus dimensiones oportunas teniendo además en cuenta su facilidad de ser encontradas en el mercado.

En este trabajo se aporta, de forma original, un seguidor a dos ejes novedoso capaz de instalarse en todo tipo de cubiertas, tanto industriales como urbanas, planas o inclinadas. A esto se le une el hecho de ser modular, lo que permite asociarlo a otro seguidor de las mismas características a continuación con unas operaciones de montaje sencillas.

Durante todo el proceso D. José Reyes Amil ha demostrado una gran iniciativa a la hora de enfocar y resolver los problemas, así como una actitud muy positiva. Por todo ello nuestra valoración del trabajo realizado es excelente.

Córdoba, a 3 de Diciembre de 2013

El/la Directora/a

El/la Directora/a

Fdo:

Fdo:







## **DEDICATORIA**

*A María José por permanecer, por ser  
esa constante llamada felicidad*

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias al Departamento de Física Aplicada de la ETSIAM y en especial al Prof. Dr. Rafael López Luque, fuente de conocimiento inagotable, por su incansable ayuda y disposición a ayudarme en la realización del presente Trabajo Fin de Máster. También agradecer su colaboración a la Prof. Dra. Marta María Varo Martínez. A todos los profesores del Máster de Energías Renovables Distribuidas y en especial a su Director, el Prof. Dr. Antonio Moreno Muñoz.



## INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
INDICE DE TABLAS.....	xi
INDICE DE FIGURAS .....	xiii
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1    Introducción .....	1
2    Objetivos.....	7
2.1   Objetivo general .....	7
2.2   Objetivos específicos.....	7
3    Antecedentes .....	7
3.1   Geometría solar .....	7
3.2   Seguidores solares .....	12
4    Metodología .....	21
4.1   Solidworks .....	23
4.2   Módulo fotovoltaico .....	23
4.3   Estructura soporte.....	25
4.4   Bisagras.....	28
4.5   Rueda de cadena.....	30
4.6   Cadena .....	31
4.7   Pletina de arriostramiento .....	32
4.8   Cabezal de giro.....	32
4.9   Rodamientos.....	34
4.9.1   Rodamiento rígido de bolas.....	36
4.9.2   Rodillo de agujas de empuje .....	37
4.9.3   Rodillo de agujas sin anillo interior.....	38

4.9.4	Lubricación.....	39
4.10	Doble junta cardan.....	40
4.11	Motorreductor y varilla roscada .....	41
4.12	Soldadura .....	43
4.13	Carcasa protectora .....	44
4.14	Controlador .....	44
5	Simulación de esfuerzos .....	45
5.1	Estructura soporte.....	45
5.1.1	Acciones sobre la estructura.....	45
5.2	Simulación de la barra longitudinal.....	48
5.3	Simulación del soporte rectangular .....	51
5.4	Simulación de la barra fija .....	53
5.5	Simulación de la bisagra .....	54
6	Resultados.....	59
6.1	Estudio de radiación .....	59
6.1.1	Ángulo óptimo de inclinación .....	59
6.1.2	Captación anual y sombreado .....	60
6.1.3	Separación y número de colectores.....	62
6.2	Valoración económica .....	63
7	Conclusiones.....	65
8.	Bibliografía.....	66

Anexo:

Anexo A. Simulación de la barra longitudinal

Anexo B: Simulación del soporte rectangular del módulo fotovoltaico

Anexo C: Simulación de barra fija (120 x 60 x 5x6000)

Anexo D. Simulación de la hoja móvil de la bisagra

Anexo E. Simulación de la hoja fija de la bisagra

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> <i>Características eléctricas y físicas del módulo A-150P de ATERSA.....</i>	24
<b>Tabla 2.</b> <i>Características del acero galvanizado.....</i>	25
<b>Tabla 3.</b> <i>Designación de los tipos de aceros galvanizados.....</i>	25
<b>Tabla 4.</b> <i>Características del acero galvanizado.....</i>	30
<b>Tabla 5.</b> <i>Características de la cadena de transmisión 20A-1.....</i>	32
<b>Tabla 6.</b> <i>Características del rodamiento SKF 7207BEP.....</i>	36
<b>Tabla 7.</b> <i>Características del rodamiento SFK-AXK 0821 TN.....</i>	38
<b>Tabla 8.</b> <i>Características del rodamiento SFK-AXK 0808.....</i>	39
<b>Tabla 9.</b> <i>Coefficientes parciales de seguridad (<math>\gamma</math>) para las acciones.....</i>	46
<b>Tabla 10.</b> <i>Valores del coeficiente de exposición <math>c_e</math>.....</i>	47
<b>Tabla 11.</b> <i>Radiación Global en el Edificio C2 del C.U. Rabanales.....</i>	59
<b>Tabla 12.</b> <i>Valoración económica del seguidor.....</i>	63





## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> <i>Evolución del consumo eléctrico en GWh</i> .....	3
<b>Figura 2.</b> <i>Reparto de la generación eléctrica en 2012</i> .....	3
<b>Figura 3.</b> <i>Reparto de la generación eléctrica con fuentes renovables</i> .....	4
<b>Figura 4.</b> <i>Evaluación de la aportación de las EERR a la cobertura de demanda</i> .....	4
<b>Figura 5.</b> <i>Seguidores a dos ejes de superficie instalados sobre cubiertas</i> .....	6
<b>Figura 6.</b> <i>Movimiento de la Tierra alrededor del Sol</i> .....	9
<b>Figura 7.</b> <i>Representación de la altura solar (<math>\alpha</math>) y el azimut (<math>\gamma</math>)</i> .....	9
<b>Figura 8.</b> <i>Variación del arco diurno en distintas épocas del año</i> .....	10
<b>Figura 9.</b> <i>Diagrama de trayectoria solar en Córdoba</i> .....	10
<b>Figura 10.</b> <i>Posición del Sol respecto a una superficie inclinada <math>\beta</math> y arbitrariamente orientada</i> .....	11
<b>Figura 11.</b> <i>Energía perdida en función del ángulo máximo de seguimiento respecto al ideal</i> ....	12
<b>Figura 12.</b> <i>Sistema de seguidor con Freón de Zomeworks Corporation</i> .....	14
<b>Figura 13.</b> <i>Seguidor solar de Poulek antes a) y después b) de la orientación por la mañana</i> ....	15
<b>Figura 14.</b> <i>Planos de detalle del seguidor solar de Poulek</i> .....	15
<b>Figura 15.</b> <i>Posicionamiento de los semicilindros y fotorresistencias (a) y esquema del sistema de control de un eje (b)</i> .....	16
<b>Figura 16.</b> <i>Sensor piramidal propuesto por Lynch</i> .....	17
<b>Figura 17.</b> <i>Diagrama de bloques del diseño propuesto por Al-Mohamad</i> .....	18
<b>Figura 18.</b> <i>Seguidor solar propuesto por Poulek y Libra, 1998</i> .....	18
<b>Figura 19.</b> <i>Posiciones del seguidor a lo largo del día a) y detalle de diseño b)</i> .....	19
<b>Figura 20.</b> <i>Montaje del seguidor solar propuesto por Aliman</i> .....	20
<b>Figura 21.</b> <i>Componentes principales del seguidor</i> .....	22
<b>Figura 22.</b> <i>Posiciones de los módulos desde una perspectiva isométrica</i> .....	22
<b>Figura 23.</b> <i>Posiciones de los módulos desde una perspectiva de perfil</i> .....	23
<b>Figura 24.</b> <i>Curvas características del módulo A-150P</i> .....	24
<b>Figura 25.</b> <i>Vista genérica constructiva del panel. Catálogo ATERSA</i> .....	24
<b>Figura 26.</b> <i>Sección de perfil tubular rectangular</i> .....	26
<b>Figura 27.</b> <i>Dimensiones del soporte del módulo fotovoltaico</i> .....	27
<b>Figura 28.</b> <i>Detalle del tornillo de cabeza avellanada hexagonal</i> .....	27

<b>Figura 29.</b> <i>Detalle de tuerca hexagonal abridada de calidad A.....</i>	28
<b>Figura 30.</b> <i>Detalle de la unión mediante tornillo-tuerca.....</i>	28
<b>Figura 31.</b> <i>Croquis de detalle de la hoja de la bisagra que se fija a la barra de 6 m.....</i>	29
<b>Figura 32.</b> <i>Croquis de detalle de la hoja de la bisagra que aloja el rodamiento.....</i>	29
<b>Figura 33.</b> <i>Ensamblaje de la bisagra.....</i>	30
<b>Figura 34.</b> <i>Rueda para cadena de rodillos de paso corto.....</i>	31
<b>Figura 35.</b> <i>Cadena de rodillos 20A-1.....</i>	31
<b>Figura 36.</b> <i>Cabezal de giro.....</i>	33
<b>Figura 37.</b> <i>Vista de la estructura sin aristas ocultas (a) y sólida (b) del ensamblaje.....</i>	33
<b>Figura 38.</b> <i>Tipos de esfuerzos a los que puede verse sometido un rodamiento.....</i>	34
<b>Figura 39.</b> <i>Tipos de rodamientos.....</i>	35
<b>Figura 40.</b> <i>Detalle del rodamiento SKF-7207BEP.....</i>	37
<b>Figura 41.</b> <i>Rodillo de agujas de empuje.....</i>	38
<b>Figura 42.</b> <i>Rodillo de agujas de empuje SKF-AXK 0821 TN.....</i>	38
<b>Figura 43.</b> <i>Rodillo de agujas sin anillo interior SKF-HK0808.....</i>	39
<b>Figura 44.</b> <i>Doble junta cardan telescópica.....</i>	41
<b>Figura 45.</b> <i>Manguito rígido partido.....</i>	42
<b>Figura 46.</b> <i>Croquis acotado en mm y vista en perspectiva.....</i>	43
<b>Figura 47.</b> <i>Croquis del ensamblaje.....</i>	43
<b>Figura 48.</b> <i>Carcasa protectora.....</i>	44
<b>Figura 49.</b> <i>Mapa de velocidad del viento en España.....</i>	47
<b>Figura 50.</b> <i>Tensión axial y de flexión (<math>N/mm^2</math>) de la barra longitudinal. Escala de deformación 1:7800.....</i>	49
<b>Figura 51.</b> <i>Desplazamiento de la barra longitudinal. Escala de deformación 1:7800.....</i>	50
<b>Figura 52.</b> <i>Factor de seguridad de la barra longitudinal.....</i>	51
<b>Figura 53.</b> <i>Tensión axial y de flexión soporte rectangular. Escala de deformación 1:500.....</i>	52
<b>Figura 54.</b> <i>Desplazamiento del soporte rectangular. Escala de deformación 1:500.....</i>	52
<b>Figura 55.</b> <i>Factor de seguridad del soporte rectangular.....</i>	53
<b>Figura 56.</b> <i>Tensión de von Misses (<math>N/mm^2</math>) de la barra fija. Escala de deformación 1:25000.....</i>	53
<b>Figura 57.</b> <i>Desplazamiento (mm) de la barra fija. Escala de deformación 1:25000.....</i>	54
<b>Figura 58.</b> <i>Factor de seguridad de la barra fija.....</i>	54
<b>Figura 59.</b> <i>Tensión de von Misses (<math>N/mm^2</math>) de la hoja móvil de la bisagra. Escala de deformación 1:250000.....</i>	55

<b>Figura 60.</b> Desplazamiento (mm) de la hoja móvil de la bisagra. Escala de deformación 1:250000.....	56
<b>Figura 61.</b> Factor de seguridad (FDS) de la hoja móvil de la bisagra.....	56
<b>Figura 62.</b> Tensión de von Misses ( $N/mm^2$ ) de la hoja fija de la bisagra. Escala de deformación 1:78000.....	57
<b>Figura 63.</b> Desplazamiento (mm) de la hoja fija de la bisagra. Escala de deformación 1:78000.....	58
<b>Figura 64.</b> Factor de seguridad (FDS) de la hoja fija de la bisagra.....	58
<b>Figura 65.</b> Ángulo óptimo de inclinación del colector a lo largo del año.....	60
<b>Figura 66.</b> Captación anual del colector en función de la distancia entre ejes.....	61
<b>Figura 67.</b> Relación de captación entre seguidor proyectado variando la distancia entre ejes y un seguidor a dos ejes aislado.....	61
<b>Figura 68.</b> Radiación captada de un módulo proyectado vs módulo horizontal.....	63

## RESUMEN

El aprovechamiento de la cubierta tanto de edificios industriales como urbanos para generar electricidad por medio de paneles fotovoltaicos, destinada al autoconsumo y en mayor medida para ser vertida a la red y así obtener un beneficio económico, es uno de los usos que muchos propietarios se plantean.

El uso de seguidores solares incrementa notablemente la producción eléctrica de una instalación fotovoltaica, por lo que su uso es muy recomendable si se desea rentabilizar lo antes posible la inversión realizada. A diferencia de las instalaciones a nivel de superficie que utilizan seguidores, habitualmente a dos ejes, es extraño el uso de seguidores en cubiertas. En todo caso, se utilizan seguidores a un eje en cubiertas planas, siendo prácticamente inexistente el uso de seguidores en cubiertas inclinadas.

Se propone un nuevo seguidor a dos ejes versátil, que puede ser instalado tanto en cubiertas planas como inclinadas. Se trata de un seguidor de fácil instalación, accesible económicamente y que requiere poco mantenimiento. Además, permite ser adaptado a antiguas instalaciones en cubierta sin seguidor realizando pequeñas modificaciones.

Palabras Claves: seguidor solar para cubierta, autoconsumo y balance neto

## **ABSTRACT**

Taking advantage of the roof covering of industrial and urban buildings to generate electricity by using photovoltaic panels is one of the uses many owners consider to obtain an economic benefit from it.

The use of solar tracking considerably increases the electric production of photovoltaic installations. It is advisable its use with the aim of ensuring an earlier return of the investment. It's not common the use of solar tracking located on the rooftop of the buildings. Single Axis Tracking system is usually used on the flat rooftop of the buildings, however, the use of solar tracking is still almost non-existent in sloped roofs.

It is proposed a new and versatile dual axis solar tracker which can be installed both on flat or sloped roof coverings. This solar tracking system is fast and easy to install with low cost and maintenance. In addition, it can be adapted to the old installations with no solar tracker on roof coverings by making just small modifications.

Keywords: solar tracking, net metering

## 1 INTRODUCCIÓN

La humanidad y su desarrollo han estado siempre ligados al consumo de energía. En un principio sólo se consumía la energía proveniente de los alimentos necesarios para sobrevivir, 2.500-3.500 kcal/persona y día. El descubrimiento del fuego y sus usos diversos incrementó el consumo energético por persona a unas 6.000 kcal/diarias.

Hoy en día, el consumo energético en los países más desarrollados se puede cifrar en unas 300.000 kcal/persona y día, destinadas al abastecimiento de vehículos, calefacción, industria, electrodomésticos, iluminación, etc. Por tanto, sólo un 1% se dedica al consumo alimenticio directo.

El paisaje energético mundial siempre ha sido dinámico, sin embargo, en las últimas décadas, se han acentuado los problemas energéticos llegando a desembocar incluso en conflictos armados. Las cíclicas crisis económicas, la localización de los yacimientos petrolíferos y de gas, la creciente demanda de energía por parte de los países emergentes, las consecuencias negativas para el medio ambiente del uso de combustibles fósiles o las reivindicaciones de la sociedad por el uso de energías limpias, están entre los factores más importantes que motivan esos cambios en el panorama energético.

La búsqueda de un suministro eficiente de energía limpia para el futuro es uno de los retos más difíciles de la sociedad. El drástico aumento que ha sufrido la demanda de energía ha tenido como consecuencia el paulatino agotamiento de las reservas energéticas tradicionales (petróleo, carbón y gas natural) y el incremento en el precio de la energía. Para dar respuesta a esto, de manera paralela, se ha producido un más que notable avance tecnológico con dos objetivos principales: desarrollar sistemas tecnológicos que permitan hacer un uso lo más rentables posible de las fuentes de energía alternativas y abaratar el transporte de la energía hasta los lugares de consumo.

Es necesario señalar que como medida de equivalencia entre los distintos tipos de energía, se utiliza la tonelada equivalente de petróleo (tep y múltiplos como la ktep) que sería la energía liberada por la combustión de una tonelada de crudo.

Para hacerse una idea, el poder calorífico de 1 tep = 1111 m<sup>3</sup> de gas natural = 1,5 T de carbón. También recordar que 1 tep = 7,33 barriles de petróleo, tal que 1 barril de petróleo contiene 158,98 l.

Antes de entrar a hablar sobre el consumo de energía en España y en el mundo, conviene señalar la diferencia entre energía primaria y final. La **energía primaria** son las

formas primarias de energía en su estado natural. Es aquella que no ha sido sometida a ningún proceso de conversión. Se pueden diferenciar dos grupos:

- Energías primarias no renovables: petróleo, carbón, gas natural y uranio.
- Energías primarias renovables: hidráulica, eólica, solar y biomasa.

El sector energético parte de las energías primarias y a través de sus tecnologías las convierte en **energías finales, secundarias o útiles**. Esta energía final es la que le llega al consumidor para realizar con ella un determinado trabajo.

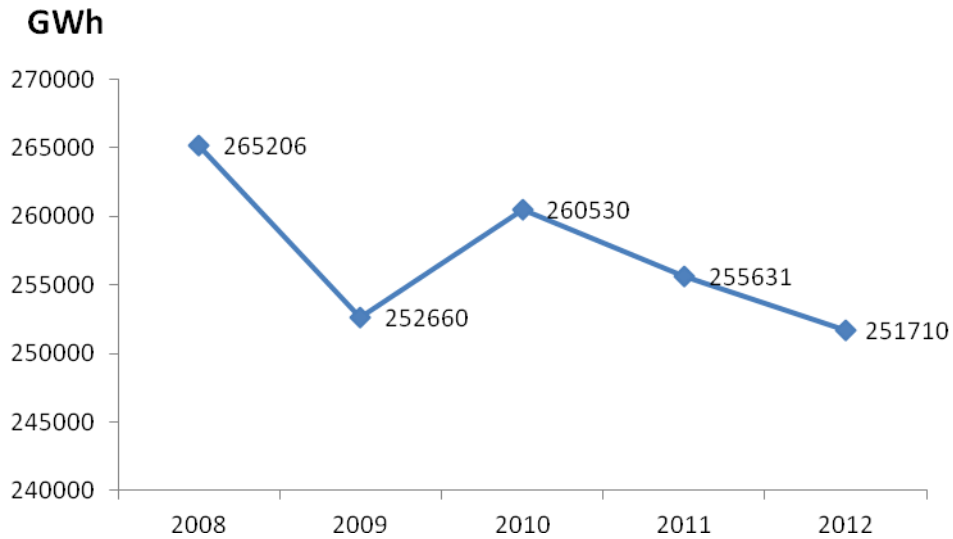
El **consumo de energía primaria** en España en 2008 fue de **142.075 ktep**, siendo un 3,1% inferior al año anterior. Por fuentes energéticas la participación es la siguiente:

- E.P. no renovables (93%): petróleo (48%), carbón (9%), gas (25%) y uranio (11%).
- E.P. renovables (7%): hidráulica (1,5%), eólica (2%), solar (0,25%) y biomasa (3,25%).

Destaca la continua y creciente participación del gas natural y de las energías renovables en la cobertura de la demanda energética, con efecto favorable en la eficiencia del sistema energético, como se desprende de la tendencia a la baja en el consumo de energía primaria.

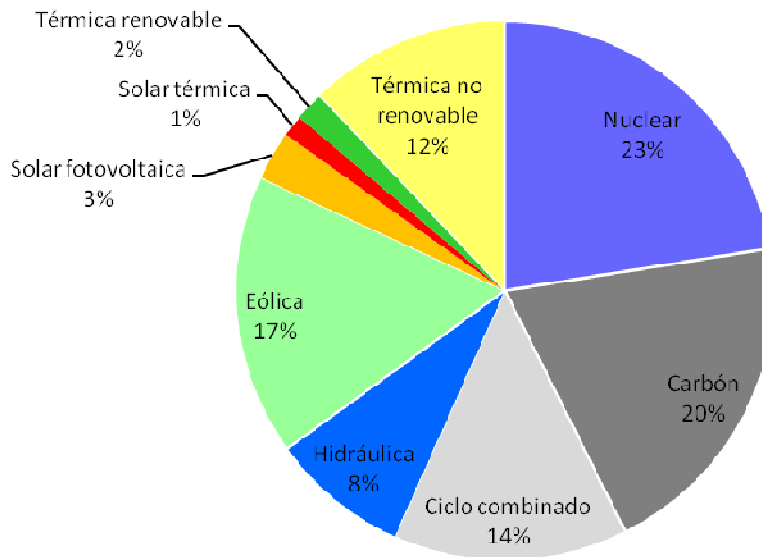
En lo que respecta al **consumo de energía final** en 2008, excluyendo los usos no energéticos, se alcanzaron las **98.737 ktep** correspondiéndole a los productos petrolíferos el 54,14% de la cantidad mencionada.

En cuanto a la demanda de energía eléctrica peninsular, en 2012 fue de 251.710 GWh. En la Figura 1 se puede observar la evolución del consumo eléctrico en los últimos cinco años, observándose un decrecimiento en los últimos años como consecuencia de la crisis económica.



**Figura 1.** Evolución del consumo eléctrico en GWh

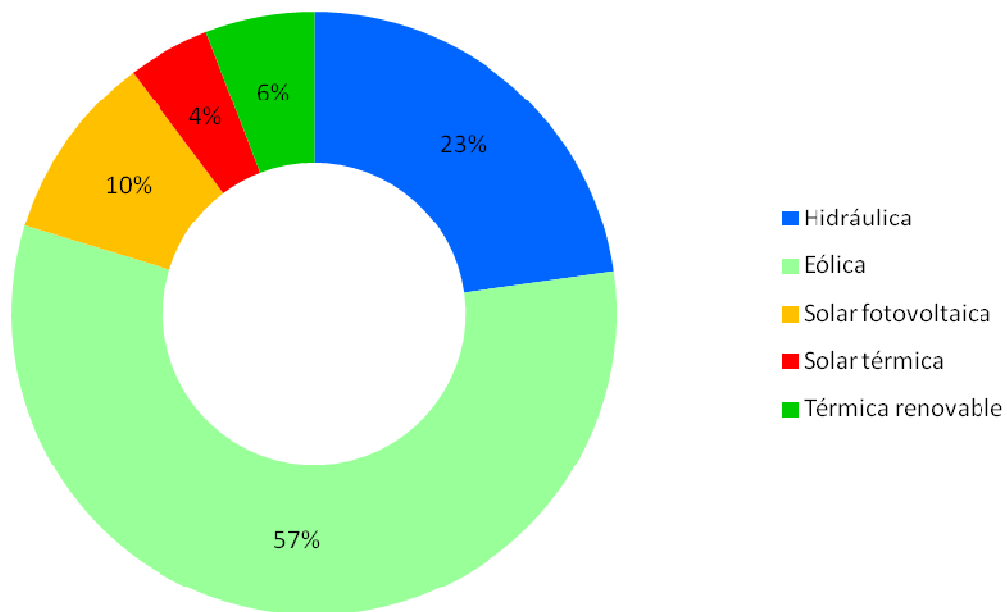
Las energías renovables, con una producción bruta de 62.557 GWh (bombeo excluido), aportan el 32 % de la producción, frente al 23 % de la electricidad de origen nuclear.



**Figura 2.** Reparto de la generación eléctrica en 2012

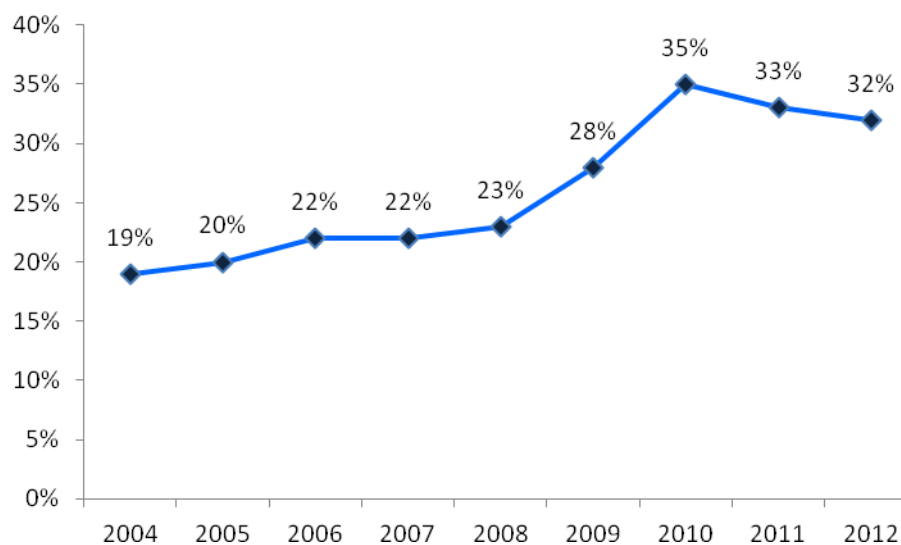
Esta producción eléctrica renovable procede en su mayoría (80%) de la energía hidráulica y eólica como se aprecia en la Figura 3.





**Figura 3.** *Reparto de la generación eléctrica con fuentes renovable*

La evolución de las energías renovables en España ha seguido una tendencia creciente, tan sólo interrumpida en aquellos años caracterizados por una baja hidraulicidad. Hoy día, existe una más que preocupante incertidumbre debido a las continuas modificaciones legales que afectan a las primas que reciben este tipo de energías.



**Figura 4.** *Evaluación de la aportación de las EERR a la cobertura de demanda*

Dentro del mix de energías renovables, la energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, ha experimentado un gran incremento de potencia instalada en los últimos años. Esto se debe fundamentalmente a los mecanismos de fomento económico propiciados por el

Gobierno para la instalación de este tipo de energías, acompañado a su vez de las mejoras tecnológicas (mejora de la eficiencia energética, disminución del precio de los paneles, mejoras en la red de distribución...)

En particular, las ventajas a destacar de la energía solar fotovoltaica serían las siguientes:

- Se trata de una fuente de energía inagotable
- No contamina cuando genera energía
- Sistema idóneo para zonas rurales, montañosas o insulares donde el tendido eléctrico no llega
- Fácil mantenimiento de los sistemas de captación solar
- Puede ser instalada en tejados y cubiertas de edificios sin ocupar espacio adicional
- Reduce la dependencia energética de otros países
- Creación de empleo

Aunque además de las ya mencionadas ventajas, existen muchas otras más, la fotovoltaica presenta una serie de inconvenientes como son:

- Fluctuación del nivel de radiación de una zona a otra y de una estación a otra
- Si se decide suministrar energía a una parte importante de la población se necesitan grandes extensiones de terreno
- La eficiencia energética de los paneles aún no es muy elevada
- Aún no está resuelta la cuestión del reciclaje de los paneles cuando agoten su vida útil
- Si se destina a autoconsumo, se precisan sistemas de acumulación (baterías) caros y que contienen agentes químicos peligrosos
- Inicialmente requiere una importante inversión económica
- Las áreas de mayor radiación son lugares desérticos y alejados por lo que los costes de distribución de la electricidad se incrementarían

Hoy día, existe un panorama expansivo del uso de energías renovables y la demanda del autoconsumo y balance neto por parte de muchos usuarios del ámbito urbano es una realidad. El autoconsumo consiste en generar tu propia energía y consumirla in situ. Si en algún periodo necesitas más energía de que la puedes generar, compras el resto a la red. El balance neto representa un paso más en el concepto. Consiste en consumir la energía que produces, y el exceso venderlo a la red. Globalmente, solo compras la energía que consumes de forma neta, es decir, la diferencia entre lo que compras y lo que vendes. Aunque la actual legislación es restrictiva en este aspecto, la perspectiva futura es que se incluya el balance neto y autoconsumo como una opción real para el consumidor final de energía eléctrica.

Así, si un propietario o una comunidad de propietarios de un edificio se proponen realizar una inversión para obtener energía eléctrica por medio de una instalación fotovoltaica, tanto en la opción de autoconsumo como en la de balance neto, debe optimizar al máximo el rendimiento de la misma. Como toda inversión, su objetivo final es satisfacer una necesidad de tal manera que sea amortizada lo antes posible y comience a dar un beneficio o reducir un gasto que se presenta de manera constante. Una medida que permite la consecución de ese objetivo es la instalación de sistemas de **seguimiento solar** para optimizar la captación de la irradiancia incidente sobre los paneles. Es en esta cuestión, el diseño de un seguidor para cubierta a dos ejes y modular en la que se centra el presente Trabajo Fin de Máster.

El seguimiento a dos ejes sobre cubierta es prácticamente inexistente y más si cabe en el ámbito urbano. Existen algunas instalaciones de seguidores a dos ejes que no son más que seguidores de superficie instalados sobre cubiertas, Figura 5.



**Figura 5.** Seguidores a dos ejes de superficie instalados sobre cubiertas

Existe por tanto la necesidad de diseñar un seguidor que posibilite el seguimiento a dos ejes sobre cubiertas, a ser posible adaptable tanto a planas como inclinada.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Dentro del contexto presentado en el apartado anterior, se propone el presente Trabajo Fin de Máster cuyo objetivo general sería el **diseño de un seguidor de dos ejes modular para cubiertas**, tanto industriales y domésticas ya sean planas o inclinadas, de bajo coste y fácil instalación y mantenimiento.

El uso de sistemas de seguimiento solar viene motivado por la necesidad de optimizar al máximo la incidencia de la radiación solar y con ello la generación de electricidad. En definitiva, mejorar la eficiencia de las instalaciones. El fin último que se persigue, es amortizar lo antes posible la instalación y dar servicio a las cargas a las que está conectada si es que tiene.

Para conseguir ese máximo de energía radiante incidente, es necesario que los paneles se mantengan orientados a lo largo del día siguiendo la trayectoria solar y con la inclinación precisa, de tal manera que los paneles estén perpendiculares a los rayos solares y conseguir con ello el máximo valor de radiación incidente. Esa orientación e inclinación, no sólo dependerá de la estación del año y hora del día sino de las coordenadas geográficas de la instalación.

### 2.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general que se plantea en este TFM, es necesario trasladarlo a la consecución de una serie de objetivos específicos que para este TFM serían:

- Diseñar un sistema de seguimiento a dos ejes adaptable a todo tipo de cubiertas
- Estudiar el comportamiento respecto al sol
- Analizar los parámetros de diseño y su influencia en el mismo

## 3 ANTECEDENTES

### 3.1 Geometría solar

La energía del Sol tiene su origen en las reacciones nucleares que tienen lugar en él. Tal es así, que la radiación en el “astro rey” alcanza los  $63.450.720 \text{ Wm}^{-2}$ . Si se tiene en cuenta que la distancia media a la atmósfera terrestre es  $149,6 \times 10^6 \text{ km}$  y se supone que el Sol emite en

todas direcciones, se puede definir la **constante solar**,  $G_{SC}$ , como el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol fuera de toda atmósfera. El valor comúnmente aceptado es  $G_{SC} = 1.353 \text{ Wm}^{-2}$ , variable durante el año un 3% a causa de la elipticidad de la órbita terrestre [1].

A la Tierra sólo llega aproximadamente 1/3 de la energía total interceptada por la atmósfera, y de ella el 70% cae sobre superficie marina. Aún así, la energía que llega es varios miles de veces el consumo energético mundial [2].

Al total de la radiación que llega a la Tierra se le conoce con el nombre de radiación global y se obtiene como la suma de tres componentes:

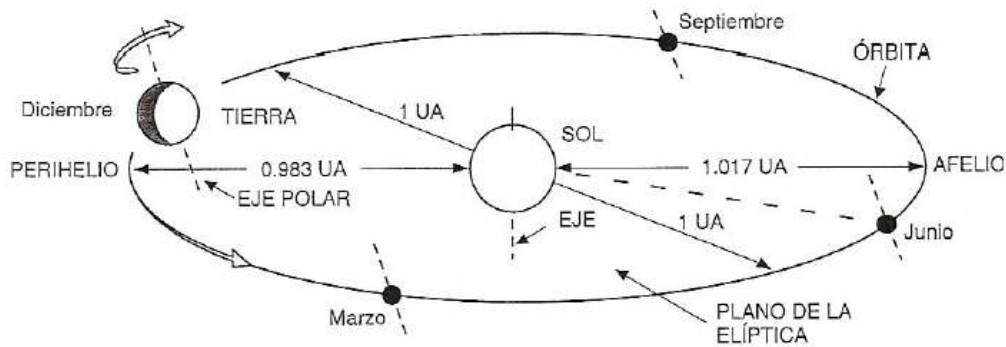
- Radiación directa: es la que no se refleja o dispersa a su paso por la atmósfera y llega a la superficie directamente. Es la componente de mayor peso desde el punto de vista fotovoltaico.
- Radiación difusa: es la que sufre cambios en su dirección debido a la reflexión y difusión en la atmósfera
- Albedo: es la fracción de la radiación directa y difusa que llega al suelo y se refleja de nuevo a la atmósfera.

La cantidad de radiación directa, difusa y albedo que incide en una superficie depende del día juliano que sea, las condiciones meteorológicas (presencia de nubes, lluvia...), la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal y en menor medida, de la presencia de superficies reflectantes (nieve, láminas de agua...)

Los principales movimientos de la tierra son el de rotación, alrededor de un eje que pasa por los polos, el eje polar, siendo la duración media de una vuelta completa de 24 horas y el de traslación, describiendo una órbita elíptica llamada eclíptica estando el Sol en uno de esos focos y con una duración de 365,24 días. 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

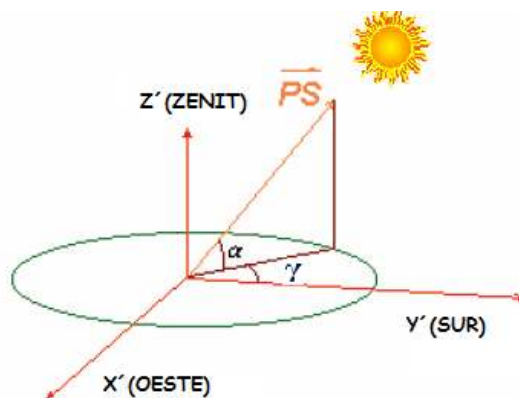
horizontal es mayor en el hemisferio Norte que en el Sur. Esto produce un mayor calentamiento en el hemisferio Norte durante el verano.



**Figura 6.** *Movimiento de la Tierra alrededor del Sol*

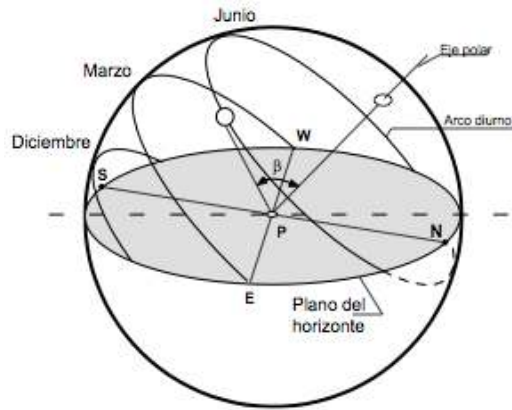
Dependiendo de la estación del año, el Sol dibuja trayectorias diferentes. Para analizar este movimiento, se hace uso de un sistema de coordenadas con dos ángulos:

- **Altura solar ( $\alpha$ ):** es el ángulo que forma la horizontal del lugar con la posición aparente del Sol. Su valor varía entre 0 y 90°. La altura solar determina la inclinación óptima de los paneles.
- **Ángulo azimutal ( $\gamma$ ):** es el valor angular con la desviación de la normal a la superficie desde el meridiano local, siendo el origen de ángulos el Sur ( $\gamma = 0^\circ$ ), tomando el Este y Oeste como positivo y negativo respectivamente. Es decir, el ángulo determinado por la proyección del vector solar  $\overrightarrow{PS}$  sobre el plano horizontal y la dirección Sur, Figura 7. Su valor varía entre el 0 y  $\pm 180^\circ$ . Así, se tienen valores positivos de ángulo acimutal antes del medido día solar y negativos tras el medio día solar. El ángulo azimutal es el que determina la orientación que deberán tener los paneles.

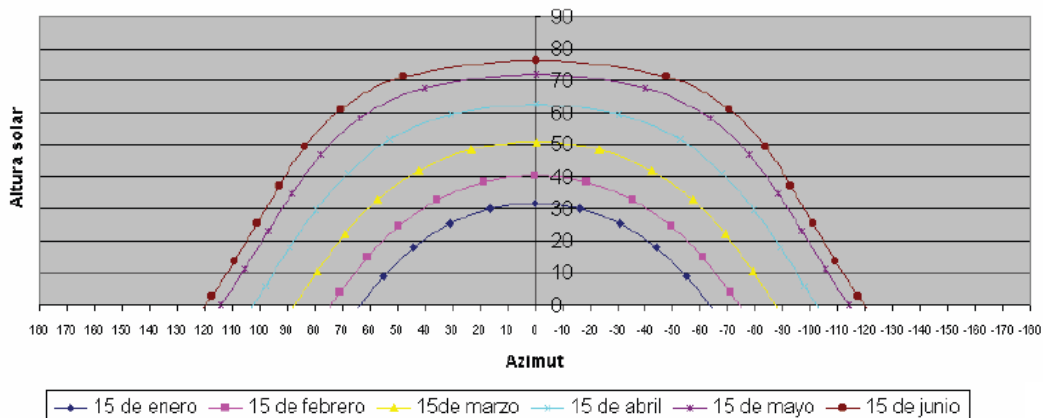


**Figura 7.** *Representación de la altura solar ( $\alpha$ ) y el azimut ( $\gamma$ )*

A lo largo del día, debido a la rotación de la Tierra, el Sol recorre en su movimiento aparente un paralelo celeste con un diámetro variable cada día. Este diámetro se hace máximo en los equinoccios y mínimo en los solsticios. Los lugares geométricos donde se produce la intersección de la órbita aparente del Sol con el plano del horizonte determinan el amanecer y el ocaso.

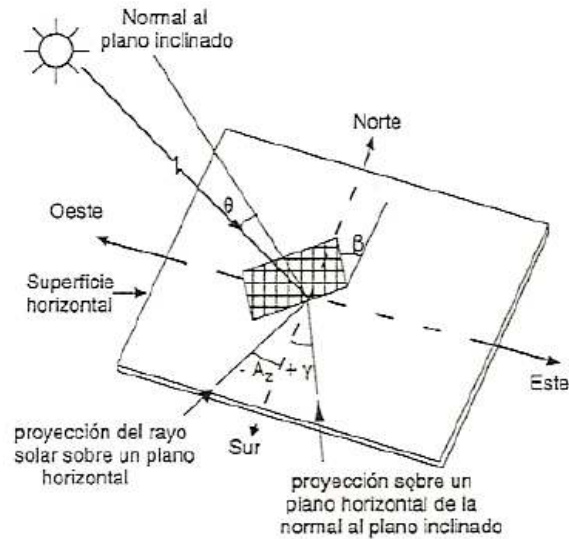


**Figura 8.** Variación del arco diurno en distintas épocas del año



**Figura 9.** Diagrama de trayectoria solar en Córdoba

Es conocido que el receptor solar suele tener una **inclinación**  $\beta$  respecto del horizonte y una orientación determinada, Figura 10. La orientación viene dada por el **ángulo zimutal**  $\gamma$ , o desviación de la normal a la superficie desde el meridiano local, siendo el origen de ángulos el Sur ( $\gamma = 0^\circ$ ), tomando el Este como positivo y Oeste negativo. En sistemas captadores con una inclinación fija, el mayor aprovechamiento es con orientación Sur ( $\gamma=0^\circ$ ). El **ángulo de incidencia solar**,  $i$ , para la superficie arbitrariamente orientada, será el ángulo formado por la normal a la superficie y el vector Tierra-Sol.



**Figura 10.** Posición del Sol respecto a una superficie inclinada  $\beta$  y arbitrariamente orientada

Para una superficie orientada arbitrariamente  $\gamma$  respecto al meridiano local, el ángulo de salida del Sol sobre la superficie,  $\omega_{sr}$ , y el de puesta,  $\omega_{ss}$ , se calculan por las siguientes ecuaciones:

I.  $\gamma > 0$ , superficie orientada hacia el Este:

$$\omega_{sr} = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \left( \frac{-xy - y\sqrt{(x^2 - y^2 + 1)}}{x^2 + 1} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\omega_{ss} = -\min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \left( \frac{-xy + y\sqrt{(x^2 - y^2 + 1)}}{x^2 + 1} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 2})$$

II.  $\gamma < 0$ , superficie orientada hacia el Oeste:

$$\omega_{sr} = \min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \left( \frac{-xy + y\sqrt{(x^2 - y^2 + 1)}}{x^2 + 1} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\omega_{ss} = -\min \left[ \omega_s, \cos^{-1} \left( \frac{-xy - y\sqrt{(x^2 - y^2 + 1)}}{x^2 + 1} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde  $x$  e  $y$  son variables de valores:

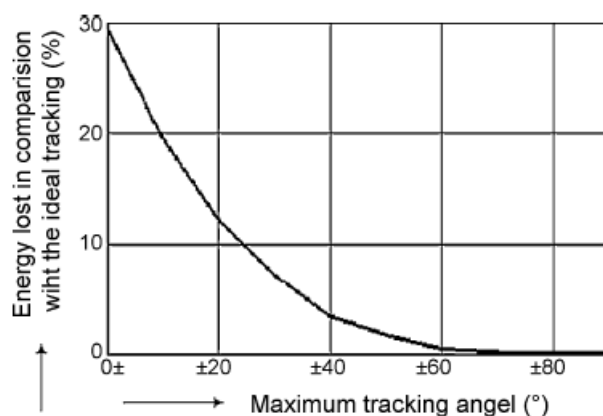
$$x = \frac{\cos\theta}{\text{sen}\gamma \tan\beta} + \frac{\text{sen}\theta}{\tan\gamma} \quad (\text{Ecuación 5})$$



$$y = \tan \delta \left( \frac{\sin \theta}{\sin \gamma \tan \beta} - \frac{\cos \theta}{\tan \gamma} \right) \quad (\text{Ecuación 6})$$

### 3.2 Seguidores solares

La eficiencia de una instalación fotovoltaica puede incrementarse significativamente usando seguidores solares. Una instalación con seguidores puede proporcionar aproximadamente un 33% más de energía que una instalación de paneles fijos [3].



**Figura 11.** Energía perdida en función del ángulo máximo de seguimiento respecto al ideal

En la bibliografía existen numerosas referencias respecto a la conveniencia de realizar seguimiento solar. Thomson analizó el rendimiento de un colector solar el cual modificaba su orientación solo dos veces al día a un determinado ángulo azimutal predefinido respecto a otro que permanecía estático. Los resultados obtenidos, tanto simulados como experimentales, mostraron que esos dos movimientos diarios, suponen un aumento del rendimiento energético del 10 al 20% en un año en comparación con un colector de orientación sur fijo e inclinado en un ángulo óptimo [4].

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:

- Estáticos: son aquellas instalaciones fotovoltaicas en las que los módulos se mantienen en la misma posición a lo largo del año, sin modificar la de sus ejes polar y acimutal. Los módulos de estas instalaciones se suele orientar dirección Sur en el hemisferio Norte y con una cierta inclinación que optimiza la captación de radiación. Por ejemplo, en la provincia de Córdoba se le suele dar una inclinación en torno a 30°. Aunque no se utilizan en los llamados huertos solares por cuestiones de eficiencia, los módulos estáticos son muy comunes en instalaciones aisladas del ámbito rural.
- Seguimiento solar 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. El primer seguidor de este tipo fue introducido en 1962 por Finster y era totalmente mecánico. Un año más tarde, Saavedra presenta un mecanismo pero ya con control electrónico automático [5]. En la actualidad existen numerosos seguidores comerciales de este tipo.

En cuanto a los tipos de seguidores en función del sistema de control del seguimiento, se tienen los siguientes:

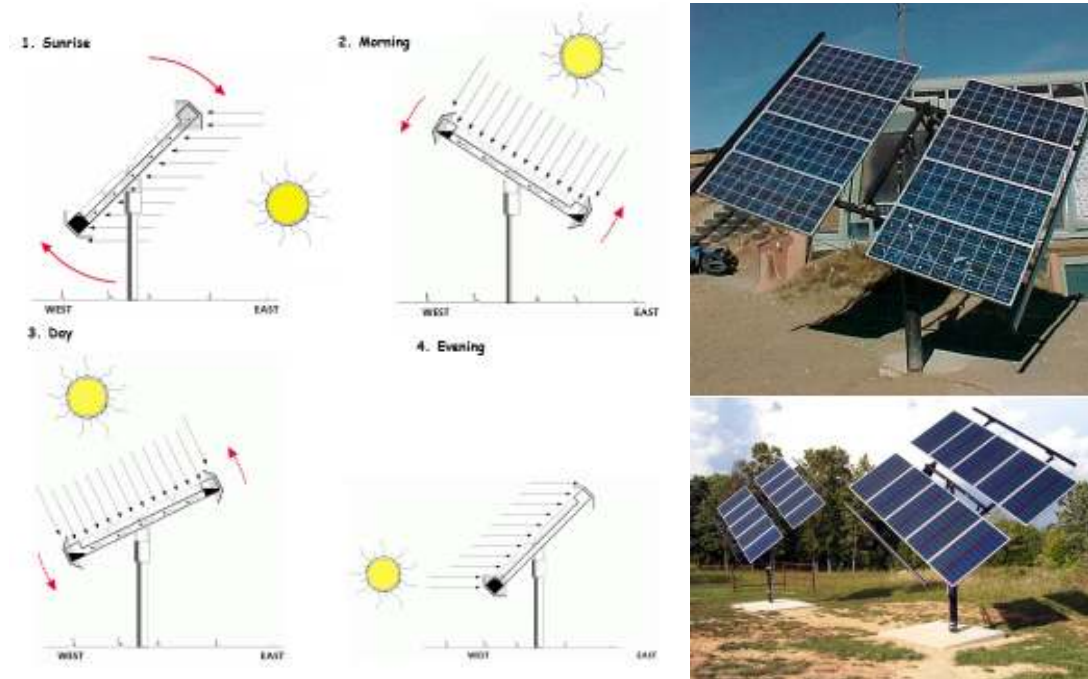
- Pasivos: Se puede decir que son totalmente mecánicos.
- Activos: Su control es de tipo electrónico.

#### 3.2.1.1 Seguidores pasivos

Los sistemas pasivos son aquellos capaces de seguir la órbita solar sin necesidad de control electrónico o motor. Existen dos tipos: los que se basan en la expansión térmica de un fluido o los que tienen un actuador con memoria de forma.

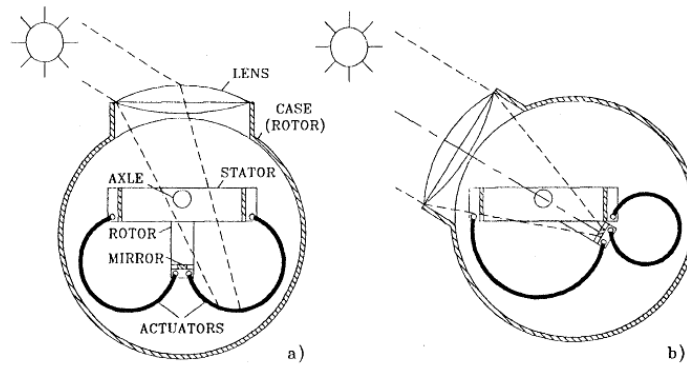
Los seguidores que utilizan la expansión térmica de un fluido para conseguir el movimiento, consisten en una tubería a modo de marco interconectada sobre la que se sitúa el o los módulos. En el interior de la tubería se aloja un fluido, suele ser Freón. Cuando el panel está desalineado, el sol calienta 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, como en el sistema de Zomeworks Corporation, Figura 12.

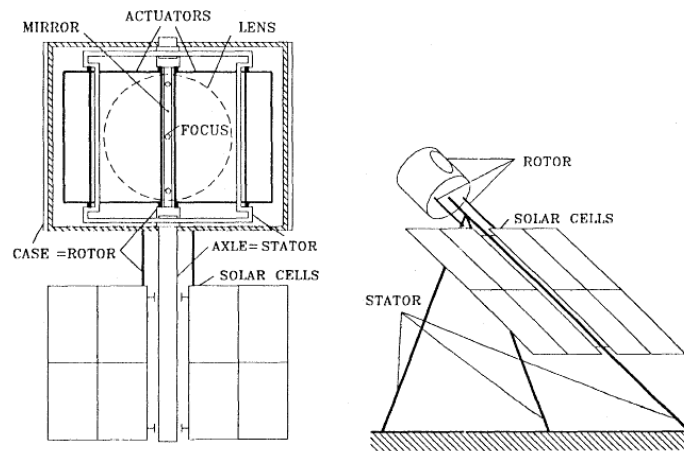


**Figura 12.** Sistema de seguidor con Freón de Zomeworks Corporation

El otro caso de seguidor pasivo son los que se conocen como seguidores con actuadores con memoria de forma. Uno de los más conocidos es el seguidor a un eje diseñado por Poulek. Se trata de un seguidor con dos actuadores metálicos, dos cables metálicos, fácilmente deformables a temperaturas relativamente bajas (menos de 70°C) siendo capaces de recobrar su forma original cuando se calienta por encima de la temperatura de transformación. Ambos actuadores están unidos a su vez 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 tanto un trabajo mecánico que permite la orientación de los paneles [6].



**Figura 13.** Seguidor solar de Poulek antes a) y después b) de la orientación por la mañana



**Figura 14.** Planos de detalle del seguidor solar de Poulek

Frente a los seguidores activos, los pasivos son menos complejos y necesitan menos mantenimiento, sin embargo, pueden llegar a dejar de trabajar en condiciones de baja temperatura.

### 3.2.1.2 Seguidores Activos

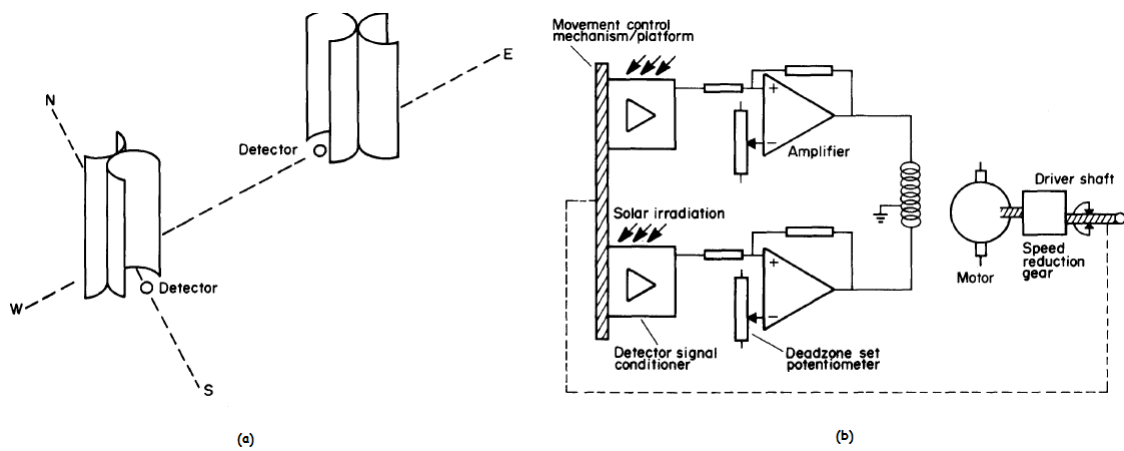
Los seguidores activos pueden clasificarse en función del sistema electrónico de control de los mismos. Así, se tienen seguidores controlados mediante un microprocesador y una unidad electro-óptica, por células solares bifaciales auxiliares, por un ordenador en función de la hora y la fecha, y una combinación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

#### **A. Basados en un microprocesador y sensores electro-ópticos**

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.

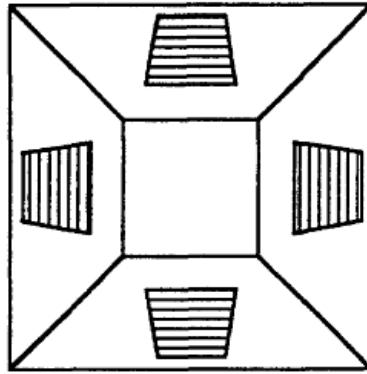
Requieren una instalación muy precisa y están destinados principalmente para centrales en las que se genera electricidad por concentración.

A continuación, se exponen algunos de los muchos seguidores propuestos de este tipo. Rumala diseñó un sistema automático de seguimiento que usa cuatro semicilindros unidos de dos en dos en la disposición que se muestra en la Figura 15 a) y en el interior de cada uno se sitúa una fotorresistencia. Estas cuatro fotorresistencias forman parte del circuito electrónico de control, Figura 15 b). Así, a través de un juego de sombras, los sensores colocados en el interior de los cilindros dispuestos en la dirección E-W determinarán la inclinación y los dispuestos en dirección S-N definirán la orientación [7].



**Figura 15.** Posicionamiento de los semicilindros y fotorresistencias (a) y esquema del sistema de control de un eje (b).

W. Lynch propuso un seguidor solar con dos sensores electro-ópticos y un circuito de control electrónico de bajo coste. Uno de los sensores está formado por una pirámide con cuatro células, una sobre cada cara, montado en un seguidor plano, Figura 16. El segundo sensor es un sensor de irradiancia el cual es fijado con orientación hacia el sur. El primer sensor se utiliza para determinar la orientación hacia donde la intensidad de luz es máxima y el segundo sensor se resuelve los problemas de posicionamiento inicial y luz difusa que pueden provocar deambulación del seguidor en días nublados [8].

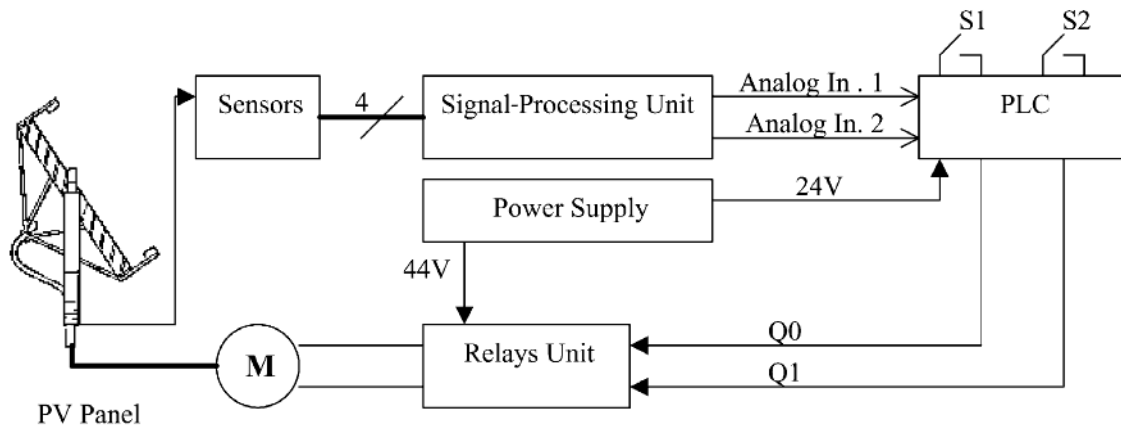


**Figura 16.** *Sensor piramidal propuesto por Lynch*

Hamilton ideó un sistema de seguimiento basado en un microcontrolador que utiliza dos motores para inclinar los paneles en los dos planos de movimiento. Definió un algoritmo que lee y amplifica los valores de los sensores, a continuación, compara los datos digitalmente y determina la posición exacta del sol y con ello activa los motores. El sensor es una pirámide de base cuadrada con células solares montadas en cada lado, similar al diseñado por Lynch. El microcontrolador está programado en lenguaje C [9].

Abdallah diseñó un sistema de seguimiento solar a dos ejes, en lazo abierto, con control lógico programable (PLC). Su funcionamiento se basa en la definición matemática de la posición de los paneles definida por dos ángulos: la inclinación del panel y su azimut. Para conseguir estos ángulos se utilizan dos motores y se prescinde del uso de sensores ópticos. Predijeron que el consumo de energía de esos dos motores y el sistema de control difícilmente excedía el 3% de la energía ahorrada por el uso del seguidor [10].

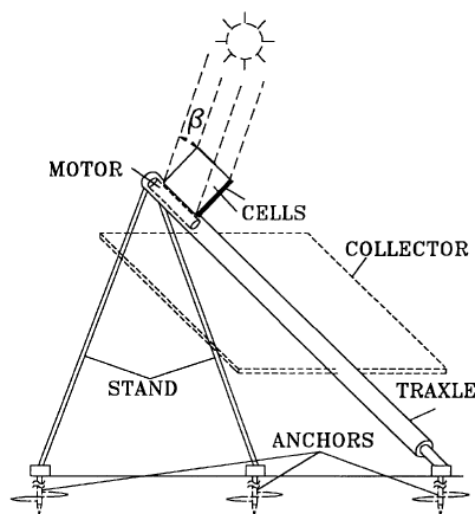
Al-Mohamad, con el propósito de mejorar de potencia diaria de un módulo fotovoltaico, propuso un sistema de seguimiento a un eje mediante PLC. Consiste en dos sensores fotoresistentes separados por una barrera que proporciona sombra a cada uno. Al aumentar la intensidad de radiación, la resistividad 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 [11].



**Figura 17.** Diagrama de bloques del diseño propuesto por Al-Mohamad

### **B. Basado en células solares bifaciales auxiliares**

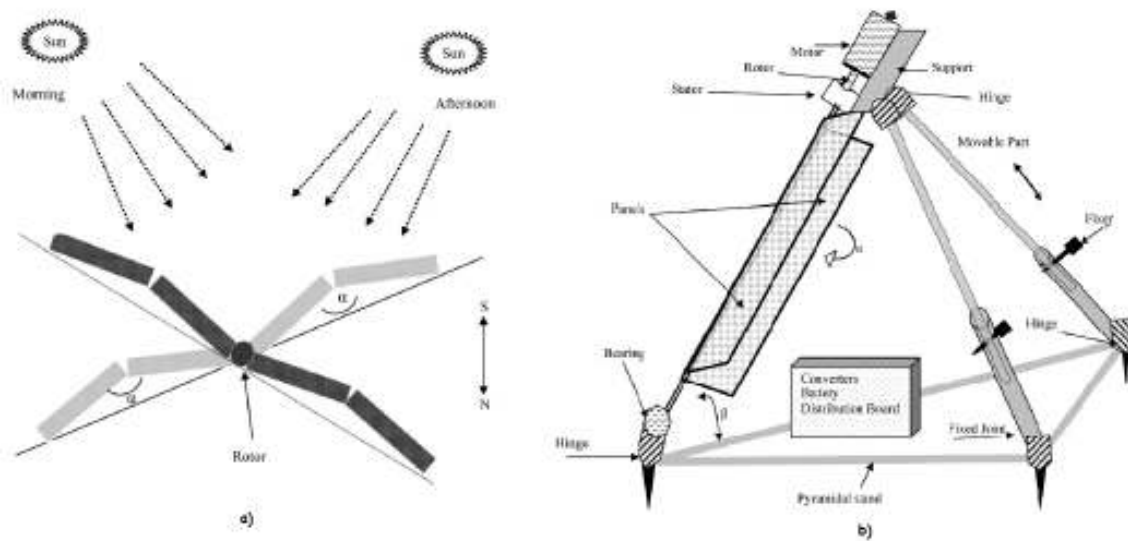
El primer seguidor solar controlado por células solares bifaciales auxiliares fue el propuesto por Poulek y Libra. Las mencionadas células solares bifaciales auxiliares están conectadas directamente a un motor de corriente continua que proporciona el movimiento. Su funcionamiento tiene serios problemas en los días nublados [12].



**Figura 18.** Seguidor solar propuesto por Poulek y Libra, 1998

Korimov et al. construyeron un seguidor fotovoltaico a un solo eje con cuatro módulos solares instalados en un rotor. El otro eje es ajustable manualmente con el fin de fijar el ángulo de inclinación de los módulos. Los módulos se dividieron en dos pares, siendo el ángulo entre los pares de módulos de  $170^\circ$  (Figura 19). Los paneles fotovoltaicos son conectados a un circuito puente similar al puente de Wheatstone. Si el voltaje de salida de los módulos no es el

mismo, el voltaje aplicado al motor de corriente continua es distinto a cero y como resultado, el motor comienza a girar [13].



**Figura 19.** Posiciones del seguidor a lo largo del día a) y detalle de diseño b)

### C. Astronómicos

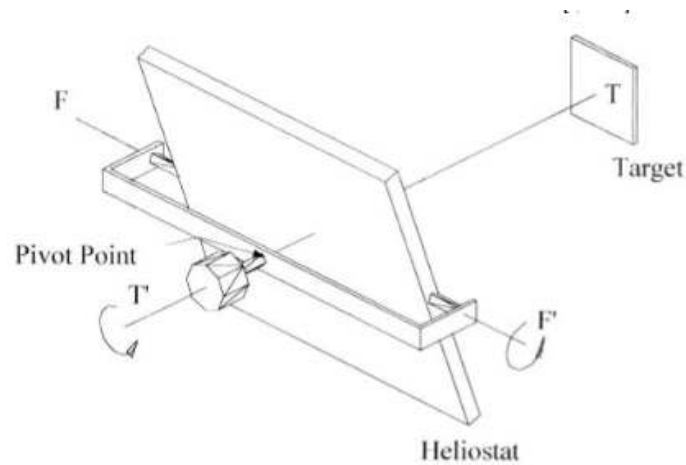
Este grupo sería el formado por aquellos seguidores **controlados a través de la posición solar** que es una función de fecha y hora. En estos, un ordenador calcula la posición del Sol a partir de algoritmos a partir de la hora, fecha y coordenadas geográficas para enviar señales a un motor o motores eléctricos. No obstante, en muchas ocasiones se hace uso de sensores para definir una posición específica.

Canada et al. propusieron un seguidor solar de este tipo con un error de posición máximo de  $2^\circ$  y que permitía hasta una semana de trabajo sin necesidad de supervisión. El movimiento del sistema es comandado por un motor paso a paso con un reductor de velocidad. El sistema tenía dos grados de libertad, uno que permitía la orientación y otro la inclinación de los paneles. Dos sensores on/off indican la posición inicial para cada uno de los grados de libertad. Todos los códigos fueron escritos en C++ bajo el entorno Windows para: proveer el movimiento relativo al sol, controlar el motor, ajustar y volver a la posición inicial, alarma y activador de sensores [14].

Aliman et al. desarrollaron un seguidor a dos ejes para generar electricidad por concentración. Su sistema consistía en un espejo principal rodeado de varios espejos esclavos. El espejo principal refleja los rayos del Sol en un blanco estacionario que actúa como referencia para los espejos esclavos. El seguidor tiene dos ejes de perpendiculares entre sí. Uno de ellos es el eje de rotación que apunta hacia el objetivo y el otro es el eje de elevación que se sitúa



paralelo al reflector. A medida que el Sol se mueve desde su salida hasta el mediodía solar, el plano del espejo empieza a rotar. Para determinar el movimiento angular que debía tener el espejo obtuvieron una fórmula basada en el tiempo y la fecha [15].



**Figura 20.** Montaje del seguidor solar propuesto por Aliman

Blanco et al. compararon las diferencias entre los algoritmos propuestos para la determinación de la posición del Sol y desarrollaron uno nuevo. Evaluaron un sistema en lazo abierto controlado por un microprocesador y encontraron un algoritmo de control más preciso y simple que los utilizados hasta el momento para calcular la dirección del vector solar en función de la ubicación geográfica y el tiempo. El algoritmo permite determinar el vector solar con una precisión de 0,5 minutos de arco para el periodo de 1999 a 2015 [16].

#### **D. Basados en la combinación de sensor y astronómico**

Al igual que en los otros casos, en la literatura se pueden encontrar numerosos sistemas de seguimiento que utilizan sensores y la determinación de la fecha y hora de manera conjunta para definir la posición del seguidor o seguidores. Así, Roth et al. diseñaron y construyeron un seguidor a dos ejes. Usaron un pirheliómetro como instrumento para seguir el sol, potenciómetros y finales de carrera junto a cada eje para enviar la señal a la CPU del movimiento de los ejes, un microprocesador PIC-16F877 como parte principal conectada a un ordenador y dos sensores. Uno de los sensores da información de la posición del sol y el otro indica la intensidad de radiación, señalando el comienzo y final del día. Analiza los datos generados durante el día y establece una serie de parámetros para la detección de errores que son usados en el siguiente día para calcular una posición más precisa del sol [17].

Rubio et al. discutieron el diseño e implementación de un seguidor a dos ejes combinando la estrategia de un seguimiento en lazo abierto con microprocesador basado en un modelo de movimiento solar y una en lazo cerrado donde el control es electro-óptico. La

potencia instantánea generada es medida por un sensor que emite una señal proporcional a esa potencia. Así, implementaron una técnica de control proporcional e integral para cada coordenada de manera independiente [18].

Bakos ideó un sistema de seguimiento a dos ejes basado en la combinación de foto-resistencias convencionales y métodos de control programados. El dispositivo electromecánico consiste en cuatro relés, dos circuitos electrónicos, dos foto-resistores conectados en serie con dos motores de corriente alterna. El código que permite el control del seguidor está escrito en lenguaje Visual C++ [19].

Hession et al. implementaron un seguidor electromecánico a un eje mediante foto-transistores para controlar la posición de un colector solar. La diferencia de señal de los foto-resistores es convertida a voltaje y amplificada para activar o no un motor de corriente continua [20].

#### 4 METODOLOGÍA

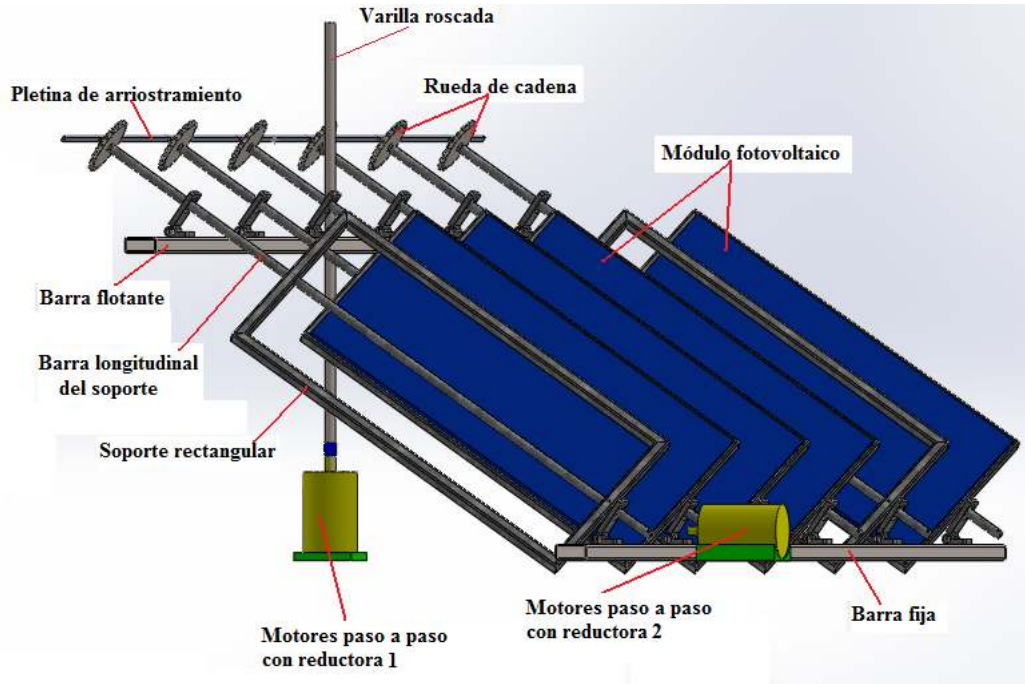
En este apartado se describe el proceso seguido en el diseño del seguidor, el software utilizado, su funcionamiento y las distintas partes que lo componen.

El seguidor se ha diseñado a modo de ventana veneciana, donde cada colector es una lama. De esta manera se reducen notablemente las cargas de viento, pues su efecto vela es menor que si se colocase un seguidor a dos ejes de superficie sobre cubierta. Presenta una motorización sencilla, dos motores paso a paso con reductora, uno para cada eje, regulados con controlador. Además, se ha diseñado de tal forma que sea modular, es decir se pueda asociar a otro seguidor igual modificando tan sólo la longitud de la cadena de transmisión.

En la Figura 21 se pueden ver los principales componentes del seguidor. Dos barras de sección rectangular, una de ellas fija a la cubierta y la otra flotante. Sobre estas barras, mediante tornillos, se fijan unas bisagras que servirán de apoyo para la estructura soporte de los colectores. Cada una de las hojas móviles de las bisagras aloja, en un taladro realizado al efecto, una barra longitudinal que a su vez atraviesa un soporte rectangular sobre el que se sitúan los módulos.

El movimiento se consigue gracias a dos motores paso a paso con reductora. El motorreductor 1 se encarga del movimiento ascendente y descendente del colector por medio de una varilla roscada unida a su eje. La varilla roscada gira en ambos sentidos en el interior de una tuerca de una pieza diseñada a tal efecto, pieza que está atornillada a la barra flotante. Así, cuando la varilla gira en sentido horario la barra flotante asciende y cuando gira en el sentido

contrario a las agujas del reloj la barra flotante desciende. El motorreductor 2 proporciona el movimiento de giro a los colectores a través de una doble junta cardan telescópica. Este motorreductor 2 se unirá a uno de los dos colectores que están en los extremos y el movimiento solidario de todos ellos se consigue por medio de una cadena de rodillos que engrana una rueda de cadena soldada al extremo de la barra longitudinal.



**Figura 21.** Componentes principales del seguidor

En las Figuras 22 y 23 se pueden desde distintas perspectivas las diferentes posiciones que el seguidor puede adoptar.



**Figura 22.** Posiciones de los módulos desde una perspectiva isométrica



**Figura 23.** *Posiciones de los módulos desde una perspectiva de perfil*

#### **4.1 Solidworks**

El software de diseño mecánico usado en la realización del seguidor solar ha sido Solidworks desarrollado por SolidWorks Corp., subsidiaria de Dassault Systèmes.

Las principales características que hace de SolidWorks una herramienta versátil y precisa es su capacidad de ser asociativo, variacional y paramétrico de forma bidireccional con todas sus aplicaciones. Además utiliza el Gestor de diseño (FeatureManager) que facilita enormemente la modificación rápida de operaciones tridimensionales y de croquis de operación, sin tener que rehacer los diseños ya plasmados en el resto de sus documentos asociados.

Junto con las herramientas de diseño de Pieza, Ensamblajes y Dibujo, SolidWorks incluye Herramientas de Productividad, de Gestión de Proyectos, de Presentación y de Análisis y Simulación que lo hacen uno de los estándares de diseño mecánico más competitivo del mercado.

Se trata de un programa con una amplia implantación en diferentes sectores industriales que posibilita al usuario modelar piezas, realizar ensamblajes o llevar a cabo simulaciones entre otras muchas cosas. Permite diseñar sólidos y conjuntos mecánicos de elevado grado de complejidad, además de realizar planos con vistas y acotaciones asociadas al modelo.

#### **4.2 Módulo fotovoltaico**

El módulo fotovoltaico elegido ha sido el A-150P de la marca ATERSA. Se trata de un módulo de silicio policristalino cuyas características técnicas más representativas son las que se muestran en la Tabla 1:

Características eléctricas (STC: 1KW/m <sup>2</sup> , 25°C±2°C)		Características físicas	
Potencia nominal	150 W	Peso	11,9 kg
Eficiencia	15,42%	Dimensiones (mm±2mm)	1476x659x35
Corriente Punto de Máxima Potencia (I <sub>MP</sub> )	8,41 A	Tipo de célula	Policristalina
Tensión Punto de Máxima Potencia (V <sub>MP</sub> )	17,84 V	Rango de temperatura	-40 °C a +85 °C
Corriente en Cortocircuito (I <sub>SC</sub> )	8,69 A	Carga Máxima Viento	130 km/h
Tensión de Circuito Abierto (V <sub>OC</sub> )	22,6 V	Carga Máxima Nieve	551 kg/m <sup>2</sup>

Tabla 1. Características eléctricas y físicas del módulo A-150P de ATERSA

En la Figura 24 se muestran las curvas modelo del módulo elegido muy útiles a la hora de dimensionar la instalación.

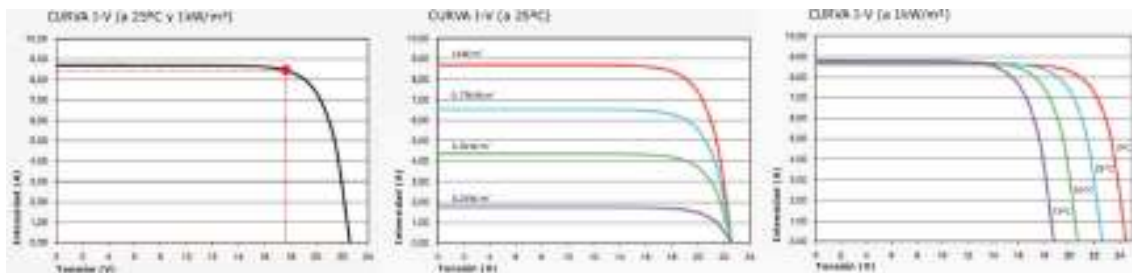


Figura 24. Curvas características del módulo A-150P

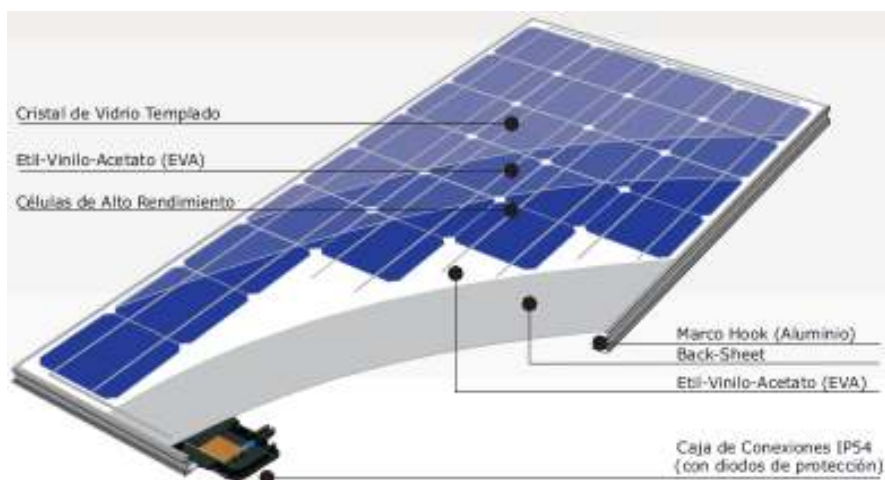


Figura 25. Vista genérica constructiva del panel. Catálogo ATERSA

Este módulo incluye diversos sistemas de fijación que permiten su instalación sobre cualquier tipo de soporte.

### 4.3 Estructura soporte

Uno de los elementos más importantes en una instalación fotovoltaica, para asegurar un óptimo aprovechamiento de la radiación solar es la estructura soporte, encargada de sustentar los módulos solares, proporcionándole la inclinación más adecuada para que los módulos reciban la mayor cantidad de radiación a lo largo del año.

La estructura debe ser diseñada tanto para soportar las diferentes acciones a la que será sometida, sobre todo la acción del viento, como a la oxidación y corrosión provocadas por la humedad ambiental. Por estos motivos, los materiales que se emplean en la fabricación la estructura son perfiles huecos de acero galvanizado en caliente (normas UNE 37-501 y UNE 37-508), que cumple con los espesores mínimos exigibles según la norma UNE EN ISO 1461. La Tabla 2 muestra los valores de algunas propiedades del acero inoxidable.

<b>Características del acero galvanizado</b>	
Módulo elástico	200000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.29 N/D
Densidad	7870 kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	356.9 N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	203.94 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 2.** Características del acero galvanizado

La designación de los tipos de aceros galvanizados obtenidos por conformación en frío de acuerdo a la norma EN 10326 (antes UNE EN 10147) es la siguiente:

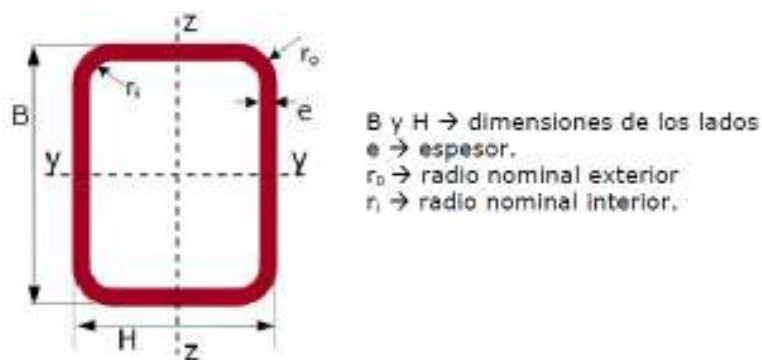
<b>UNE EN 10027-1 y CR 10260</b>	<b>UNE EN 10027-2</b>
S250GD+Z	1.0242
S280GD+Z	1.0244
S320GD+Z	1.0250
S350GD+Z	1.0529
S220GD+Z	1.0241

**Tabla 3.** Designación de los tipos de aceros galvanizados

Los recubrimientos galvanizados cuentan con la característica casi única de estar unidos metalúrgicamente al acero base, por lo que poseen una excelente adherencia. Por otra parte, al estar constituidos por varias capas de aleaciones zinc-hierro, más duras incluso que el acero, y por una capa externa de zinc más blanda, forman un sistema muy resistente a los golpes y a la abrasión. Además, son soldables.

Se han elegido perfiles huecos, pues su peso es más reducido y al estar la estructura soporte sobre una cubierta, prima su ligereza. Además, poseen una gran rigidez a torsión por lo que no requieren una comprobación específica de los fenómenos de inestabilidad, como pandeo por flexión, pandeo por torsión y efectos o inestabilidades de carácter local.

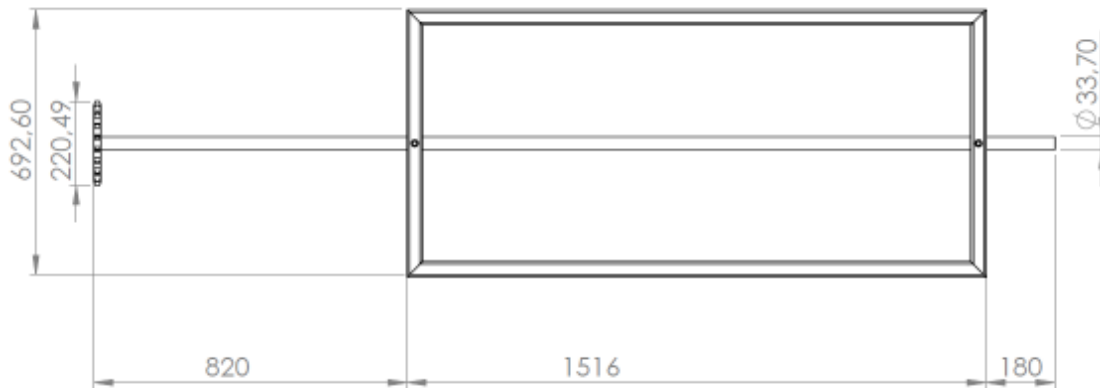
En la estructura soporte se distinguen dos elementos claramente. Un elemento sería el formado por dos barras de acero galvanizado, consistentes cada una en un perfil de sección rectangular, sobre la que recaen los elementos que forman el perfil. Una de las barras permanece fija sobre la cubierta y la otra es móvil o flotante, dispuesta con caras paralelas a la primera, que permite la orientación del módulo en función de la altura solar. Ambas barras tienen 6 m de longitud y de dimensiones de sección 120 x 60 x 5 mm. Se han elegido 6 m de longitud por ser una longitud comercial, fácil de manejar a la hora de su instalación y suficiente para instalar varios módulos. La colocación de estas barras se hará de tal forma que el lado más ancho de su sección quede paralelo al plano imaginario que contendría la cubierta sobre la que se dispondría el seguidor.



**Figura 26.** Sección de perfil tubular rectangular

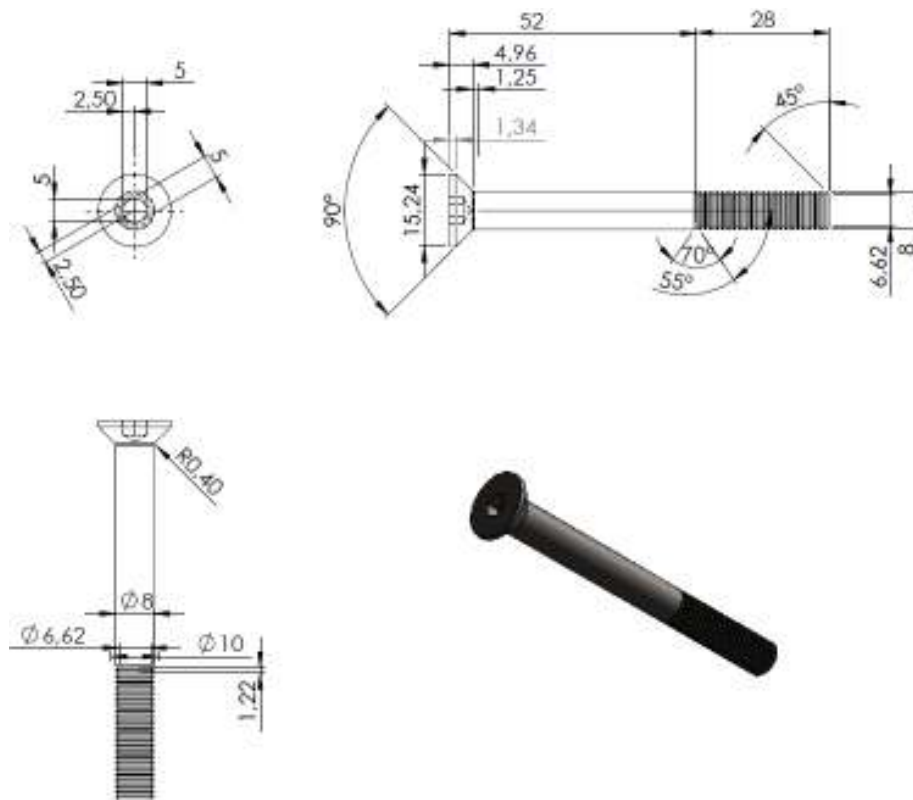
El otro elemento sería un soporte de forma rectangular, sobre el que recaería el módulo fotovoltaico, el cual es atravesado por el punto medio de sus lados más cortos por una barra longitudinal como se puede ver en la Figura 27. El grupo de perfiles con los que se fabrica la forma rectangular son tipo tubo de sección cuadrada de 60 x 40 x 3,2 mm. La barra longitudinal es un perfil tubular de sección circular de 33,7 x 4 mm (diámetro exterior x

espesor) que posibilita el giro del módulo en función del ángulo acimutal. Al final de la barra longitudinal se soldaría una rueda de cadena.



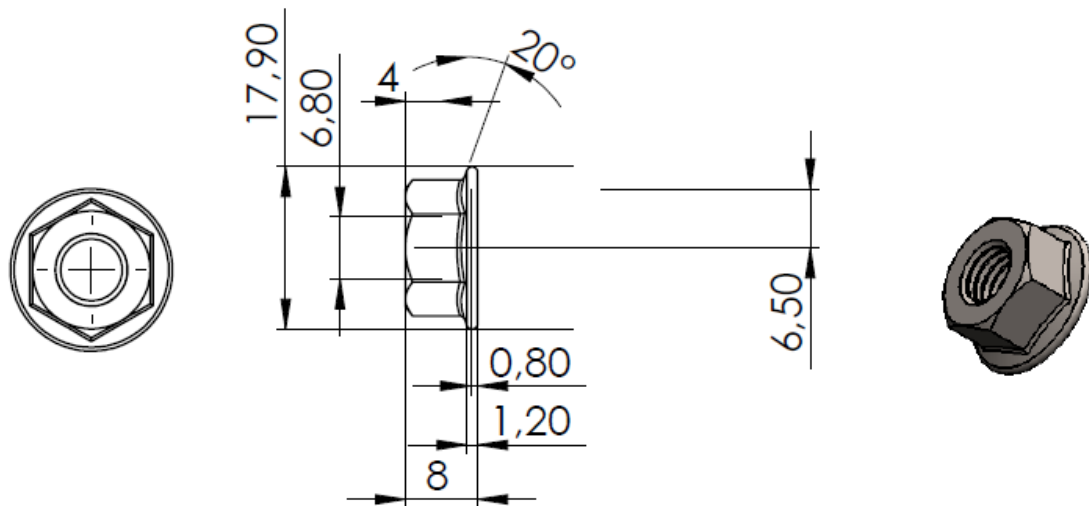
**Figura 27.** Dimensiones del soporte del módulo fotovoltaico

Para evitar el giro libre de la barra longitudinal sin arrastrar el soporte rectangular se consigue la unión mediante tornillo pasante de cabeza avellanada hexagonal y tuerca, con su correspondiente arandela. El agujero del taladro sería por tanto de tipo avellanado. La tuerca es de tipo hexagonal abridada de calidad A, Figura 28. Tanto tornillo, tuerca como arandela cumplen con las normas ISO 10642, ISO 4161 e ISO 7089 respectivamente.

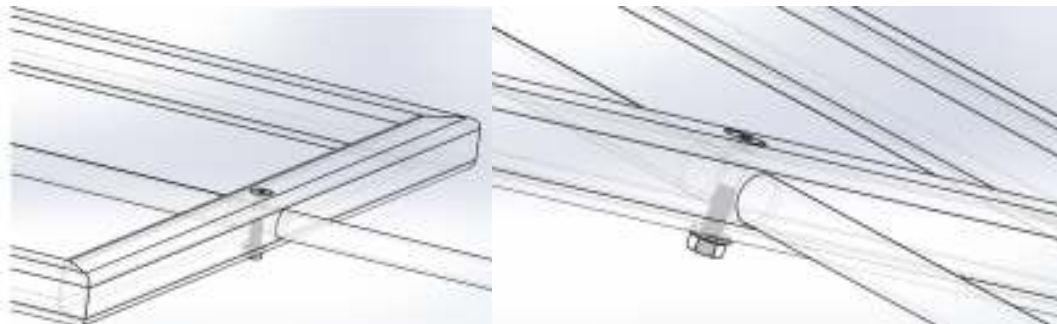


**Figura 28.** Detalle del tornillo de cabeza avellanada hexagonal





**Figura 29.** *Detalle de tuerca hexagonal abridada de calidad A*

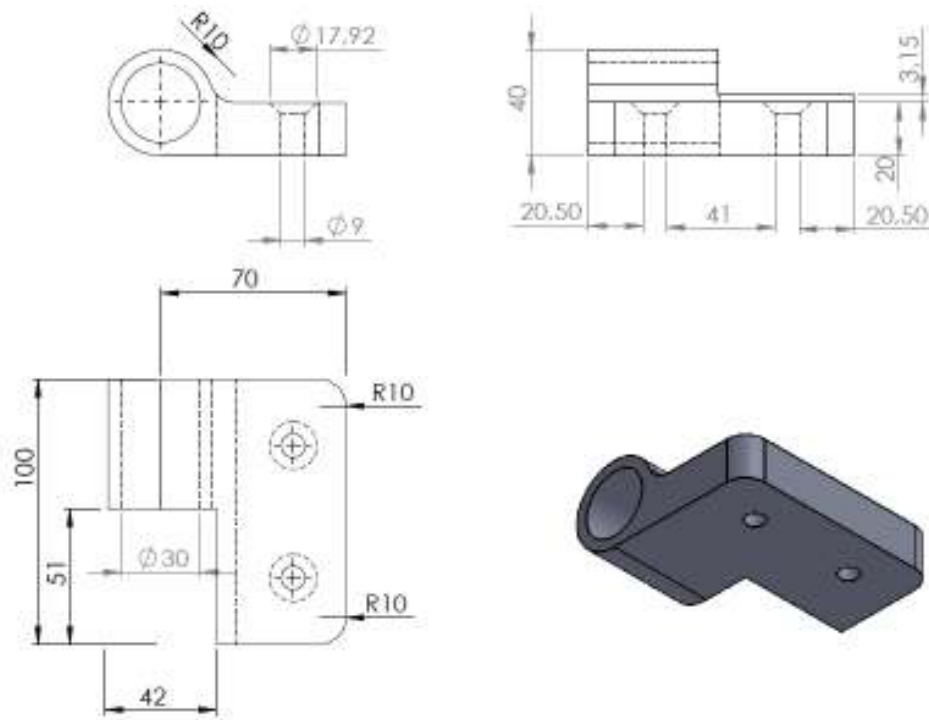


**Figura 30.** *Detalle de la unión mediante tornillo-tuerca*

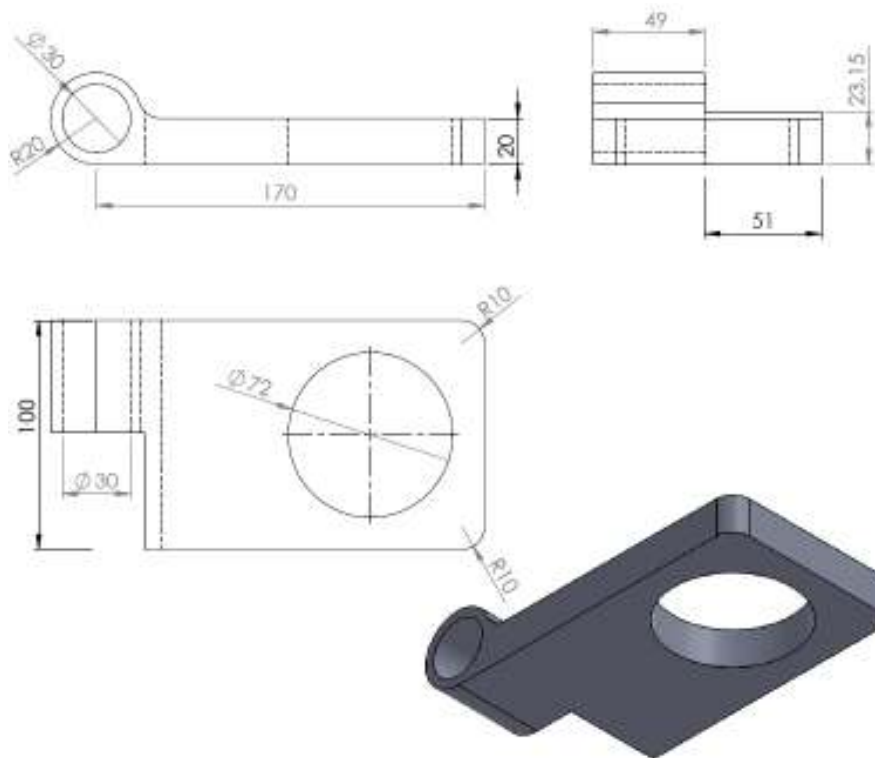
#### 4.4 Bisagras

Para articular los dos movimientos que realizará cada uno de los paneles ha sido preciso el diseño específico de bisagras a partir de pletinas de acero galvanizado de 20 mm de espesor de la siguiente manera. Una de las hojas, la hoja fija, estará unida a la cara superior de una de las barras de acero galvanizado de 6 m de longitud mediante dos tornillos pasantes de cabeza avellanada hexagonal y tuerca, con su correspondiente arandela.

La otra hoja, la hoja móvil, queda articulada a la primera mediante un pasador. Sobre su cara se realiza un taladro con el propósito de alojar en su interior un rodamiento. El diámetro del taladro dependerá del diámetro exterior del rodamiento que es de 48 mm. En las Figura 31 y 32. se pueden ver sus características.

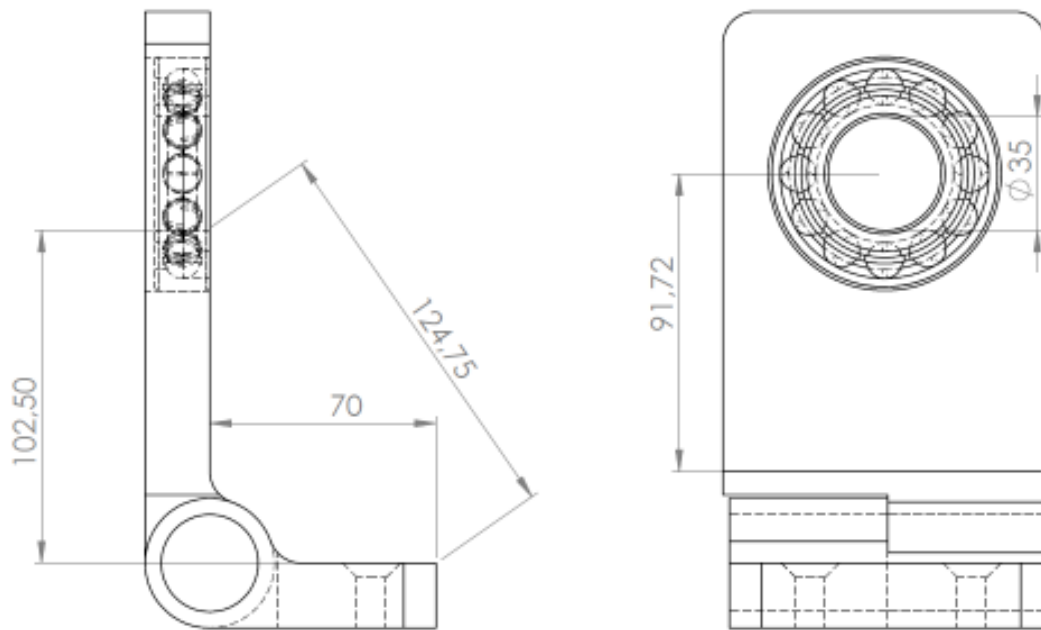


**Figura 31.** Croquis de detalle de la hoja de la bisagra que se fija a la barra de 6 m



**Figura 32.** Croquis de detalle de la hoja de la bisagra que aloja el rodamiento

Se han diseñado con unas dimensiones tales que permitan cualquier ángulo de inclinación, Figura 33.



**Figura 33.** *Ensamblaje de la bisagra*

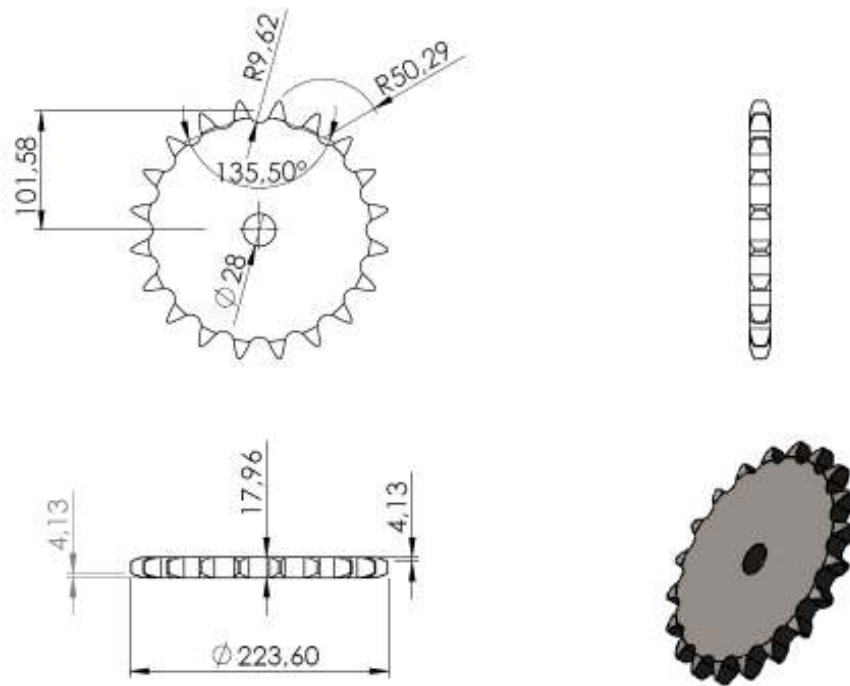
Las bisagras son realizadas a partir de chapa de acero inoxidable de 20 mm de espesor. En la Tabla 4 se pueden ver algunas de sus propiedades características:

<b>Características del acero galvanizado</b>	
Módulo elástico	192.300 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,27 N/D
Densidad	8.000 kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	580 N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	172 N/mm <sup>2</sup>

**Tabla 4.** *Características del acero galvanizado*

#### 4.5 Rueda de cadena

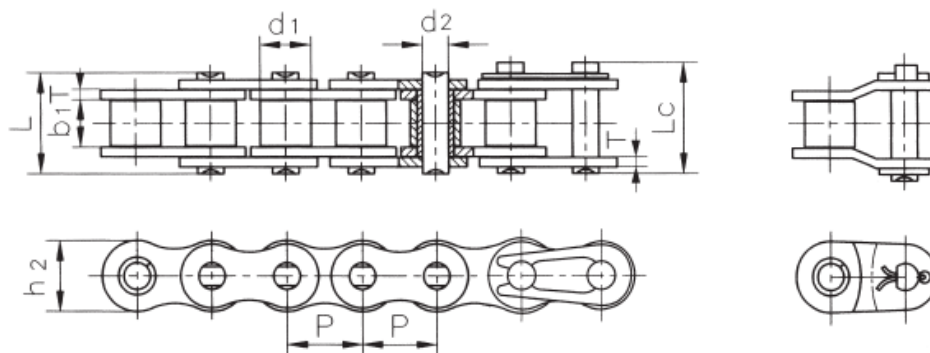
El elemento a usar para transmitir el movimiento del que podría llamarse seguidor motriz al resto de seguidores, que serían los conducidos, es una rueda de cadena. Esta vendría ya soldada al final de la barra longitudinal de la estructura soporte del panel fotovoltaico. La elegida es una rueda para cadena de rodillos de paso corto. Tiene 20 dientes, un diámetro de eje nominal de 28 mm y carece de ranura de chaveta, Figura 34.



**Figura 34.** Rueda para cadena de rodillos de paso corto

#### 4.6 Cadena

Los seguidores deben girar a la vez y el mismo ángulo. Para ello, se utilizará una cadena que posibilita la transmisión del movimiento del llamado seguidor motriz a los seguidores conducidos. La cadena elegida es de rodillos de doble paso corto simple, la cual permite la transmisión entre ejes prolongados de acuerdo a las dimensiones de la rueda de cadena elegida en el apartado anterior y según las especificaciones de la norma ISO 606. En concreto, se ha elegido una cadena del tipo 20A-1, Figura 35.



**Figura 35.** Cadena de rodillos 20A-1

Las dimensiones características de la cadena se pueden ver en la Tabla 5.

ISO N° cadena 20A-1		
Paso	P (mm)	31,75
Diámetro del rodillo	d1 max (mm)	19,05
Longitud entre las placas interiores	b1 min (mm)	18,90
Diámetro del pasador	d2 max (mm)	9,53
Longitud del pasador	L max (mm)	40,40
	L <sub>c</sub> max (mm)	44,70
Profundidad de la placa interior	h2 max (mm)	30,00
Resistencia máx. a la tracción	Q <sub>min</sub> (kN)	88,50
Resistencia media a la tracción	Q <sub>0</sub> (kN)	101,80
Peso por metro	Q (kg/m)	3,91

**Tabla 5.** Características de la cadena de transmisión 20A-1

#### 4.7 Pletina de arriostramiento

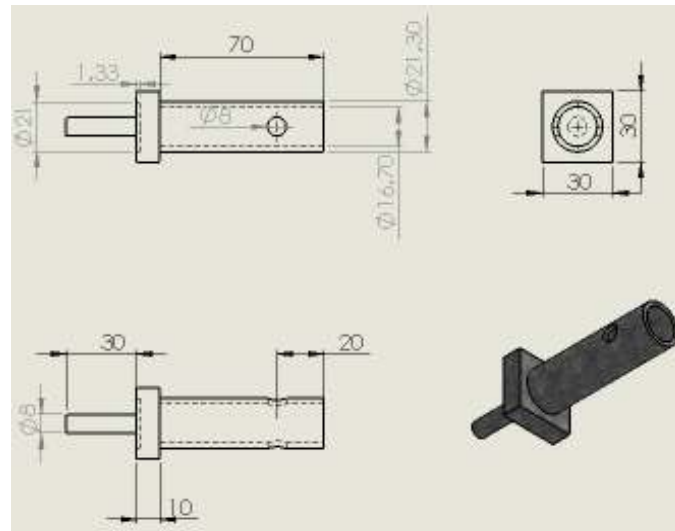
El conjunto de los seguidores deben tener un movimiento de ascenso y descenso longitudinal estable y solidario. Para conseguir esto se hace uso de una pletina de acero galvanizado de 20x10 mm y 6 m de longitud. A una distancia entre sí de 100 cm se realizan unos taladros de 12 mm de diámetro que alojarán unos rodamientos del tipo rodillos de agujas sin anillo interior, los cuales permitirán el giro de la estructura soporte de los módulos fotovoltaicos.

#### 4.8 Cabezal de giro

Ha sido necesario el diseño de una pieza específica que posibilite el giro de la estructura del seguidor y su movimiento de ascenso y descenso. Se trata de una pieza fabricada con acero galvanizado de las mismas características que el usado para la estructura soporte. En la pieza, Figura 36, se distinguen tres partes:

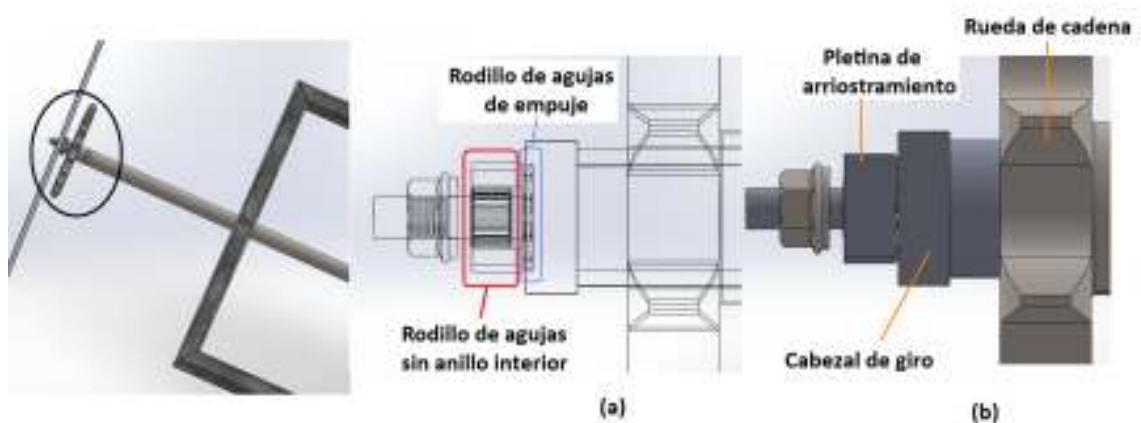
- Cilindro hueco que se alojará en el interior de la barra de la estructura de soporte, al que se le han practicado dos taladros para que quede fijado mediante tornillos pasantes de cabeza hexagonal

- Pletina de 30x30 y 10 mm de espesor soldada en un extremo del cilindro hueco. La pletina alojará un rodamiento tipo rodillo de agujas de empuje por lo que ha sido necesario extruir una sección circular de 1,33 mm de espesor y 21 mm de diámetro.
- Tornillo tipo M8 soldado al centro de la sección circular extruida en la pletina. En el extremo no soldado comienza el fileteado propio del tornillo hasta los 20 mm en longitud del mismo. Este se alojará en el interior del taladro realizado a tal efecto en la pletina de arriostamiento.



**Figura 36.** *Cabezal de giro*

Para mayor aclaración, en la Figura 37 se muestra un detalle del ensamblaje de la pieza.



**Figura 37.** *Vista de la estructura sin aristas ocultas (a) y sólida (b) del ensamblaje*

## 4.9 Rodamientos

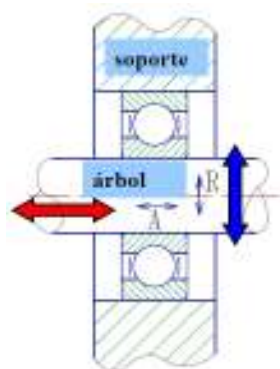
La rotación total o parcial de una pieza con respecto a otra implica rozamiento y ello se traduce en:

- Aumento del par de giro
- Producción de calor
- Aumento del desgaste
- Pérdida de rendimiento

La fuerza de rozamiento depende de la carga normal y el coeficiente de rozamiento y éste del tipo, deslizamiento o rodadura, la naturaleza de los materiales en contacto, lubricación, rugosidad superficial...

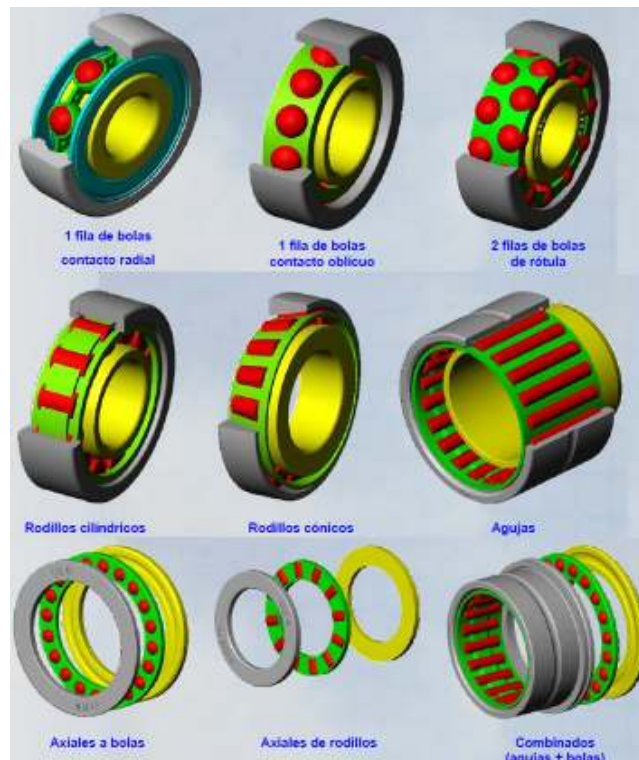
El rodamiento es un mecanismo, destinado a servir de apoyo entre un elemento giratorio y su soporte transformando el rozamiento por deslizamiento en deslizamiento por rodadura. De esta manera, permiten obtener una unión giratoria entre un árbol y un soporte (agujero), con poco rozamiento. Se pueden ver sometidos a esfuerzo axial "A" según el eje y/o radial "R", según el radio, Figura 38.

Los rodamientos pueden utilizarse para montaje directo sobre alojamientos realizados en las estructuras en cuestión o bien sobre soportes especiales que a su vez se acoplan a aquellas.



**Figura 38.** Tipos de esfuerzos a los que puede verse sometido un rodamiento

Los tipos de rodamientos más usados habitualmente y fáciles de encontrar en el mercado son los de la Figura 39:



**Figura 39.** *Tipos de rodamientos*

A la hora de realizar el montaje de los rodamientos se tienen que seguir las siguientes premisas:

- El anillo que gira con relación a la direcci3n de la carga debe de montarse con montaje apretado
- El anillo fijo en relaci3n a la direcci3n de la carga debe de montarse con un ajuste libre permitiendo un desplazamiento axial
- Cuando la direcci3n de la carga est1 indeterminada o es oscilante los dos anillos se montan con aprieto
- Un anillo apretado debe de apoyarse con referencia sobre un resalte y montarse con prensa
- Si hay riesgo de dilataci3n durante el funcionamiento, un solo rodamiento debe de asegurar el posicionamiento axial en los dos sentidos
- Todos los anillos no se inmovilizan axialmente.

A continuaci3n se describen los rodamientos que formar1n parte del seguidor solar.



#### 4.9.1 Rodamiento rígido de bolas

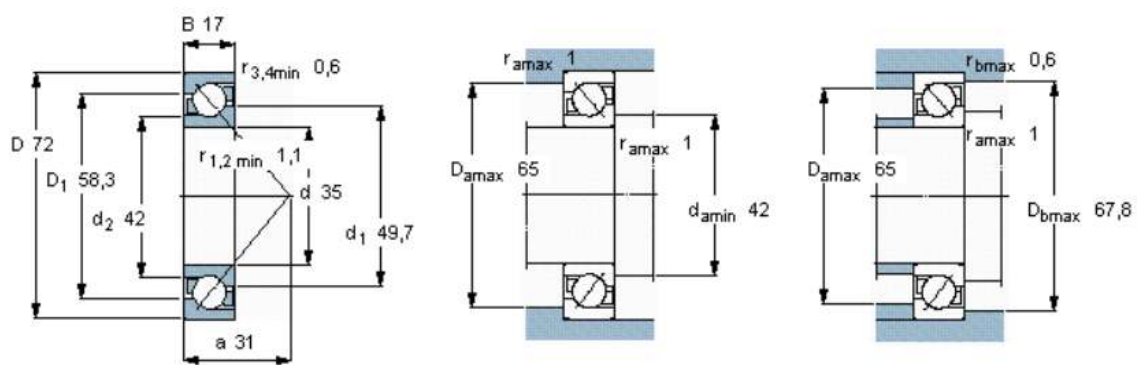
Con el objetivo de posibilitar el giro de los módulos, los brazos de sección circular de la estructura soporte sobre la que los paneles se fijan, deben tener permitido el giro tanto en un sentido como en otro. Para ello, se hace uso de rodamientos rígidos de bolas que alojarán dichos brazos.

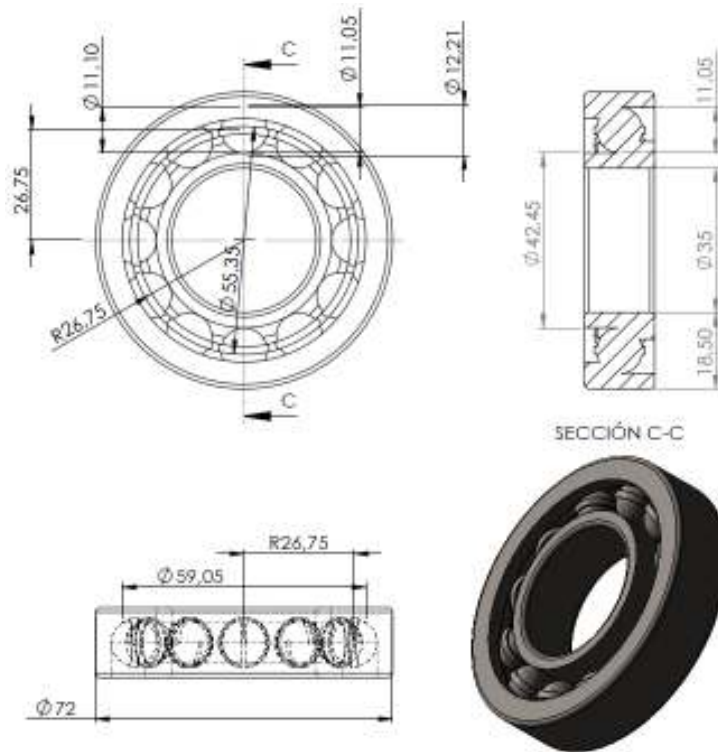
Los rodamientos se han elegido de acuerdo a las dimensiones de la bisagra donde se alojarán como las del brazo de sección circular del soporte que girará de forma concéntrica en su interior. En particular se ha elegido el rodamiento 7207BEP de la casa SKF con dimensiones y valores característicos los que se muestran en la Tabla 6:

Rodamiento SKF 7207BEP						
Dimensiones principales (mm)			Capacidad de carga (kN)		Velocidades nominales (rpm)	
d	D	B	Dinámica C	Estática C <sub>0</sub>	Velocidad de referencia	Límite de velocidad
35	72	17	29,1	19	11.000	11.000

Tabla 6. Características del rodamiento SKF 7207BEP

En la Figura 40 se muestra con detalle las dimensiones y aspecto del rodamiento seleccionado.





**Figura 40.** Detalle del rodamiento SKF-7207BEP

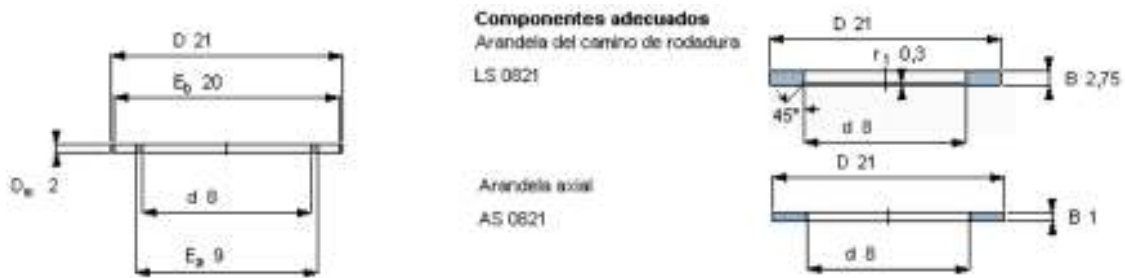
#### 4.9.2 Rodillo de agujas de empuje

La barra longitudinal que forma parte de la estructura soporte del módulo debe girar libremente. Además, la fricción entre la pletina metálica que arriestra los paneles unos con otros para conseguir que giren de manera solidaria y la pieza llamada “cabezal de giro” debe ser mínima. Con tales propósitos, se coloca un rodillo de agujas de empuje, Figura 41, entre la pletina metálica y el cabezal de giro.



**Figura 41.** Rodillo de agujas de empuje

En particular se ha elegido el modelo AXK 0821 TN de la casa SKF, cuyas características principales se pueden ver en la Figura 42:



**Figura 42.** Rodillo de agujas de empuje SKF-AXK 0821 TN

En la Tabla 7 se especifican sus dimensiones:

Rodamiento SKF-AXK 0821 TN						
Dimensiones principales (mm)			Capacidad de carga (kN)		Velocidades nominales (rpm)	
d	D	D <sub>w</sub>	Dinámica C	Estática C <sub>0</sub>	Velocidad de referencia	Límite de velocidad
8	12	2	7,2	20	5600	11000

**Tabla 7.** Características del rodamiento SFK-AXK 0821 TN

#### 4.9.3 Rodillo de agujas sin anillo interior

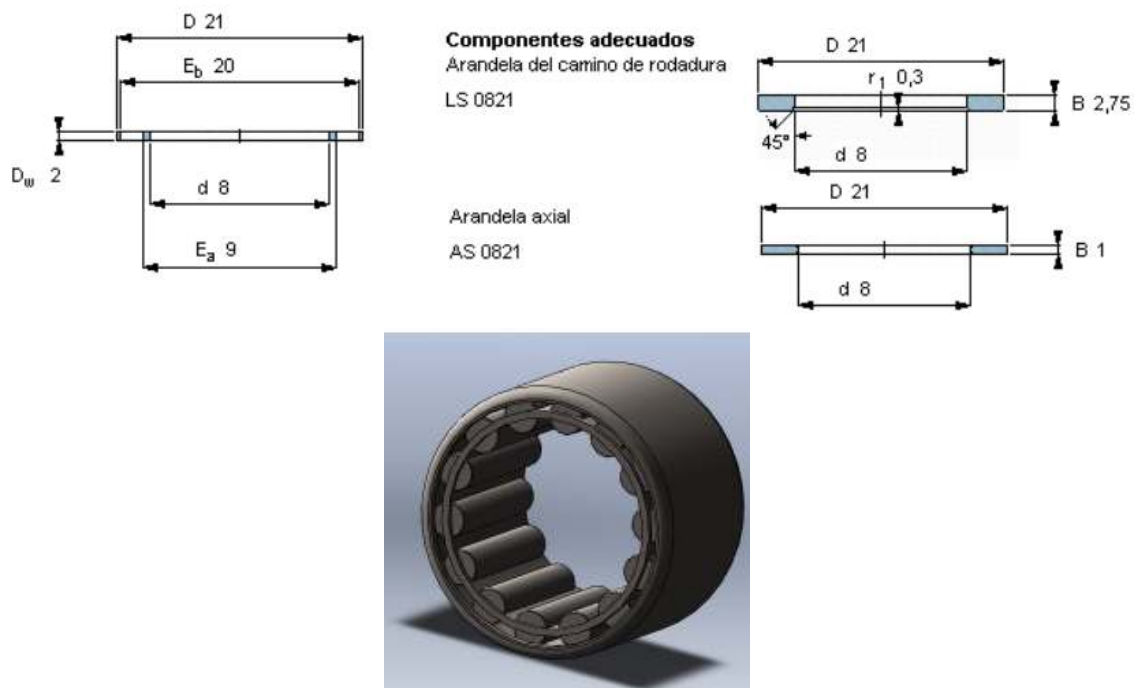
El extremo de la pieza “cabezal de giro” debe girar libremente y de manera concéntrica en los taladros realizados al respecto en la pletina metálica de arriostamiento. Para facilitar ese giro y evitar al máximo la fricción, en el interior de los taladros mencionados se coloca un rodamiento del tipo rodillo de agujas sin anillo interior.

Se ha elegido el HK0808 de la casa SKF cuyas características principales se pueden ver en la Tabla 8.

Rodamiento SKF-HK 0808						
Dimensiones principales (mm)			Capacidad de carga (kN)		Velocidades nominales (rpm)	
d	D	C	Dinámica C	Estática C <sub>0</sub>	Velocidad de referencia	Límite de velocidad
8	21	8	2,7	2,75	19000	22000

**Tabla 8.** Características del rodamiento SFK-AXK 0808

En la Figura 43 se muestra con detalle las dimensiones y aspecto del rodamiento seleccionado.



**Figura 43.** Rodillo de agujas sin anillo interior SKF-HK0808

#### 4.9.4 Lubricación

La lubricación juega un papel importante en el funcionamiento y vida de los rodamientos. El lubricante crea una fina capa entre las partes móviles que permite minimizar la fricción y prevenir el desgaste. Además, el lubricante actúa como protección frente a la

corrosión, la humedad y la entrada de contaminantes. A modo de resumen, las características que un buen lubricante para rodamientos debe reunir son:

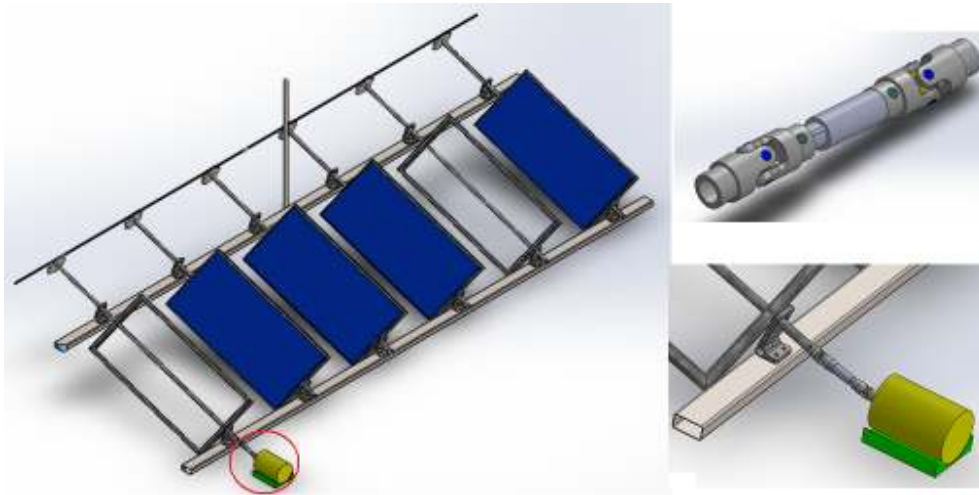
- Mantener una viscosidad estable en un amplio rango de temperaturas
- Buena resistencia de la película a las posibles cargas
- Estructura estable que proporciona una larga vida útil
- No corrosivo y compatible con el resto de componentes
- Proporcionar una barrera contra los contaminantes y la humedad

Se ha optado por el uso de un lubricante tipo grasa con espesante de litio y aceite base de diéster, que presenta buenas propiedades antioxidantes. La viscosidad del aceite es de 15 mm<sup>2</sup>/s a 40 °C y de 3,7 mm<sup>2</sup>/s a 100 °C. La grasa es apropiada para temperaturas de funcionamiento de entre -55 y +110 °C. No obstante, el margen de temperaturas de funcionamiento admisibles viene limitado por el material de la obturación de -40 a +80 °C.

#### **4.10 Doble junta cardan**

La junta cardan consiste en un acoplamiento flexible que puede operar con un elevado grado de desalineamiento. Se trata de un par cinemático con 2 grados de libertad. Una junta cardan consiste en una junta mecánica formada por dos horquillas unidas entre sí por un elemento que permite su articulación. Entre sus ventajas, destaca su capacidad para operar con un alto ángulo de desalineación, larga vida útil, necesitan un mínimo mantenimiento, soportan elevados pares y velocidades de giro y soportan bien la contaminación ambiental.

En el seguidor, es necesario una doble junta cardan telescópica para transmitir el movimiento del motorreductor 1 al brazo del soporte, es decir a la llamada barra longitudinal, al que va fijado el panel. La doble junta cardan permite un movimiento armónico de giro y salva las desalineaciones que se producen entre el eje de giro del motorreductor y el del módulo, como consecuencia del movimiento ascendente y descendente del soporte del panel para seguir la altura solar.



**Figura 44.** *Doble junta cardan telescópica*

#### **4.11 Motorreductor y varilla roscada**

El movimiento de giro y ascenso y descenso de los paneles se consigue gracias al uso de dos motores paso a paso con reductora. Se trata de un elemento usado desde la antigüedad para transmitir el par necesario a un mecanismo para que este gire. Hoy día, su accionamiento es eléctrico y su campo de aplicación muy variado, desde un pequeño motorreductor capaz de cambiar y combinar velocidades de giro en un reloj de pulsera, hasta enormes motorreductores para dar tracción en buques de carga o a grandes tuneladoras.

Su principio de funcionamiento es sencillo. Un engranaje motriz transmite movimiento de giro de un motor eléctrico a otro con el que está engranado, engranaje conducido, existiendo entre ambos una diferencia de diámetro. Esto hace que si por ejemplo, el motriz da una vuelta y tiene la mitad de diámetro que el conducido, el conducido habrá dado dos vueltas. Con esta simple combinación se ha conseguido reducir a la mitad la velocidad de salida del motor a la mitad. Si a la combinación de ruedas descrita encadenamos otras ruedas adicionales, se logrará una velocidad cada vez menor. Pero no sólo se consigue disminuir la velocidad, sino que al mismo tiempo se aumentará el par en la última rueda del motorreductor que se conoce como rueda de salida. A la relación entre el diámetro del engranaje motriz y el conducido se le conoce como relación de transmisión.

Un motor eléctrico viene caracterizado por su potencia (W) determinada y velocidad de giro (se suele dar en rpm). Estas dos características: velocidad y potencia llevan aparejado un cierto par que puede liberar el motor. Es precisamente el par lo que permitirá o no el giro de un determinado sistema mecánico con una carga asociada. Esta combinación de potencia, par y velocidad en un motorreductor está regida por la siguiente fórmula:

$$Potencia (W) = PAR (N. m) * Velocidad de giro del motor \left(\frac{rad}{s}\right) \quad (\text{Ecuación 7})$$

De la expresión (1) se puede extraer la interrelación existente entre ellas. Así, a igual potencia, cada vez que se reduzca la velocidad de giro se obtendrá un par más elevado que permitirá girar una mayor carga.

Las tres condiciones que debe satisfacer el motor a elegir son:

- Velocidad de giro coincidente con la velocidad de giro del sistema
- El eje es capaz de soportar la carga radial aplicada
- Transmitir un par motor suficiente para el accionamiento de todo el sistema

Conocidas estas tres condiciones, se han elegido **dos motores paso a paso con un par de 0,25 Nm y una relación de transmisión de la reductora de 1:50**. Se trata de motores que aunque no tienen una potencia muy elevada, su par sí que lo es y además quedaría multiplicado por cincuenta gracias a la reductora.

El motorreductor 1 es el que posibilita el movimiento longitudinal de ascenso y descenso de los colectores. A través de un acoplamiento rígido de manguito partido, Figura 45, entre el eje del motor y una varilla roscada de acero inoxidable de 39 mm de diámetro y 2 m de longitud. El manguito partido se fabrica en dos piezas unidas entre sí por tornillos, permitiendo el montaje sobre los ejes sin necesidad de mover ninguna de las partes. Permite una transmisión de par elevada.

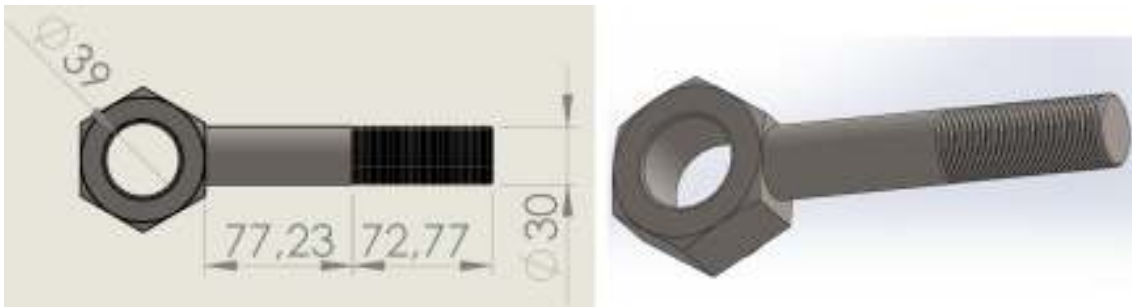
El llamado motorreductor 2 es el encargado de realizar el movimiento de giro de los colectores, transmitiendo el movimiento gracias a la doble junta cardan.



**Figura 45.** *Manguito rígido partido*

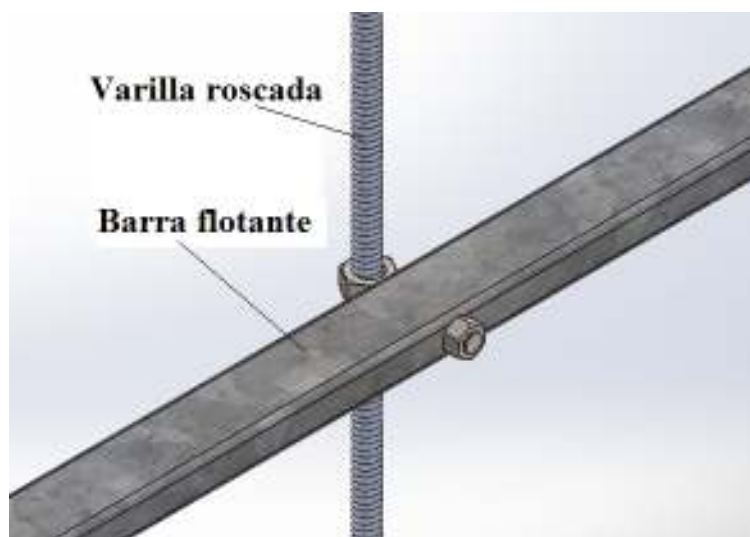
La varilla roscada gira en el interior de una tuerca que forma parte de la pieza de la figura 46. Como se puede ver en la Figura 46, la pieza se ha formado con una tuerca

hexagonal de paso fino de acuerdo a la norma ISO 8673 de tamaño M42x3.0 a la que se le ha soldado el cuerpo de un tornillo hexagonal (sin cabeza) de 30 mm de diámetro y 150 mm de longitud.



**Figura 46.** Croquis acotado en mm y vista en perspectiva

Esta pieza, se fija a la barra flotante atravesando el taladro realizado en la mencionada barra y atornillando en su extremo la conveniente tuerca. En la Figura 47 se muestra como quedaría esta pieza ensamblada en el seguidor.



**Figura 47.** Croquis del ensamblaje

#### 4.12 Soldadura

Los perfiles tubulares a usar cumplen con las especificaciones de las normas UNE 37-501, UNE 37-508 y UNE EN ISO 1461, y por ello con las normas sobre soldadura, por lo que se puede afirmar que son totalmente soldables.

Los procedimientos de soldadura que se utilizan normalmente para el acero sin galvanizar son igualmente aplicables al acero galvanizado: soldadura eléctrica por arco (es la más utilizada), soldadura con soplete, soldadura por resistencia, etc. La única precaución a tener



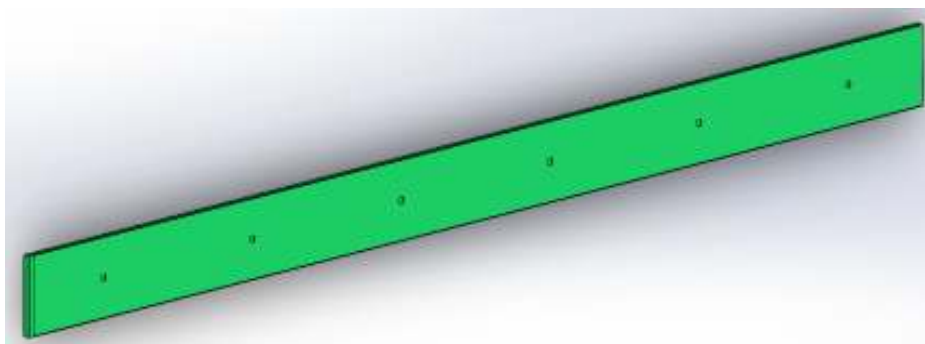
en cuenta es adecuar la técnica y los parámetros de soldeo a las condiciones particulares del material galvanizado. Es de señalar que el principal riesgo al soldar perfiles de acero en general lo constituye el agrietamiento en frío de la zona soldada.

La soldabilidad de los aceros depende tanto de su composición química como del método de soldadura a utilizar. Las normas Europeas EN 1011-1 y EN 1011-2 recogen los requisitos generales para la soldadura. Utilizando las recomendaciones especificadas en ellas, pueden determinarse las condiciones de soldadura y los diferentes parámetros de soldadura recomendados para cada clase de acero. Estos parámetros variarán en función del espesor de la pared del perfil, el nivel de resistencia y la composición química del acero, de la energía aplicada durante la soldadura, de los requisitos de cálculo, de la eficiencia del electrodo, del proceso de soldadura y de las propiedades del metal de aportación.

Deben restaurarse las zonas afectadas por el corte con soplete o por la soldadura de acuerdo a las normas UNE-EN ISO 1461 y UNE-EN ISO 2063. Esas zonas del recubrimiento afectadas por efecto del calor de la soldadura se pueden restaurar fácilmente mediante metalización con zinc o pintura rica en zinc.

#### **4.13 Carcasa protectora**

Con el objetivo de proteger tanto la cadena y la rueda de cadena, se usará una carcasa de polipropileno de 6 metros de longitud, 400 mm de altura, 35 mm de profundidad y 3 mm de espesor. Será una carcasa de sencillo montaje y desmontaje que permita un fácil y rápido acceso para llevar a cabo las operaciones propias de mantenimiento como sería el engrase. Tiene los correspondientes orificios a la distancia adecuada para poder alojar el eje de los soportes.



**Figura 48.** *Carcasa protectora*

#### **4.14 Controlador**

El movimiento de giro del motor es controlado a través de un sistema analógico auto regulado, mediante un sistema de coordenadas calculadas, que decide cuando el motor debe

accionar el sistema de seguimiento y cuando debe estar desconectado. Una propuesta para su realización sería el uso de la plataforma de electrónica abierta Arduino, basada en software y hardware flexible y fácil de usar.

Arduino permite capturar información a través de sus pines de entrada de una variada gama de sensores para controlar de manera adecuada luces, motores u otros actuadores. El lenguaje de programación de su microcontrolador está basado en Wiring y el entorno de desarrollo en Processing. Permite desarrollar proyectos sin necesidad de conectar a un ordenador o poder hacerlo y comunicarse así con diferentes tipos de software.

Aunque las placas pueden hacerse a mano también se pueden adquirir ya montadas de fábrica, el software se puede descargar de manera gratuita.

## 5 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS

### 5.1 Estructura soporte

#### 5.1.1 Acciones sobre la estructura

Es necesario determinar si las dimensiones de la barra longitudinal y del soporte de forma rectangular son las adecuadas. Para ello, se realiza la evaluación de las acciones a las que pueden verse sometidas.

El Código Técnico de Edificación (CTE) clasifica las acciones como:

- **Acciones permanentes (G):** son aquellas que actúan en todo instante sobre el edificio manteniendo su posición. Es el caso del peso propio.
- **Acciones variables (Q):** son aquellas que pueden actuar en algunos momentos como por ejemplo las debidas al viento o la nieve.
- **Acciones accidentales (A):** tienen baja probabilidad de ocurrencia pero de gran importancia, como sismo, incendio, impacto o explosión. No se han tenido en cuenta a la hora de dimensionar la estructura soporte.

Para considerar las acciones específicas, se atenderá a las indicaciones expuestas en el CTE-DB-SE-AE. Una vez obtenidas las acciones características se procederá a aplicarlas su coeficiente de ponderación, todo ello en base al CTE-DB-SE.

Este coeficiente de ponderación se elegirá en función del tipo de acción, la Hipótesis de carga y de la naturaleza de su efecto (favorable o desfavorable).

**Tabla 9.** Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones

Tipo de verificación <sup>(1)</sup>	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		<b>desestabilizadora</b>	<b>estabilizadora</b>
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

<sup>(1)</sup> Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

#### 5.1.1.1 Acciones permanentes

Las acciones permanentes serán:

- Carga del módulo fotovoltaico: el módulo elegido tiene un peso de 11,9kg y unas dimensiones de 1476x659 mm, por tanto su valor por metro lineal es  $11,9/1,476 = 8,06$  kg/m
- Carga del soporte rectangular: esta pieza tiene un peso de 19,149 kg y de acuerdo a sus dimensiones 1516x699 mm, la carga por metro lineal es  $19,149/1,516 = 12,62$  kg/m
- Peso propio de la barra longitudinal que es de 2,94 kg/m

Se obtiene una  $G_{total} = 8,06 + 12,62 + 2,94 = 23,62$  kg/m

#### 5.1.1.2 Acciones variables

##### **A. Carga de viento**

La acción de viento se debe tomar como una fuerza perpendicular a la superficie a calcular, o presión estática, que puede expresarse como:

$$q_s = q_b \cdot c_s \cdot c_p \text{ (Ecuación 8)}$$

siendo:

- $q_b$  la presión dinámica del viento. Se elige en función de la zona del emplazamiento. Para la zona A,  $q_b = 0,42 \text{ kN/m}^2 = 42 \text{ kp/m}^2$



**Figura 49.** Mapa de velocidad del viento en España

- $c_e$  el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción. Para una zona urbana en general, industrial o forestal situada a unos 15 m es de 2,1.

**Tabla 10.** Valores del coeficiente de exposición  $c_e$

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

- $c_p$  el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento, y en su caso, de la situación del punto respecto a los bordes de esa superficie; un valor negativo indica succión. Se toma como valor de  $c_p$  de presión 0,8 y de succión -0,4.

Luego la acción del viento será:

$$\diamond Q_e \text{ presión} = 0,42 \text{ kp/m}^2 * 2,1 * 0,8 = 70,56 \text{ kp/m}^2$$

$$\diamond Q_{e \text{ succión}} = 0,42 \text{ kp/m}^2 * 2,1 * (-0,4) = -35,28 \text{ kp/m}^2$$

## **B. Carga de nieve**

La distribución e intensidad de la carga de nieve sobre una cubierta depende del clima del lugar, del tipo de precipitación, del relieve del entorno, de la forma de la cubierta, de los efectos del viento y de los intercambios térmicos en los paramentos exteriores.

Como valor de carga de nieve por unidad de superficie en proyección horizontal puede tomarse:

$$q_n = \mu S_k \text{ (Ecuación 9)}$$

siendo:

- $\mu$  coeficiente de forma de la cubierta que lo tomar
- $S_k$  el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal

Puesto que no hay impedimento al deslizamiento y el ángulo de inclinación para los meses con posibilidad de nieve en Córdoba (Enero, Febrero, Marzo, Octubre, Noviembre y Diciembre) es superior a 30°, el valor de  $\mu$  será de 0 y por tanto nulo el valor de  $q_n$ .

La combinación más desfavorable es la siguiente:

$$1,35 * G_{\text{total}} + 1,5 * Q_{e \text{ presión}} = 1,35 * 23,62 + 1,5 * 70,56 * \cos 30 =$$

$$124 \text{ kg/m} \equiv 1,24 \text{ kN/m}$$

## **5.2 Simulación de la barra longitudinal**

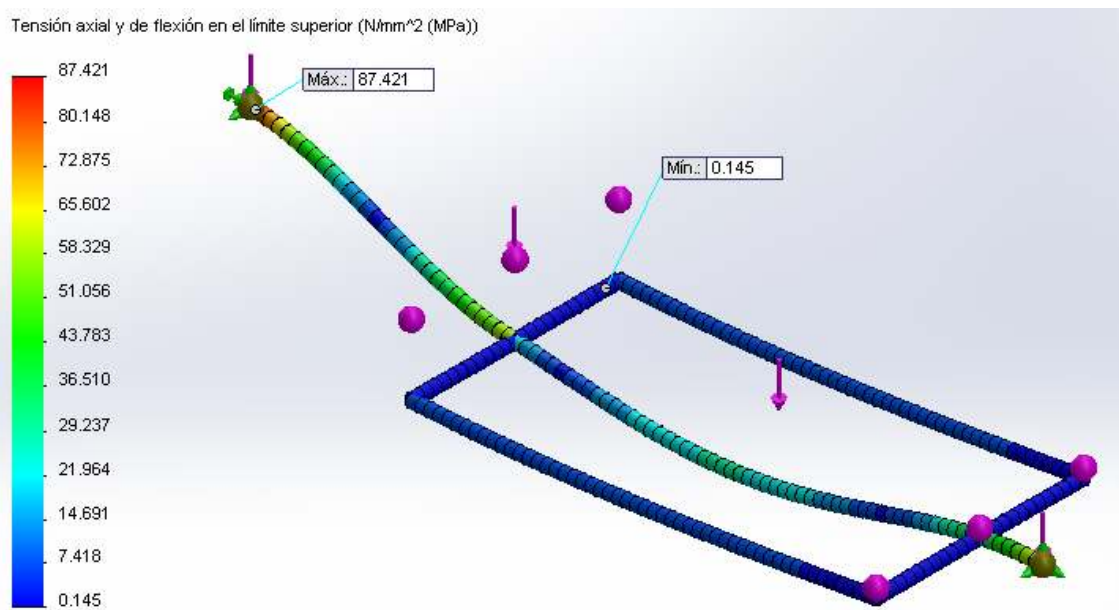
Se ha procedido a realizar la simulación del esfuerzo con SolidWorks. La aplicación ofrece el complemento *Simulation* con el que se puede realizar un análisis de tensiones a la pieza que se desee. Esta herramienta de simulación ayuda a reducir el coste y el tiempo de salida al mercado de los productos gracias a la realización de pruebas informáticas de los diseños, evitando así tener que hacer pruebas de campo.

En particular, se ha utilizado el criterio del esfuerzo máximo de von Mises para calcular los factores de seguridad. Este criterio manifiesta que un material dúctil empieza a ser flexible cuando el esfuerzo equivalente (esfuerzo de von Mises) alcanza el límite elástico del material. El límite elástico (SIGYLD) se define como una propiedad del material. Además, *Simulation* calcula el factor de seguridad en un punto dividiendo el límite elástico entre el esfuerzo

equivalente en ese punto, lo cual es muy útil para conocer el punto exacto donde el material cede. La interpretación del valor del factor de seguridad sería:

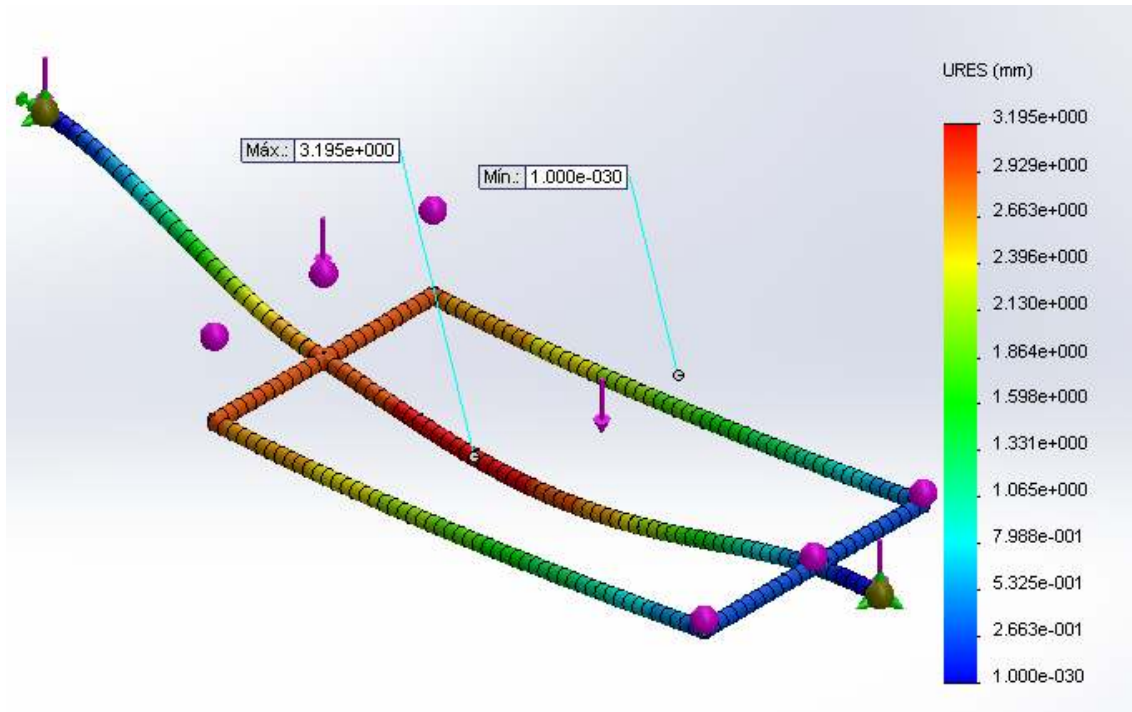
- Un factor de seguridad inferior a 1.0 en una ubicación significa que el material de esa ubicación ha cedido y que el diseño no es seguro.
- Un factor de seguridad de 1.0 en una ubicación significa que el material de esa ubicación ha empezado a ceder.
- Un factor de seguridad superior a 1.0 en una ubicación significa que el material de esa ubicación no ha cedido.
- El material de esa ubicación empezará a ceder si aplica nuevas cargas iguales a las actuales multiplicadas por el factor de seguridad resultante.

Los resultados obtenidos con SolidWorks para la barra longitudinal han sido los que se detallan a continuación. El valor máximo de tensión que sufriría la barra sería de  $87.421 \text{ N/mm}^2$  inferior a los  $203.943 \text{ N/mm}^2$  que tiene por límite elástico el acero galvanizado. El mencionado valor máximo estaría en cada uno de los extremos de la barra, Figura 50.



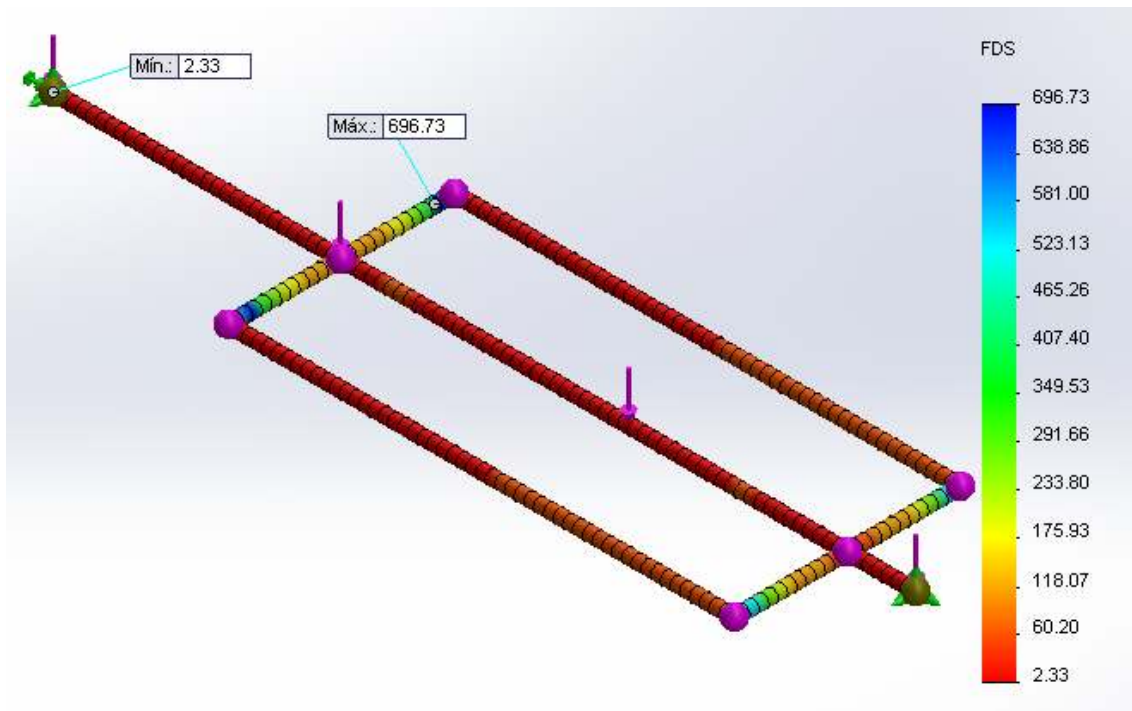
**Figura 50.** Tensión axial y de flexión ( $\text{N/mm}^2$ ) de la barra longitudinal. Escala de deformación 1:7800

El desplazamiento máximo se daría en la zona central de la barra coloreada de rojo de la Figura 52 y su valor sería de 3,195 mm inferior al valor de flecha máximo

$$\frac{L}{250} = \frac{2616}{250} = 10 \text{ mm.}$$


**Figura 51.** Desplazamiento de la barra longitudinal. Escala de deformación 1:7800

El Factor de Seguridad, Figura 52, más bajo se localiza en el extremo de la barra y su valor 2,33 es superior a 1 y por tanto el material no cede en punto alguno.



**Figura 52.** Factor de seguridad de la barra longitudinal

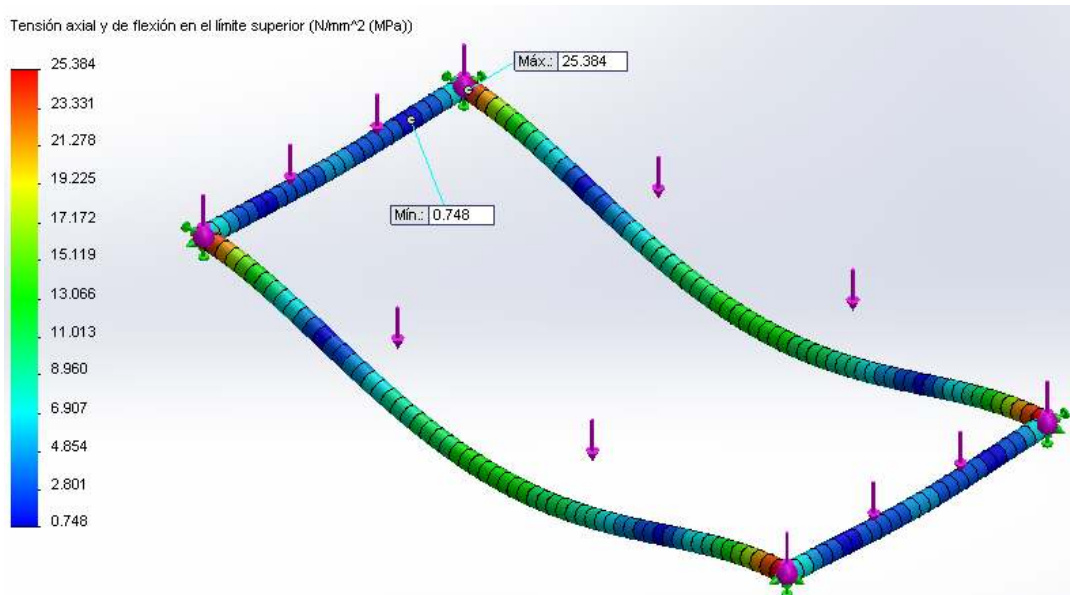
### 5.3 Simulación del soporte rectangular

Puede resultar evidente que si la barra longitudinal soporta las cargas, el soporte rectangular también debe de hacerlo pues ha sido diseñado con perfiles de mayores dimensiones. No obstante, es necesario que quede reflejado en el presente documento.

Para quedar más si cabe del lado de la seguridad, se realiza la simulación para el mismo valor de la combinación más desfavorable al que fue sometida la barra longitudinal, 1,24 kN/m. Los resultados han sido:

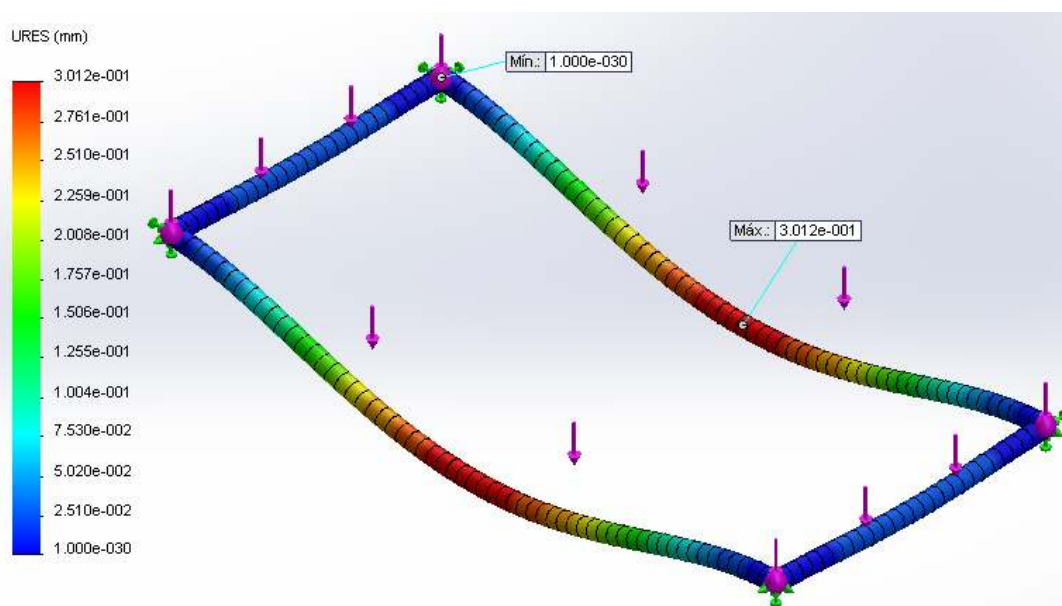
El valor máximo de tensión se produciría en las uniones entre los perfiles que forman el soporte aunque su valor 25.384 N/mm<sup>2</sup> es muy inferior del máximo que es capaz de soportar el acero inoxidable.





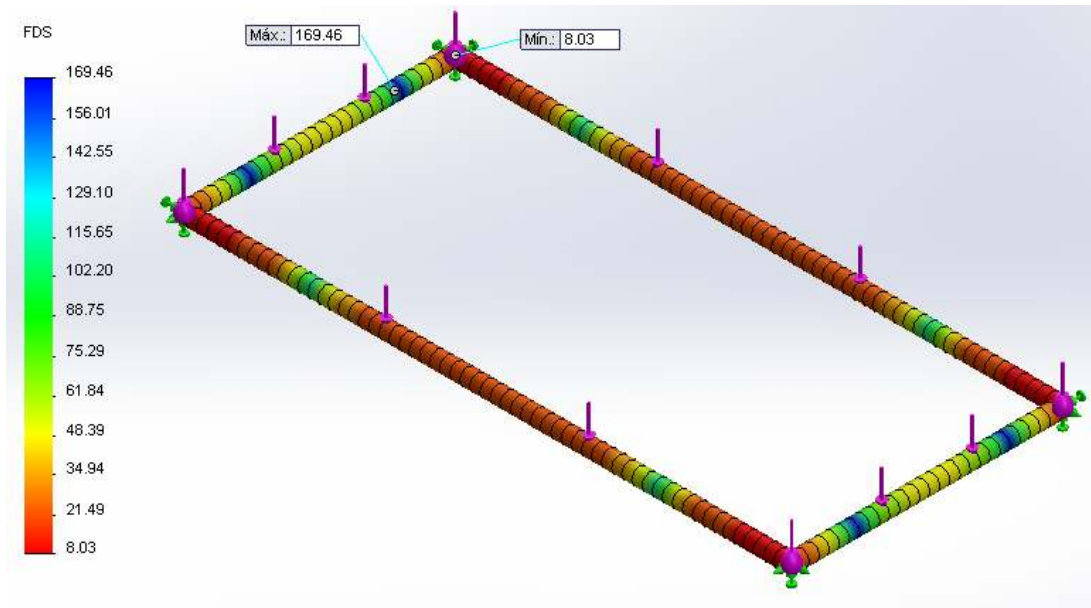
**Figura 53.** Tensión axial y de flexión soporte rectangular. Escala de deformación 1:500

El desplazamiento máximo se da en la zona central de los perfiles más largos que forman el soporte, siendo su valor 0,3 mm, Figura 54.



**Figura 54.** Desplazamiento del soporte rectangular. Escala de deformación 1:500

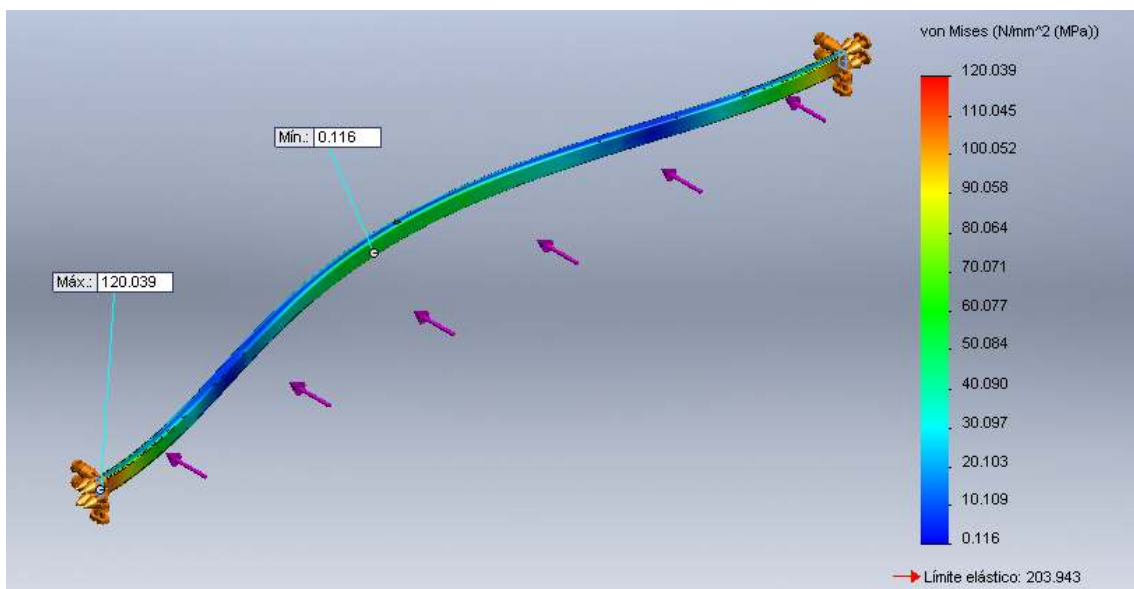
El FDS más bajo es de 8,03 por lo que el material no cede, Figura 55.



**Figura 55.** Factor de seguridad del soporte rectangular

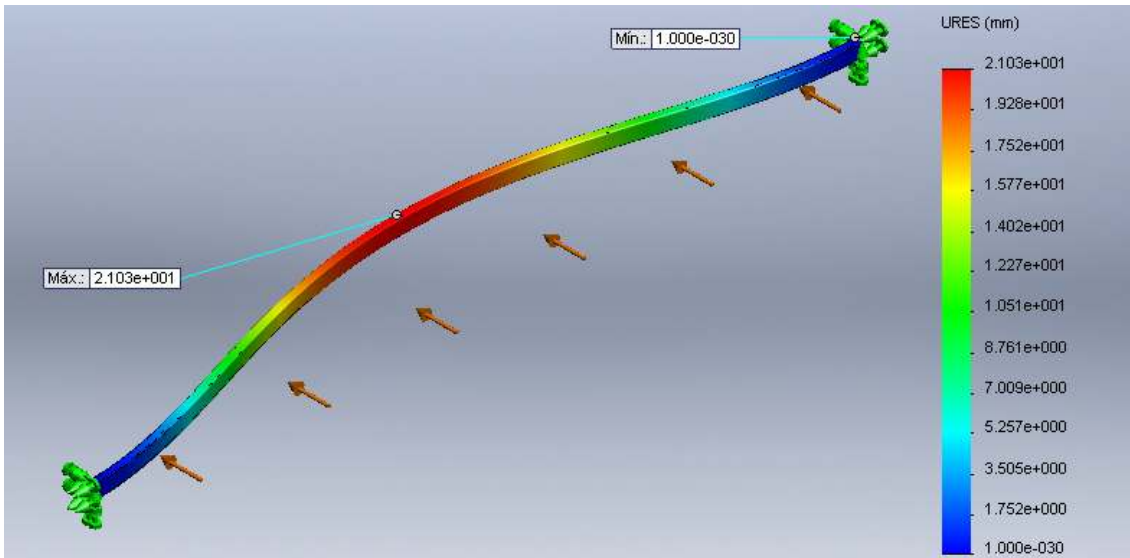
#### 5.4 Simulación de la barra fija

La simulación de la barra fija se ha realizado considerando una sujeción en cada uno de sus extremos. El esfuerzo máximo de von Mises obtenido es de 120.039 N/mm<sup>2</sup>, justo en sus extremos, muy inferior del límite máximo del material.



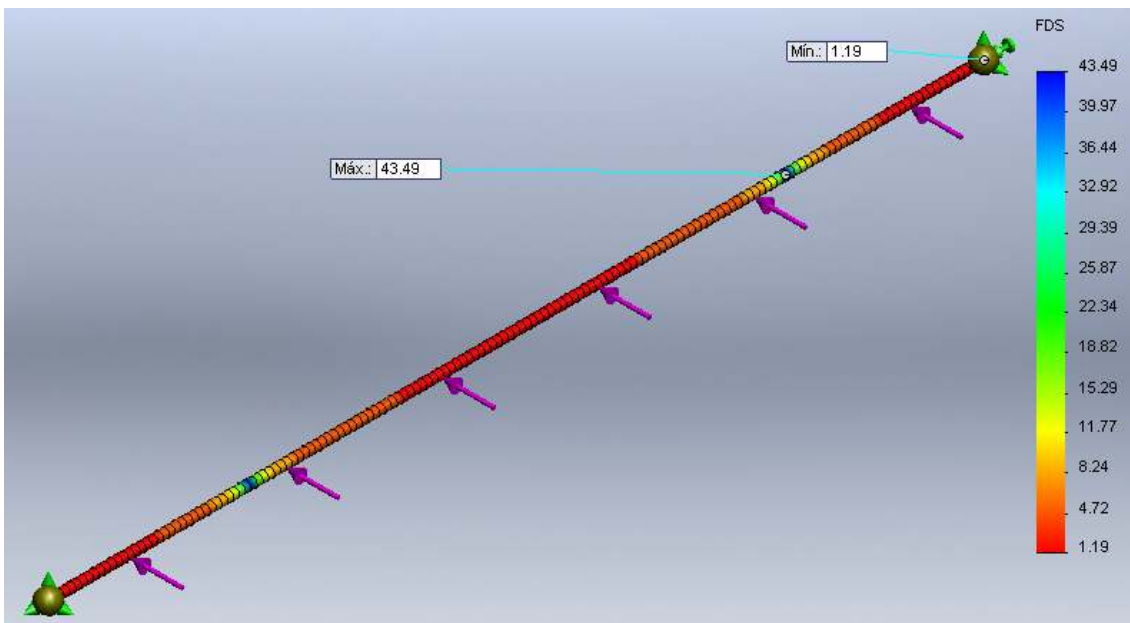
**Figura 56.** Tensión de von Misses (N/mm<sup>2</sup>) de la barra fija. Escala de deformación 1:25000

El máximo desplazamiento resultante, Figura 57, se ha producido en la zona central de la barra y es de 2,1 mm inferior al valor de flecha máximo  $\frac{L}{250} = \frac{6000}{250} = 24 \text{ mm}$ .



**Figura 57.** Desplazamiento (mm) de la barra fija. Escala de deformación 1:25000

El Factor de Seguridad (FDS) más bajo se localiza en el extremo de la barra y su valor 1,19 es superior a 1 y por tanto el material no cede en punto alguno, Figura 58.



**Figura 58.** Factor de seguridad de la barra fija

## 5.5 Simulación de la bisagra

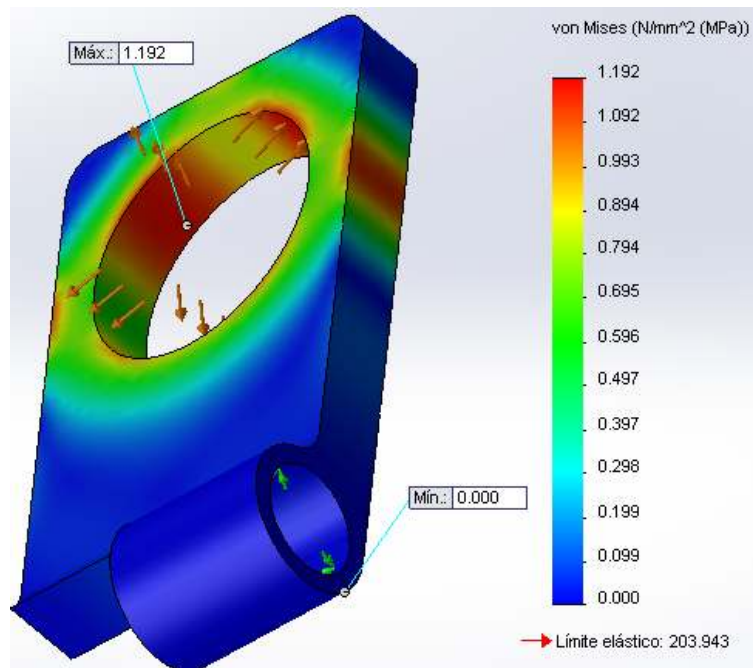
Se ha realizado un estudio de simulación de los esfuerzos a los que se verían sometidos las dos hojas que forman la bisagra, tanto de la hoja que quedará fijada a la barra de la estructura soporte como de la hoja móvil, para poder determinar si su diseño y dimensiones son las adecuadas.

### A. Hoja móvil de la bisagra

A la hoja móvil se le ha realizado el ensayo de simulación para una carga en el orificio donde se alojará la barra longitudinal de la estructura soporte, de valor:

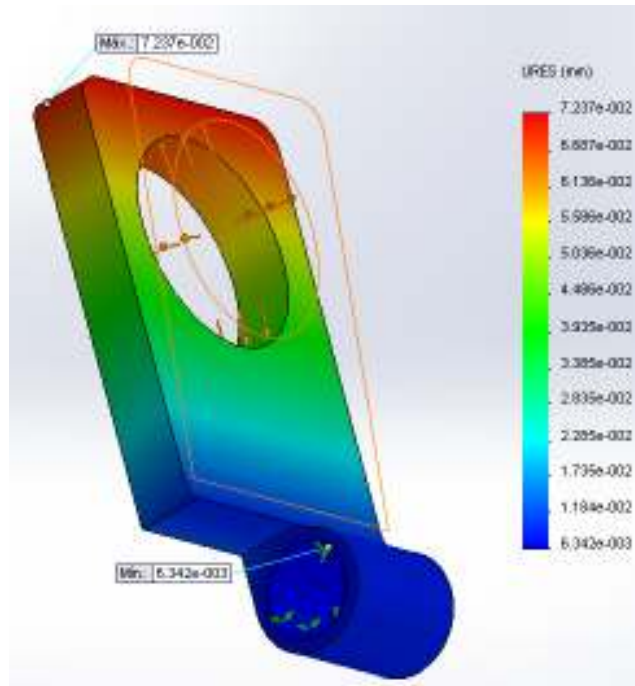
$$\frac{\text{Carga lineal sobre la barra} * \text{longitud}}{\text{Número de apoyos}} = \frac{1240 \text{ N/m} * 2,516 \text{ m}}{2} = 1288,2 \text{ N}$$

En la evaluación de la tensión con *Simulation*, se emplea el criterio de von Mises. El material empieza a ceder en una ubicación cuando la tensión de von Mises es igual al límite elástico del material. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión, en el caso que ocupa el del acero galvanizado es de 203.943 N/mm<sup>2</sup>. La tensión máxima es 1.192 N/mm<sup>2</sup> muy inferior a la máxima permitida y se da, como era de esperar, en la cara interna del orificio que alojará la barra longitudinal, Figura 59.



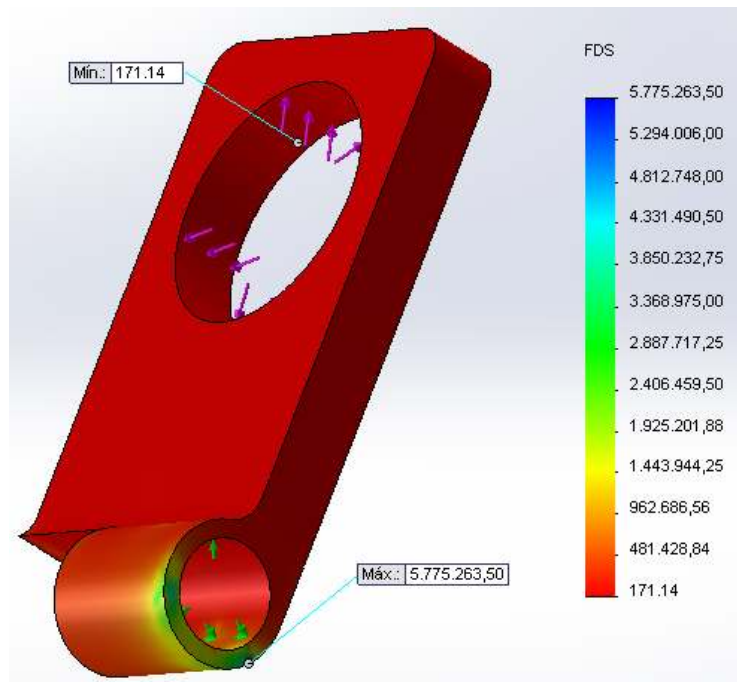
**Figura 59.** Tensión de von Misses (N/mm<sup>2</sup>) de la hoja móvil de la bisagra. Escala de deformación 1:250000

La Figura 61 muestra el llamado gráfico URES que representa la resultante de los desplazamientos en la pieza debido a la fuerza a la que está sometida. Se puede ver como los mayores desplazamientos están en las zonas rojas de la Figura 60, siendo el valor máximo de desplazamiento 0,0728 mm, prácticamente inapreciable.



**Figura 60.** Desplazamiento (mm) de la hoja móvil de la bisagra. Escala de deformación 1:250000

Con base en los parámetros especificados, el factor de seguridad (FDS) más bajo encontrado en su diseño es 171,14, Figura 61, por lo que se puede afirmar que el material en su punto más débil no cede.

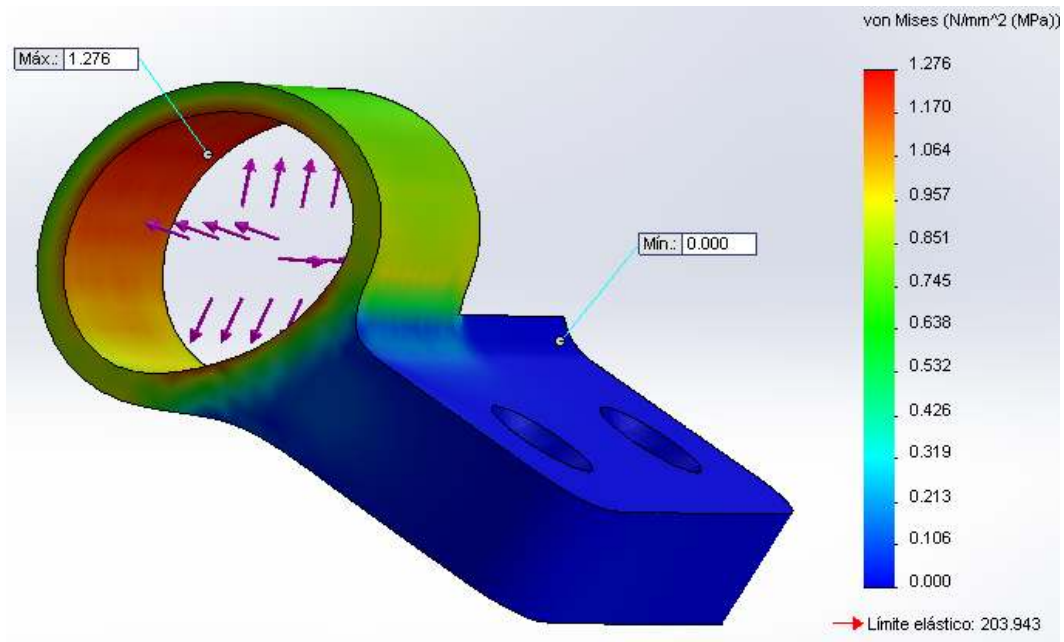


**Figura 61.** Factor de seguridad (FDS) de la hoja móvil de la bisagra

## **B. Hoja fija de la bisagra**

En el orificio de la hoja fija donde se aloja el pasador, se ha aplicado una fuerza de 1.288,2 N. Se ha simulado como fijación los taladros realizados en su cara.

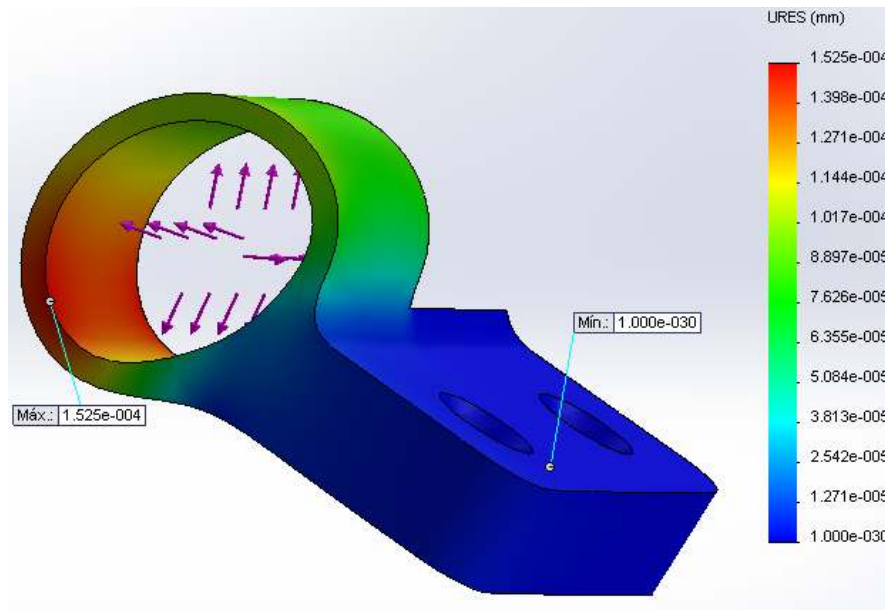
La tensión máxima es 1.276 N/mm<sup>2</sup> muy inferior a la máxima permitida y se da, en la cara interna del orificio donde se sitúa el pasador, Figura 62.



**Figura 62.** Tensión de von Misses (N/mm<sup>2</sup>) de la hoja fija de la bisagra. Escala de deformación 1:78000

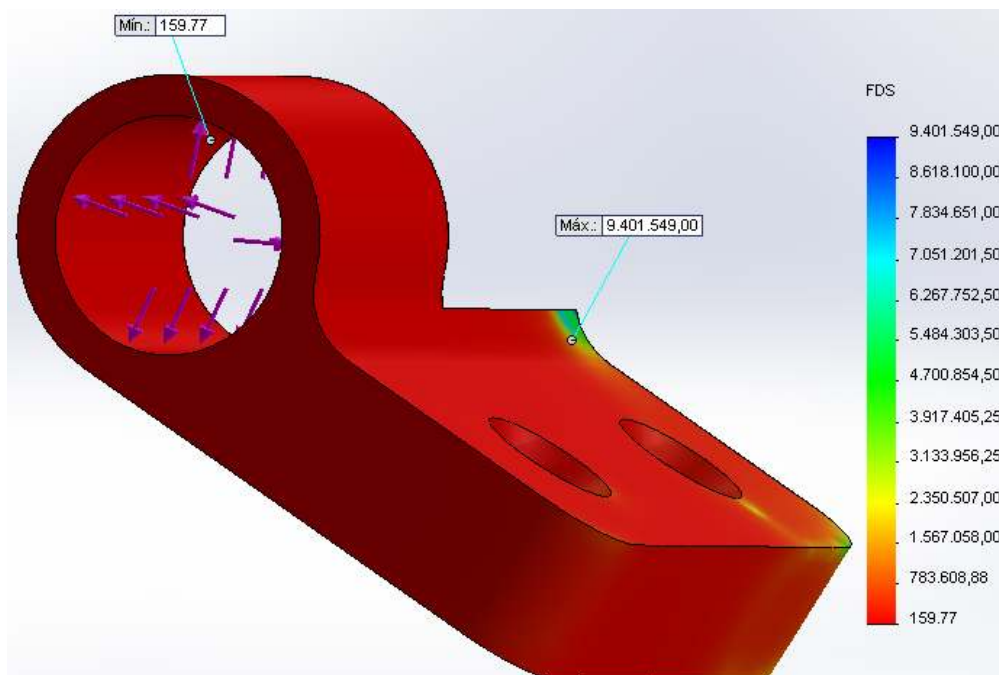
El gráfico URES, Figura 63, muestra las zonas coloreadas de rojo como las de mayor desplazamiento, siendo el valor máximo 0,00015 mm.





**Figura 63.** Desplazamiento (mm) de la hoja fija de la bisagra. Escala de deformación 1:78000

El factor de seguridad (FDS) más bajo encontrado en su diseño es 159,77 más que suficiente para asegurar, junto a los resultados anteriormente estudiados, que la pieza cumplirá sobradamente frente a las cargas a las que se verá sometida.



**Figura 64.** Factor de seguridad (FDS) de la hoja fija de la bisagra

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Estudio de radiación

El estudio de radiación se justifica por la necesidad de conocer la productividad del seguidor en función de las coordenadas del lugar elegido, en este caso el Edificio C2 del Campus Universitario Rabanales, y del tipo de diseño que se propone. Además, este estudio, resulta imprescindible a la hora de decidir la distancia óptima entre colectores y con ello el número de ellos que tendrá cada seguidor.

Las características del colector son determinadas tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista comercial. Así, se decide que el seguidor tenga una longitud de 6 m y se justifica por dos motivos:

- Es una dimensión suficiente para obtener una producción energética que justifique el uso del seguidor
- Es una longitud de perfil comercial, fácilmente disponible

A continuación se presenta de manera detallada el estudio de radiación realizado.

#### 6.1.1 Ángulo óptimo de inclinación

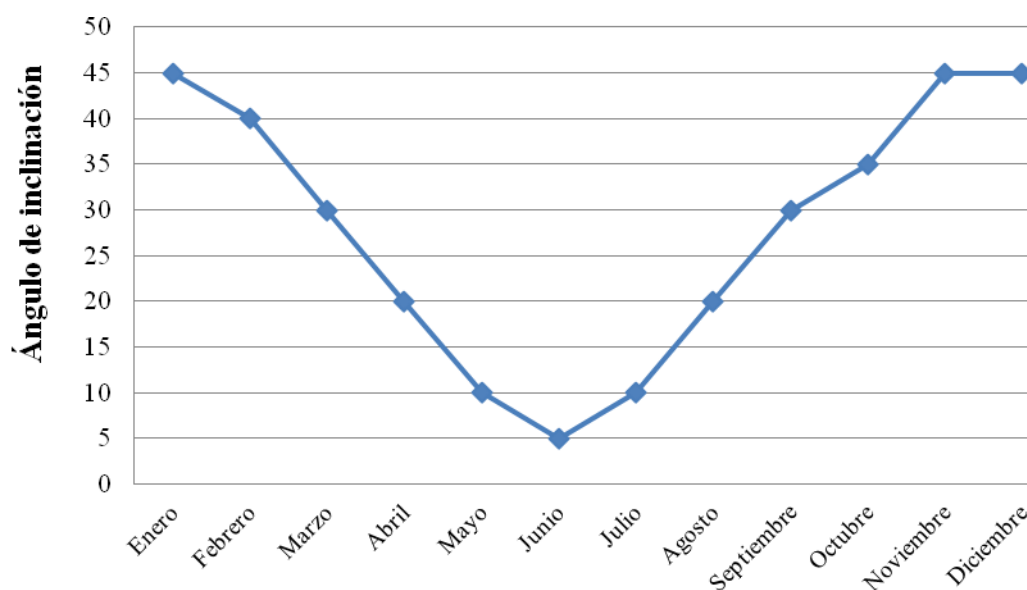
Las coordenadas geográficas del Edificio C2 del C.U. Rabanales son 4,719° de longitud Oeste y 37,5° de latitud Norte. A partir de estas coordenadas, sabiendo que los seguidores se orientarán con dirección Sur y conocida la radiación global en el lugar, se obtiene el ángulo de inclinación óptimo mensual, Tabla 11.

Mes	Día Juliano	Radiación Global	Mes	Día Juliano	Radiación Global
Enero	15	7401000	Julio	196	25719000
Febrero	46	11097000	Agosto	227	23411000
Marzo	74	14158000	Septiembre	258	17983000
Abril	105	17307000	Octubre	288	11895000
Mayo	135	19017000	Noviembre	319	8228000
Junio	166	24263000	Diciembre	349	6237000

**Tabla 11.** Radiación Global en el Edificio C2 del C.U. Rabanales



A partir de los valores de la Tabla 11, se puede determinar el valor óptimo del ángulo de inclinación que deberían tener los colectores a lo largo del año, Figura 65.

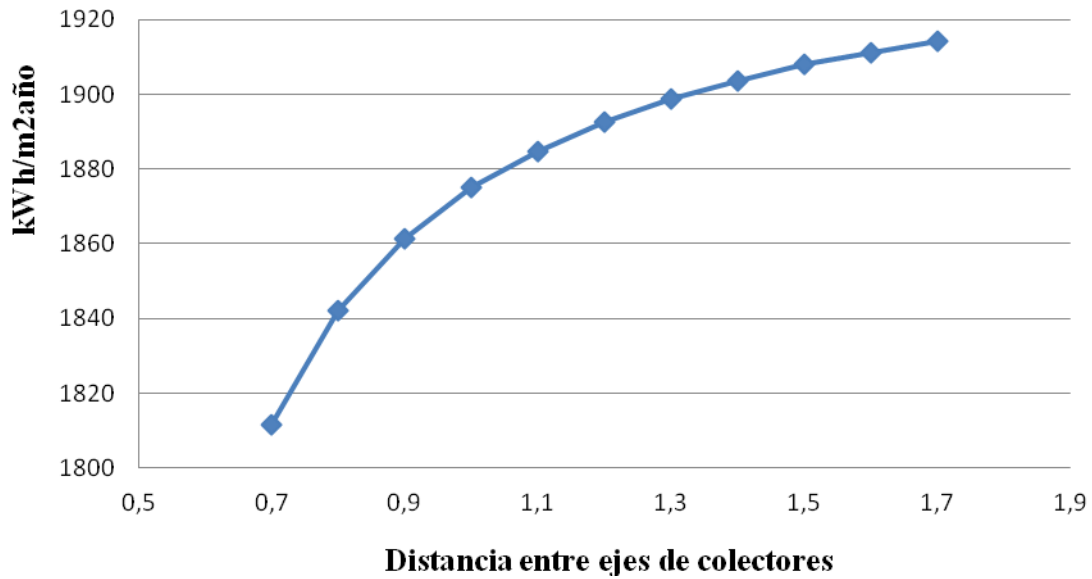


**Figura 65.** *Ángulo óptimo de inclinación del colector a lo largo del año*

### 6.1.2 Captación anual y sombreado

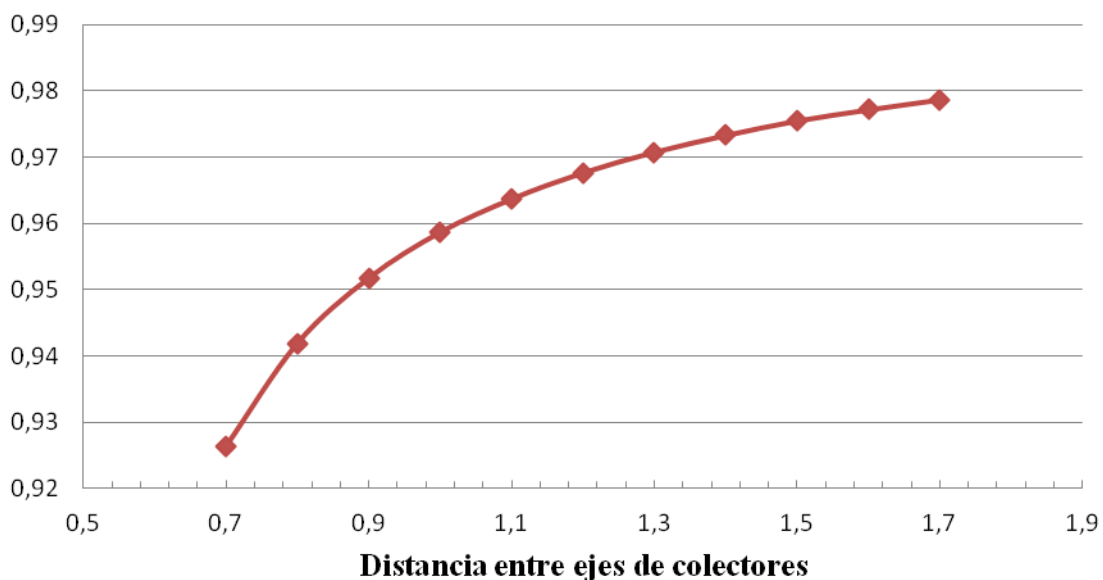
Una vez conocido el ángulo óptimo de inclinación mensual se puede determinar la captación anual en ( $\text{kWh}/\text{m}^2\text{año}$ ) en función de la distancia de separación entre los ejes de los colectores. Además, se tendrá en cuenta el **sombreado** y para ello es necesario definir las dimensiones del módulo que para este caso de estudio serán  $1476 \times 659$  mm como viene recogido en el apartado “5.2 Módulo Fotovoltaico”.

En la Figura 67 se muestran los resultados obtenidos de realizar los cálculos de captación anual energética por unidad de superficie, teniendo en cuenta el sombreado que se produciría entre colectores para las distintas distancias entre ejes que se proponen. Se puede ver como a medida que aumenta la distancia entre ejes el valor de captación incrementa aunque la curva presenta una clara tendencia asintótica.



**Figura 66.** Captación anual del colector en función de la distancia entre ejes

La Figura 67 representa la evolución de la relación adimensional existente entre la captación energética anual por unidad de superficie del seguidor proyectado a medida que se incrementa la distancia entre ejes teniendo en cuenta el sombreado y la captación anual de un seguidor con movimiento a dos ejes que se encuentra totalmente aislado. Se muestra claramente una tendencia asintótica de la curva y como para valores de distancia entre colectores superiores a 0,9 m la relación de captación es superior a 0,95.



**Figura 67.** Relación de captación entre seguidor proyectado variando la distancia entre ejes y un seguidor a dos ejes aislado

### 6.1.3 Separación y número de colectores

Para decidir la distancia entre ejes no es decisivo el criterio según el cual la distancia debería ser aquella que hace máximo el valor de captación. Hay que contar con las dimensiones del seguidor, en este caso seis metros de longitud, y optimizar en lo posible ese valor para incluir el mayor número de colectores posibles.

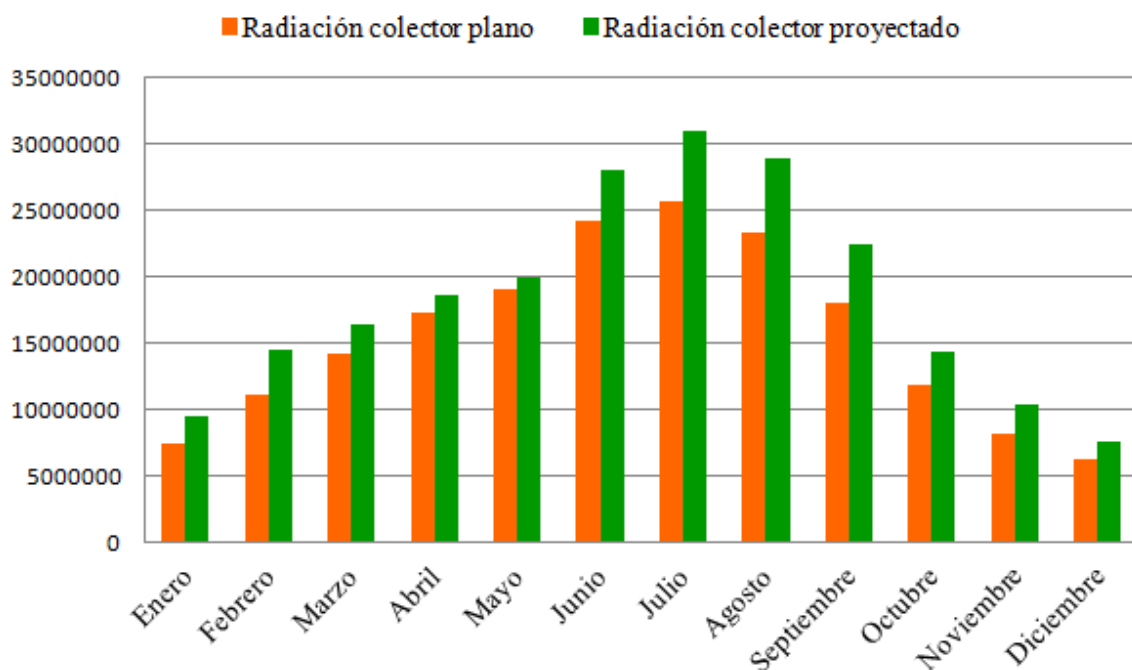
El seguidor se debe diseñar de tal manera que permita la colocación de seguidores a ambos lados, lo que se traduce en que hay que dejar una distancia entre el eje del primer seguidor y el principio de la barra donde se fijará de al menos la mitad de la separación entre ejes que se decida y análoga decisión para el último seguidor y la distancia de su eje respecto al extremo de la barra.

Teniendo en cuenta lo dicho en este apartado y precedentes, se decide:

- La **separación entre ejes deberá ser de 1 metro.**
- La distancia entre los extremos del perfil metálico usado como barra de fijación y el eje del seguidor será de 0,5 m.
- Con estas dimensiones, **el número de colectores por seguidor será de seis.**

Conocido el diseño seguidor, los módulos que lo integran y el tipo de seguimiento que llevan a cabo, se ha realizado un estudio comparativo entre la radiación que captaría uno de sus módulos y un módulo estático en posición horizontal a lo largo del año. Así, se ha obtenido que un módulo del seguidor diseñado, capta una radiación global de  $221.712.177,8 \text{ J/m}^2$  frente a los  $186.716.000 \text{ J/m}^2$  que captaría un seguidor estático horizontal. Esto se traduce en una mayor captación por parte del seguidor proyectado de casi el 19%.

En la Figura 68 se ha representado la evolución a lo largo de un año de la radiación captada por un módulo en posición horizontal permanentemente y un módulo con el módulo proyectado. Se puede ver como en todos los meses del año el colector proyectado capta una mayor radiación que el colector plano.



**Figura 68.** Radiación captada de un módulo proyectado vs módulo horizontal

## 6.2 Valoración económica

La actual situación económica del país, hace que para una adecuada valoración económica del seguidor sea necesario un estudio y sondeo de precios en el mercado actual debido a la constante fluctuación de los mismos.

Tras consultar numerosos suministradores, el precio medio de los módulos en el mercado es de 259 € la unidad con iva. Puesto que son seis módulos, el precio total es de 1.554 € iva incluido.

En la Tabla 12 se presenta a modo de resumen la valoración económica del seguidor solar propuesto de acuerdo a los precios reales con iva consultados a diversas empresas suministradoras de material. El precio total del seguidor asciende a 1648,38 €.

	Precio unitario	Peso	Longitud	Nº de unidades	Precio total
Barra fija	15,83 €/m	--	6,00 m	1	94,98 €
Barra flotante		--	6,00 m	1	94,98 €
Barra longitudinal del soporte	11,80 €/m	--	2,516 m	6	178,13 €
Pletina de arriostamiento	6,7 €/m	--	6,00 m	1	40,20 €

	Precio unitario	Peso	Longitud	Nº de unidades	Precio total
Soporte rectangular	14,80 €/m	--	4,43 m	6	393,38 €
Varilla roscada M39	17,91 €/m	--	2,00 m	1	35,82 €
Bisagra fija	3,97 €/kg	0,999 kg	--	12	47,59 €
Bisagra móvil		1,958 kg	--	12	93,27 €
Cabezal de giro		0,208 kg	--	6	4,954 €
Rueda de cadena	25,00 €	--	--	6	150,00 €
Cadena	2,00 €/m	--	7,20 m	1	144,00 €
Carcasa protectora	30,00 €	--	--	1	30,00 €
Doble junta cardan	70,00 €	--	--	1	70,00 €
Tornillería	--	--	--		50,00 €
Rodamiento rígido de bolas	2,50 €	--	--	12	30,00 €
Rodillo de agujas de empuje	1,20 €	-	--	6	7,20 €
Rodillo de agujas sin anillo interior	3,98 €	--	--	6	23,88 €
Motorreductor	80,00 €	--	--	2	160,00 €
<b>Total</b>					1648,38 €

**Tabla 12.** Valoración económica

## 7 CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden extraer del presente Trabajo Fin de Máster son:

- Se ha diseñado un seguidor adaptable a todo tipo de cubiertas. Su principal característica es la de poder ser instalado en cubiertas tanto planas como inclinadas.
- Es posible asociar el seguidor con otro similar. El seguidor se ha diseñado de tal manera que se pueda asociar con otro seguidor a continuación suya, lo único que habría que modificar sería la longitud de la cadena de transmisión y colocar un motorreductor que se encargue del movimiento ascendente y descendente del nuevo seguidor. De esta manera se conseguiría aumentar la productividad, por lo que bajaría de manera considerable el precio por kWh producido.
- Se trata de un sistema autónomo regulado por medio de un controlador.
- Su mantenimiento es reducido, se limitaría prácticamente al engrase de la cadena y revisión de los motorreductores.
- El montaje y puesta en servicio es muy sencilla, no requiere operaciones complejas de soldadura, basta con atornillar donde proceda y ensamblar correctamente. En caso de un posible deterioro de alguna de sus “piezas”, éstas pueden ser reemplazables pues es fácil obtenerlas en el mercado.
- El seguidor se ha diseñado con materiales resistentes a la oxidación y corrosión (acero galvanizado e inoxidable) y se hace uso de rodamientos para evitar el desgaste entre sus partes móviles. Todo esto garantiza que el seguidor tenga una elevada durabilidad en el tiempo.
- Con sencillas modificaciones se podría adaptar a cualquier tipo de módulos fotovoltaicos

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fernández Salgado José M<sup>a</sup>, Guía completa de la energía solar fotovoltaica (Adaptada al Código Técnico de la Edificación), AMV Ediciones (A. Madrid Vicente, Ediciones); 2007.
- [2] Mendez Muñoz Javier M<sup>a</sup>, Cuervo García Rafael, Energía solar fotovoltaica 7<sup>a</sup> edición, Bureau Veritas Formación, 2011.
- [3] Gay CF, Yerkes JW, Wilson JH. Performance advantages of two-axis tracking for large flat-plate photovoltaic energy systems. In: Proceedings of 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1982. p. 1368–71.
- [4] Tomson T. Discrete two-positional tracking of solar collectors. *Renewable Energy* 2008;33:400–5.
- [5] Roth P, Georgiev A, Boudinov H. Cheap two-axis sun following device. *Energy Conversion and Management* 2005; 46:1179–92.
- [6] Poulek V. Testing the new solar tracker with shape memory alloy actuators. *Conference Record of the Twenty Fourth; IEEE Photovoltaic Specialists Conference* 1994; 1:1131–3.
- [7] Rumala SSN. A shadow method for automatic tracking. *Solar Energy* 1986;37(3):245–7
- [8] Lynch WA, Salameh ZM. Simple electro-optically controlled dual-axis sun tracker. *Solar Energy* 1990;45(2):65–9.
- [9] Hamilton SJ. Sun-tracking solar cell array system. Bachelor of Engineering Thesis Division of Electrical Engineering. Department of Computer Science & Electrical Engineering, University of Queensland; October 1999.
- [10] Abdallah S, Nijmeh S. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Conversion and Management* 2004; 45:1931–9.
- [11] Al-Mohamad A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a suntracking system. *Applied Energy* 2004; 79:345–54.

- [12] Poulek V, Libra M. New solar tracker. *Solar Energy Mater Solar Cells* 1998; 51(2):113–20.
- [13] Korimov KhS, Saqib MA, Akhter P, Ahmed MM, Chatthad JA, Yousafzai SA. A simple photo-voltaic tracking system. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2005;87:49–59.
- [14] Canada J, Utrillas MP, Lozano JAM, Pedros R, Amo JLG, Maj A. Design of a sun tracker for the automatic measurement of spectral irradiance and construction of an irradiance database in the 330–1100 nm range. *Renewable Energy* 2007;32: 2053–68.
- [15] Aliman O, Daut I, Isa M, Adzman MR. Simplification of sun tracking mode to gain high concentration solar energy. *American Journal of Applied Sciences* 2007;4(3):171–5.
- [16] Blanco-Muriel M, Alarcon-Padilla DC, Lopez- Moratalla T, Lara-Coira M. Computing the solar vector. *Solar Energy* 2001; 70(5):431–41.
- [17] Roth P, Georgiev A, Boudinov H. Design and construction of a system for suntracking. *Renewable Energy* 2004; 29:393–402.
- [18] Rubio FR, Ortega MG, Gordillo F, Lopez-Martinez M. Application of new control strategy for sun tracking. *Energy Conversion and Management* 2007;48:2174–84.
- [19] Bakos GC. Design and construction of a two-axis sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy* 2006; 31:2411–21.
- [20] Hession PJ, Bonwick WJ. Experience with a sun tracker. *Solar Energy* 1984;32(1):3–11





# EX NIHILO NIHIL FIT



© Universidad de Córdoba

Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci

14071 CÓRDOBA (España)

Teléfono 957-218373



## Anexo A. Simulación de la barra longitudinal

**Diseñador:** José Reyes Amil

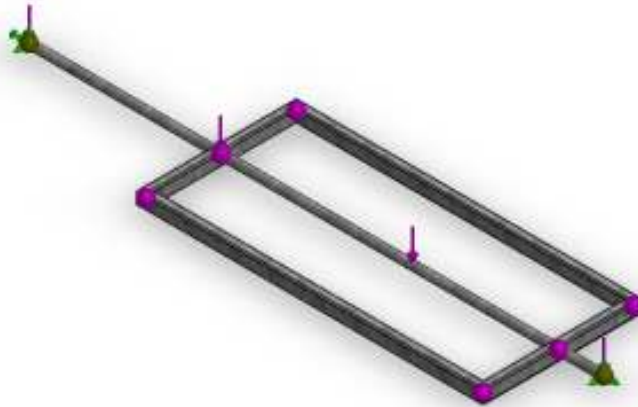
**Nombre de estudio:** Estudio 1

**Tipo de análisis:** Análisis estático

### Tabla de contenidos


Información de modelo .....	2
Propiedades del estudio .....	4
Unidades .....	4
Propiedades de material.....	5
Cargas y sujeciones.....	6
Información de contacto.....	6
Información de malla.....	7
Fuerzas resultantes.....	8
Vigas.....	9
Resultados del estudio .....	11


## Información de modelo



Nombre del modelo: Ensamblaje\_soporte\_modulo  
Configuración actual: Predeterminado

### Sólidos de viga:

Nombre de documento y referencia	Formulación	Propiedades	Ruta al documento/Fecha de modificación
Viga-1(Miembro estructural2[3]) 	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-iso/rectangular tube/60 x 40 x 3.2 Área de sección: 572.67in <sup>2</sup> Longitud:1476mm Volumen:0.000845268m <sup>3</sup> Densidad:7870kg/m <sup>3</sup> Masa:6.65226kg Peso:65.1922N	

<p>Viga-2(Cortar-Extruir4[1])</p> 	<p>Viga - Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/rectangular tube/60 x 40 x 3.2  Área de sección: 572.67in<sup>2</sup>  Longitud:659mm  Volumen:0.000371684m<sup>3</sup>  Densidad:7870kg/m<sup>3</sup>  Masa:2.92515kg  Peso:28.6665N</p>	
<p>Viga-3(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81)</p> 	<p>Viga - Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/rectangular tube/60 x 40 x 3.2  Área de sección: 572.67in<sup>2</sup>  Longitud:659mm  Volumen:0.000370927m<sup>3</sup>  Densidad:7870kg/m<sup>3</sup>  Masa:2.9192kg  Peso:28.6082N</p>	
<p>Viga-4(Miembro estructural2[1])</p> 	<p>Viga - Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/rectangular tube/60 x 40 x 3.2  Área de sección: 572.67in<sup>2</sup>  Longitud:1476mm  Volumen:0.000845268m<sup>3</sup>  Densidad:7870kg/m<sup>3</sup>  Masa:6.65226kg  Peso:65.1922N</p>	
<p>Viga-5(Cortar-Extruir3)</p> 	<p>Viga - Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección- Personalizado  Área de sección: 373.221in<sup>2</sup>  Longitud:2516mm  Volumen:0.000937974m<sup>3</sup>  Densidad:7870kg/m<sup>3</sup>  Masa:7.38185kg  Peso:72.3422N</p>	

---


## Propiedades del estudio

Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla de viga
Tipo de solver	Direct sparse solver
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automática
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Carpeta de resultados	

## Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/mm <sup>2</sup> (MPa)

## Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p> <b>Nombre:</b> Acero galvanizado  <b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico elástico lineal  <b>Criterio de error predeterminado:</b> Desconocido  <b>Límite elástico:</b> 203.943 N/mm<sup>2</sup>  <b>Límite de tracción:</b> 356.901 N/mm<sup>2</sup>  <b>Módulo elástico:</b> 200000 N/mm<sup>2</sup>  <b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.29  <b>Densidad:</b> 7870 g/cm<sup>3</sup> </p>	<p> Sólido 1(Miembro estructural2[3])(soporte módulo-1),  Sólido 2(Cortar-Extruir4[1])(soporte módulo-1),  Sólido 3(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81)(soporte módulo-1),  Sólido 4(Miembro estructural2[1])(soporte módulo-1),  Sólido 1(Cortar-Extruir3)(soporte_barra_33.7 x 4.0x2516-1) </p>
Datos de curva:N/A		

## Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		<b>Entidades:</b> 2 Joint(s) <b>Tipo:</b> Geometría fija

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<b>Entidades:</b> 1 plano(s), 1 Viga(s) <b>Referencia:</b> Planta <b>Tipo:</b> Aplicar fuerza <b>Valores:</b> ---, ---, -1240 N <b>Momentos:</b> ---, ---, --- N·m

## Información de contacto

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
Contacto global		<b>Tipo:</b> Unión rígida <b>Componentes:</b> 1 componente(s) <b>Opciones:</b> Mallado compatible



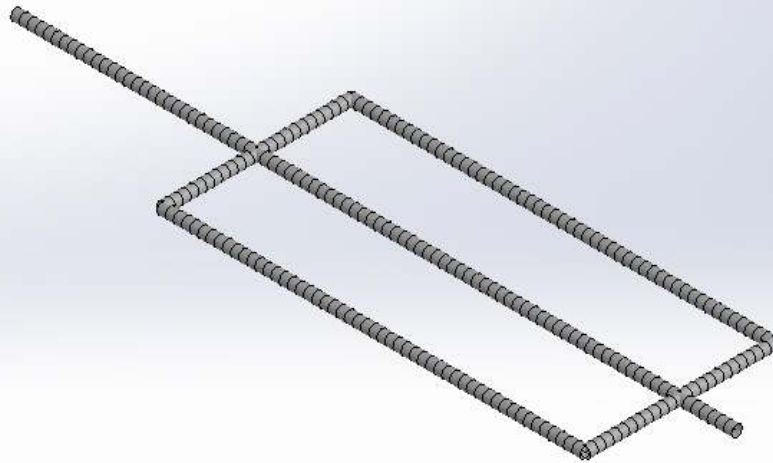
## Información de malla

Tipo de malla	Malla de viga
---------------	---------------

## Información de malla - Detalles

Número total de nodos	245
Número total de elementos	241
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:02
Nombre de computadora:	

Nombre de modelo: Ensamblaje\_soporte\_modulo  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de malla:



---

## Fuerzas resultantes

### Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	0	1240	-1.09635e-010	1240

### Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N·m	-2.58549e-010	6.58738e-008	51.74	51.74

## Vigas

### Fuerzas de viga

Nombre de viga	Junta s	Axial(N )	Corte1(N )	Corte2(N )	Momento1(N·m)	Momento2(N·m)	Torsión(N·m)
Viga-1(Miembro estructural2[3])	1	- 5.20232	51.7945	-0.452255	0.342642	96.6246	2.28148
	2	5.20232	-51.7945	0.452255	0.324886	-20.1759	-2.28148
Viga-2(Cortar-Extruir4[1])	1	- 0.45225 5	-5.20232	-51.7945	2.28148	-0.342642	96.6246
	2	0.45225 5	-5.20232	-51.7945	-2.28148	0.342642	96.6246
	3	0.45225 5	5.20232	51.7945	14.7848	-1.37152	-96.6246
Viga-3(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81)	1	0.45225 5	-22.002	-47.1767	2.2609	-0.446153	-20.1759
	2	- 0.45225 5	-22.0021	-47.1767	-2.2609	0.446153	-20.1759
	3	- 0.45225 5	22.002	47.1767	13.2838	-6.80352	20.1759
Viga-4(Miembro estructural2[1])	1	- 5.20232	51.7945	0.452255	-0.342642	96.6246	-2.28148
	2	5.20232	-51.7945	-0.452255	-0.324886	-20.1759	2.28148
Viga-5(Cortar-Extruir3)	1	6.10383	-598.769	-28.2627	-7.80768	165.412	5.92679e-008
	2	- 6.10383	-639.852	-30.2019	10.2472	-217.094	-5.95264e-008
	3	6.10383	240.106	11.3334	6.61615	-140.169	5.95264e-008
	4	-4.3008	-382.862	-18.0716	-4.0001	84.7454	-4.19077e-008

### Tensiones de viga

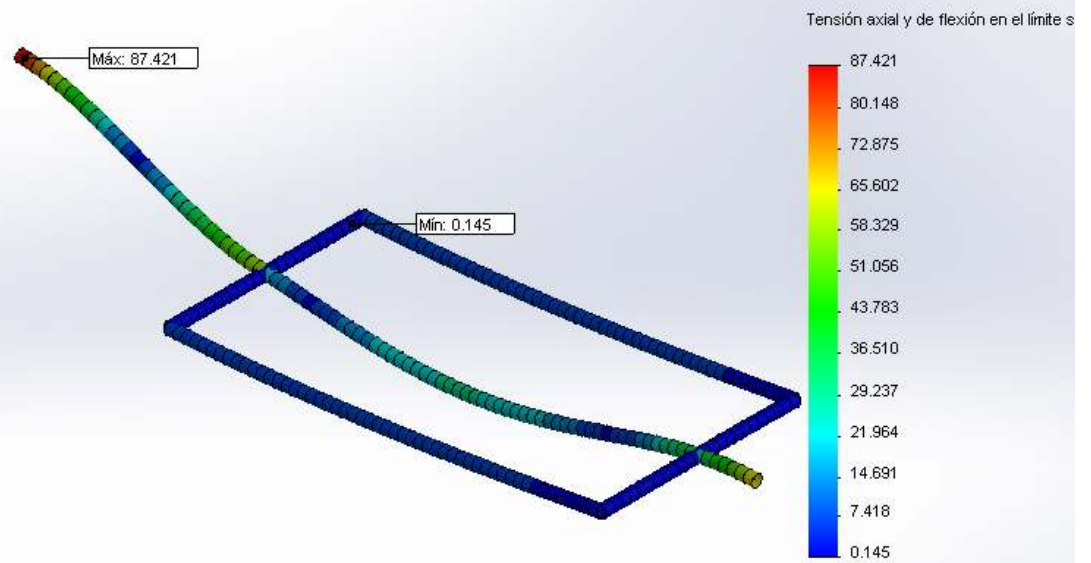
Nombre de viga	Junta s	Axial(N/m^2 )	Dir. de pliegue1(N/m^2 )	Dir. de pliegue2(N/m^2 )	Torsional (N/m^2)	Peor caso(N/m^2 )
Viga-1(Miembro estructural2[3])	1	9084.32	-48716.8	1.08951e+007	248195	1.09529e+007
	2	9084.32	46192.2	2.27497e+006	-248195	2.33025e+006
Viga-2(Cortar-Extruir4[1])	1	789.731	-324380	-38635.2	1.05115e+007	363805
	2	789.731	-324380	-38635.2	1.05115e+007	363805

	3	789.731	2.1021e+006	154648	- 1.05115e+00 7	2.25754e+006
Viga-3(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81)	1	-789.731	-321454	-50306.8	- 2.19487e+00 6	372550
	2	-789.731	-321454	-50306.8	- 2.19487e+00 6	372550
	3	-789.731	1.88869e+006	767143	2.19487e+00 6	2.65662e+006
Viga-4(Miembro estructural2[1])	1	9084.32	48716.8	1.08951e+007	-248194	1.09529e+007
	2	9084.32	-46192.2	2.27497e+006	248194	2.33025e+006
Viga-5(Cortar-Extruir3)	1	16354.5	-3.13997e+006	-6.65228e+007	0.0119177	6.66133e+007
	2	16354.5	-4.12104e+006	-8.73077e+007	-0.0119697	8.74212e+007
	3	16354.5	2.66078e+006	5.63708e+007	0.0119697	5.645e+007
	4	-11523.5	-1.6087e+006	-3.40816e+007	-0.00842691	3.41311e+007

## Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	TXY: Tensión cortante en dir. Y en plano YZ	0.145491 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Elemento: 54	87.4212 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Elemento: 153

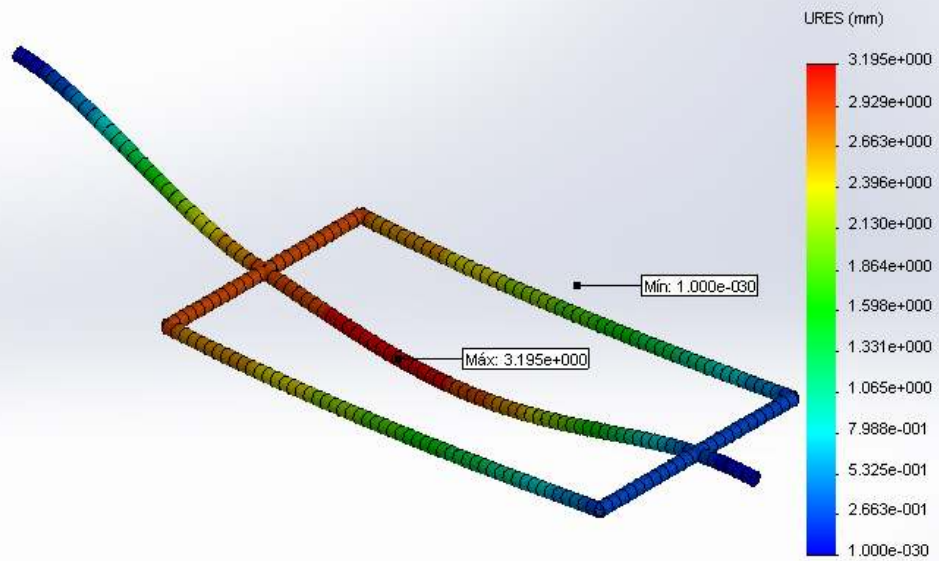
Nombre de modelo: Ensamblaje\_soporte\_modulo  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Tensión axial y de flexión en el límite superior Tensiones1  
Escala de deformación: 78.7471



Estudio de tensiones de la barra longitudinal

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 153	3.19504 mm Nodo: 198

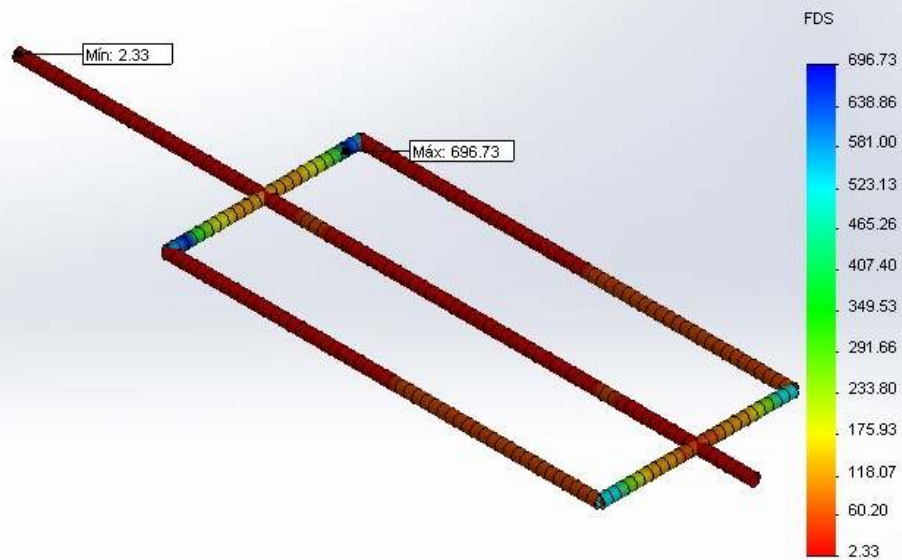
Nombre de modelo: Ensamblaje\_soporte\_modulo  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1  
Escala de deformación: 78.7471



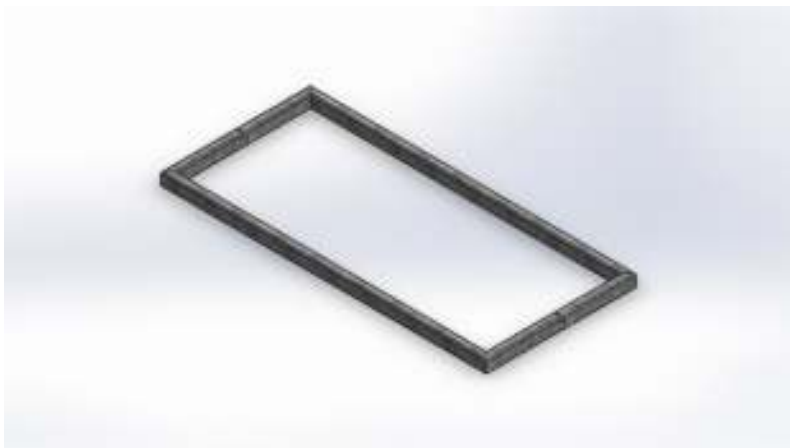
Estudio de desplazamientos de la barra longitudinal

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	2.33288 Nodo: 153	696.729 Nodo: 55

Nombre de modelo: Ensamblaje\_soporte\_modulo  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 2.3



Estudio del Factor de Seguridad de la barra longitudinal



## Anexo B: Simulación del soporte rectangular del módulo fotovoltaico

**Diseñador:** José Reyes Amil

**Nombre de estudio:** Estudio del soporte rectangular del módulo fotovoltaico

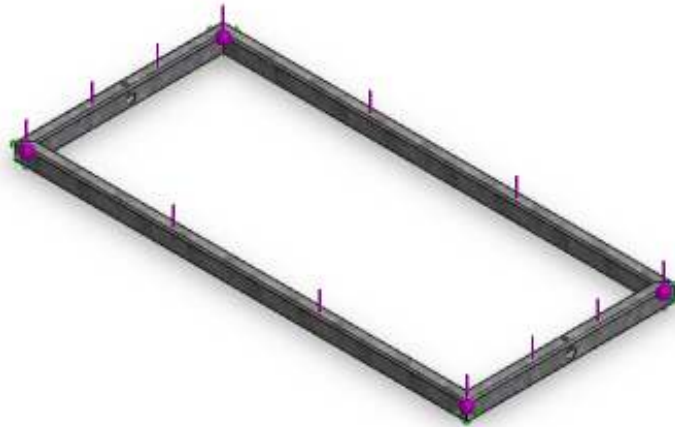
**Tipo de análisis:** Análisis estático

### Tabla de Contenidos

Información de modelo .....	2
Propiedades del estudio .....	3
Unidades .....	4
Propiedades de material.....	4
Cargas y sujeciones.....	5
Información de malla.....	6
Fuerzas resultantes.....	6
Vigas .....	7
Resultados del estudio .....	8







## Información de modelo



Nombre del modelo: soporte módulo  
Configuración actual: Predeterminado<Como mecanizada>

### Sólidos de viga:

Nombre de documento y referencia	Formulación	Propiedades	Ruta al documento/Fecha de modificación
Viga-5(Miembro estructural2[3]) 	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-iso/rectangular tube/60 x 40 x 3.2 Área de sección: 572.67in <sup>2</sup> Longitud:1476mm Volumen:0.000845268m <sup>3</sup> Densidad:7870kg/m <sup>3</sup> Masa:6.65226kg Peso:65.1922N	
Viga-6(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81[2]) 	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-iso/rectangular tube/60 x 40 x 3.2 Área de sección: 572.67in <sup>2</sup> Longitud:659mm Volumen:0.00037088m <sup>3</sup> Densidad:7870kg/m <sup>3</sup> Masa:2.91882kg Peso:28.6045N	

<p>Viga-7(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81[1])</p> 	<p>Viga - Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/rectangular tube/60 x 40 x 3.2  Área de sección: 572.67in<sup>2</sup>  Longitud:659mm  Volumen:0.00037088m<sup>3</sup>  Densidad:7870kg/m<sup>3</sup>  Masa:2.91882kg  Peso:28.6045N</p>	
<p>Viga-8(Miembro estructural2[1])</p> 	<p>Viga - Sección transversal uniforme</p>	<p>Estándar de sección-iso/rectangular tube/60 x 40 x 3.2  Área de sección: 572.67in<sup>2</sup>  Longitud:1476mm  Volumen:0.000845268m<sup>3</sup>  Densidad:7870kg/m<sup>3</sup>  Masa:6.65226kg  Peso:65.1922N</p>	

## Propiedades del estudio

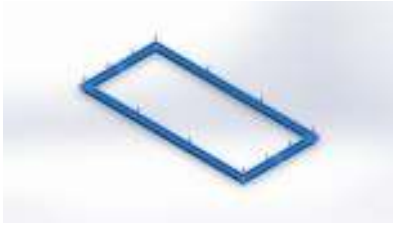
Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla de viga
Tipo de solver	Direct sparse solver
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automática
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Carpeta de resultados	



## Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/mm <sup>2</sup> (MPa)

## Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: Acero galvanizado</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Límite elástico: 203.943 N/mm<sup>2</sup></p> <p>Límite de tracción: 356.901 N/mm<sup>2</sup></p> <p>Módulo elástico: 200000 N/mm<sup>2</sup></p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.29</p> <p>Densidad: 7870 g/cm<sup>3</sup></p>	<p>Sólido 1(Miembro estructural2[3])(soporte módulo),</p> <p>Sólido 2(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81[2])(soporte módulo),</p> <p>Sólido 3(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81[1])(soporte módulo),</p> <p>Sólido 4(Miembro estructural2[1])(soporte módulo)</p>
Datos de curva: N/A		

## Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		<p>Entidades: 4 Joint(s)                      Tipo: Geometría fija</p>

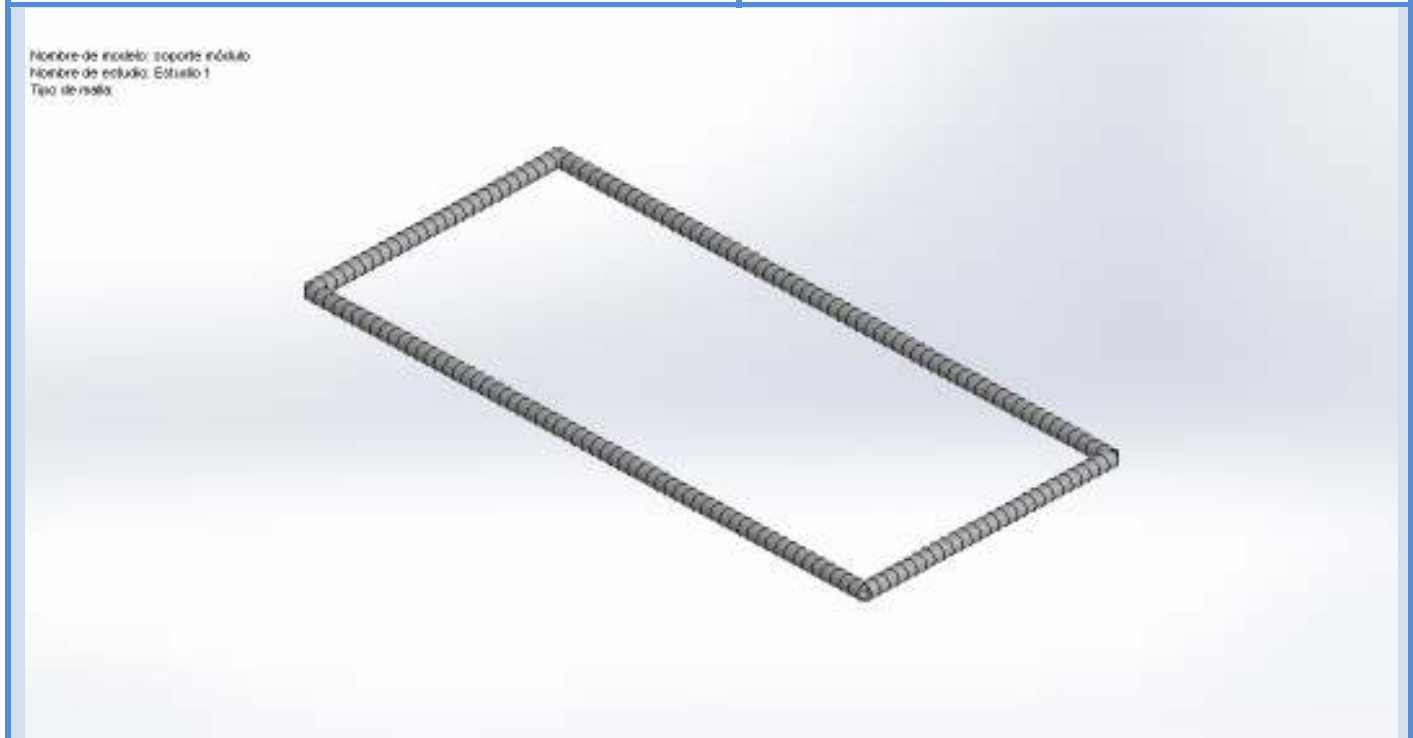
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<p>Entidades: 1 plano(s), 4 Viga(s)                      Referencia: Planta                      Tipo: Aplicar fuerza                      Valores: ---, ---, -1240 N                      Momentos: ---, ---, --- N·m</p>

## Información de malla

Tipo de malla	Malla de viga
---------------	---------------

## Información de malla - Detalles

Número total de nodos	178
Número total de elementos	174
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:03
Nombre de computadora:	



## Fuerzas resultantes

### Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	2.5878e-011	5294.8	0	5294.8

### Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N·m	0	-2.3093e-013	0	2.3093e-013



## Vigas

### Fuerzas de viga

Nombre de viga	Juntas	Axial(N)	Corte1(N)	Corte2(N)	Momento1(N·m)	Momento2(N·m)	Torsión(N·m)
Viga-5(Miembro estructural2[3])	1	0	-915.12	0	0	-225.12	0
	2	0	-915.12	0	0	225.12	0
Viga-6(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81[2])	1	7.18234e-014	169.393	-371.811	40.8373	18.605	-2.80284e-017
	2	2.07557e-014	169.393	-371.811	-40.8373	-18.605	2.80284e-017
Viga-7(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81[1])	1	4.91881e-013	169.393	371.811	-40.8373	18.605	-1.91952e-016
	2	1.42145e-013	169.393	371.811	40.8373	-18.605	1.91952e-016
Viga-8(Miembro estructural2[1])	1	6.15663e-015	-915.12	0	0	-225.12	0
	2	8.84518e-013	-915.12	0	0	225.12	0

### Tensiones de viga

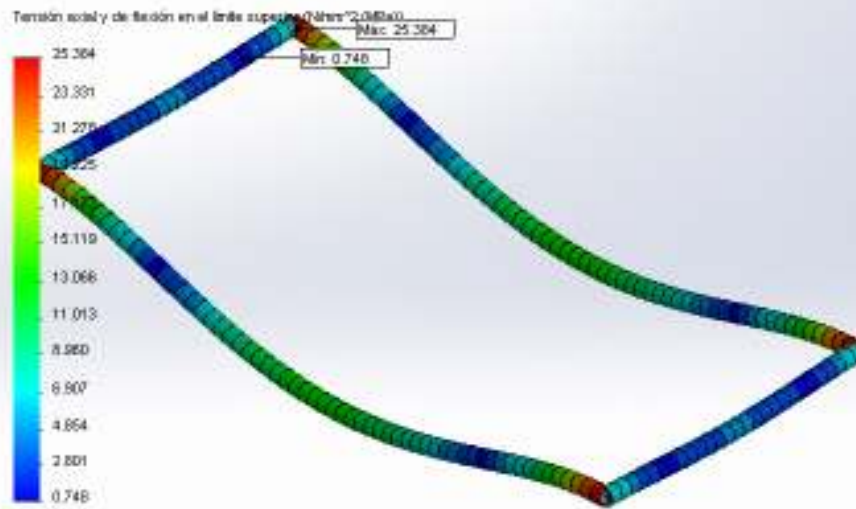
Nombre de viga	Juntas	Axial(N/m <sup>2</sup> )	Dir. de pliegue1(N/m <sup>2</sup> )	Dir. de pliegue2(N/m <sup>2</sup> )	Torsional(N/m <sup>2</sup> )	Peor caso(N/m <sup>2</sup> )
Viga-5(Miembro estructural2[3])	1	0	0	-2.53837e+007	0	2.53837e+007
	2	0	0	-2.53837e+007	0	2.53837e+007
Viga-6(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81[2])	1	1.25419e-010	-5.80623e+006	2.09784e+006	-3.04912e-012	7.90407e+006
	2	3.62438e-011	-5.80623e+006	2.09784e+006	3.04912e-012	7.90407e+006
Viga-7(Avellanado para tornillo tapón avellanado de clavija hexagonal de M81[1])	1	-8.58927e-010	5.80623e+006	2.09784e+006	-2.08818e-011	7.90407e+006
	2	-2.48215e-010	5.80623e+006	2.09784e+006	2.08818e-011	7.90407e+006
Viga-8(Miembro estructural2[1])	1	-1.07508e-011	0	-2.53837e+007	0	2.53837e+007
	2	1.54455e-009	0	-2.53837e+007	0	2.53837e+007



## Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	TXY: Tensión cortante en dir. Y en plano YZ	0.748122 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Elemento: 66	25.3837 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Elemento: 1

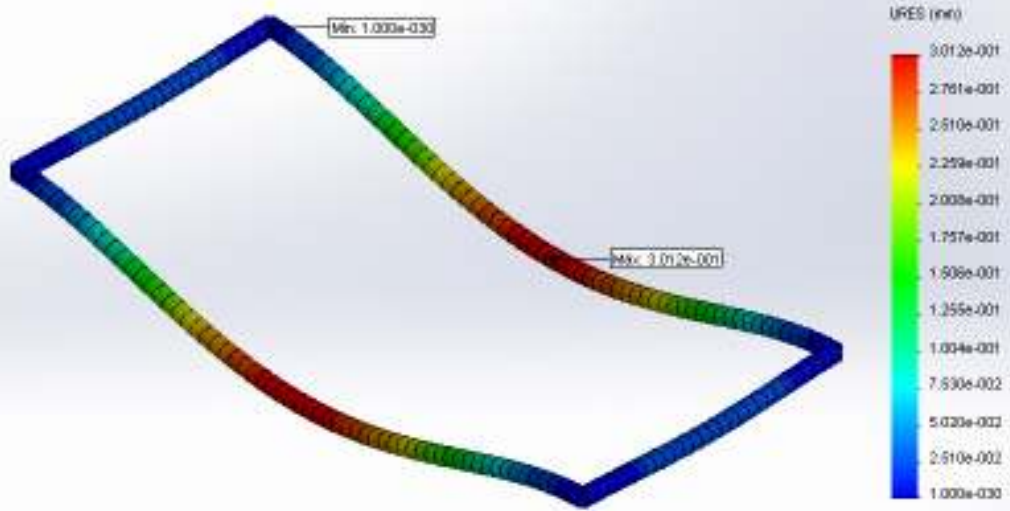
Nombre de modelo: soporte módulo  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Tensión axial y de flexión en el límite superior Tensiones1  
Escala de deformación: 514 E



Estudio de tensiones del soporte rectangular del módulo fotovoltaico

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 1	0.30118 mm Nodo: 31

Nombre de modelo: soporte módulo  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1  
Escala de deformación: 514 E

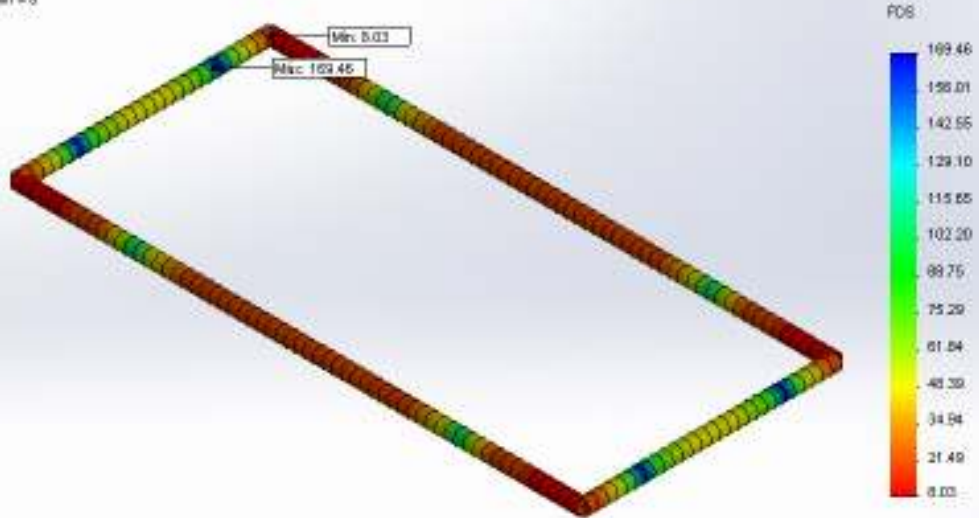


Estudio de desplazamientos del soporte rectangular del módulo fotovoltaico



Nombre	Tipo	Mín.	Máy.
Factor de seguridad1	Automático	8.0344 Nodo: 1	169.458 Nodo: 67

Nombre de modelo: soporte módulo  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 8



Factor de seguridad del soporte rectangular del módulo fotovoltaico



## Anexo C: Simulación de barra fija (120 x 60 x 5x6000)

**Diseñador:** José Reyes Amil

**Nombre de estudio:** Simulación de barra fija

**Tipo de análisis:** Análisis estático

### Tabla de contenidos

Información de modelo.....	2
Propiedades del estudio .....	3
Unidades .....	3
Propiedades de material.....	4
Cargas y sujeciones .....	4
Información de malla .....	5
Fuerzas resultantes .....	6
Resultados del estudio .....	7


**Información de modelo**



**Nombre del modelo:** barra\_fija\_120 x 60 x 5.0x6000.0

**Configuración actual:** 120 x 60 x 5.0x6000.0

**Sólidos**

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Perforador para roscar para macho de roscar para M301 	Sólido	<b>Masa:77.1746 kg</b> <b>Volumen:0.00980617 m<sup>3</sup></b> <b>Densidad:7870 kg/m<sup>3</sup></b> <b>Peso:756.311 N</b>	

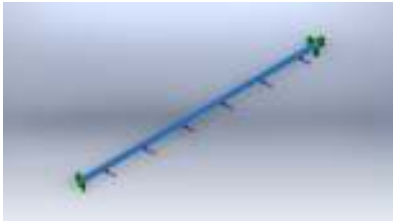
### Propiedades del estudio

Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SolidWorks Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automática
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	

### Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/mm <sup>2</sup> (MPa)

### Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<b>Nombre:</b> Acero galvanizado <b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico elástico lineal <b>Criterio de error predeterminado:</b> Tensión máxima de von Mises <b>Límite elástico:</b> 203.943 N/mm <sup>2</sup> <b>Límite de tracción:</b> 356.901 N/mm <sup>2</sup> <b>Módulo elástico:</b> 200000 N/mm <sup>2</sup> <b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.29 <b>Densidad:</b> 7870 g/cm <sup>3</sup>	Sólido 1(Perforador para roscar para macho de roscar para M301)(barra flotante_120 x 60 x 5.0x6000.0)
Datos de curva:N/A		

### Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<b>Entidades:</b> 2 cara(s) <b>Tipo:</b> Geometría fija		
<b>Fuerzas resultantes</b>				
<b>Componentes</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Resultante</b>
<b>Fuerza de reacción(N)</b>	7203.16	-0.112	-2.88477	7203.16
<b>Momento de reacción(N·m)</b>	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<b>Entidades:</b> 1 plano(s) <b>Referencia:</b> Plane3 <b>Tipo:</b> Aplicar fuerza <b>Valores:</b> ---, ---, -1200 N

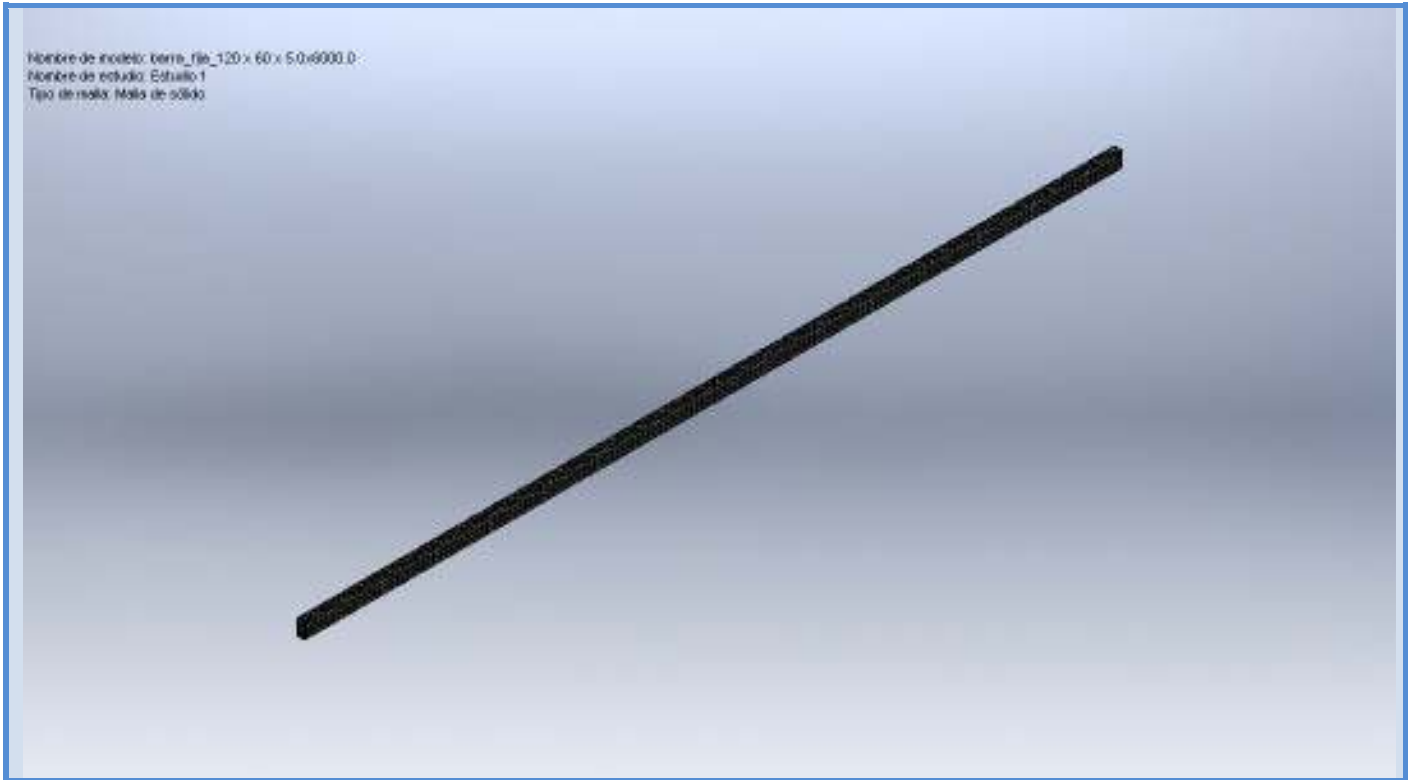
---

### Información de malla

<b>Tipo de malla</b>	Malla sólida
<b>Mallador utilizado:</b>	Malla basada en curvatura
<b>Puntos jacobianos</b>	4 Puntos
<b>Tamaño máximo de elemento</b>	0 mm
<b>Tamaño mínimo del elemento</b>	0 mm
<b>Calidad de malla</b>	Elementos cuadráticos de alto orden

### Información de malla - Detalles

<b>Número total de nodos</b>	25034
<b>Número total de elementos</b>	13162
<b>Cociente máximo de aspecto</b>	34.964
<b>% de elementos cuyo cociente de aspecto es &lt; 3</b>	0.175
<b>% de elementos cuyo cociente de aspecto es &gt; 10</b>	20.2
<b>% de elementos distorsionados (Jacobiana)</b>	0
<b>Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):</b>	00:00:10
<b>Nombre de computadora:</b>	



**Fuerzas resultantes**

**Fuerzas de reacción**

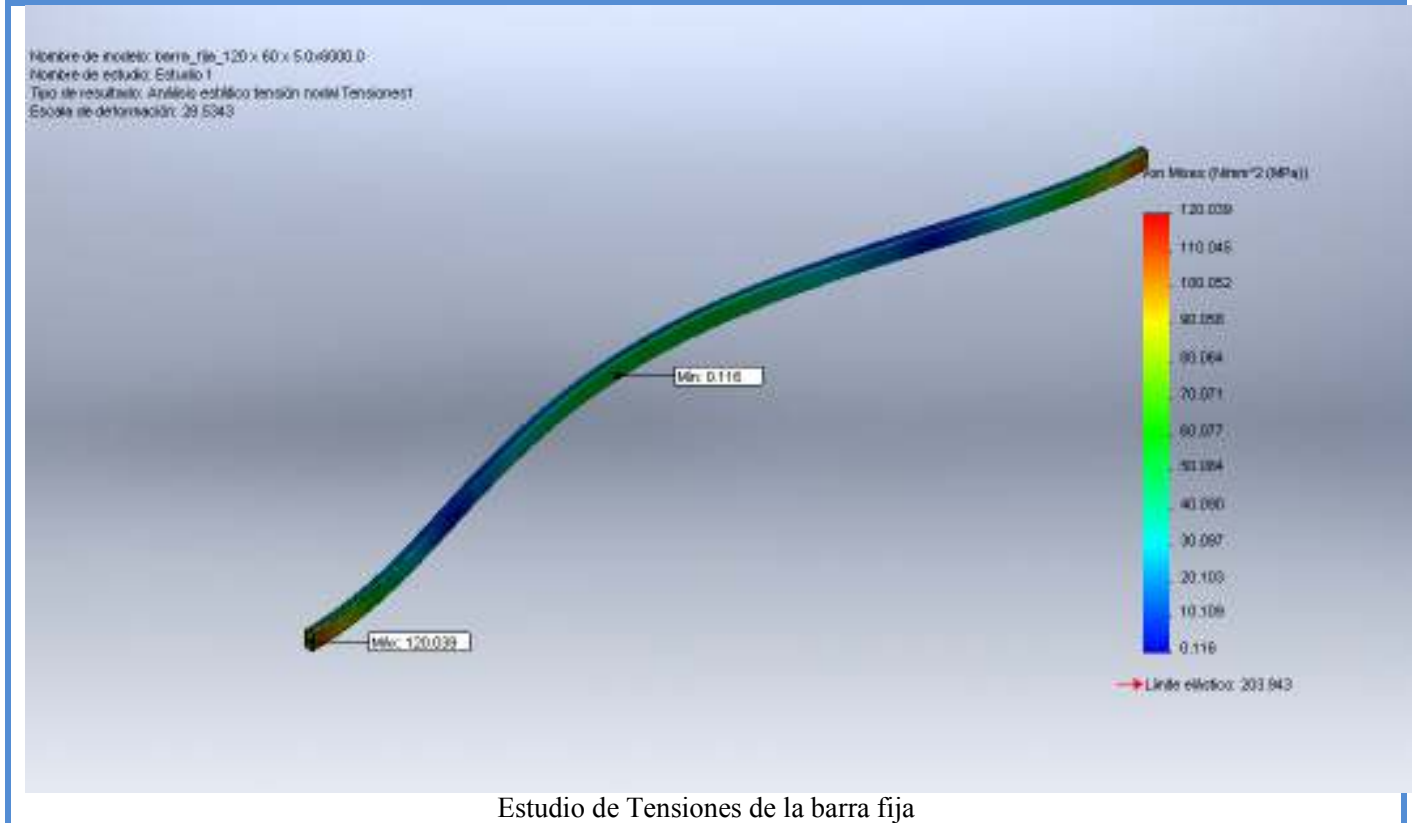
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	7203.16	-0.112	-2.88477	7203.16

**Momentos de reacción**

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N·m	0	0	0	0

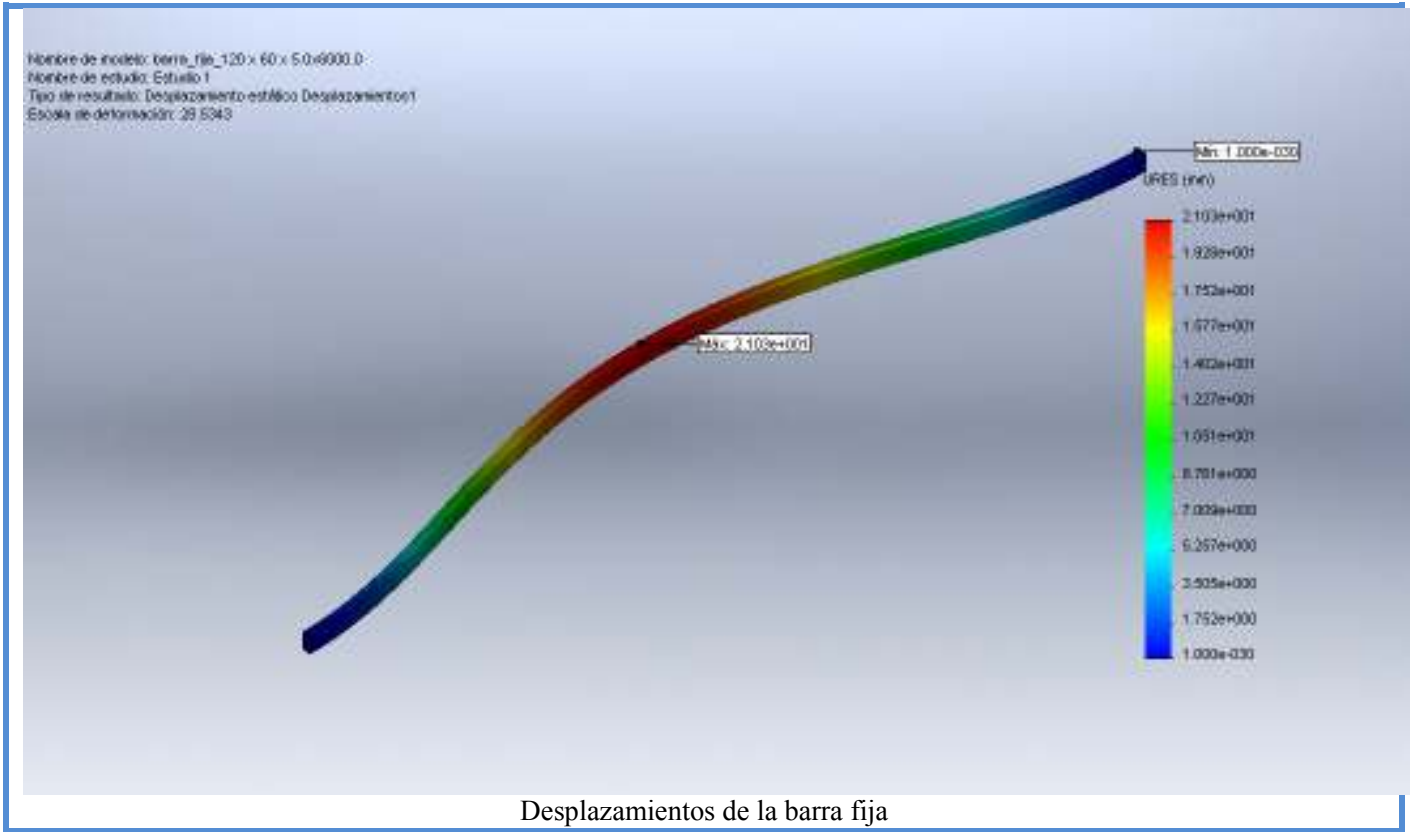
## Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.115853 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Nodo: 15586	120.039 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Nodo: 852



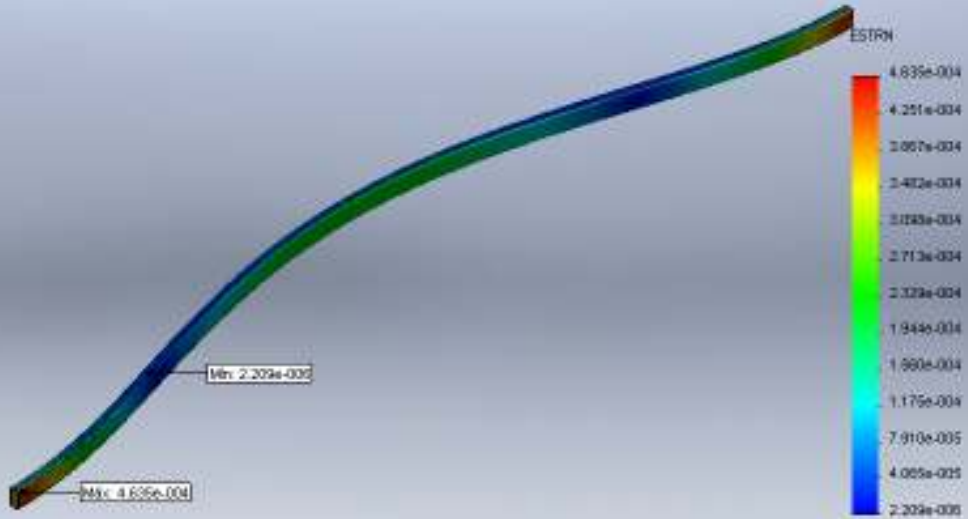
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 29	21.0274 mm Nodo: 24937





Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	2.20897e-006 Elemento: 3862	0.000463539 Elemento: 6254

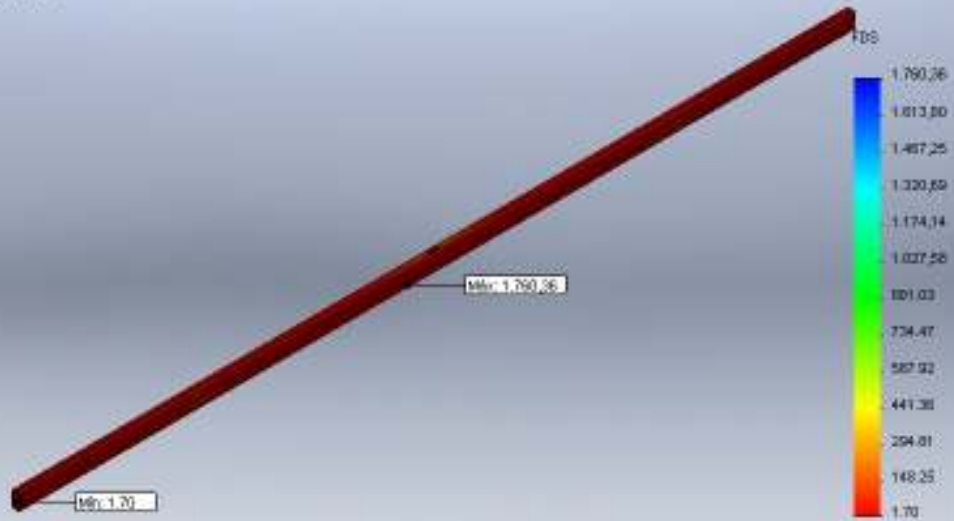
Nombre de modelo: barra\_fija\_120 x 60 x 5.0x6000.0  
 Nombre de estudio: Estudio1  
 Tipo de resultado: Deformación unitaria estática (Deformaciones unitarias)  
 Escala de deformación: 20.5343



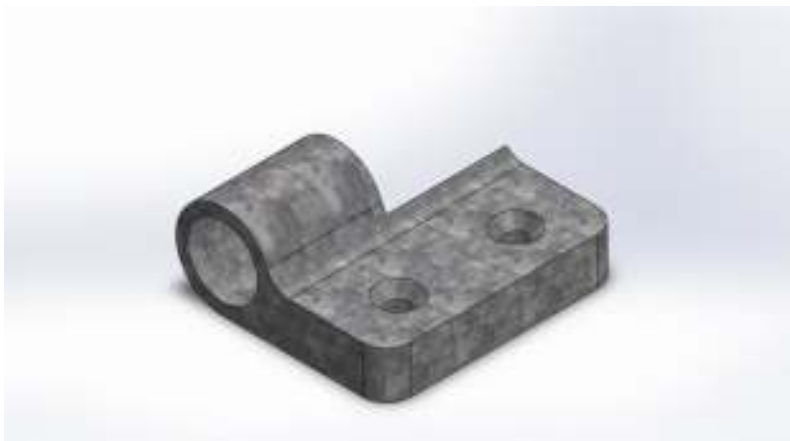
Deformaciones unitarias de la barra fija

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	1.69898 Nodo: 852	1760.36 Nodo: 15586

Nombre de modelo: barra\_fija\_120 x 60 x 5.0x6000.0  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Automático  
Distribución de factor de seguridad: FDS min = 1.7



Factor de seguridad de la barra fija



## Anexo E. Simulación de la hoja fija de la bisagra

**Diseñador:** José Reyes Amil

**Nombre de estudio:** Estudio de la hoja fija de la bisagra

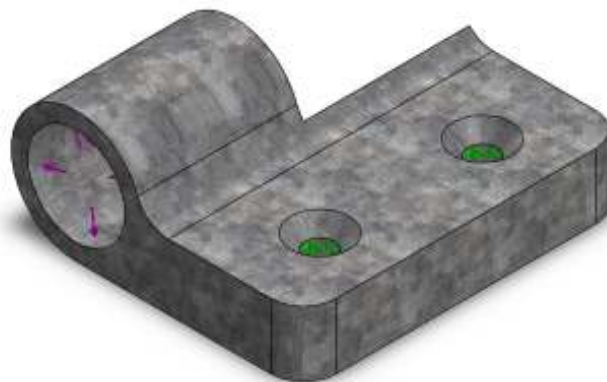
**Tipo de análisis:** Análisis estático

### Table de contenidos

Información de modelo.....	2
Propiedades del estudio .....	3
Unidades .....	3
Propiedades de material.....	4
Cargas y sujeciones .....	4
Información de malla .....	5
Fuerzas resultantes .....	6
Resultados del estudio .....	7




## Información de modelo



Nombre del modelo: bisagra\_fija  
 Configuración actual: Predeterminado

### Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Cortar-Extruir8 	Sólido	Masa:0.998852 kg Volumen:0.000126919 m <sup>3</sup> Densidad:7870 kg/m <sup>3</sup> Peso:9.78875 N	

## Propiedades del estudio


Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SolidWorks Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automática
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	

## Unidades

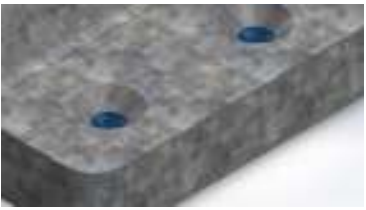
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/mm <sup>2</sup> (MPa)



### Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: Acero galvanizado                      Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal                      Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises                      Límite elástico: 203.943 N/mm<sup>2</sup>                      Límite de tracción: 356.901 N/mm<sup>2</sup>                      Módulo elástico: 200000 N/mm<sup>2</sup>                      Coeficiente de Poisson: 0.29                      Densidad: 7870 g/cm<sup>3</sup></p>	Sólido 1(Cortar-Extruir8)(bisagra_fija)
Datos de curva:N/A		

### Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 2 cara(s)                      Tipo: Geometría fija</p>		
<b>Fuerzas resultantes</b>				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0.000157215	-8.90065e-005	0.000230528	0.000292886
Momento de reacción(N·m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<b>Entidades:</b> 1 cara(s) <b>Tipo:</b> Aplicar fuerza normal <b>Valor:</b> 1288.2 N

### Información de malla

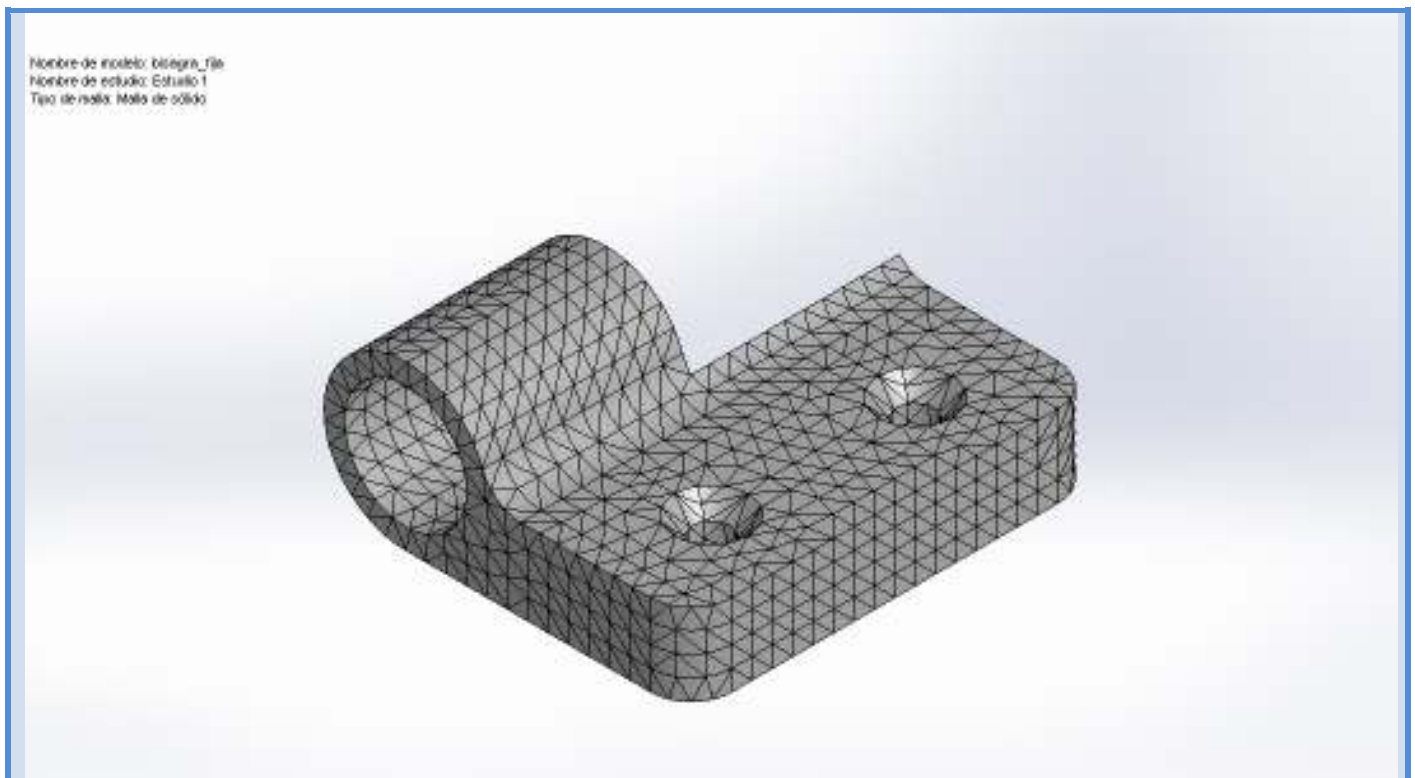
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	5.02696 mm
Tolerancia	0.251348 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

### Información de malla - Detalles

Número total de nodos	12682
Número total de elementos	7781
Cociente máximo de aspecto	4.2127
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99.3
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04
Nombre de computadora:	







## Fuerzas resultantes

### Fuerzas de reacción

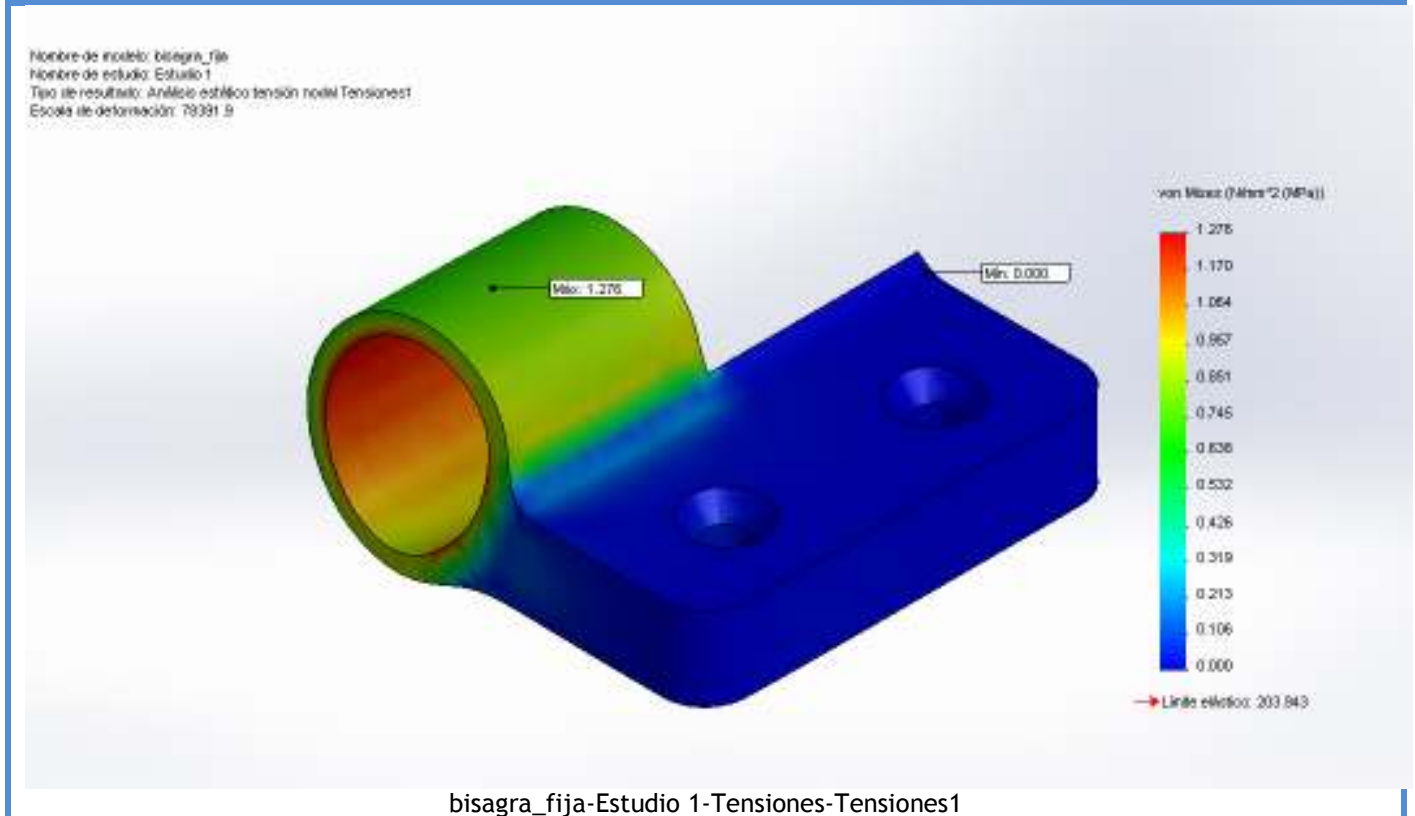
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	0.000157215	-8.90065e-005	0.000230528	0.000292886

### Momentos de reacción

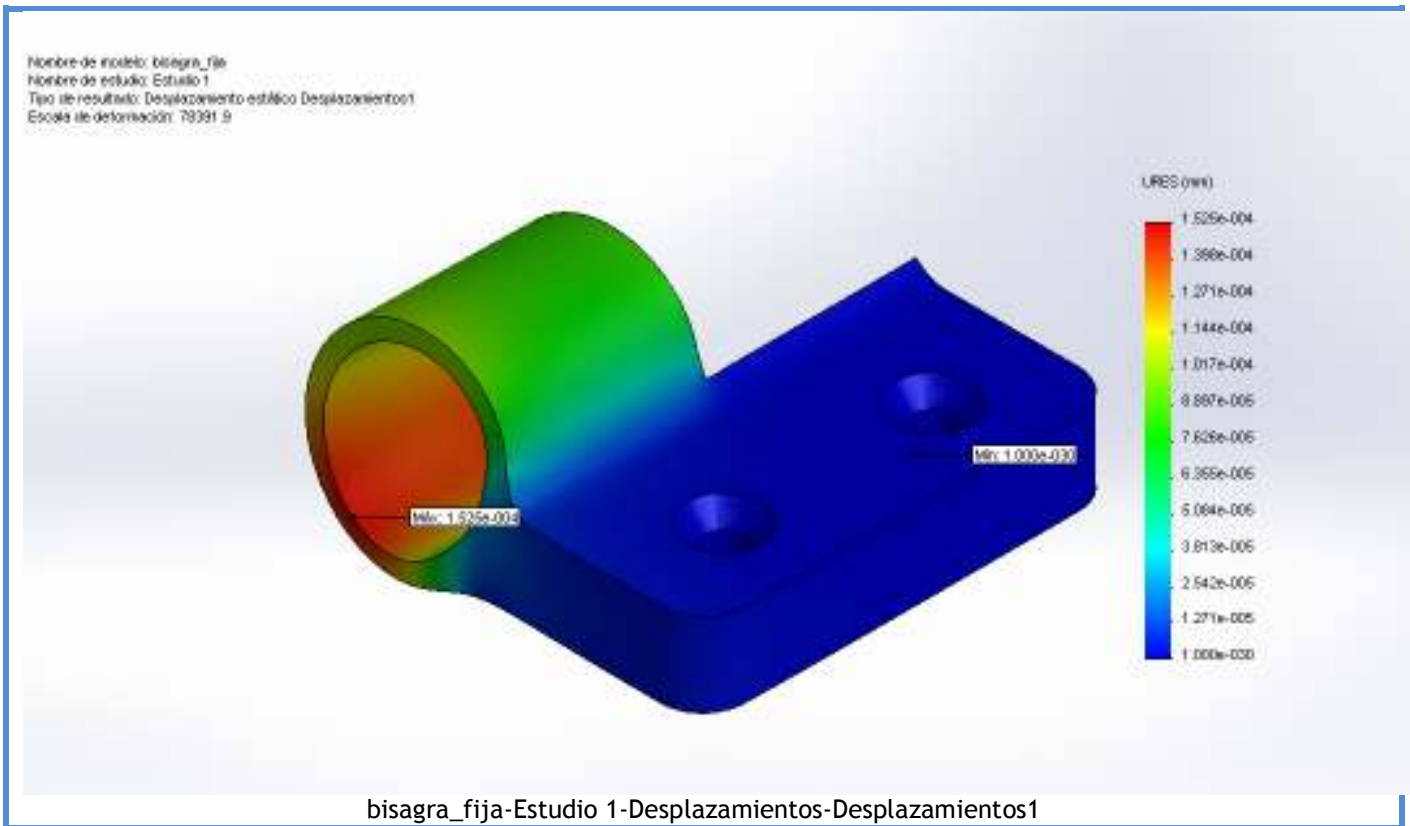
Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N·m	0	0	0	0

## Resultados del estudio

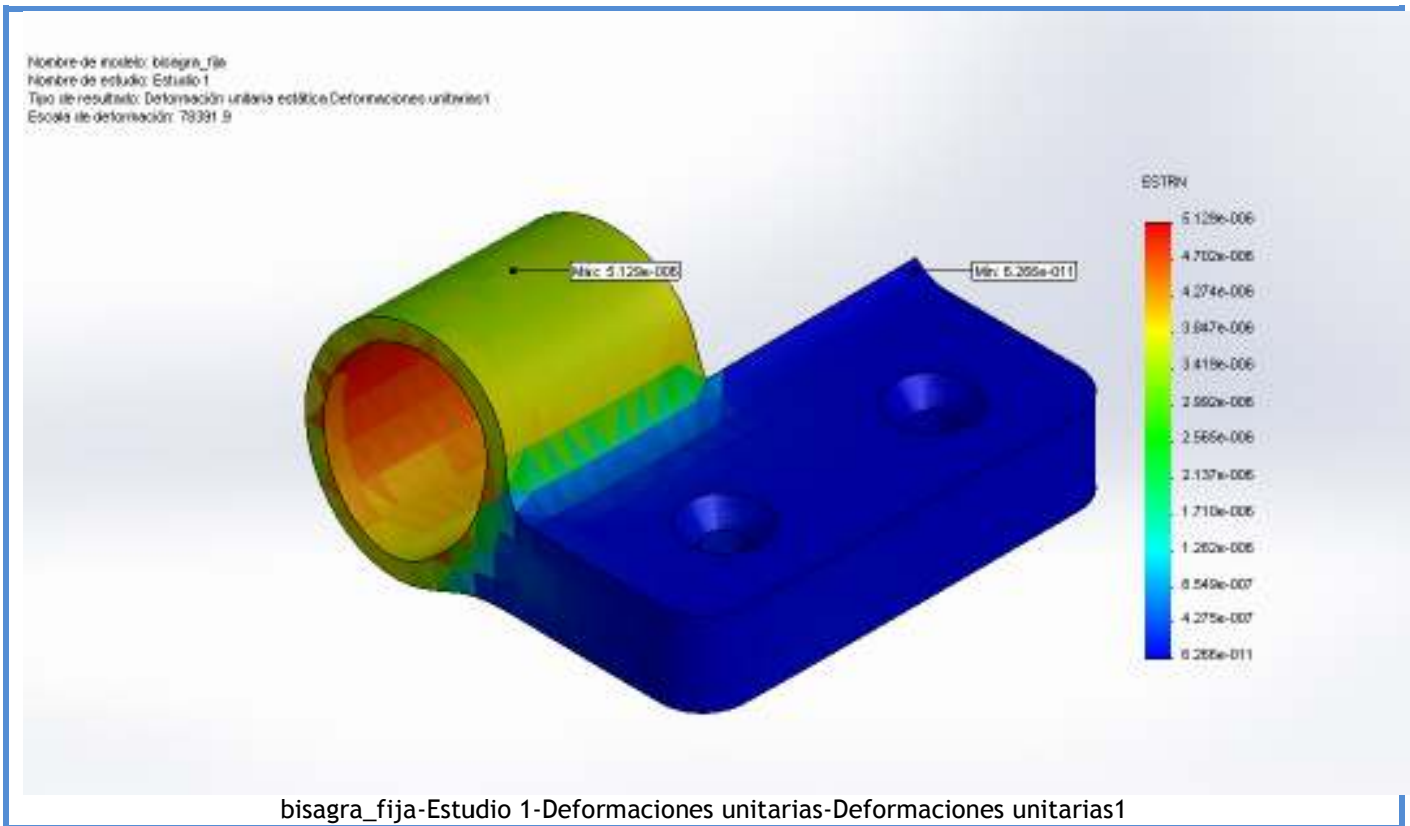
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	2.16925e-005 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Nodo: 9981	1.27646 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Nodo: 10952



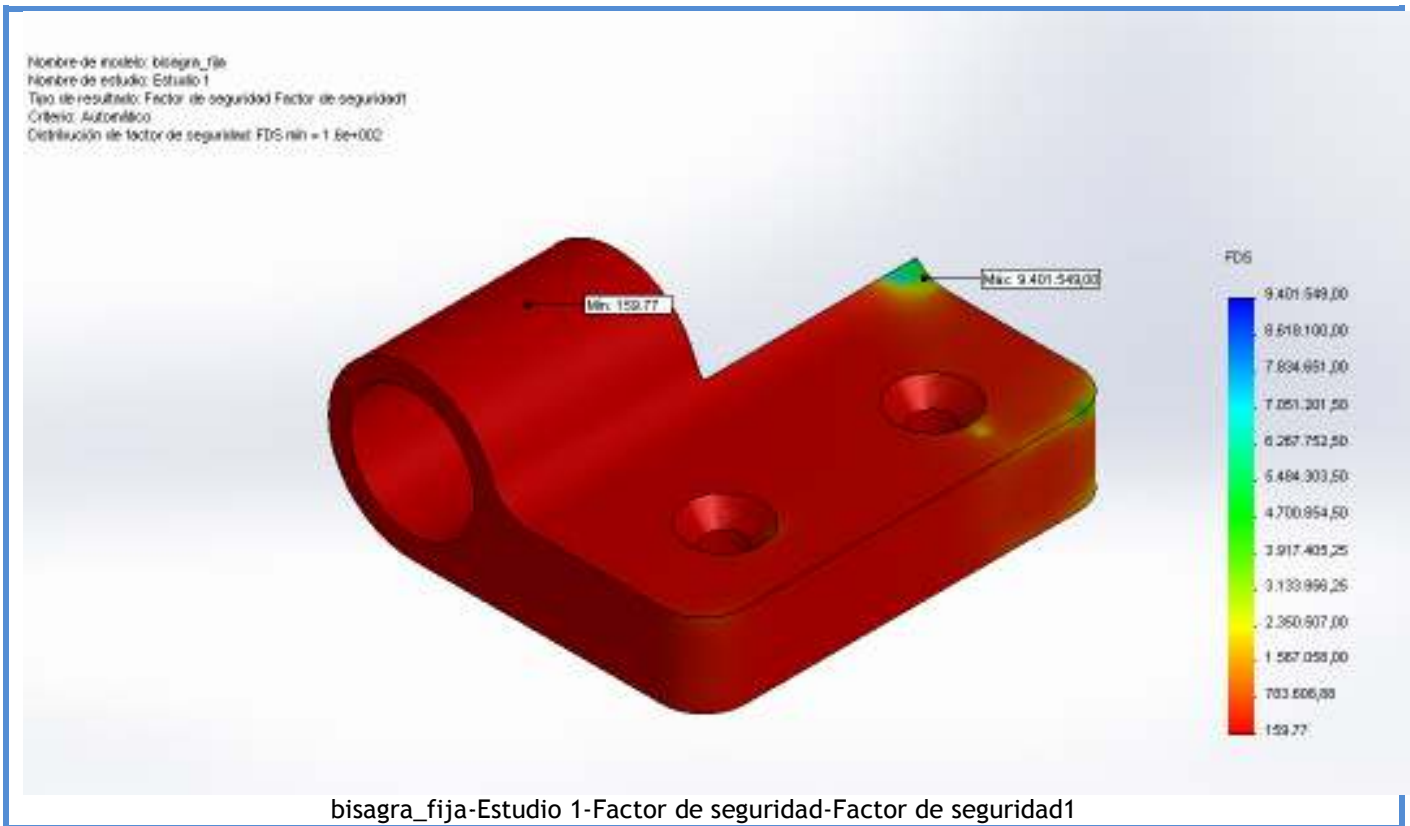
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 1	0.000152527 mm Nodo: 11918

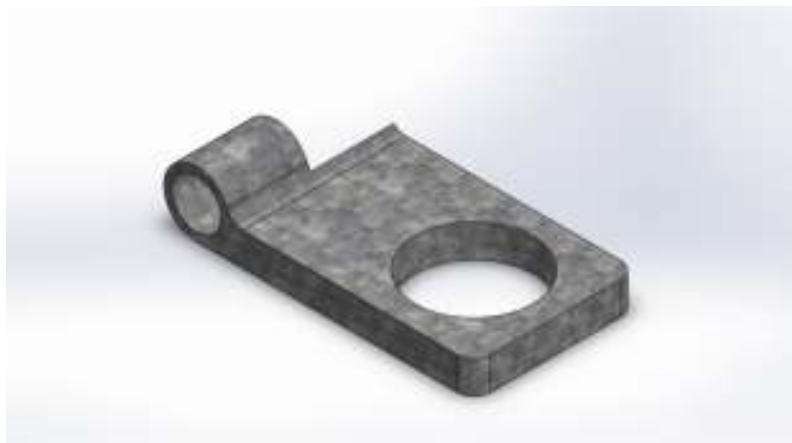


Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	6.26634e-011 Elemento: 3554	5.12921e-006 Elemento: 5977



Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	159.772 Nodo: 10952	9.40155e+006 Nodo: 9981





## Anexo D. Simulación de la hoja móvil de la bisagra

**Diseñador:** José Reyes Amil

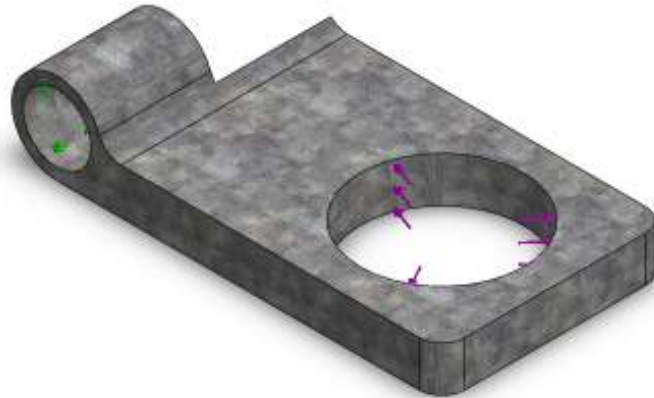
**Nombre de estudio:** Estudio de la hoja móvil de la bisagra

**Tipo de análisis:** Análisis estático

### Tabla de contenidos


Información de modelo.....	2
Propiedades del estudio .....	3
Unidades .....	3
Propiedades de material.....	4
Cargas y sujeciones .....	4
Fuerzas resultantes .....	5
Resultados del estudio .....	6

## Información de modelo



Nombre del modelo: bisagra\_móvil  
Configuración actual: Predeterminado

### Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Cortar-Extruir8 	Sólido	Masa: 1.95791 kg Volumen: 0.000248782 m <sup>3</sup> Densidad: 7870 kg/m <sup>3</sup> Peso: 19.1875 N	

## Propiedades del estudio

Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SolidWorks Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automática
Gran desplazamiento	Desactivar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	


## Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/mm <sup>2</sup> (MPa)





## Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<b>Nombre:</b> Acero galvanizado <b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico elástico lineal <b>Criterio de error predeterminado:</b> Tensión máxima de von Mises <b>Límite elástico:</b> 203.943 N/mm <sup>2</sup> <b>Límite de tracción:</b> 356.901 N/mm <sup>2</sup> <b>Módulo elástico:</b> 200000 N/mm <sup>2</sup> <b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.29 <b>Densidad:</b> 7870 g/cm <sup>3</sup>	Sólido 1(Cortar-Extruir8)(bisagra_móvil)
Datos de curva: N/A		

## Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Bisagra fija-1		<b>Entidades:</b> 1 cara(s) <b>Tipo:</b> Bisagra fija

### Fuerzas resultantes

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0.0169553	0.00470831	0.00257045	0.0177836
Momento de reacción(N·m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<b>Entidades:</b> 1 cara(s) <b>Tipo:</b> Aplicar fuerza normal <b>Valor:</b> 1288.2 N

---

## Fuerzas resultantes

### Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.0169553	0.00470831	0.00257045	0.0177836

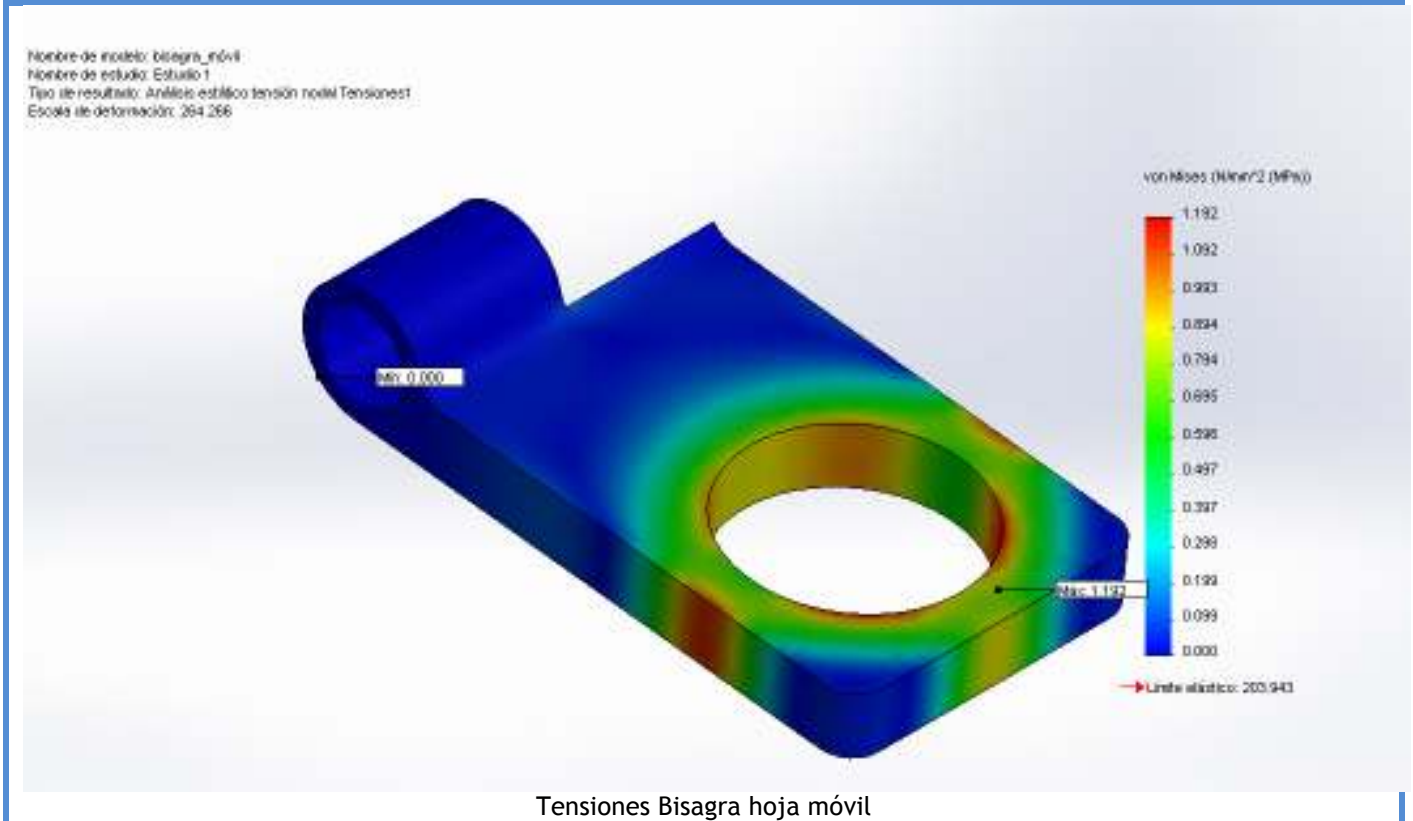
### Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Suma X	Suma Y	Suma Z	Resultante
Todo el modelo	N·m	0	0	0	0



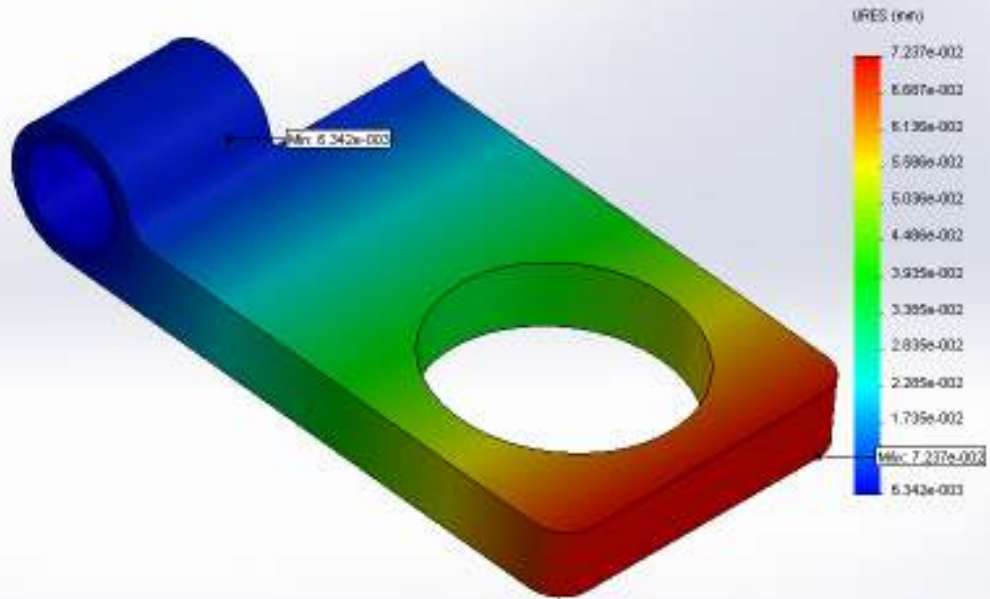
## Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	3.53132e-005 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Nodo: 6670	1.19168 N/mm <sup>2</sup> (MPa) Nodo: 9818



Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0.00634226 mm Nodo: 4507	0.0723676 mm Nodo: 421

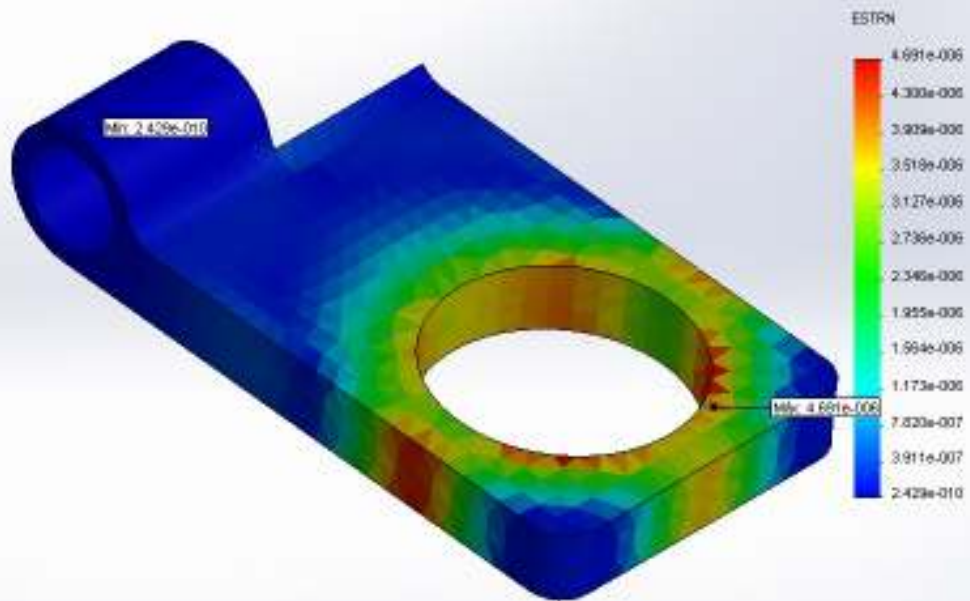
Nombre de modelo: bisagra\_móvil  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1  
Escala de deformación: 264.266



Desplazamientos Bisagra hoja móvil

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	2.42886e-010 Elemento: 3062	4.69094e-006 Elemento: 5504

Nombre de modelo: bisagra\_móvil  
Nombre de estudio: Estudio 1  
Tipo de resultado: Deformación unitaria equivalente (Deformaciones unitarias1)  
Escala de deformación: 264.266



Deformaciones unitarias Bisagra hoja móvil