

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA  
SANTIAGO - CHILE



# ANÁLISIS DE FALLA EN SISTEMAS DE SEGUIMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Sebastián Ignacio Jeria Sobarzo

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Ing. Luis Guzmán Bonet  
Profesor Correferente: Ing. Mario Villa Durán

Septiembre 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi familia que siempre ha estado junto a mí, por el amor y apoyo incondicional que me han dado durante toda mi vida, por haberme entregado las herramientas para seguir creciendo como persona y enseñarme el valor del trabajo duro para alcanzar mis metas. Agradezco a mi hermana Tamara, mi aliada desde siempre, por su alegría y perseverancia que me han inspirado a seguir adelante incluso en los días más difíciles.

A mis amigos, que han hecho de la carrera universitaria un viaje inigualable, siempre tendrán mi gratitud por su valioso apoyo. Agradezco también a Claudia, mi compañera de vida, quien le ha dado sentido y alegría a cada uno de mis días, espero poder hacer que se sienta orgullosa.

Agradezco a mis profesores por entregarme los conocimientos necesarios para poder desempeñarme como ingeniero y enfrentar los futuros desafíos laborales.

Por último, quiero agradecer a mi profesor guía, Luis Guzmán, por su apoyo durante todo este proceso en el que he desarrollado este trabajo. Sus enseñanzas me han permitido llegar más lejos de lo que me habría imaginado.

## RESUMEN

Este trabajo consiste en un análisis profundo del funcionamiento y modos de falla de los sistemas de seguimiento de paneles fotovoltaicos o Solar Trackers, ubicados en el norte de Chile. Estos equipos se encargan de sostener los paneles fotovoltaicos y de rotarlos durante todo el día para lograr una posición perpendicular entre el panel y los rayos del sol, de esta forma se aumenta la eficiencia energética del panel.

El problema que existe con las actuales plantas de seguidores solares es que los planes de mantenimiento están basados en proyectos realizados en otros países con contextos operacionales muy diferentes, y hoy en día nuestros Solar Trackers ya están mostrando síntomas de fallas, como por ejemplo, la desviación en la posición angular de algunos equipos, la cual es una problemática bastante importante considerando que se trata de equipos que basan su rentabilidad en la precisión de su posición angular.

El objetivo principal de este trabajo es determinar la forma en que un sistema de seguimiento de panel fotovoltaico puede fallar considerando el contexto en el que opera. Para lograr este objetivo se partió definiendo la teoría que sustenta la utilización de un sistema de seguimiento solar. Posteriormente se definió el funcionamiento y las partes del sistema Solar Tracker a analizar. Luego se hizo un análisis FMEA sobre las partes o componentes considerados.

## **ABSTRACT**

This work consists of an in-depth analysis of the operation and failure modes of the tracking systems of photovoltaic panels or Solar Trackers, located in northern Chile. These teams are responsible for supporting the photovoltaic panels and rotate them throughout the day to achieve a perpendicular position between the panel and the sun's rays, thus increasing the energy efficiency of the panel.

The problem that exists with the current solar tracking plants is that the maintenance plans are based on projects carried out in other countries with very different environmental contexts, and today our Solar Trackers are already showing symptoms of failures such as, for example, the deviation in the angular position of some equipment, which is a very important problem considering that it is about equipment that bases its profitability on the accuracy of its angular position.

The main objective of this work is to determine the way in which a photovoltaic panel tracking system can fail, considering the context in which it operates. To achieve this objective, it was decided defining the theory that supports the use of a solar tracking system. Subsequently, the operation and the parts of the Solar Tracker system to be analyzed were defined. Then an FMEA analysis was made on the parts or components considered.

## **GLOSARIO**

FMECA: *Failure mode, effects and criticality analysis*

FMEA: *Failure Mode and Effect Analysis*

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María.

RCM: *Reliability Centred Maintenance*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT .....	III
GLOSARIO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	2
1. MARCO TEÓRICO .....	3
1.1. GEOMETRÍA SOLAR .....	3
1.2. SOLAR TRACKER.....	6
1.3. MODELO DE ESTUDIO .....	7
1.3.1. COMPONENTES DEL MODELO .....	8
1.3.2. CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	13
1.3.2.1. RANGO DE TRABAJO .....	13
1.3.2.2. VELOCIDADES DE VIENTO.....	15
1.3.2.3. INCLINACIÓN DEL TERRENO .....	16
1.3.2.4. RANGOS DE TEMPERATURA .....	17
1.3.2.5. NIVELES DE CORROSIÓN AMBIENTAL .....	20
1.4. PROBLEMÁTICAS ACTUALES DE SOLAR TRACKING EN EL NORTE DE CHILE .....	24
1.5. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM) .....	26
1.5.1. NORMATIVAS .....	28
1.5.1.1. SAE JA1011 .....	28

1.5.1.1.1. FALLAS FUNCIONALES .....	29
1.5.1.1.2. MODOS DE FALLA .....	29
1.5.1.1.3. EFECTOS DE LA FALLA.....	29
1.5.1.1.4. CONSECUENCIAS DE LA FALLA .....	30
1.5.1.1.5. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO.....	30
1.5.1.2. SAE JA1012 .....	31
1.5.1.2.1. ALGORITMO DE DECISIÓN RCM .....	31
1.5.2. ANÁLISIS FMEA .....	35
1.5.3. PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL .....	37
2. MODELO DE ANÁLISIS.....	38
2.1. DISEÑO .....	38
2.2. MATERIALES .....	45
3. MÉTODO ELEMENTOS FINITOS .....	45
4. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.....	49
4.1. PREPARACIÓN .....	49
4.2. MALLADO .....	51
4.3. CONDICIONES DE OPERACIÓN EVALUADAS .....	52
4.3.1. CONDICIÓN ESTÁTICA INICIAL .....	52
4.3.2. CARENCIA DE SOPORTE .....	54
4.3.3. INCLINACIÓN DEL TERRENO .....	54
4.3.4. EFECTO DEL VIENTO.....	56
4.3.5. SIMULACIÓN TRANSITORIA .....	58
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	59
5.1. SIMULACIÓN ESTÁTICA INICIAL.....	60
5.2. SIMULACIÓN CON PÉRDIDA DE SOPORTE.....	62

5.3. SIMULACIÓN CON INCLINACIÓN NORTE-SUR.....	64
5.4. SIMULACIÓN CON INCLINACIÓN ESTE-OESTE.....	67
5.5. SIMULACIÓN CON EFECTO DEL VIENTO.....	70
5.6. SIMULACIÓN TRANSITORIA.....	75
6. CONCLUSIONES.....	78
7. RECOMENDACIONES .....	84
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa mundial del potencial fotovoltaico por radiación. (Solargis, 2017) .....	2
Figura 2: Trayectoria del Sol en distintas épocas del año. (M. Reyes, 2018) .....	4
Figura 3: Declinación terrestre en diferentes épocas del año. (M. Reyes, 2018) .....	4
Figura 4: Ángulos solares desde la perspectiva de un observador en la Tierra. (M. Reyes, 2018) .....	5
Figura 5: Ángulos solares para un plano inclinado. (M. Reyes, 2018) .....	6
Figura 6: Esquema de seguridad frente a vientos fuertes .....	8
Figura 7: Cimentación tipo Hinca. ....	9
Figura 8: Cimentación tipo Tornillo. ....	9
Figura 9: Apoyo simple, que sostiene el eje y permite su rotación. ....	10
Figura 10: Apoyo motor, que sostiene el motor reductor que permite el giro. ....	10
Figura 11: Transmisión Eje-Motor. ....	10
Figura 12: Transmisión Eje-Eje .....	11
Figura 13: Datos y esquema del motor reductor del Solar Tracker. ....	12
Figura 14: Soporte de módulos. ....	13
Figura 15: Imagen de la inclinación del terreno Planta Finis Terrae. (Cooperativa, 2016) ..	16
Figura 16: Promedio de temperatura para cada mes y hora. (Ministerio de Energía, 2020) .....	17
Figura 17: Radiación incidente horizontal promedio cada hora del día ( <b><math>Wm^2</math></b> ). (Ministerio de Energía, 2020) .....	18
Figura 18: Curva de temperatura del sistema por radiación reflejada. ....	20
Figura 19: Ubicación de los puntos de medición de corrosión. (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012) .....	21
Figura 20: Concentraciones de contaminantes medidos en un año <b><math>mgm^2día</math></b> . (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012) .....	22

Figura 21: Velocidad de corrosión promedio del acero al carbono. (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012).....	23
Figura 22: Velocidad de corrosión promedio del acero galvanizado. (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012).....	23
Figura 23: Distribución de fallas en plantas fotovoltaicas en Chile (CORFO, 2017).....	25
Figura 24: Tipos de falla de los seguidores solares. ....	25
Figura 25: Primera parte del algoritmo de decisión RCM de la norma SAE JA1012. (SAE-JA1012, 2002) .....	33
Figura 26: Segunda parte del algoritmo de decisión RCM de la norma SAE JA1012. (SAE-JA1012, 2002) .....	34
Figura 27: Solar Tracker montado en la planta Assuruá de Brasil (Proveedor de Solar Trackers, s.f.).....	38
Figura 28: Solar Tracker montado en la planta Floresta de Brasil (Proveedor de Solar Trackers, s.f.).....	39
Figura 29: Solar Tracker con módulo bi-faciales (Proveedor de Solar Trackers, s.f.).....	39
Figura 30: Solar Tracker montado en Calama, Chile (Proveedor de Solar Trackers, s.f.).....	40
Figura 31: Esquema del perfil utilizado en la cimentación del Solar Tracker. ....	41
Figura 32: Esquema del soporte de paneles utilizado en el Solar Tracker.....	41
Figura 33: Pieza del apoyo que sostiene el eje y permite el movimiento rotatorio del Solar Tracker.....	42
Figura 34: Cimentación y apoyo rotatorio con sección cuadrada para el eje del Solar Tracker. ....	43
Figura 35: Ensamble completo del Solar Tracker que será utilizado para la simulación. ....	44
Figura 36: Montaje completo del Solar Tracker.....	44
Figura 37: Ejemplo de geometría llevada a elementos finitos. (Budynas & Nisbett, 2008) 46	
Figura 38: Ejemplo de elemento lineal. (Budynas & Nisbett, 2008) .....	48
Figura 39: Propiedades del acero S275 ingresados en ANSYS. ....	50

Figura 40: Geometría importada desde Inventor. ....	51
Figura 41: Mallado del Solar Tracker.....	52
Figura 42: Aplicación de presión representando el peso de los paneles. ....	53
Figura 43: Condición de empotramiento de los perfiles en la zona azul. ....	53
Figura 44: Cimentación elegida para la pérdida de soporte. ....	54
Figura 45: Inclinación de 15° en dirección Norte-Sur.....	55
Figura 46: Inclinación de 15° en dirección Este-Oeste. ....	56
Figura 47: Posición crítica para ráfagas de viento.....	57
Figura 48: Rediseño del Solar Tracker en SpaceClaim.....	59
Figura 49: Deformación total en condición estática inicial. ....	60
Figura 50: Esfuerzo equivalente de Von Mises en condición estática inicial. ....	61
Figura 51: Acercamiento al máximo valor de esfuerzo equivalente.....	61
Figura 52: Deformación del mecanismo al perder soporte de una cimentación.....	62
Figura 53: Esfuerzos equivalentes para el caso de pérdida de soporte. ....	63
Figura 54: Acercamiento a la pieza con esfuerzo equivalente máximo. ....	63
Figura 55: Deformación de la estructura con inclinación de 5° Norte-Sur. ....	65
Figura 56: Esfuerzo equivalente con inclinación de 5° Norte-Sur.....	66
Figura 57: Acercamiento a la posición de máximo esfuerzo equivalente con inclinación de 5° Norte-Sur.....	66
Figura 58: Deformación con inclinación de 5° Este-Oeste. ....	68
Figura 59: Esfuerzos equivalentes para una inclinación de 5° Este-Oeste.....	69
Figura 60: Acercamiento al máximo esfuerzo equivalente en inclinación de 5° Este-Oeste. ....	69
Figura 61: Deformación por efecto del viento desde el lado frontal. ....	71
Figura 62: Esfuerzos equivalentes por efecto del viento desde el lado frontal. ....	71

Figura 63: Acercamiento al esfuerzo máximo por efecto del viento desde el lado frontal.	72
Figura 64: Deformación por efecto del viento desde el lado posterior de los paneles. ....	73
Figura 65: Esfuerzos equivalentes por efecto del viento desde lado posterior. ....	73
Figura 66: Acercamiento al esfuerzo máximo por efecto del viento desde el lado posterior. .....	74
Figura 67: Modificación del mallado para la simulación transitoria. ....	76
Figura 68: Diferentes posiciones del mecanismo durante la simulación transitoria. ....	77
Figura 69: Comparación de precios promedio según capacidad instalada entre 2018 y 2019 en Chile. (Ministerio de Energía, 2020) .....	79
Figura 70: Direcciones de inclinación que afectan al soporte del eje. ....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características operacionales de un modelo Solar Tracker utilizado en el norte de Chile. ....	14
Tabla 2: Datos meteorológicos en aeropuerto El Loa, Calama, 2019. (Meteored, 2020)....	15
Tabla 3: Tabla FMEA del Solar Tracker (Parte 1). ....	36
Tabla 4: Esquema de Inspecciones. ....	37
Tabla 5: Propiedades mecánicas del Acero S275. ....	45
Tabla 6: Magnitudes obtenidas de la simulación estática inicial. ....	62
Tabla 7: Magnitudes obtenidas de la simulación con pérdida de soporte. ....	64
Tabla 8: Magnitudes obtenidas de la simulación con inclinación Norte-Sur. ....	67
Tabla 9: Magnitudes obtenidas de la simulación con inclinación Este-Oeste. ....	70
Tabla 10: Magnitudes obtenidas de la simulación con efecto del viento. ....	75
Tabla 11: Esfuerzos equivalentes máximos en soporte de eje. ....	78
Tabla 12: Resumen de los datos obtenidos a partir de las simulaciones. ....	80

## INTRODUCCIÓN

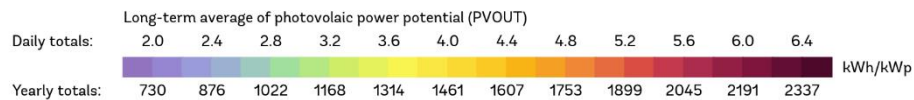
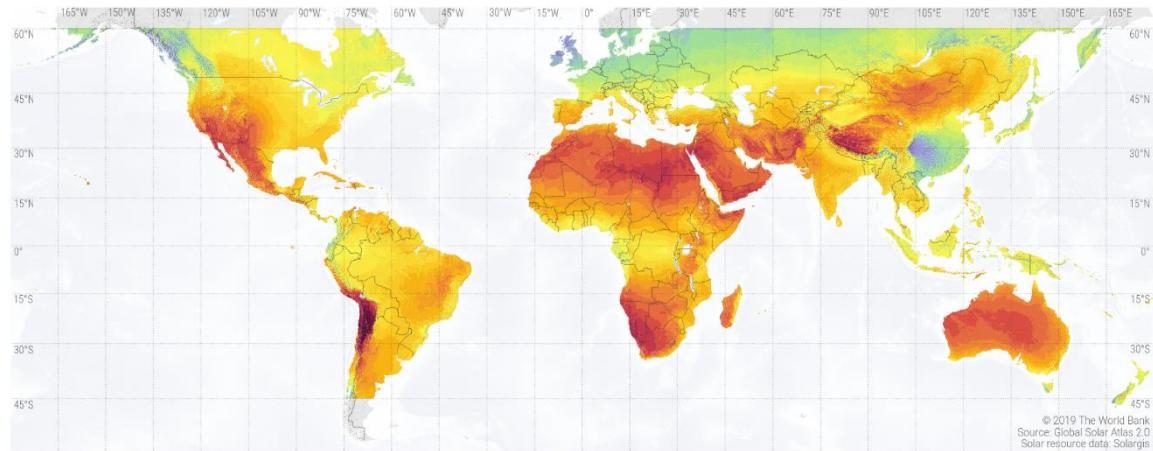
La energía fotovoltaica ha tenido un crecimiento considerable los últimos años, debido a que, entre otros factores, los costos de fabricación de los paneles fotovoltaicos han descendido bastante, esto hace que sea muy rentable instalar una planta de energía fotovoltaica. Sin embargo, la problemática a corto plazo es definir la mejor manera de mantener los sistemas de energía fotovoltaica, considerando la ubicación de las instalaciones y las condiciones en las que operan.

El Solar Tracker que se analizará en este trabajo se diseñará a partir de datos básicos y registros fotográficos de modelos actualmente utilizados en las plantas de energía fotovoltaica del norte de Chile, el cual es un sector caracterizado por ser desértico. Allí es donde se ubican las plantas de energía solar por sus altos niveles de radiación, uno de los más altos del planeta como se muestra en la Figura 1, lo que nos lleva a afirmar que está instalado en un lugar con altas temperaturas durante el día y bajas temperaturas durante la noche, además de la gran cantidad de material particulado, sin olvidar que es una zona de actividad sísmica, al igual que en el resto de Chile continental.

Las empresas que proveen los Solar Trackers a las plantas generadoras son de carácter internacional, es decir que fabrican estos equipos para países de todo el mundo. Sin embargo, la gran mayoría de esos países no tienen condiciones operacionales como las que existen en el norte de Chile, por lo que el plan de mantenimiento podría ser insuficiente.

Para poder hacer un plan de mantenimiento efectivo, que asegure el correcto funcionamiento de la planta al menor costo posible primero es necesario determinar las fallas que podrían llegar a ocurrirle a los equipos en el ambiente en el que operan. Para poder hacer eso primero se estudia el funcionamiento del Solar Tracker junto con sus componentes, posteriormente se analiza el contexto operacional en el que estos equipos trabajan y que variables intervienen en su funcionamiento. Junto con toda esta información se hace un análisis más estructurado, recopilando los modos de falla del mecanismo. Finalmente se procede a armar una simulación considerando todas las variables de operación relevantes para el estudio de falla. Esta simulación pretende reflejar los puntos débiles que puede tener el mecanismo bajo las condiciones estudiadas.

## SOLAR RESOURCE MAP PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

**Figura 1: Mapa mundial del potencial fotovoltaico por radiación. (Solargis, 2017)**

## OBJETIVOS

- Objetivo General:

Determinar la forma en que un sistema de seguimiento de panel fotovoltaico basado en modelos utilizados en el norte de Chile puede fallar, considerando el contexto en el que opera.

- Objetivos Específicos:

- Describir el funcionamiento y la composición del Solar Tracker.
- Determinar las condiciones de operación reales del Solar Tracker.
- Emplear herramientas de análisis introductorio como FMECA para determinar los modos de falla de los componentes del Solar Tracker.
- Realizar un estudio a fondo de las posibles fallas estructurales a corto, mediano y largo plazo mediante el cálculo y la simulación.
- Proponer mejoras en los planes de mantenimiento actualmente empleados en las plantas de Solar Trackers considerando el estudio realizado.

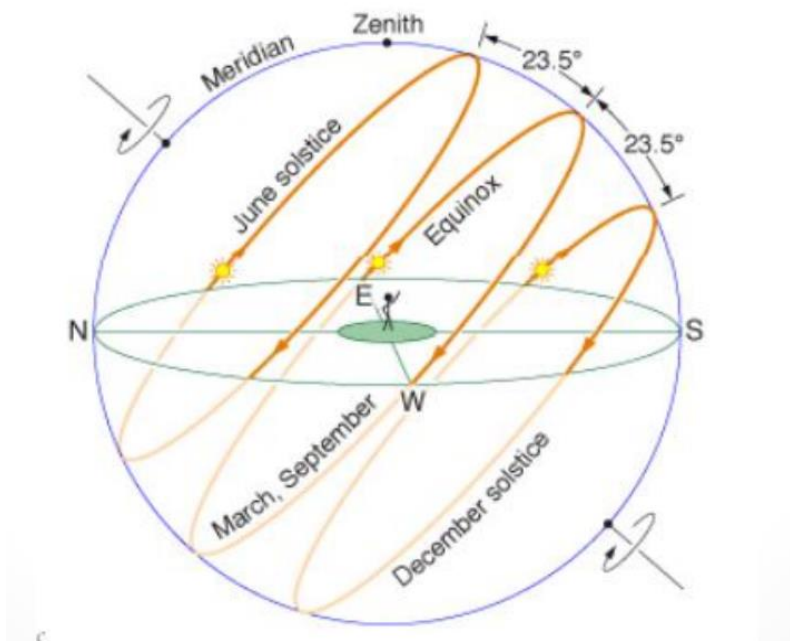
# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. GEOMETRÍA SOLAR

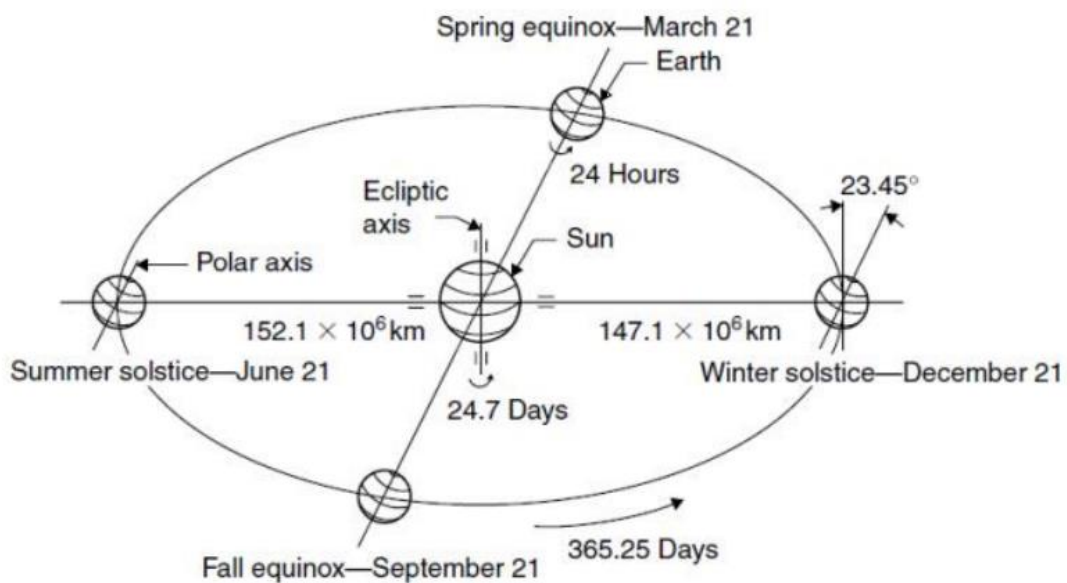
La premisa principal del Solar Tracker es que la eficiencia en la transformación de la radiación solar en energía eléctrica depende mucho del ángulo con el que el rayo de luz incide en el panel fotovoltaico, entre otros factores como el nivel de radiación. Entre más cerca esté el ángulo de incidencia de los  $90^\circ$  con respecto a la superficie del panel, mayor será la corriente generada. Debido a esto, un objetivo posterior a la creación de paneles fotovoltaicos de uso masivo fue el diseño de un sistema automatizado que logre la perpendicularidad entre el rayo de luz y la superficie del panel durante el día, sin embargo, para poder automatizar un mecanismo de ese tipo primero es necesario predecir de forma muy exacta la perpendicularidad de los rayos solares durante todo el día y a lo largo de todo el año.

Es sabido que, durante el día, desde la perspectiva de un observador en la Tierra, el sol se mueve a través del cielo con una trayectoria en forma de arco que cruza el horizonte de un extremo a otro. El principal origen de este movimiento es la rotación de la Tierra que, para el observador, produce el día y la noche.

Para poder comenzar a analizar la forma en la que se puede predecir la posición del sol en todo momento, es necesario definir algunos conceptos. En primer lugar, la Tierra gira alrededor del sol en un movimiento denominado traslación, por lo que es posible decir que este movimiento se realiza en un plano, con forma de elipse, y que el eje de rotación de la Tierra forma un ángulo de magnitud variable con respecto al plano mencionado. A este ángulo se le denomina Declinación y se produce por la inclinación del eje de rotación terrestre, el cual es de aproximadamente  $23^\circ 27'$ . Estos dos conceptos se esquematizan en la Figura 2 y Figura 3.



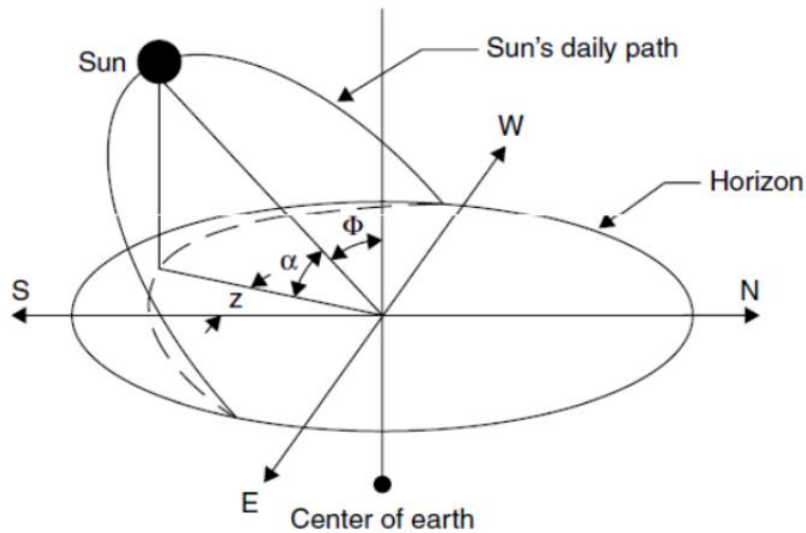
**Figura 2: Trayectoria del Sol en distintas épocas del año. (M. Reyes, 2018)**



**Figura 3: Declinación terrestre en diferentes épocas del año. (M. Reyes, 2018)**

La Declinación es aquel ángulo que muestra las variaciones en la posición angular de la Tierra con respecto al sol, pero para poder llegar a utilizar la geometría solar para predecir el ángulo de incidencia de la luz es necesario enfocarse en un observador en la Tierra. Para ello se definen los conceptos de Altitud ( $\alpha$ ) y Azimut ( $Z$ ). La Altitud es el ángulo que forma el rayo de luz con el plano horizontal en la Tierra, y el Azimut es el ángulo formado por la

proyección de este rayo de luz en el plano horizontal y la línea Norte-Sur. Estos dos conceptos se muestran de mejor forma en la Figura 4



**Figura 4: Ángulos solares desde la perspectiva de un observador en la Tierra. (M. Reyes, 2018)**

Finalmente, el ángulo que importa a la hora de querer posicionar el panel solar en busca de la perpendicularidad es el ángulo de Incidencia ( $\theta$ ), formado por el rayo de luz y la normal al plano en cuestión, por lo que teóricamente, lo que se busca es que el ángulo de Incidencia sea  $0^\circ$  para lograr la mayor eficiencia energética. En la Figura 5 se muestra un esquema con un plano inclinado que representaría un panel solar, además se muestra la representación del ángulo de Incidencia.

En resumen, la perpendicularidad del rayo de luz sobre un panel solar puede ser determinada en cualquier momento del día con bastante exactitud realizando cálculos matemáticos sin mucha complejidad, sin embargo, es necesario poseer varios datos para lograr esto, como la hora del día, la zona horaria, la fecha en el año y la posición global del panel, considerando coordenadas de latitud y longitud (Kalogirou, 2009).

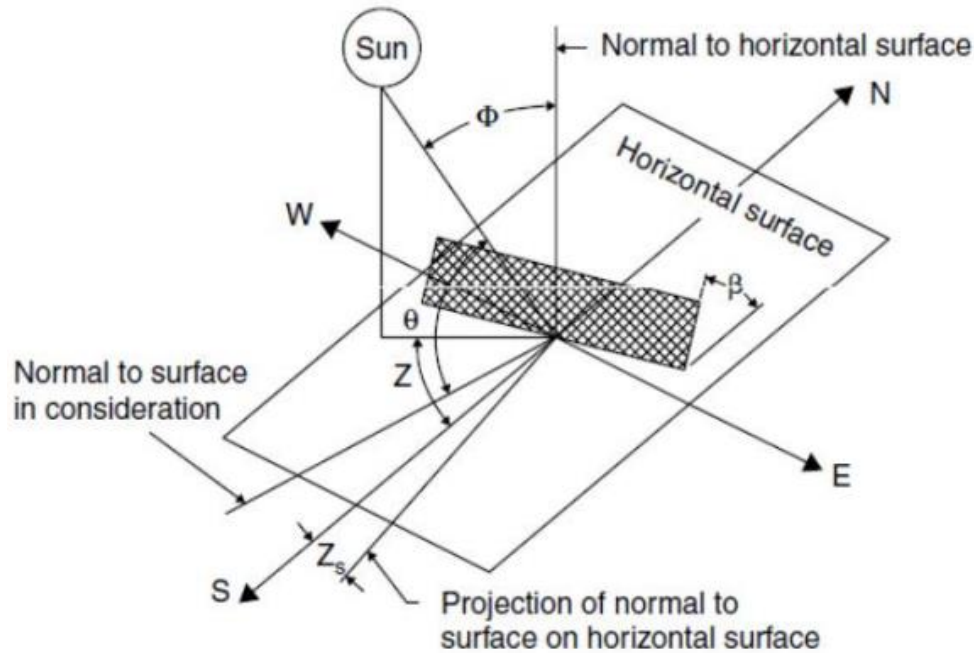


Figura 5: Ángulos solares para un plano inclinado. (M. Reyes, 2018)

## 1.2. SOLAR TRACKER

Saber en qué posición se encuentra el sol en cualquier momento es muy importante cuando se utiliza un sistema fotovoltaico para generar energía, debido a esto, resulta primordial definir correctamente la geometría solar en el lugar en donde se van a posicionar los paneles solares.

Estos paneles aprovechan el efecto fotovoltaico para generar una corriente. Poseen dos materiales semiconductores con distinta polaridad, lo que produce un campo eléctrico entre ellos. El primer material es el que recibe los rayos solares, los cuales se componen de fotones, que viajan con suficiente energía como para que, al impactar con el material semiconductor, desprendan electrones de valencia de los átomos. Estos electrones son atrapados por el campo eléctrico y su traspaso de un material a otro genera la corriente eléctrica que sale de los paneles.

Existe un factor muy importante a la hora de considerar el uso de los paneles, que es la radiación solar. Entre mayor sea la radiación solar mayor será la corriente generada, y ya que la radiación viaja en línea recta, la posición en donde se obtiene una mayor eficiencia es en la posición perpendicular al rayo de luz. Este último es el objetivo de los Solar Trackers, lograr la perpendicularidad del panel con los rayos del sol durante todo el día.

Existen varios tipos de Solar Trackers, como primeras categorías, están los sistemas de un eje y de dos ejes. Los sistemas de un eje realizan el seguimiento durante todo el día, pero no consideran la variación de la altitud del sol durante el año, o al menos no de forma automatizada. En cambio, los sistemas de dos ejes están preparados para compensar esta variación, logrando una mayor efectividad en el posicionamiento perpendicular, aunque para esto es necesario un mecanismo de mayor complejidad y muchas veces de mayor consumo energético para efectuar el movimiento.

Además de estas dos categorías, los Solar Trackers también se clasifican según la forma en la que encuentran la perpendicularidad con los rayos solares (Hafez, Yousef, & Harag, 2018).

- **Active Trackers:** Utilizan sensores de luz para lograr la perpendicularidad, ordenan el movimiento del sistema hasta encontrar la posición con la mayor intensidad de luz.
- **Passive Trackers:** Utilizan un sensor que depende de la dilatación térmica o de la diferencia de presión producida por la temperatura.
- **Semi-Passive Trackers:** Mediante lentes Fresnel se proyectan los rayos de luz hacia el panel, el esfuerzo es menor, ya que lo que se mueve es el sistema de lentes y no los paneles.
- **Manual Trackers:** Como dice su nombre, el movimiento mecánico es manual, por lo que el movimiento se suele efectuar en intervalos de tiempo.
- **Chronological Trackers:** Su movimiento está previamente programado, utiliza el paso del tiempo para saber en qué momentos y con qué ángulo efectuar el movimiento.

### 1.3. MODELO DE ESTUDIO

El sistema que se utilizará como referencia para estudiar la composición de estos equipos se basa en aquellos implementados en el norte de Chile, funcionan con una programación, por lo que se les denomina Chronological Trackers. Además, solo poseen un eje de movimiento automatizado, por lo que no considera la variación de altitud durante el año.

Poseen un funcionamiento de seguridad frente a los vientos. Hay que mencionar que las plataformas de paneles son bastante grandes, por lo que un viento relativamente fuerte puede ejercer bastantes esfuerzos sobre la estructura, como si se tratara de la vela de un barco.

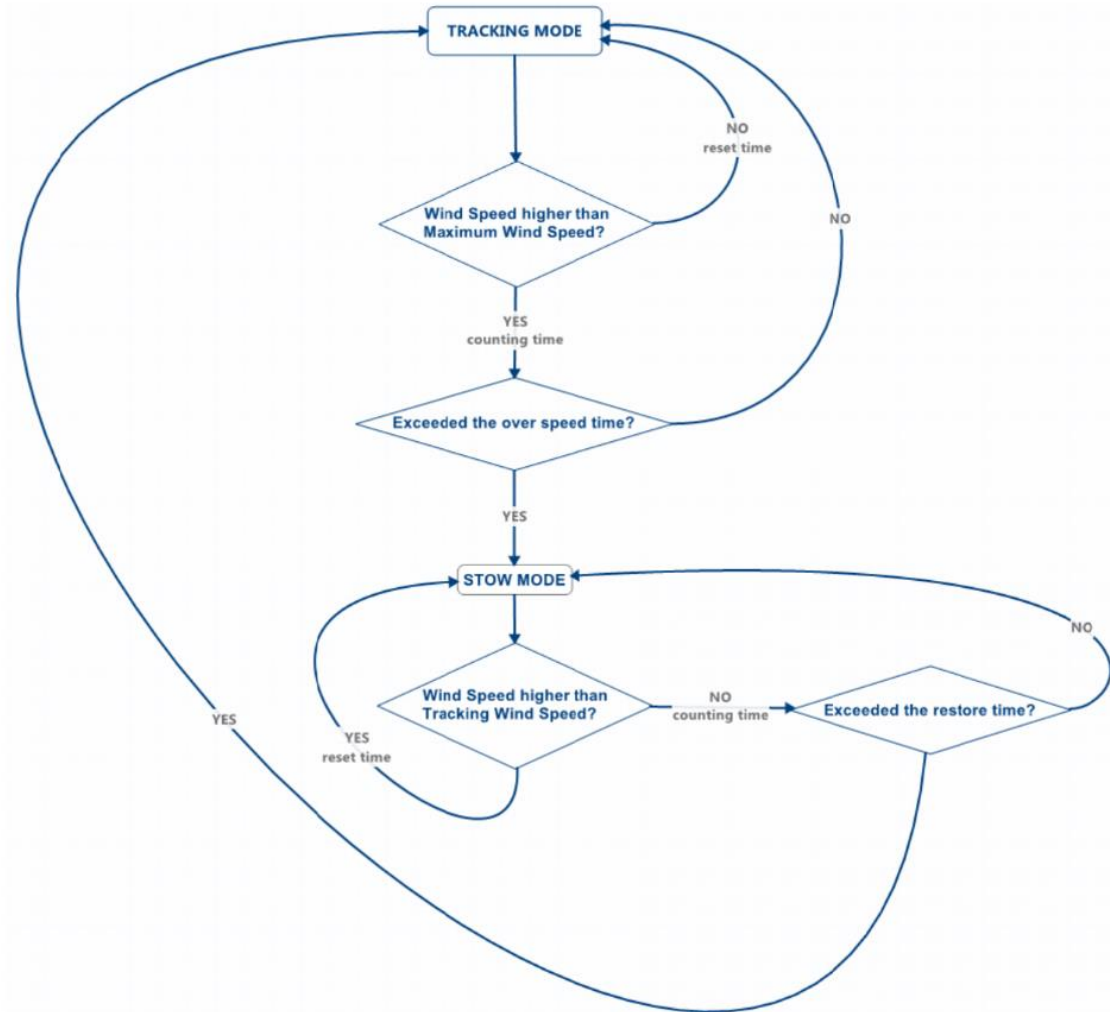
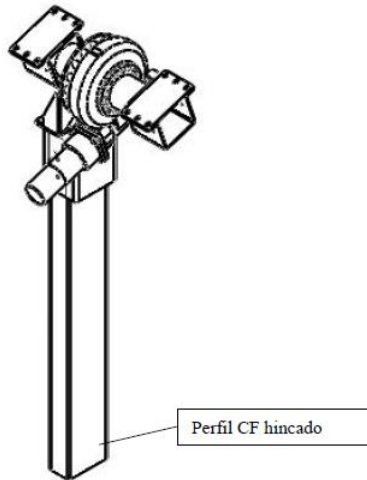


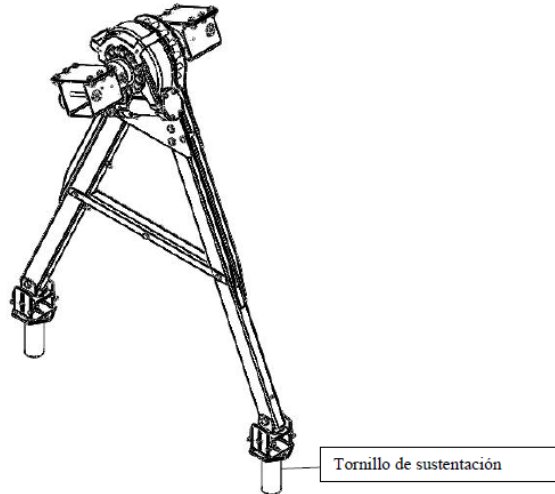
Figura 6: Esquema de seguridad frente a vientos fuertes.

### 1.3.1. COMPONENTES DEL MODELO

El sistema está compuesto en primer lugar por cimentaciones, las cuales son básicamente perfiles que se sujetan al terreno. Existen dos tipos, ambas muy diferentes en su construcción.



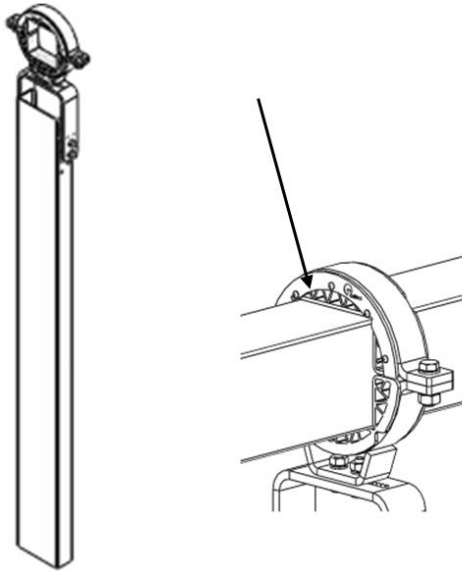
**Figura 7: Cimentación tipo Hincado.**



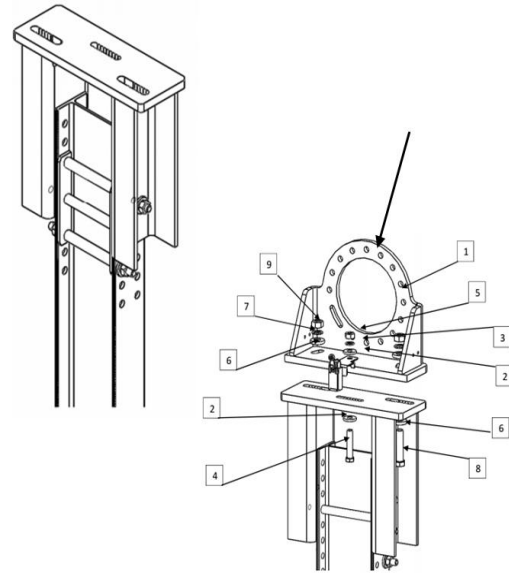
**Figura 8: Cimentación tipo Tornillo.**

Estas dos opciones son las encargadas de sostener todo el sistema de Solar Tracking. La cimentación tipo hincado es la que más se suele implementar para el modelo de Solar Tracker investigado.

Luego están los apoyos, que se encargan de sostener el eje y permitir que este efectúe el movimiento de rotación. Hay que mencionar que todos los paneles de una misma fila están unidos por el mismo eje de rotación, por lo que, a lo largo de este eje, existen dos tipos de apoyo, los apoyos simples, que se encargan de sostener el peso y permitir el giro, y los apoyos de motor, que se encargan de sostener el motor reductor que permite el giro.

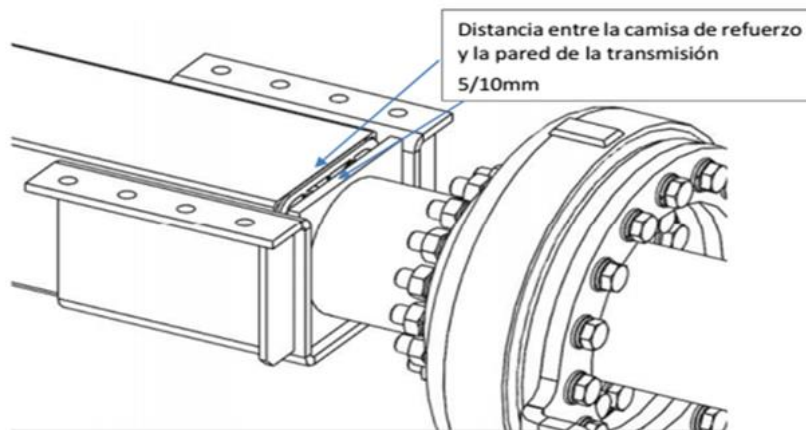


**Figura 9: Apoyo simple, que sostiene el eje y permite su rotación.**

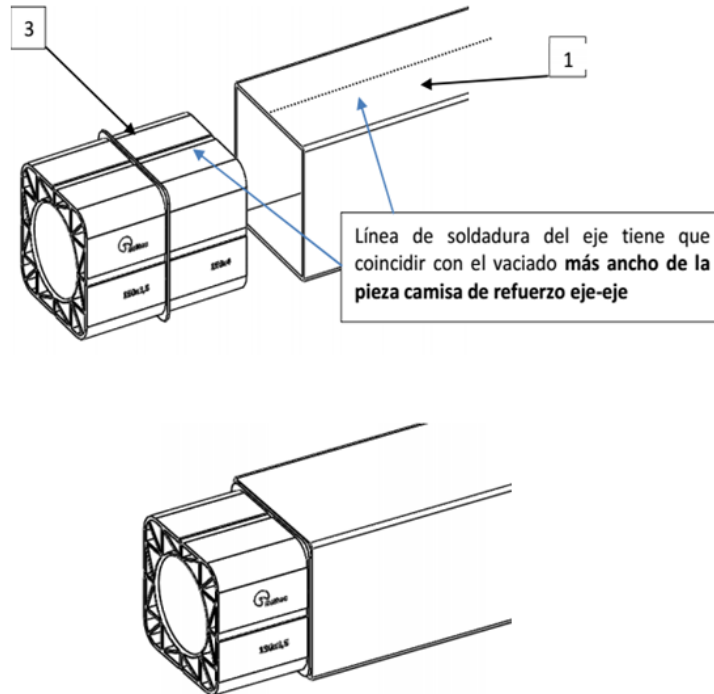


**Figura 10: Apoyo motor, que sostiene el motor reductor que permite el giro.**

Luego están las transmisiones, que son piezas que se encargan de unir las secciones del eje. Se montan dentro de cada sección uniendo dos secciones adyacentes, posteriormente se recubren con una segunda pieza de sellado que va por la cara exterior del eje. También se diferencian en dos tipos, las que unen el motor con los ejes, y las que unen dos secciones de ejes.



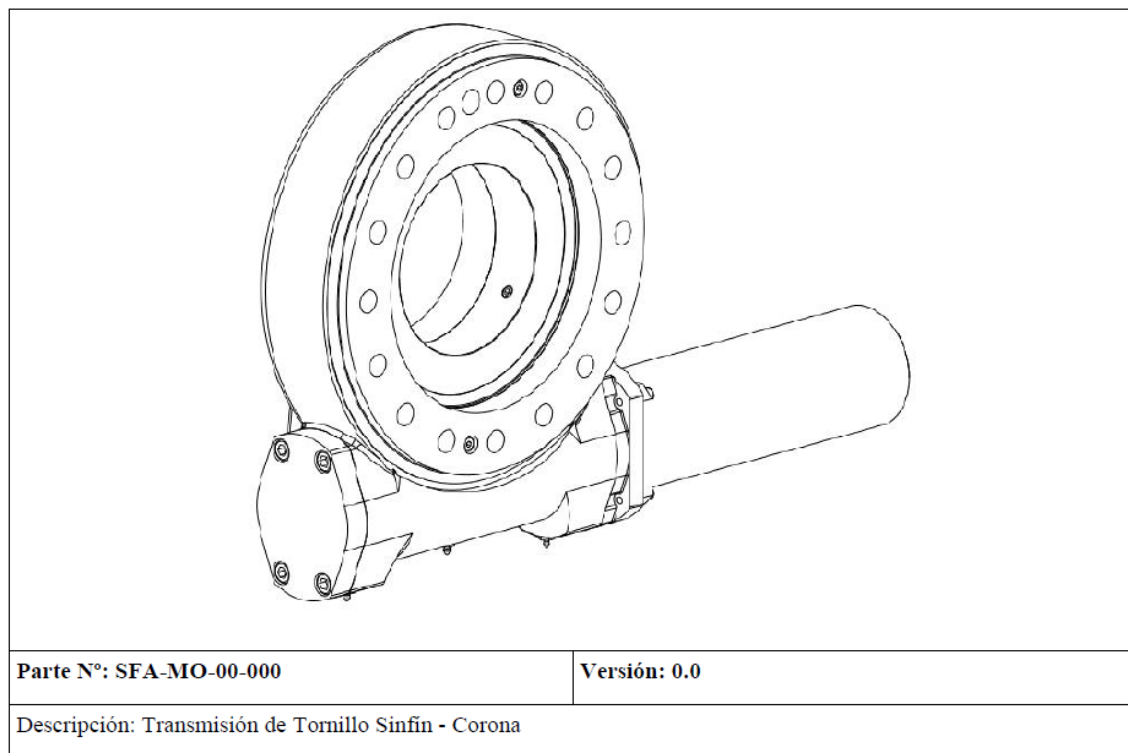
**Figura 11: Transmisión Eje-Motor.**



**Figura 12: Transmisión Eje-Eje.**

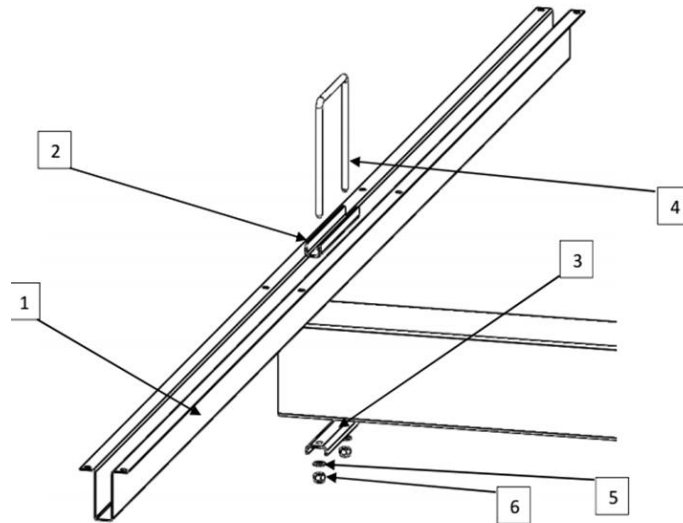
El mecanismo principal y además el más complejo es el Motor reductor, o Transmisión de Tornillo Sinfin – Corona, compuesto por un motor DC acoplado a un reductor, el cual posee un tornillo sin fin conectado a una rueda dentada. Este mecanismo se acopla directamente con el eje, y permite la rotación de todos los paneles. Mediante el reductor, es posible convertir la velocidad de rotación del motor DC en una lenta y controlada velocidad de  $0,01 [rpm]$ , de esta forma el mecanismo rota lentamente durante el día, siguiendo la rotación del sol.

<b>Velocidad Nominal de Salida</b>	0.01 rpm
<b>Tensión Nominal</b>	24 VDC
<b>Corriente Máxima / Nominal</b>	3 A / 1.5 A
<b>Potencia máxima /Nominal</b>	72 W / 36 W
<b>Alimentación</b>	Monofásica 110 - 230 VAC (*) (*) <i>Conversión AC/DC</i>
<b>Consumo eléctrico</b>	Máximo: 70 Wh/día Nominal: 30 Wh/día
<b>Tipo de Protección</b>	IP55
<b>Rango de Temperaturas</b>	-40 to +80 °C



**Figura 13: Datos y esquema del motor reductor del Solar Tracker.**

Finalmente se encuentran los soportes de módulos, estas son piezas que se encargan de sostener los paneles fotovoltaicos por sobre el resto de la estructura.



**Figura 14: Soporte de módulos.**

### **1.3.2. CONDICIONES DE OPERACIÓN**

Ya hemos definido y detallado los componentes que forman el mecanismo Solar Tracker, pero su estudio no estaría completo sin antes determinar su contexto operacional, y las condiciones mecánicas y climatológicas en las que este opera. Estos factores son fundamentales para terminar de comprender como este equipo puede fallar tanto de forma parcial como total.

#### **1.3.2.1. RANGO DE TRABAJO**

El fabricante define en qué condiciones puede operar el equipo, especificando el rango de rotación, la velocidad de rotación, la superficie permitida de los paneles, la velocidad de viento tolerado y la inclinación de la estructura, entre otros parámetros.

**Tabla 1: Características operacionales de un modelo Solar Tracker utilizado en el norte de Chile.**

<b>Superficie máxima de módulos fotovoltaicos*</b>	Max. 120 m <sup>2</sup> Configuraciones estándar*: 3x6, 3x12, 3x18, 3x19, <b>4x19</b> Opcional*: 3x20 *Módulos en horizontal (tamaño 1956mm x 992mm)
<b>Amplitud rotacional</b>	Máximo +/- <b>60°</b>
<b>Potencia de Motor y Control</b>	Máximo 70 W DC – Estándar 40 W
<b>Algoritmo de seguimiento</b>	Astronómico con backtracking
<b>Monitorización y control</b>	<b>MODBUS TCP</b> y/o vía Web basado en interfaz a través de dispositivo Gateway
<b>Comunicación</b>	Opción 1. <b>Red RS-485 por cable</b> Opción 2. Radiofrecuencia 868 / 915 MHz
<b>Máxima Resistencia al Viento (en cualquier posición)**</b>	80 km/h
<b>Máxima Resistencia al Viento (en posición de seguridad)**</b>	108 km/h según la zona de implantación de la instalación
<b>Adaptabilidad al terreno***</b>	<u>SFUtility modelo estándar</u> : para inclinaciones del terreno de hasta el 2% en dirección Norte-Sur y hasta el 36% en dirección Este-Oeste. <u>HS-SFUtility</u> : para inclinaciones de hasta el 17% en dirección Norte-Sur y hasta el 36% en dirección Este-Oeste.

Como se describe en la Tabla 1, el rango de operación del Solar Tracker es de  $\pm 60^\circ$ , lo que indica que puede hacer un seguimiento de la trayectoria del sol en un solo eje recorriendo  $120^\circ$  en total. La superficie máxima de los paneles es de  $120 \text{ m}^2$ , lo que indica el área total de cobertura en toda la estructura, como se muestra en la Figura 35. La velocidad de viento permitida en la posición de trabajo es de  $80 \text{ km/h}$ , mientras que, en la posición horizontal de los paneles, el valor sube hasta  $108 \text{ km/h}$ . Estos valores están asociados a la presión que el viento ejerce sobre los paneles cuando alcanza tales magnitudes de velocidad. Para evitar daños, el sistema recurre al modo de seguridad como se muestra en la Figura 6 cuando el viento alcanza  $80 \text{ km/h}$ , donde se mantiene en posición de horizontal hasta que los valores de velocidad del viento vuelven a ser seguros.

La Tabla 1 también muestra los valores de inclinación permitidos para montar la estructura, haciendo la distinción entre las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, siendo de 2% y 36% respectivamente. La diferencia entre estos dos valores será objeto de análisis en los próximos capítulos.

### 1.3.2.2. VELOCIDADES DE VIENTO

Como ya se mencionó, el viento es un factor que afecta drásticamente la integridad estructural del Solar Tracker, ya que, por su forma, los paneles generan mucho arrastre ante vientos fuertes, similar a lo que ocurre con una vela de barco, lo que somete a la estructura a grandes esfuerzos. Debido a esto es que el fabricante ha decidido incorporar un sistema de seguridad ante vientos de gran magnitud. Ante esta información, lo que se debe determinar es si los vientos que se presentan en la planta pueden alcanzar tales valores de velocidad.

Para poder averiguar esto se usaron los registros históricos de viento del sitio Meteored del año 2019 medidos en el aeropuerto El Loa en Calama, ubicado aproximadamente a 75 kilómetros de la planta fotovoltaica Finis Terrae.

**Tabla 2: Datos meteorológicos en aeropuerto El Loa, Calama, 2019. (Meteored, 2020)**

MES	T. MEDIA	T. MÁX	T. MÍN	V. MEDIA VIENTO	RACHAS MÁX
1	18 °C	27 °C	6 °C	24.6 km/h	64.8 km/h
2	18 °C	28 °C	7 °C	23 km/h	66.7 km/h
3	17 °C	27 °C	4 °C	24.9 km/h	59.3 km/h
4	14 °C	26 °C	1 °C	25.2 km/h	77.8 km/h
5	12 °C	25 °C	-2 °C	26.1 km/h	74.1 km/h
6	13 °C	29 °C	-2 °C	26.4 km/h	72.2 km/h
7	12 °C	27 °C	-8 °C	26 km/h	61.1 km/h
8	13 °C	28 °C	-3 °C	28.6 km/h	55.6 km/h
9	14 °C	26 °C	-1 °C	25.9 km/h	79.6 km/h
10	15 °C	27 °C	0 °C	27.6 km/h	75.9 km/h
11	17 °C	27 °C	4 °C	26 km/h	68.5 km/h
12	17 °C	27 °C	3 °C	26.1 km/h	74.1 km/h

Como se aprecia en la Tabla 2, en varios meses del año 2019 se alcanzaron valores muy cercanos a los 80 *km/h*, incluso es posible decir que, en el mes de septiembre, es muy probable que se hubiera activado el sistema de seguridad del Solar Tracker por vientos fuertes. Debido a esto, es posible afirmar que el mecanismo sí está sujeto a vientos peligrosamente fuertes, a tal nivel que la estructura puede estar en riesgo por esto.

### **1.3.2.3. INCLINACIÓN DEL TERRENO**

Es necesario considerar el caso en donde el terreno posee una determinada inclinación y, por lo tanto, el Solar Tracker deba trabajar bajo esa posición inclinada. Es posible afirmar que, en tal caso, la distribución de esfuerzos a lo largo de la estructura sería diferente, en comparación con una posición nivelada, la cual corresponde a la situación idónea.

Al crearse planos de esfuerzos, se podría llegar a tener una situación en donde los esfuerzos máximos aumentan hasta niveles poco esperados, es por esto por lo que la inclinación del terreno será un parámetro para evaluar en la simulación.

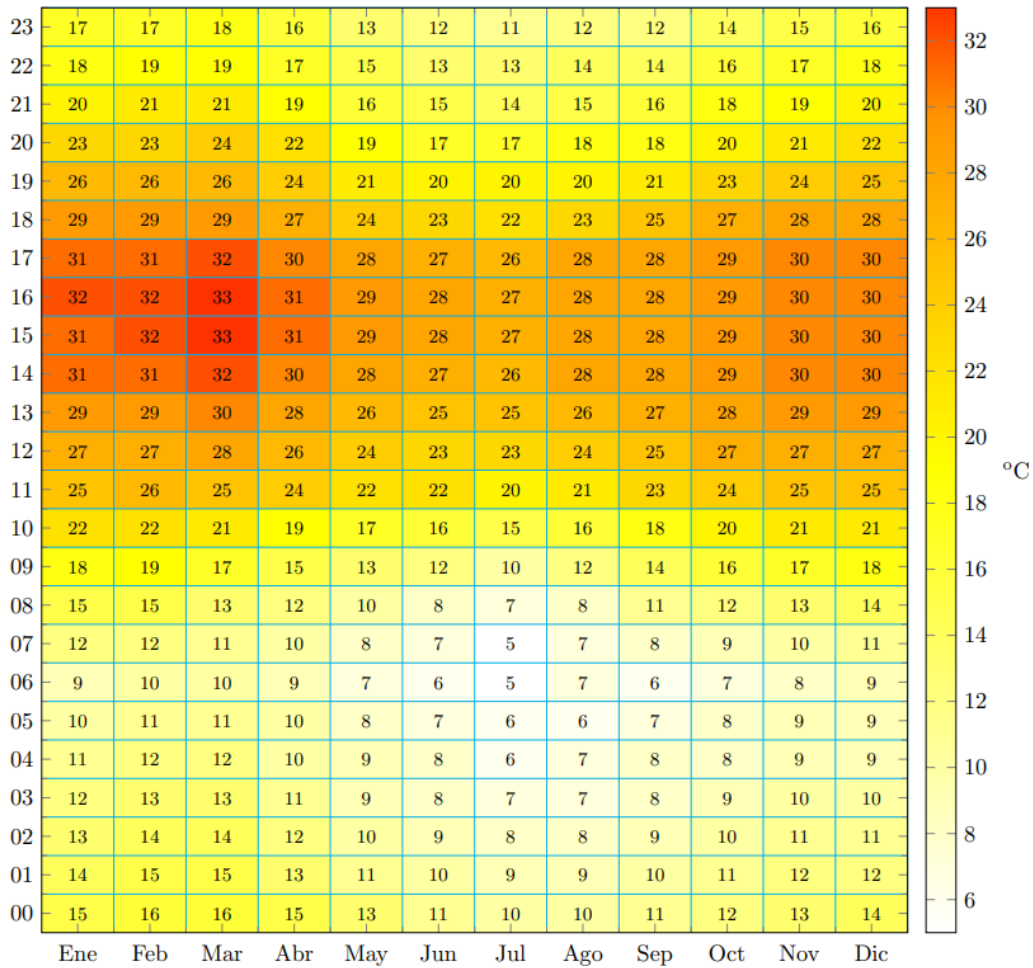


**Figura 15: Imagen de la inclinación del terreno Planta Finis Terrae. (Cooperativa, 2016)**

Como se aprecia en la Figura 15, el terreno en donde están montados los equipos Solar Trackers posee una inclinación fácilmente visible, incluso en una fotografía, por lo que se podría decir que es de magnitud no despreciable, sobre todo si se tiene en cuenta los límites de inclinación especificados en la Tabla 1. Lo que lleva a pensar que un equipo peligrosamente inclinado es una posibilidad bastante real.

### 1.3.2.4. RANGOS DE TEMPERATURA

Cuando se trata de una zona desértica, las temperaturas son un factor importante para considerar cuando se estudia el funcionamiento de un mecanismo. En él intervienen factores como las propiedades del material y el comportamiento de la dilatación térmica. Lo que se debe determinar entonces es, qué temperatura es capaz de alcanzar el equipo ante las altas temperaturas ambientales. Primero es necesario recurrir a los registros meteorológicos de la zona de estudio.



**Figura 16: Promedio de temperatura para cada mes y hora. (Ministerio de Energía, 2020)**

Como se aprecia en la Figura 16 las máximas temperaturas se alcanzan en el mes de marzo, aproximadamente a las 15:30, las cuales son de 33°C. Sin embargo, eso no significa que el material funcione a esas temperaturas. El análisis de temperaturas de la zona geográfica estudiada no es suficiente por sí solo, ya que falta un factor fundamental, que es la razón del porque se decide invertir en una planta fotovoltaica en primer lugar, y es la radiación.

La radiación solar es el principal agente que interviene en la temperatura que puede alcanzar el mecanismo, y para poder determinar a qué temperatura trabaja el material, es necesario calcular a partir de la radiación que absorbe el metal. Para ello se supondrá que los paneles bloquean la radiación directa y difusa que llega hasta la estructura, dejando paso principalmente a la radiación reflejada por el suelo del desierto. Si bien las temperaturas alcanzadas por los paneles producto de los altos niveles de radiación generan un desgaste y un descenso de la eficiencia energética importante, no es tema de esta investigación, es por esto por lo que nos centraremos solo en la radiación absorbida por la estructura del Solar Tracker.

Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Directa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.68	52.67	232.99	454.66	645.14	782.35
Difusa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.26	20.61	44.72	54.55	61.25	67.22
Global	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.94	73.28	277.71	509.21	706.39	849.57
Hora	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Directa	867.55	872.81	815.59	682.87	500.93	288.91	90.13	5.19	0.0	0.0	0.0	0.0
Difusa	65.44	67.75	64.71	64.97	61.07	50.54	26.85	3.91	0.0	0.0	0.0	0.0
Global	932.99	940.56	880.3	747.84	562.0	339.45	116.98	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0

**Figura 17: Radiación incidente horizontal promedio cada hora del día ( $W/m^2$ ).  
(Ministerio de Energía, 2020)**

Considerando estos datos, es posible determinar que, en la locación geográfica de la planta, se puede alcanzar una radiación global horizontal de al menos  $940 W/m^2$ , pero como ya se mencionó, los paneles del Solar Tracker reciben la mayor parte de esta radiación, por lo que consideraremos que la radiación que más afecta a la estructura es la reflejada por el suelo del desierto.

$$I_{ri} = \rho_r I_h \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

En la ecuación anterior,  $I_{ri}$  es la radiación reflejada que se proyecta sobre una superficie inclinada con un ángulo  $\beta$ ,  $\rho_r$  es el albedo del material reflector, el cual es una propiedad de la superficie reflectante que determina que porcentaje de la radiación global es reflejada, se considerará que el suelo del desierto tiene un albedo de 0,4, es decir, es capaz de reflejar el 40% de la radiación global. Y finalmente  $I_h$  es la radiación global horizontal.

Debido a que varias secciones del Solar Tracker se encuentran en posición vertical (ángulo de  $90^\circ$ ) como la cimentación, mientras que otras en posición horizontal (ángulo de  $180^\circ$ ) como el eje, se optará por proponer un ángulo de inclinación promedio para determinar un nivel de radiación reflejada aproximado que nos ayude a determinar un valor de temperatura semejante a la realidad.

$$I_{ri} = 0,4 * 940 [W/m^2] \left( \frac{1 - \cos 135^\circ}{2} \right) = 320,9 [W/m^2]$$

Para poder determinar que temperatura alcanza el material luego de estar expuesto a un nivel de radiación reflejada  $I_{ri}$ , se hará uso de la ley de enfriamiento de Newton aplicada para un caso inverso.

$$T = (T_a - T_\infty)e^{-kt} + T_\infty$$

$$T_\infty = T_a + \frac{I}{\rho eck}$$

Donde  $T_a$  es la temperatura inicial del material, la cual se considerará como 30°C por la temperatura ambiente,  $\rho$  es la densidad del material,  $e$  es el espesor,  $c$  es el coeficiente de conductividad térmica y  $k$  es una constante de proporcionalidad obtenida a base de experimentación, pero para efectos de aproximación, se elegirá un valor similar a experimentaciones similares.

$$T_\infty = 30 [^\circ C] + \frac{320,9 [W/m^2]}{7850 [kg * m^{-3}] * 0,005[m] * 460[J/kg^\circ C] * 0,0018[s^{-1}]} = 39,9[^\circ C]$$

Considerando este valor de temperatura, es posible afirmar que luego de un tiempo de exposición, el mecanismo es capaz de llegar a tener 40°C de temperatura. Este dato es bastante relevante, ya que la dilatación térmica del material del Solar Tracker puede tener un impacto importante en la distribución de esfuerzos, sobre todo teniendo en cuenta que la variación de temperatura durante el día podría repercutir en un ciclo de deformaciones que se repite diariamente.

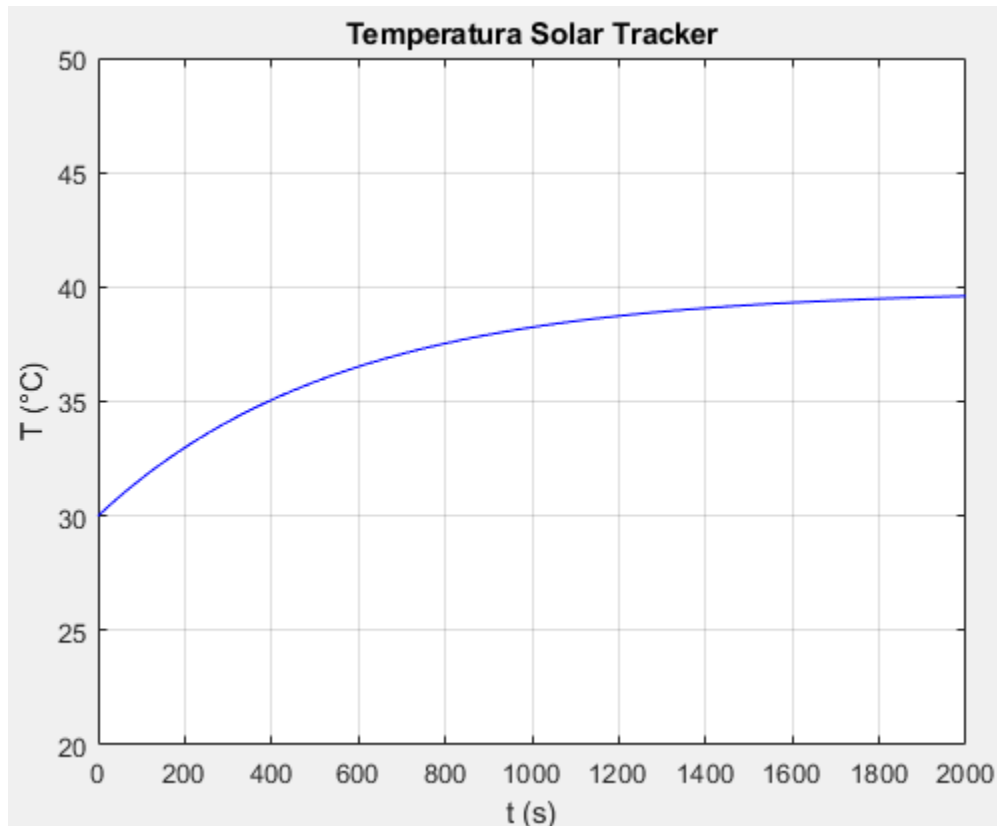
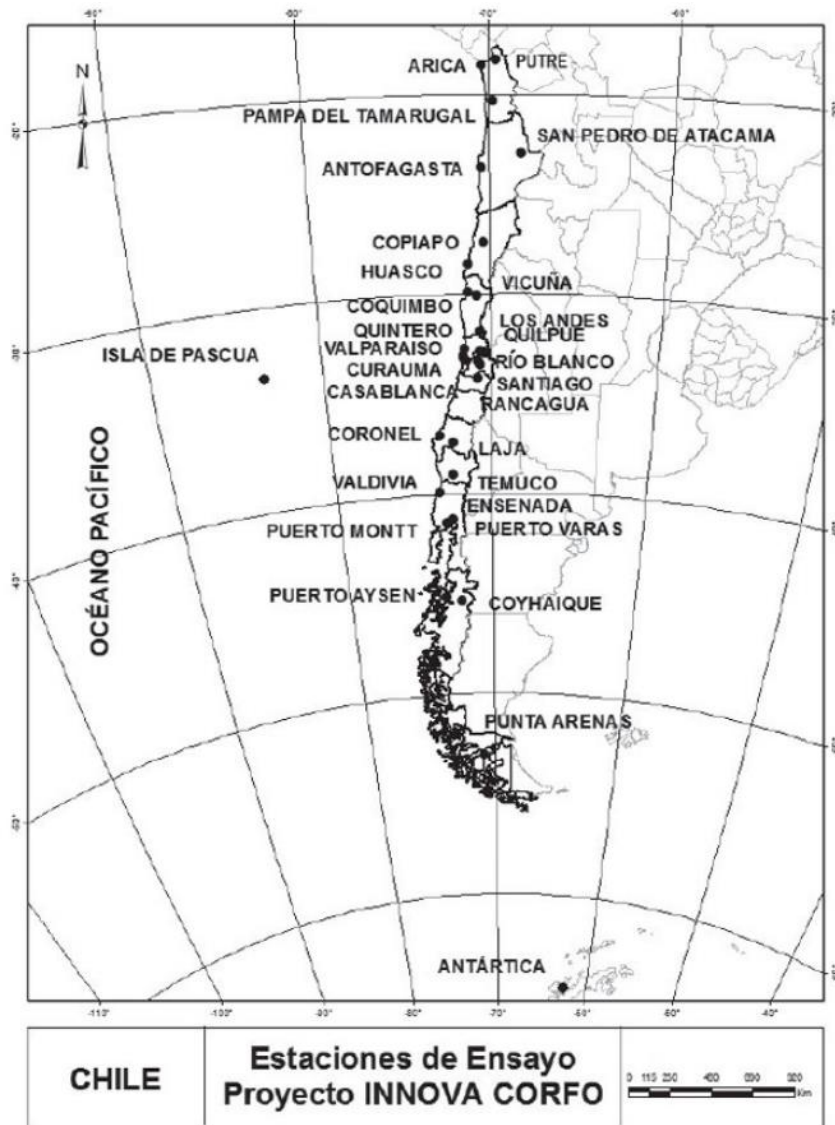


Figura 18: Curva de temperatura del sistema por radiación reflejada.

### 1.3.2.5. NIVELES DE CORROSIÓN AMBIENTAL

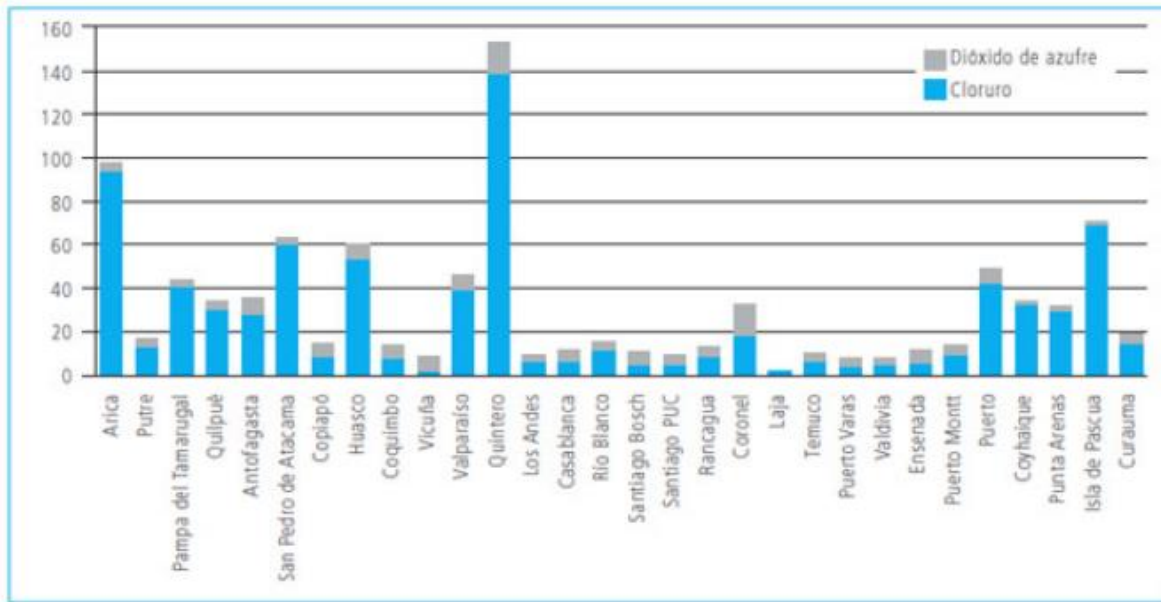
La corrosión de los materiales es una problemática muy recurrente al tener metales expuestos al ambiente. Degradan las cualidades de estos y pueden generar una pérdida de vida útil de los componentes. En el año 2010 se inició un estudio investigativo que buscaba determinar las consecuencias de la corrosión ambiental en distintas ubicaciones a lo largo de Chile (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012). A cargo de la Dirección de Obras Portuarias este estudio duró 3 años, durante los cuales se hicieron mediciones periódicas de los diferentes metales expuestos.



**Figura 19: Ubicación de los puntos de medición de corrosión. (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012)**

El procedimiento experimental consistió en la colocación de cuatro bastidores con piezas de  $10[cm] \times 10[cm]$  con un espesor de  $0,4[cm]$  y en una posición inclinada en  $45^\circ$ . Junto a los bastidores se colocaron los instrumentos de medición asignados para registrar la concentración de los contaminantes, cloruro y dióxido de azufre. Los cuatro bastidores fueron elegidos para cuatro materiales de medición, acero al carbono, cobre, acero galvanizado y aluminio.

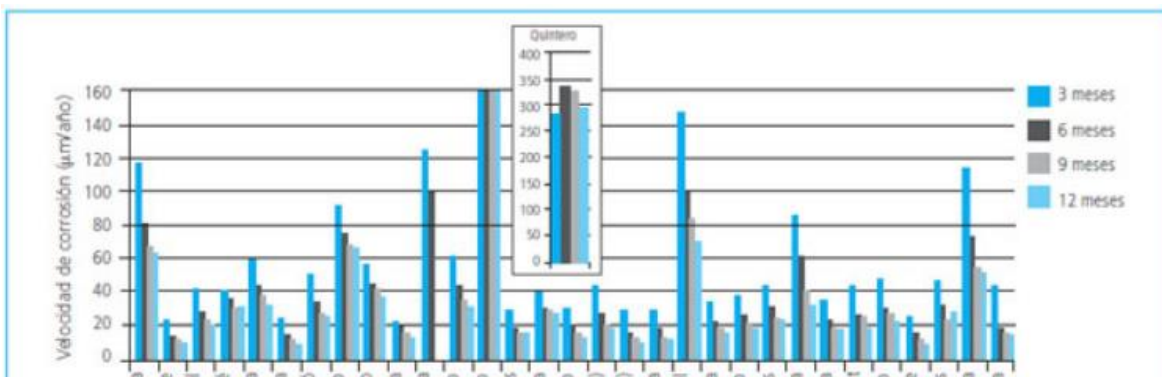
Los resultados parten por informar la concentración de contaminantes en cada estación en un periodo de un año.



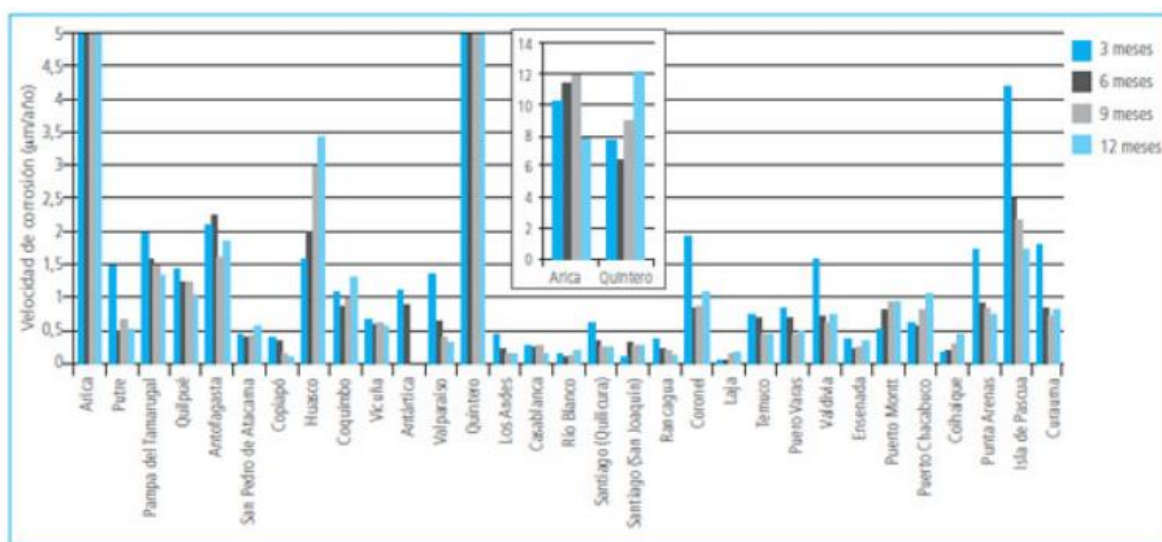
**Figura 20: Concentraciones de contaminantes medidos en un año [ $mg/m^2 día$ ]. (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012)**

Es apreciable que no existe un punto de medición en la zona de la planta fotovoltaica Finis Terrae, las estaciones más cercanas son Antofagasta y Pampa del Tamarugal, ambas a una distancia aproximada de 190[ $km$ ] de la planta fotovoltaica. Ante esto ambas son buenas opciones para usar de referencia, sin embargo la estación Pampa del Tamarugal resulta un poco más conveniente, ya que Antofagasta, al ser una ciudad costera, su concentración de contaminantes se ve muy influenciada por la presencia del mar, por lo que no es tan comparable como lo es Pampa del Tamarugal, que se encuentra a 55[ $km$ ] de la costa, mientras que la planta fotovoltaica está ubicada a 65[ $km$ ], lo que aumenta la posibilidad de usar los datos de Pampa del Tamarugal como referencia.

Posteriormente, las mediciones determinaron la pérdida de material por corrosión. Estas mediciones se hicieron cada tres meses, en donde se pudo observar que, en general, la velocidad de corrosión disminuyó, se piensa que es debido a la capa de óxido formada sobre el material, que contradictoriamente, funciona como una protección adicional.



**Figura 21: Velocidad de corrosión promedio del acero al carbono. (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012)**



**Figura 22: Velocidad de corrosión promedio del acero galvanizado. (Vera, Puentes, Araya, Rojas, & Carvajal, 2012)**

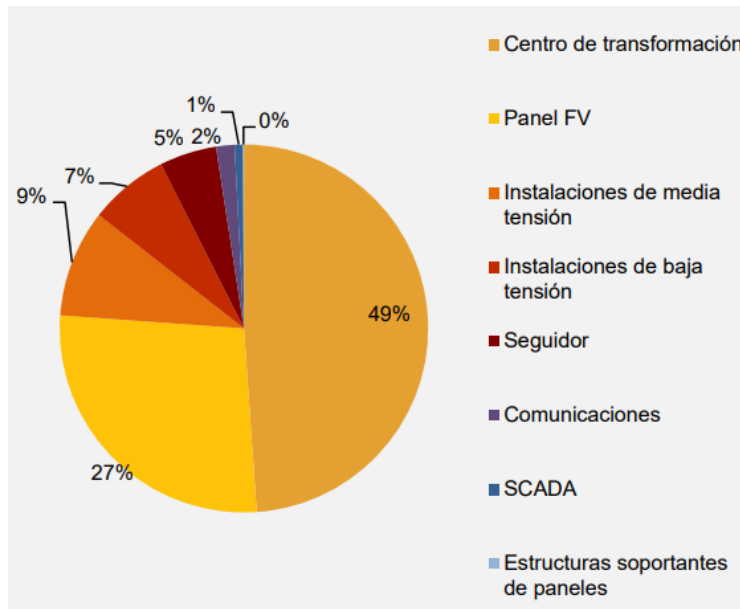
Gracias a los datos se pueden sacar ciertas conclusiones aplicables en la zona geográfica de la planta fotovoltaica Finis Terrae. En primer lugar, el hecho de que el acero utilizado para los Solar Trackers sea acero galvanizado representa una gran diferencia en cuanto a la velocidad de corrosión. El acero galvanizado es un acero que, gracias a un proceso químico, es recubierto con varias capas de zinc. Existen tres regiones principales en un acero galvanizado, la región más externa es una capa compuesta principalmente de zinc, el cual es muy resistente a la oxidación, lo que impide que este proceso químico alcance al acero. La segunda región es una zona mixta entre zinc y acero, es ahí en donde se encuentra el enlace químico entre estos dos materiales, producido durante la galvanización. Y la tercera región es la zona interior, en donde se encuentra el acero. Es fundamental considerar el uso de este material en las estructuras expuestas al ambiente, puesto que, como se muestra en

la Figura 21 y en la Figura 22, la velocidad de corrosión disminuye 20 veces en los primeros 3 meses cuando se utiliza acero galvanizado en vez del acero al carbono. Sin embargo, también se debe destacar el caso desfavorable. Si el material estuviera bajo condiciones menos favorables de las pronosticadas, que pudieran exponer el acero bajo la capa de zinc, ya sea por la misma corrosión ambiental, por rayaduras o por el contacto con fluidos propios del sistema mecánico, la velocidad de corrosión podría generar que se perdiera casi medio milímetro de espesor de material durante los primeros 10 años. Hay que aclarar que la vida útil de la planta Finis Terrae es de 25 años, lo que significa que se podrían presentar problemas de corrosión mucho antes de que la planta cumpla su ciclo. Para esto también se debería poner atención a los métodos de mantenimiento, ya que como se muestra en la Tabla 4 del Capítulo 1.5.3, el tratamiento superficial de las piezas estructurales forma parte de los tópicos de las inspecciones visuales anuales, pero no se menciona que tipo de lubricante se le aplica al motor reductor, ya que no todos los lubricantes ofrecen protección ante corrosión, y un año de exposición ante fugas podría significar una eventual corrosión significativa.

#### **1.4. PROBLEMÁTICAS ACTUALES DE SOLAR TRACKING EN EL NORTE DE CHILE**

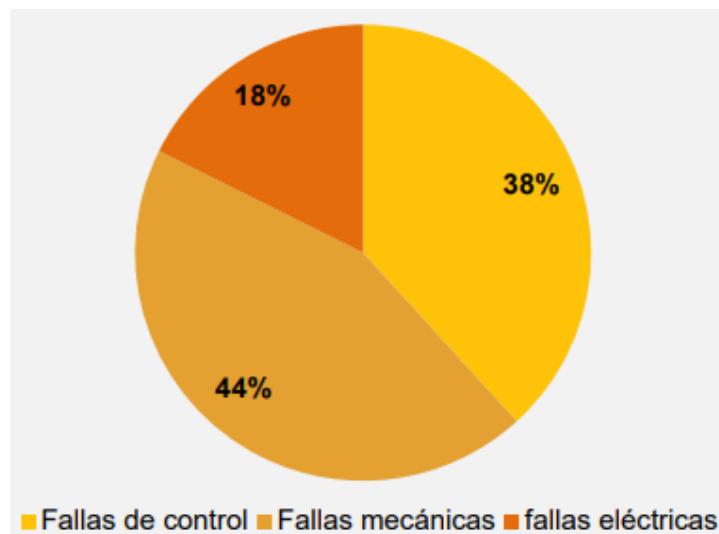
Actualmente ya hay registros de fallas producidas en plantas fotovoltaicas en Chile, incluso en plantas más nuevas como las de Solar Trackers. Un estudio de plantas operativas hasta el 2017, incluyendo la planta Finis Terrae utilizada como referencia en esta investigación, refleja que el 49% de las fallas se presentan en los centros de transformación, mientras que un 27% son asociadas a los paneles fotovoltaicos (Singh, 2020). En este estudio también se señala que el 5% de las fallas están asociadas al seguidor solar, lo que puede parecer poco, sin embargo, si se considera el avance que han tenido estas últimas tecnologías, sería imprudente no considerar este tipo de equipos para un análisis de falla más exhaustivo.

En la Figura 23 se muestra la distribución de fallas en plantas fotovoltaicas de Chile según un estudio realizado con datos hasta el año 2017. El menor porcentaje de fallas está asociado a fallas estructurales y se refiere a flexiones, torsiones o incluso fracturas de material. También se incluyen fallas asociadas a la corrosión, causada por procesos de lavado de los paneles, mala aplicación de anticorrosivos y también por un mal proceso de fabricación.



**Figura 23: Distribución de fallas en plantas fotovoltaicas en Chile (CORFO, 2017).**

También se muestra el porcentaje de fallas para los seguidores, los que corresponden al mecanismo de motor reductor, la estructura que sostiene los paneles y que permite el movimiento rotatorio y la parte de electrónica que controla el movimiento y la recopilación de información del Solar Tracker.



**Figura 24: Tipos de falla de los seguidores solares (CORFO, 2017).**

En la Figura 24 se muestran las categorías de fallas que ocurren en los seguidores. Se puede apreciar que la mayoría corresponden a fallas mecánicas, es decir, fallas asociadas a atascamientos y roturas de sujeciones en el sistema de rotación. Las fallas de control, como ya se mencionó, están asociadas a la parte de electrónica, y ocurren principalmente por

problemas de alimentación de la planta. Y por último están las fallas eléctricas, que se refieren a los problemas que pueden tener los motores conectados a los reductores. Estos pueden fallar por problemas propios de un motor eléctrico, como sobrecalentamiento o mal control de alimentación.

Además de estas fallas documentadas, que muestran la realidad actual de los solar trackers y de cómo su presencia en el mercado energético puede ir aumentando con el tiempo, y de la misma forma, sus fallas y consecuencias, también existen aquellas fallas ocultas en la falta de información estructurada. Las problemáticas actuales de los Solar Tracker no solo se ven representadas por las fallas documentadas, también podemos considerar una problemática cualquier situación de riesgo que puede desencadenar una falla a futuro. Como ya vimos en el Capítulo 1.3.2, hay una serie de situaciones que podrían desencadenar una falla de forma muy directa, como es el caso de la velocidad del viento y las condiciones del terreno. Ambas pueden desencadenar fallas del tipo estructural en el mecanismo, generando aumentos de esfuerzos en secciones débiles de la estructura. Secciones que quizás no fueron diseñadas pensando en las condiciones que tendrían que soportar en la ubicación de las plantas fotovoltaicas de Chile.

El objetivo de esta investigación es determinar de qué forma un mecanismo Solar Tracker puede fallar en el contexto operacional del norte de Chile, y hasta ahora se ha estudiado a fondo el funcionamiento de los Solar Trackers, junto con sus componentes y su contexto operacional, y además se han definido muchos de los posibles casos en los que se pueden desarrollar las fallas, sin embargo para determinar cómo se puede producir alguna de estas, es necesario hacer un trabajo mucho más técnico e ingenieril. Para ellos se hará un breve y muy acotado uso de la metodología RCM, con el fin de trasladar lo que se ha analizado hasta ahora, hacia un estudio que pueda desarrollar las conclusiones correctas con respecto al objetivo planteado. Primero se hará una introducción del RCM utilizando las normas SAE JA1011 Y SAE JA1012, las cuales definen los conceptos básicos del RCM y educan sobre como identificar cuando una metodología es realmente RCM.

## **1.5. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)**

El mantenimiento surge en la industria como el conjunto de actividades aplicadas a un elemento con una función para lograr que este elemento pueda continuar efectuando su función adecuadamente. Desde sus primeras implementaciones en la industria ha tenido una evolución constante en cuanto a su metodología. Uno de los grandes avances del mantenimiento se llevó a cabo en los años 60' durante el auge de la industria de la aviación comercial. Durante esos años, el mantener los equipos funcionando en correctas condiciones era una preocupación importante, debido a la alta tasa de fallos, y a las implicaciones que conllevaban un accidente aéreo.

El concepto RCM nace gracias a las labores de Stanley Nowlan y Howard Heap, dos empleados de United Airlines quienes durante años de trabajo, investigación y experimentación desarrollaron un sistema que les permitió aumentar la confiabilidad de los equipos disminuyendo considerablemente el número de fallas.

Con el pasar de las décadas este modelo de mantenimiento sufrió una serie de modificaciones a medida que se iba adaptando a otras industrias como la generación de energía o la industria petrolera. También se presentaban escenarios muy diferentes al que había en un inicio, como es el caso de la industria de energía nuclear, en donde se tenía una alta confiabilidad en los equipos, pero el mantenimiento excesivo y los costos que esto generaba obligó a los ingenieros a replantearse el modelo de mantenimiento utilizado.

Uno de los objetivos finales del RCM es determinar un plan de mantenimiento que se ajuste a nuestro sistema, que le permita operar bajo las condiciones óptimas de operación, pero que al mismo tiempo lo haga bajo un costo de mantenimiento aceptable.

Para lograr esto es necesario partir por conocer los componentes del sistema, cada equipo que trabaja para efectuar la función para la cual el sistema fue creado. Entender el funcionamiento de estos equipos, sus componentes, su objetivo, su importancia y las fallas funcionales que estos pueden presentar es la etapa básica del proceso RCM.

Es muy importante que después de saber cómo funciona un equipo y que fallas puede presentar, determinar las consecuencias de estas, es decir, saber si estas pueden ser suprimidas o simplemente amortiguadas. Luego de tener muy claros estos conceptos sobre el equipo, hay que enfocarse en un concepto clave que es el modo de falla, el cual refleja las múltiples circunstancias en las que se puede presentar una falla funcional específica. Un modo de falla es un concepto concreto que está ligado directamente con la función precisa que realiza el equipo. Entre más modos de fallas puedan ser identificados, más preciso y completo será el análisis para determinar el plan de mantenimiento adecuado para el equipo o sistema.

En base a todos estos datos se pueden elegir las tareas necesarias para poder combatir estos modos de fallas, en donde también entran a operar temas como la frecuencia de realización de estas tareas y como las múltiples tareas colaboraran entre sí para lograr un plan de mantenimiento fluido, efectivo y económico.

A lo largo de las últimas décadas, los cambios que ha sufrido el RCM han demostrado que cada sistema necesita ser evaluado de forma individual, el modelo exitosamente aplicado en una industria en particular no necesariamente será efectivo en otro tipo de industria. Al inicio el error más común era replicar exactamente los mismos modelos, esto causaba resultados inesperados y pérdidas económicas importantes. Sin embargo, la necesidad de

establecer una base común era evidente, ya que partir desde los cimientos del RCM resulta ser lo más indicado.

### **1.5.1. NORMATIVAS**

En un principio surgieron muchos métodos basados en RCM hechos para ser implementados comercialmente en la industria con el fin de crear planes de mantenimiento efectivos y económicamente viables. Sin embargo, muchos omitían pasos fundamentales o directamente no tenían relación alguna con el concepto RCM original. Esto llevó a fallas peligrosas por metodologías mal implementadas. Ante esto la American Society of Automotive Engineers (SAE) a finales de los 90' desarrollaron una norma que facilitaría la correcta implementación del RCM. Si bien esta primera norma no define un patrón de RCM, ya que como se mencionó previamente, sería un grave error partir con un modelo establecido, si plantea los conceptos bases para poder determinar cuándo un sistema puede llegar a ser considerado RCM. Esta norma fue denominada SAE JA1011.

#### **1.5.1.1. SAE JA1011**

Esta primera norma titulada Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), establece los conceptos básicos para determinar si un proceso puede ser llamado RCM. Este proceso debe seguir los siguientes tópicos en el orden establecido para ser considerado RCM:

- Se debe establecer el contexto operativo de cada elemento a analizar, junto con el desempeño esperado de este.
- Se deben reconocer las fallas funcionales que puede presentar el equipo mientras cumple con la labor para la cual fue diseñado.
- Se debe determinar las causas que generan estas fallas funcionales, en otras palabras, determinar los modos de falla del equipo.
- Se deben especificar los efectos que tienen estas fallas.
- Se deben categorizar estos efectos de falla en base a sus consecuencias en el equipo y el sistema.
- Se debe determinar qué es lo que se debe hacer para prevenir o predecir estas fallas.
- Finalmente se deben estudiar otras opciones de estrategias para enfrentar estas fallas y determinar la más adecuada y efectiva.

Para poder determinar si estos puntos son completados y documentados, la norma define los siguientes conceptos clave en base al orden en que serán utilizados.

#### **1.5.1.1.1. FALLAS FUNCIONALES**

Una falla funcional se define como aquella condición en la que el sistema no es capaz de efectuar su función al nivel de desempeño esperado. Para poder determinar una falla funcional es fundamental tener clara la función o funciones del sistema, y cuál es el desempeño que se espera de este sistema para realizar aquella función, ya que una falla podría inhabilitar al sistema para efectuar su función, o tan solo reducir el desempeño que tiene para cumplir su propósito. Un ejemplo de esto es un eje, el cual transmite un movimiento rotatorio, una falla funcional para este mecanismo sería que el eje no rota, o que no es capaz de alcanzar las revoluciones para la cual se diseñó.

La norma estipula que para poder proceder con el análisis es necesario identificar todas las fallas asociadas a cada función del sistema, así como los límites de funcionalidad, los cuales determinan en qué punto el sistema no estaría cumpliendo con su función de un modo aceptable.

#### **1.5.1.1.2. MODOS DE FALLA**

Ya se han establecido claramente las funciones del sistema, también se han definido las fallas funcionales, que serían las condiciones antagonistas de las funciones. El siguiente paso es determinar todos los modos de falla, los cuales se definen como aquellas situaciones que generan una falla funcional. La norma SAE JA1011 es muy enfática en que hay que ser precavido a la hora de elegir los modos de falla, ya que su elección repercute en gran medida a la hora de elegir las opciones para enfrentar las fallas, debido a esto se debe ser muy específico al redactar el modo de falla, para dejar muy en claro la naturaleza de la situación.

Para lograr una lista completa, se suele utilizar una lluvia de ideas entre los más apegados al sistema, para de esta forma, lograr abarcar la mayor cantidad de modos de falla posible. Sin embargo, para delimitar esta búsqueda, se deben considerar los modos de fallas que son razonablemente propensos a causar una falla funcional. La norma recomienda que para poder determinar qué modo de falla es “razonablemente probable”, se debe llegar a un consenso entre los encargados de determinar los modos de falla, que suelen ser los operadores que trabajan en el sistema y los dueños.

#### **1.5.1.1.3. EFECTOS DE LA FALLA**

Los efectos de falla describen lo que le ocurre al sistema cuando un modo de falla se manifiesta. Se enfocan en cuantificar el daño que estos modos de falla generan en el sistema. Para determinar qué nivel de daño pueden generar, la norma recomienda recopilar mucha información para poder entender el problema desde toda perspectiva, para ello se hacen las siguientes preguntas:

- ¿Qué evidencia muestra que la falla ha ocurrido?
- ¿Qué impacto tiene la falla en la seguridad del personal o en el medio ambiente?
- ¿Qué impacto tiene la falla en la producción?
- ¿Qué daños físicos son causados por la falla?
- ¿Qué se debe hacer para restaurar el funcionamiento del sistema luego de la falla?

#### **1.5.1.1.4. CONSECUENCIAS DE LA FALLA**

Para entender las consecuencias de las fallas, se deben describir apropiadamente cada efecto de falla, para luego ser categorizadas según el ámbito al que afectan. La categorización de los efectos de falla parte con una etapa inicial, determinar si la falla es oculta o evidente. Muchas fallas se pueden presentar sin que nadie lo note, no son detectadas sino hasta que otra falla o algún evento inusual aparece y muestra la realidad de lo que ocurre en torno a la falla inicial, a estas se les llama fallas ocultas. Por el contrario, las fallas evidentes son lo que su nombre claramente indica, eventos de fácil detección por las personas en condiciones de trabajo normales.

La segunda etapa de categorización se debe implementar solo si se han diferenciado todos los efectos de falla según la primera etapa. Esta segunda etapa consiste en cuatro categorías que reflejan el aspecto más relevante en cuanto a las consecuencias de la falla analizada, estas son la seguridad, el medio ambiente, la capacidad operacional y las consecuencias no operacionales. Esta última está netamente ligada a una consecuencia de costos, ya que solo repercute en tener que costear la reparación de la misma falla y en daños colaterales.

Es necesario recalcar que muchas fallas tienen consecuencias que pueden identificarse con más de una categoría, pero se debe elegir la más relevante, de esta forma la elección del plan de mantenimiento será la más indicada para el sistema.

#### **1.5.1.1.5. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO**

Para poder elegir una estrategia de mantenimiento adecuada para el sistema en cuestión, es necesario determinar que patrones siguen los modos de falla asociados al sistema, partiendo por los más críticos. La norma indica que uno de los factores más importantes a analizar es la relación entre el tiempo de funcionamiento del sistema y las fallas, aunque en muchos casos es más relevante la exposición del sistema a diferentes grados de esfuerzos que su tiempo de vida.

La norma SAE JA1011 determina que existen cuatro opciones de estrategias de mantenimiento que deberán ser elegidas dependiendo de cuál es la más adecuada para cada sistema:

- **Tareas de mantenimiento basadas en condición:** Estas tareas tienen como objetivo ejecutar labores de mantenimiento antes de que ocurra la falla, mediante estadística predictiva o monitoreo.
- **Tareas de reparación o reemplazo programado:** Estas tareas se efectúan analizando la vida útil del sistema, ejecutándolas cuando la tasa de falla deje de ser constante. Siempre se debe tener en cuenta la evaluación de costos del mantenimiento, comparando el costo de esta tarea con los costos asociados a asumir la eventual falla. Además de esto, se debe considerar que la reparación no siempre es lo económicamente viable, muchas veces el reemplazo de una pieza es una opción más indicada.
- **Tareas de búsqueda de falla:** Estas tareas se enfocan en buscar las fallas del tipo ocultas, y aplicando labores de mantenimiento con una frecuencia determinada. Siempre se debe asegurar que es físicamente posible encontrar las fallas ocultas.
- **Tareas combinadas:** Muchas veces la cantidad de modos de fallas hacen muy difícil que aplicar una estrategia de mantenimiento sea efectivo. Debido a eso, la combinación de más de una tarea puede llevar a la posibilidad de sufrir una falla a valores suficientemente bajos. Aunque siempre se debe asegurar que cada tarea por separado cumple con los estándares esperados, de la misma forma que si se estuviera aplicando de forma individual en el sistema.

### **1.5.1.2. SAE JA1012**

Los conocimientos y convenios que determinan si una metodología cumple con los requisitos para ser llamada RCM se verifica recurriendo a la norma SAE JA1011, ya que es en esta en donde se definen los conceptos y se determinan los criterios necesarios. Posterior a esto, lo que se desea es saber cómo se implementa una metodología RCM, para ello se recurre a la norma SAE JA1012. En ella se explica en detalle lo expresado en la norma SAE JA1011, pero además determina como interpretar esta última como una guía paso a paso para implementar la metodología RCM. Hay que hacer énfasis en que estas normas corresponden a guías que delimitan las fronteras metodológicas del RCM, no se deben interpretar como guías definitivas y suficientes por sí solas, porque cada empresa se enfrenta a desafíos diferentes. Su rubro y la manera en que hacen las cosas genera que la metodología RCM que adopten debe estar diseñada específicamente para esa empresa.

#### **1.5.1.2.1. ALGORITMO DE DECISIÓN RCM**

La norma SAE JA1012, además de introducir los conceptos anteriormente descritos desde un punto de vista aplicables a la industria, entrega una serie de herramientas muy útiles para poder diseñar un plan de mantenimiento adaptado para la empresa. Un ejemplo de esto es el algoritmo de decisión RCM, el cual, a partir de los modos de fallas y las consecuencias de estas, determina el tipo de estrategia de mantenimiento que podría ser utilizada para el sistema. Este algoritmo parte por decidir si el modo de falla en cuestión es

evidente o no. Luego se decide qué tipo de consecuencias tiene el modo de falla, entre las categorías de seguridad, ambiente y producción, aunque cabe destacar que muchos modos de falla se identifican con más de una de estas categorías, pero se debe elegir la más relevante. Finalmente se determina cual es la estrategia más efectiva dependiendo de la factibilidad de aplicación para cada modo de falla.

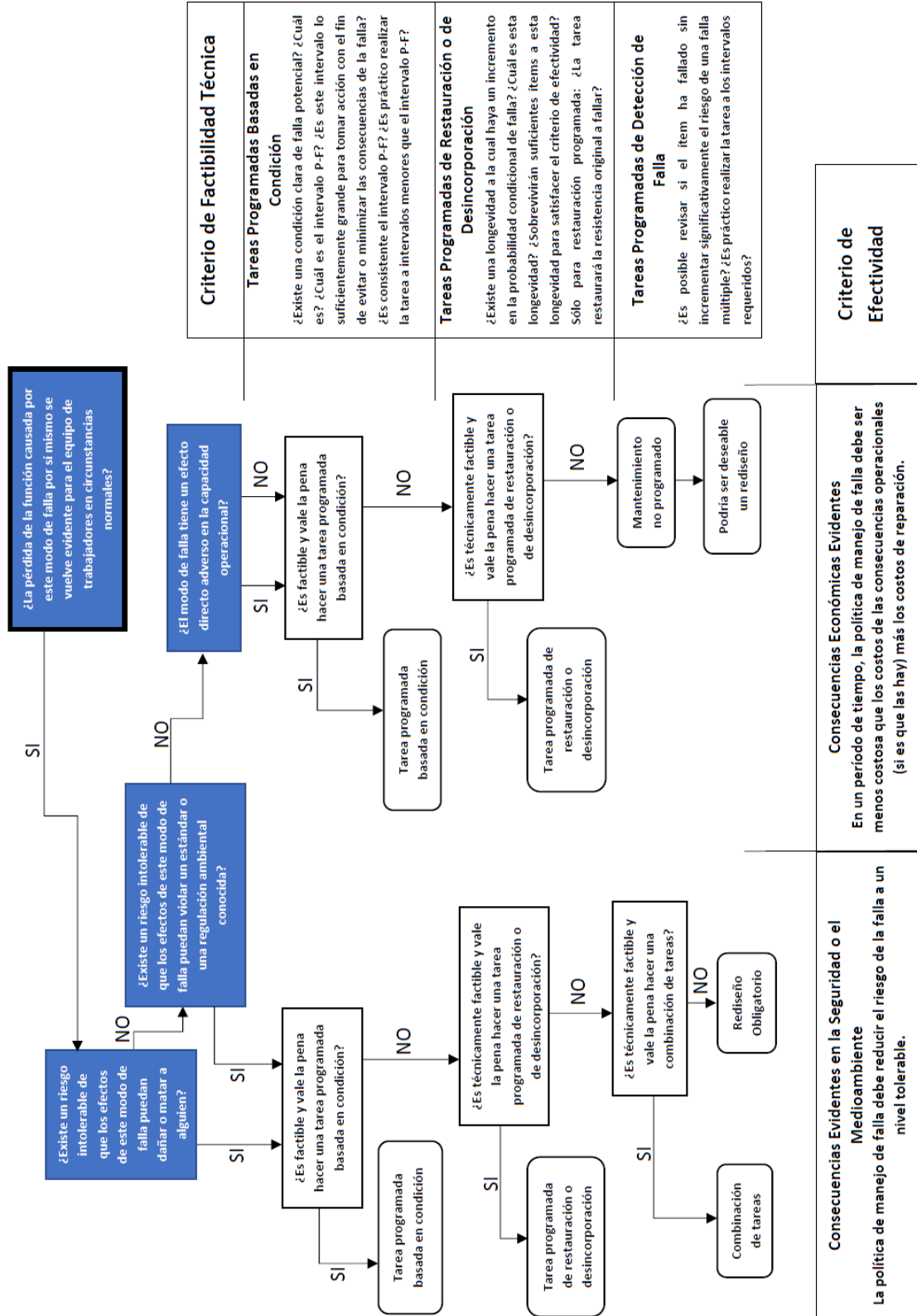
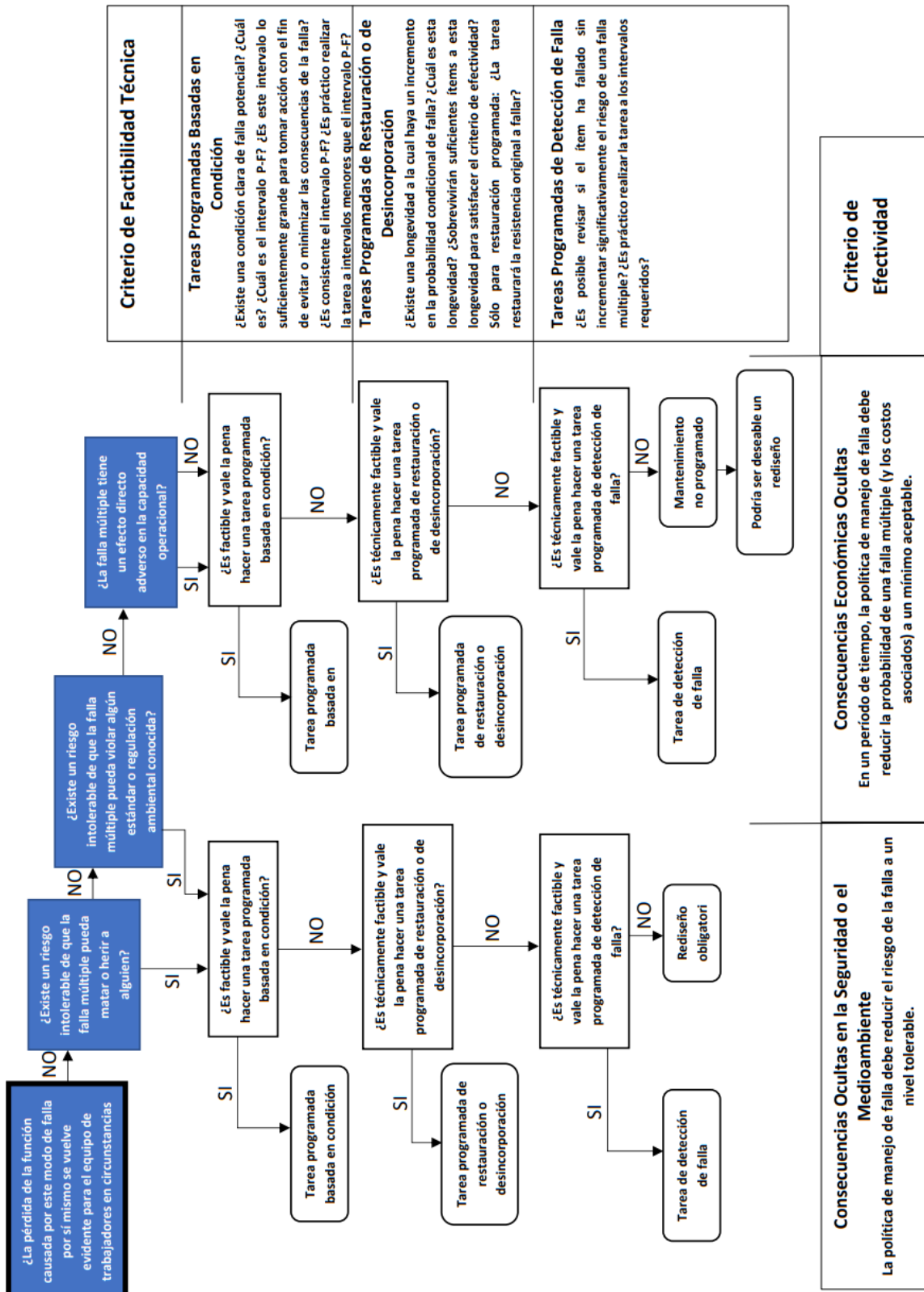


Figura 25: Primera parte del algoritmo de decisión RCM de la norma SAE JA1012. (SAE-JA1012, 2002)



Criterio de Factibilidad Técnica
<p><b>Tareas Programadas Basadas en Condición</b></p> <p>¿Existe una condición clara de falla potencial? ¿Cuáles es? ¿Cuál es el intervalo P-F? ¿Es este intervalo lo suficientemente grande para tomar acción con el fin de evitar o minimizar las consecuencias de la falla? ¿Es consistente el intervalo P-F? ¿Es práctico realizar la tarea a intervalos menores que el intervalo P-F?</p> <p><b>Tareas Programadas de Restauración o de Desincorporación</b></p> <p>¿Existe una longevidad a la cual haya un incremento en la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es esta longevidad? ¿Sobrevivirán suficientes ítems a esta longevidad para satisfacer el criterio de efectividad? Sólo para restauración programada: ¿La tarea restaurará la resistencia original a fallar?</p>
<p><b>Tareas Programadas de Detección de Falla</b></p> <p>¿Es posible revisar si el ítem ha fallado sin incrementar significativamente el riesgo de una falla múltiple? ¿Es práctico realizar la tarea a los intervalos requeridos?</p>

Criterio de Efectividad
<p><b>Consecuencias Económicas Ocultas</b></p> <p>En un periodo de tiempo, la política de manejo de falla debe reducir la probabilidad de una falla múltiple (y los costos asociados) a un mínimo aceptable.</p>
<p><b>Consecuencias Ocultas en la Seguridad o el Medioambiente</b></p> <p>La política de manejo de falla debe reducir el riesgo de la falla a un nivel tolerable.</p>

Figura 26: Segunda parte del algoritmo de decisión RCM de la norma SAE JA1012. (SAE-JA1012, 2002)

### 1.5.2. ANÁLISIS FMEA

El FMEA es una de las herramientas de análisis de falla más usadas por las empresas a la hora de implementar RCM. Aunque su aplicación no esté directamente relacionada a esta metodología, se considera un paso muy útil para poder lidiar con los múltiples y diversos modos de falla asociados a un sistema productivo.

Para poder realizar el análisis de falla del sistema que se ha estudiado, se comenzó por hacer un estudio FMEA, el cual se caracteriza por definir los componentes más elementales de la estructura e identificar sus modos de falla, además de las causas de origen de estos y las consecuencias que estos tienen en el sistema.

Hay que mencionar que para la mayoría de los componentes del Solar Tracker se repiten los modos de falla de Corrosión, Fractura y Deformación Permanente, este último es un modo de falla que se repite en todos los componentes. Estos modos de falla, sobre todo el de la deformación permanente, son los que más se han observado en las plantas de Solar Trackers, generando pequeñas desviaciones, que a pequeña escala parecieran ser insignificantes, pero cuando se trata de módulos de  $120 m^2$  estas pequeñas desviaciones se pueden percibir con facilidad, provocando disminución en el rendimiento energético del sistema y poniendo en riesgo la integridad estructural del Solar Tracker a mediano o largo plazo.

El siguiente paso lógico en este análisis de fallas sería el efectuar el análisis FMEA, el cual es muy parecido al análisis anterior, solo que considera además la criticidad de las fallas, para ello incorpora conceptos como frecuencia de falla y gravedad de falla según distintos criterios, como la seguridad de los trabajadores, la producción o la integridad del medio ambiente.

**Tabla 3: Tabla FMEA del Solar Tracker (Parte 1).**

Función	Pérdida de Funcionalidad	Efecto Potencial de la Falla	Modo de Falla	Controles Actuales
Sostener la estructura de paneles fotovoltaicos	Pérdida de soporte de la estructura	Colapso de la estructura	Fractura del material	Inspección visual
		Desviación en los paneles	Deformaciones permanentes	Inspección visual
Rotar la estructura de paneles fotovoltaicos	Detención de la rotación	Pérdida de eficiencia energética de los paneles	Atascamiento del mecanismo	Inspección visual
			Pérdida de comunicación con centro de control	Monitoreo desde centro de control
	Velocidad de rotación insuficiente (por debajo de 0,01 rpm)	Pérdida de eficiencia energética de los paneles	Excesiva resistencia al movimiento	Inspección visual
			Alimentación insuficiente del motor	Monitoreo desde centro de control
		Desgaste de secciones estructurales	Lubricación del reductor insuficiente	Mantenimiento periódico
			Lubricación de los soportes insuficiente	Mantenimiento periódico
	Velocidad de rotación excesiva (sobre los 0,01 rpm)	Pérdida de eficiencia energética de los paneles	Alimentación excesiva del motor	Monitoreo desde centro de control
		Sobrexigencias estructurales		
	Posicionamiento angular incorrecto	Pérdida de eficiencia energética de los paneles	Error en la programación del software de control	Monitoreo desde centro de control
		Colisión de la estructura con finales de carrera		
Transmitir el movimiento rotatorio hacia módulos de paneles adyacentes	Desviación de la posición angular correcta	Pérdida de eficiencia energética de los paneles adyacentes	Deformación angular del eje	Inspección visual
			Flexión del eje	Inspección visual
	Desconexión entre Solar Trackers adyacentes		Fractura del eje	Inspección visual
			Fractura en piezas de union entre ejes	Inspección visual
Captar y transformar la radiación solar en corriente eléctrica	Corriente eléctrica menor al valor óptimo	Generación eléctrica económicamente deficiente	Superficie de panel obstruida	Inspección visual
			Temperaturas excesivas	Monitoreo desde centro de control
			Rotura por estrés térmico	Inspección visual
			Punto caliente o "Hot Spot"	Inspección termográfica
	Pérdida total de la corriente del panel	Generación nula del panel defectuoso	Corte de cables eléctricos	Monitoreo desde centro de control

### 1.5.3. PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL

Para los equipos ubicados en el parque solar Finis Terrae existe un plan de mantenimiento que se aplica sobre componentes, los mismos que ya se mencionaron en el análisis FMEA. Este plan de mantenimiento es periódico y en su mayoría, corresponde a inspecciones visuales.

- Soporte Simple
- Soporte Motor
- Eje de Rotación
- Soportes de Módulos
- Sistema de Control

En la siguiente tabla se muestra la frecuencia de los mantenimientos realizados sobre cada componente o subcomponente y como ya se mencionó, muchos son visuales.

**Tabla 4: Esquema de Inspecciones.**

Task	Every year	Every two years
Surface treatment	X	
Orientation verification	X	
Rotation sleeves	X	
Screws and bolts	X	
Earthing	X	
Reduction gearbox lubrication		X
Motor status	X	
Cabling and connectors	X	
Emergency button	X	
Mechanical stroke *	X	
Batteries *	X	

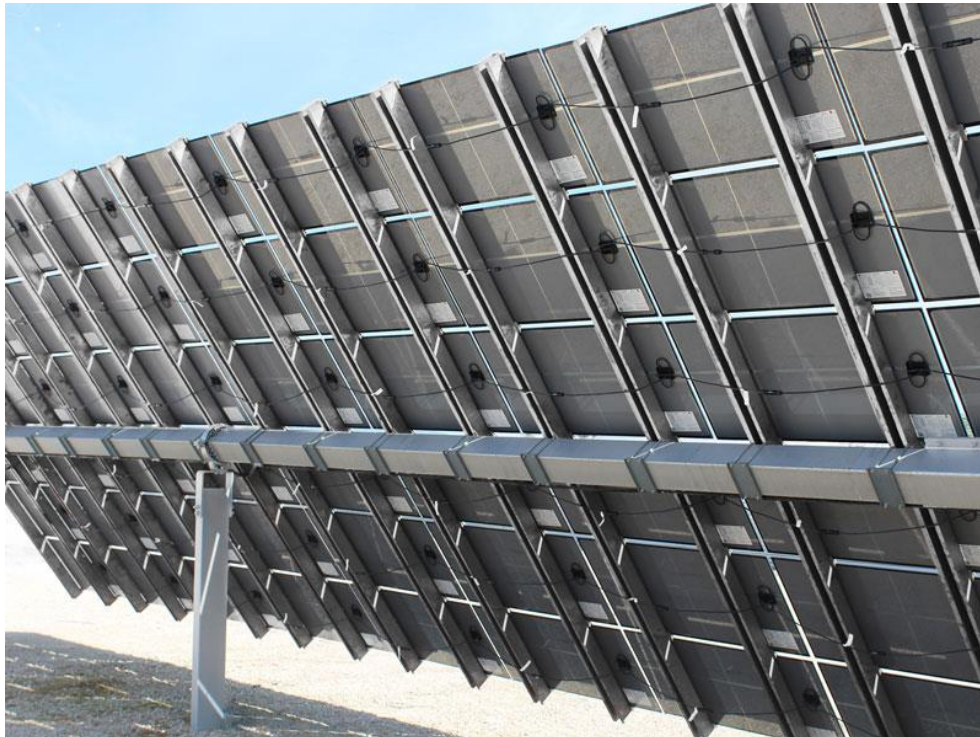
**\* These components are not included in all assembling configurations.**

Una de las excepciones en la tabla en cuanto a proceso y frecuencia, es el mantenimiento que se le hace al motor reductor encargado de efectuar el movimiento rotatorio del eje de transmisión. El mantenimiento consta del engrase del sistema mecánico con 150 gramos de grasa, este proceso se efectúa cada dos años.

## 2. MODELO DE ANÁLISIS

### 2.1. DISEÑO

Para poder determinar de qué manera el sistema mecánico podría fallar, se hará uso de la herramienta ANSYS, la cual es un software de simulación que utiliza el método de elementos finitos para resolver problemas físicos de gran complejidad. Lo que este software requiere en primer lugar es un modelo geométrico del mecanismo que se desea analizar, entonces el primer paso es determinar exactamente la forma y dimensiones del Solar Tracker. Al no tener acceso a los planos de este mecanismo por ser información confidencial del fabricante, se optó por crear un diseño propio del mecanismo a partir de la limitada información que se tiene. Se espera que los resultados no sean exactos ni reflejen perfectamente la realidad, sin embargo, serán de gran utilidad para saber en qué condiciones el mecanismo corre mayores riesgos de falla.



**Figura 27: Solar Tracker montado en la planta Assuruá de Brasil (Proveedor de Solar Trackers, s.f.).**



**Figura 28: Solar Tracker montado en la planta Floresta de Brasil (Proveedor de Solar Trackers, s.f.).**

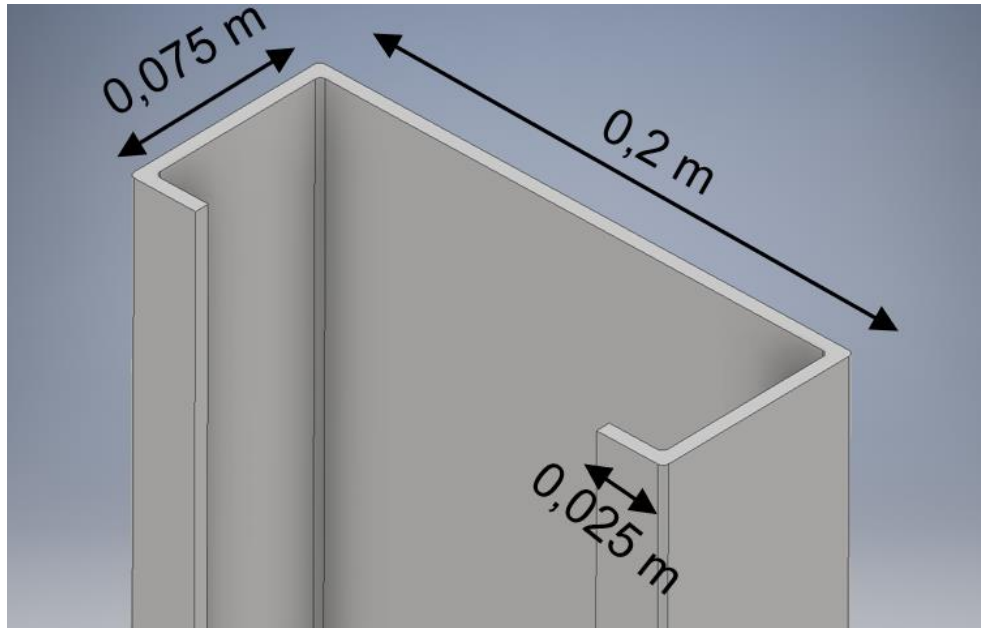


**Figura 29: Solar Tracker con módulo bi-faciales (Proveedor de Solar Trackers, s.f.).**



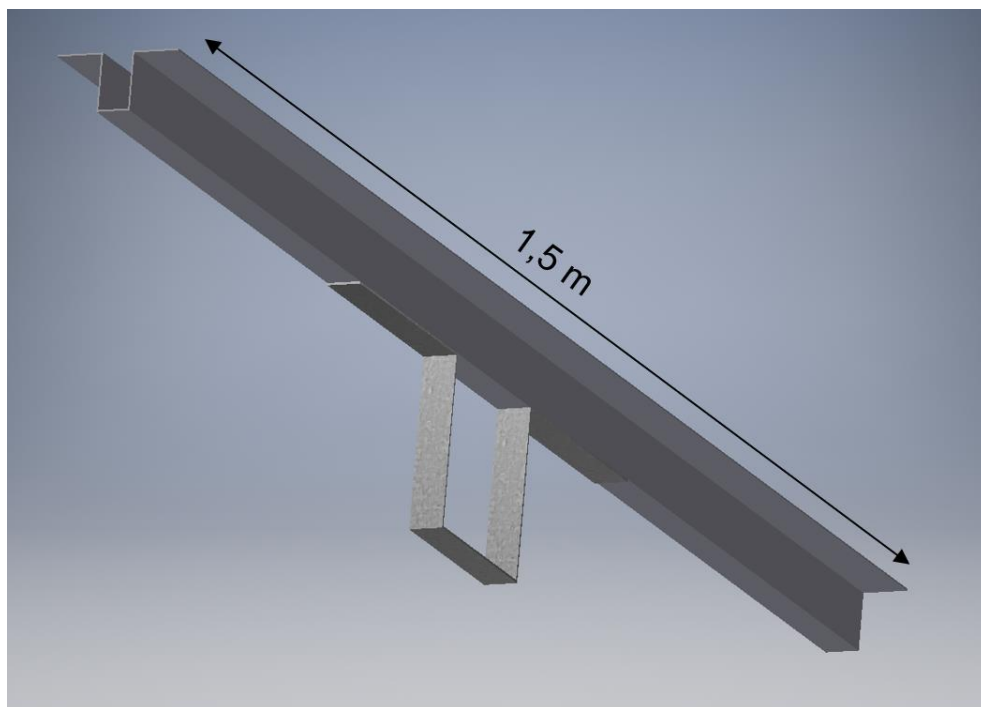
**Figura 30: Solar Tracker montado en Calama, Chile (Proveedor de Solar Trackers, s.f.).**

Con el apoyo del anterior recurso fotográfico y la recopilación de datos expuesta en el Capítulo 2, se logró llegar a un diseño que permite la funcionalidad del mecanismo, pero que al mismo tiempo posee dimensiones realistas de lo que sería una estructura de este tipo. El diseño fue hecho en el software Inventor, partiendo desde la cimentación del mecanismo, eligiendo un perfil C de 5 mm de espesor y 1,7 m de largo. Luego se dimensionó el eje que transmite el movimiento a lo largo de todo el mecanismo, para ello se usó la información del fabricante para la superficie de los paneles, el cual indica que la superficie total es de  $120 m^2$ , por lo que se consideró un largo total de aproximadamente 34 m. Para las dimensiones del eje se eligió un perfil de sección cuadrada de 15x15 cm con un espesor de 5 mm.



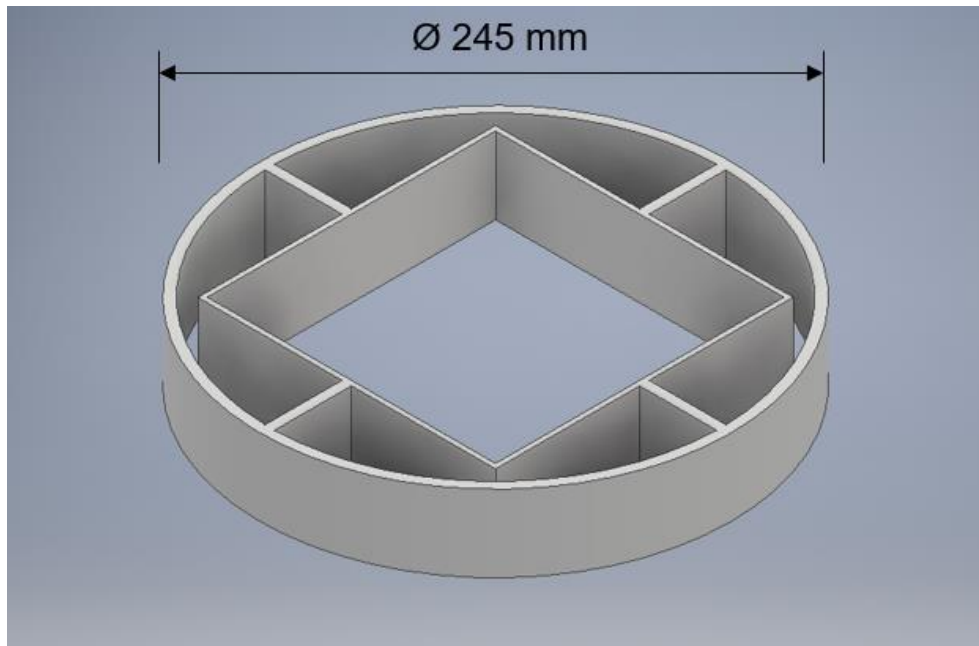
**Figura 31: Esquema del perfil utilizado en la cimentación del Solar Tracker.**

Para poder sostener los paneles solares se dimensionó un soporte muy similar a los que aparecen en la Figura 28 y la Figura 30, el cual es un perfil de 2 mm de espesor que va sujeto a una segunda pieza ubicada en su parte inferior, la cual se encarga de sujetar el soporte del panel al eje del Solar Tracker.



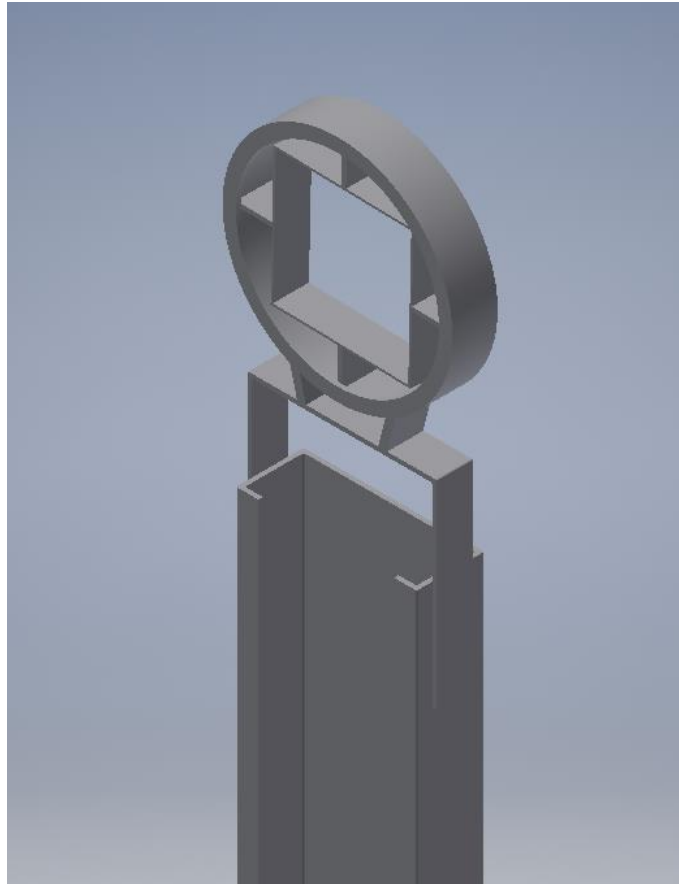
**Figura 32: Esquema del soporte de paneles utilizado en el Solar Tracker.**

Para poder sostener el eje del mecanismo y al mismo tiempo permitir el movimiento rotatorio se diseñó un ensamble muy similar al apoyo simple de la Figura 9, el cual consta de una pieza en forma de rueda que sostiene la sección cuadrada del eje y al mismo tiempo se ajusta a la cimentación con una sección redonda para permitir el giro. Ambas secciones se unen gracias a piezas rectangulares ubicadas a cada lado de la sección cuadrada, estas piezas crean el soporte mecánico del ensamble, forman parte de ambas secciones como una sola pieza y poseen un espesor de 5 mm.



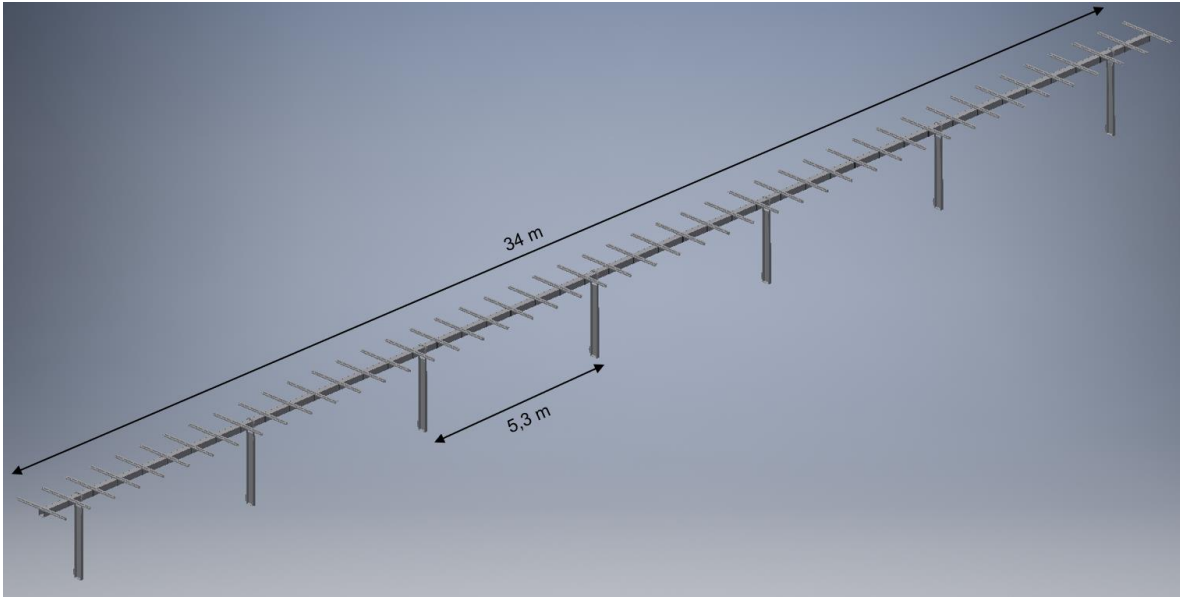
**Figura 33: Pieza del apoyo que sostiene el eje y permite el movimiento rotatorio del Solar Tracker.**

Esta última pieza se monta en la cimentación del tracker, para ello se creó un soporte redondo que va originalmente apernado al perfil C de la cimentación. Este soporte redondo es el que sostiene todo el peso del sistema rotatorio del Solar Tracker y mantiene fija la estructura gracias a la cimentación. En la siguiente figura se aprecia el apoyo redondo ensamblado a la pieza de la Figura 33.

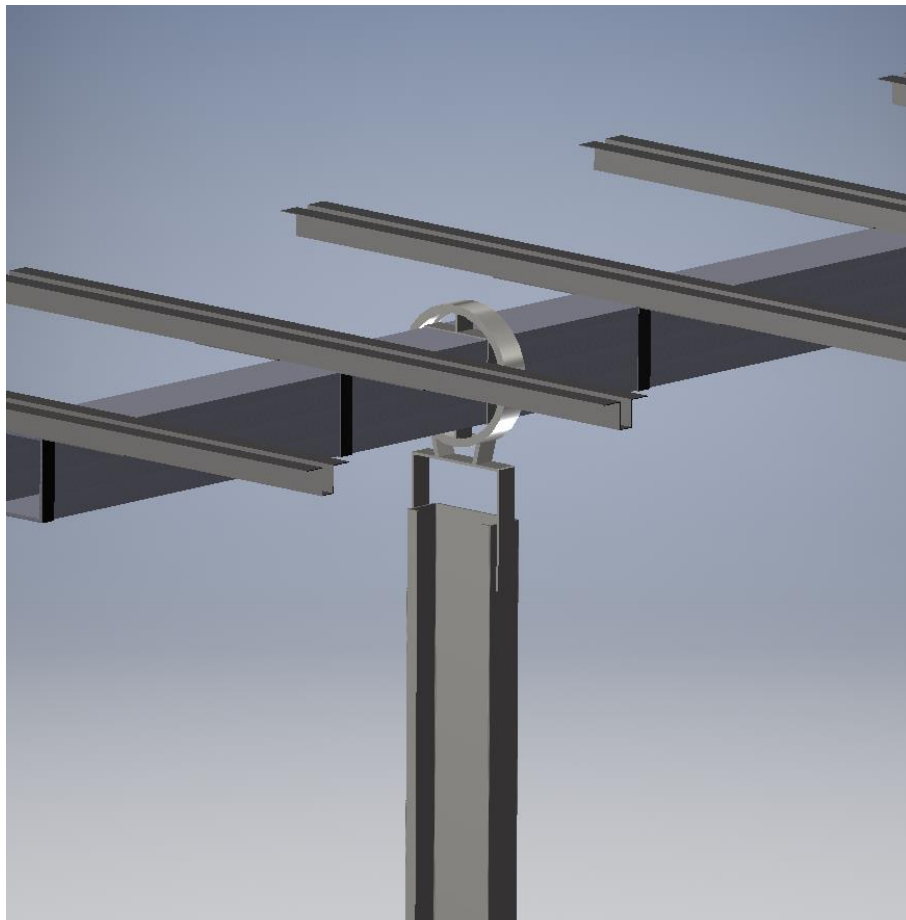


**Figura 34: Cimentación y apoyo rotatorio con sección cuadrada para el eje del Solar Tracker.**

Toda esa estructura adicional al Perfil C tiene un espesor de 5 mm y está hecha en base a lo que se observa en todas las fotografías expuestas al inicio del capítulo. El ensamble completo se aprecia en la siguiente Figura 35. La cantidad de cimentaciones y de soportes de paneles, así como la cantidad de soportes entre cada cimentación se determinó en base a la Figura 29 en donde se aprecia el Solar Tracker completo. De esta forma las dimensiones totales del mecanismo y la distancia entre cimentaciones se calcularon en base a estos últimos datos y a las dimensiones del perfil C, comparándola de forma escalada con la Figura 29.



**Figura 35: Ensamble completo del Solar Tracker que será utilizado para la simulación.**



**Figura 36: Montaje completo del Solar Tracker.**

## 2.2. MATERIALES

Según el fabricante, gran parte de los componentes estructurales del Solar Tracker están fabricadas con S275, el cual es un acero con las siguientes propiedades:

**Tabla 5: Propiedades mecánicas del Acero S275.**

Densidad	7850 [ $kg * m^{-3}$ ]
Coefficiente de Dilatación	$1,2 * 10^{-5}$ [ $^{\circ}C^{-1}$ ]
Límite Elástico	275 [MPa]
Tensión de Rotura	460 [MPa]
Módulo de Young	$2,1 * 10^5$ [MPa]
Coefficiente de Poisson	0,3 [-]
Módulo de Rigidez	$8,1 * 10^4$ [MPa]

Se trabajará con este material para todas las piezas presentes en el diseño debido a que el fabricante no entrega más detalles sobre la composición de las piezas, además de que corresponde a un material bastante estandarizado y recurrente en cuanto a sus propiedades. Esto permite suponer que el comportamiento del diseño será muy similar a lo que se esperaría en la realidad considerando las condiciones planteadas en el siguiente capítulo.

## 3. MÉTODO ELEMENTOS FINITOS

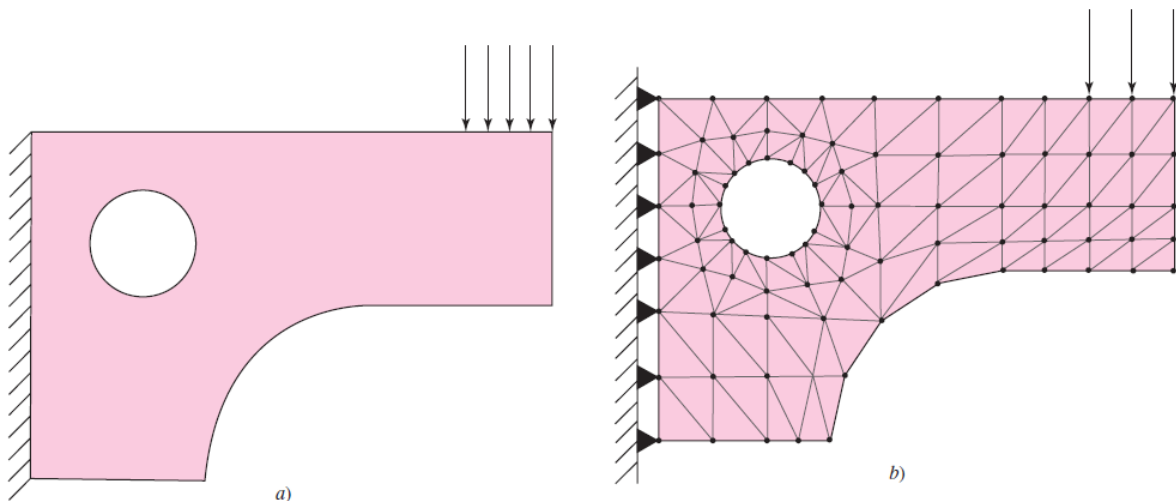
Para poder resolver problemas mecánicos de piezas como ejes, vigas, pilares, barras, etc., se utilizan una serie de métodos de análisis relativamente sencillos, que ofrecen una respuesta aproximada. Sin embargo, la realidad es mucho más compleja, los elementos a analizar suelen ser bastante más complicados, en cuanto a propiedades y geometría que los componentes de analizados mediante teorías de cálculo aproximado. Es por esto por lo que aparecen los métodos numéricos, los cuales trabajan junto con los modelos de diseño computacional para encontrar soluciones mucho más exactas para los problemas mecánicos, sobre todo aquellos que se caracterizan por tener geometrías realistas y complejas.

En términos simples, el método de elementos finitos subdivide la geometría en pequeños elementos de geometría simple, como cuadrados y triángulos. Estos elementos se unen unos con otros en sus vértices, también llamados nodos, en donde se aplican funciones polinomiales que, junto con las propiedades físicas del material, simulan un comportamiento elástico. En estos nodos es en donde recae la información mecánica del sistema, las propiedades de los materiales, las condiciones de frontera del sistema y los

agentes externos como las fuerzas. Los nodos poseen grados de libertad que definen la forma de los desplazamientos que estos sufren. Por restricción global, los nodos pueden tener un máximo de tres grados de libertad rotacional y tres grados de libertad traslacional.

Cuando todos los elementos se unen a través de los nodos, y se definen las condiciones de frontera y las fuerzas aplicadas sobre el sistema, el problema polinomial pasa a ser un problema matricial, que contiene todos los desplazamientos desconocidos en un principio. Luego de conocer esto, se aplican las ecuaciones de elasticidad para determinar una solución al problema.

A pesar de que este método está hecho para enfrentar problemas complejos de una forma sencilla y así llegar a resultados más acordes a lo que se esperaría en la realidad, no está exento de errores. El principal problema de este método es que, al subdividir la geometría en elementos más pequeños, es imposible considerar todas las variables y cambios en los esfuerzos durante una deformación, ya que como dice su nombre, el número de elementos considerado es finito.



**Figura 37: Ejemplo de geometría llevada a elementos finitos. (Budynas & Nisbett, 2008)**

En la Figura 37 se muestra lo que ocurre con una geometría cuando se plantea resolver un problema mecánico utilizando el método de elementos finitos. El primer problema es muy visible, al llevar una geometría con curvas y otros elementos geométricos, a un conjunto de triángulos, la geometría se deforma, las curvas ya no son curvas, más bien segmentos rectos unidos por un nodo. Ya que estos segmentos se mantienen rectos aun después de una deformación, es inevitable que exista una pérdida de información, porque el proceso de deformación tan solo se ha “simulado”. El resultado que se podrá observar es tan solo una versión simplificada de la realidad, y ahí recae la inexactitud del método.

El segundo problema es que, al momento de aplicar una deformación, los esfuerzos dentro de la geometría cambian de magnitud y se desplazan, y si el elemento es demasiado grande, el cambio podría no ser percibido, ya que el resultado es apenas un promedio de lo que ocurre con el elemento en sus nodos. La solución más simple ante este problema y el anterior, es considerar un “mallado” más fino. La malla del problema es la configuración o disposición de todos los elementos en toda la figura, por lo que al decir que el mallado podría ser más fino, nos referimos a que los elementos considerados sean más pequeños. Al considerar elementos más pequeños, la pérdida de información es menos notoria, ya que habrá más información de lo que ocurre con los sutiles cambios en los esfuerzos durante la deformación.

La malla no tiene por qué ser homogénea, esa es otra particularidad muy conveniente de este método. Los elementos dentro de la geometría pueden tener dimensiones convenientes para el análisis, dependiendo de su ubicación. En la Figura 37 b) se puede ver que los elementos cercanos a la perforación circular son más pequeños que los elementos de la parte inferior, esto puede deberse a que el método intenta imitar con mayor resolución la forma circular aumentando la cantidad de segmentos unidos por nodos. También esto se puede aplicar para zonas que sean de mayor interés que otras. Al tener mayor interés en un sector, debido a que, por ejemplo, se sabe que es un sector delicado en cuanto a esfuerzos o deformaciones, el número de elementos será mayor, porque nos interesa tener la mayor cantidad de información en ese sector, mientras que, en otros sectores de menor interés, el número de elementos puede ser menor, de esta forma la carga computacional disminuye.

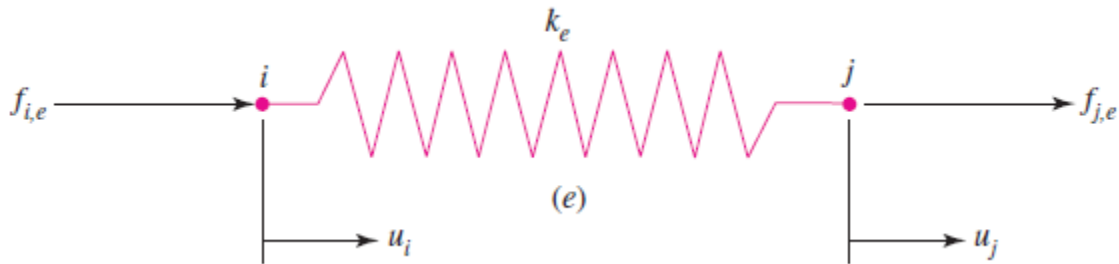
Al mencionar lo anterior sale a la luz lo evidente, que pasa si al intentar obtener una solución lo más exacta posible, aumentamos el número de elementos dentro de una geometría hasta tal punto que fuera difícil diferenciar la geometría resultante de la original. Lo primero que sucedería es que tendríamos un tiempo de procesamiento mucho mayor, ya que, al aumentar el número de elementos, o lo que sería lo mismo, disminuir el tamaño de estos, el número de operaciones que el computador tendría que resolver aumentan a una velocidad cada vez mayor.

Es debido a esto que la elección del tamaño del elemento debe ser tomada con cuidado, suficientemente fina como para converger a una solución realista, pero sin sobrepasarse, o se estarían generando tiempos de procesamiento excesivos.

Otro punto importante para considerar es la geometría de los elementos. Existen diferentes tipos de elementos, dependiendo de las restricciones que definen un modelo de análisis. Por ejemplo, existen elementos lineales, con cantidad de grados de libertad más limitados y enfocados a un análisis mucho más simple, luego existen elementos de superficie y

elementos sólidos. En estas últimas categorías la geometría puede variar, entre elementos triangulares y cuadriláteros, e incluso entre estas categorías puede haber variaciones que ayudan a analizar casos más específicos.

Para poder hacer una explicación simple de la teoría detrás del cálculo computacional, usaremos un elemento lineal con solo un grado de libertad, el cual imita lo que sería un resorte confinado al simple movimiento de contraerse o estirarse.



**Figura 38: Ejemplo de elemento lineal. (Budynas & Nisbett, 2008)**

Las propiedades del elemento pueden representarse de la siguiente forma.

$$k = \frac{AE}{l}$$

Donde  $A$  es el área transversal que, para el caso de un elemento tan simple, resulta ser constante. El módulo de elasticidad es denominado  $E$ , la longitud es  $l$  y  $k$  es el índice de elasticidad. En base a esta última ecuación, se puede plantear un sistema observando la Figura 38 y considerando como positivo los valores crecientes hacia la derecha.

$$f_{i,e} = k_e(u_i - u_j)$$

$$f_{j,e} = k_e(u_j - u_i)$$

Donde  $f$  y  $u$  son las fuerzas aplicadas y los desplazamientos sobre cada nodo respectivamente. Para trabajar este sistema de forma computacional es necesario expresarlo de forma matricial.

$$\begin{pmatrix} f_{i,e} \\ f_{j,e} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_e & -k_e \\ -k_e & k_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ u_j \end{pmatrix}$$

Este sistema es un ejemplo muy simple de lo que ocurre a nivel de cálculo, hay que considerar más variables como las condiciones de borde del mecanismo, pero sirve para representar la idea de porque este método resulta muy conveniente para un cálculo computacional. En un mecanismo, el mallado puede generar decenas de miles de nodos,

por lo que el planteamiento matricial resulta gigante, sin embargo, son cálculos relativamente simples, y si consideramos la labor de un computador, resulta muy conveniente tener un número muy grande de cálculos simples para un cálculo computacional. Es por esto por lo que el método de elementos finitos es tan efectivo al aplicarlo en un software de simulación mecánica.

## **4. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la forma en que un sistema Solar Tracker puede fallar. Se tomaron como referencia los modelos de Solar Tracker utilizados en el norte de Chile para hacer el diseño de un mecanismo de seguimiento solar. Luego de esto se hizo una investigación de las formas en las que opera este mecanismo y sus componentes, además de las condiciones en las que opera según el fabricante. Posterior a esto se investigó el contexto geográfico en el que opera, para determinar cuál será el contexto de la simulación, y al tener todos estos puntos definidos, se pudo dar inicio al proceso de simulación.

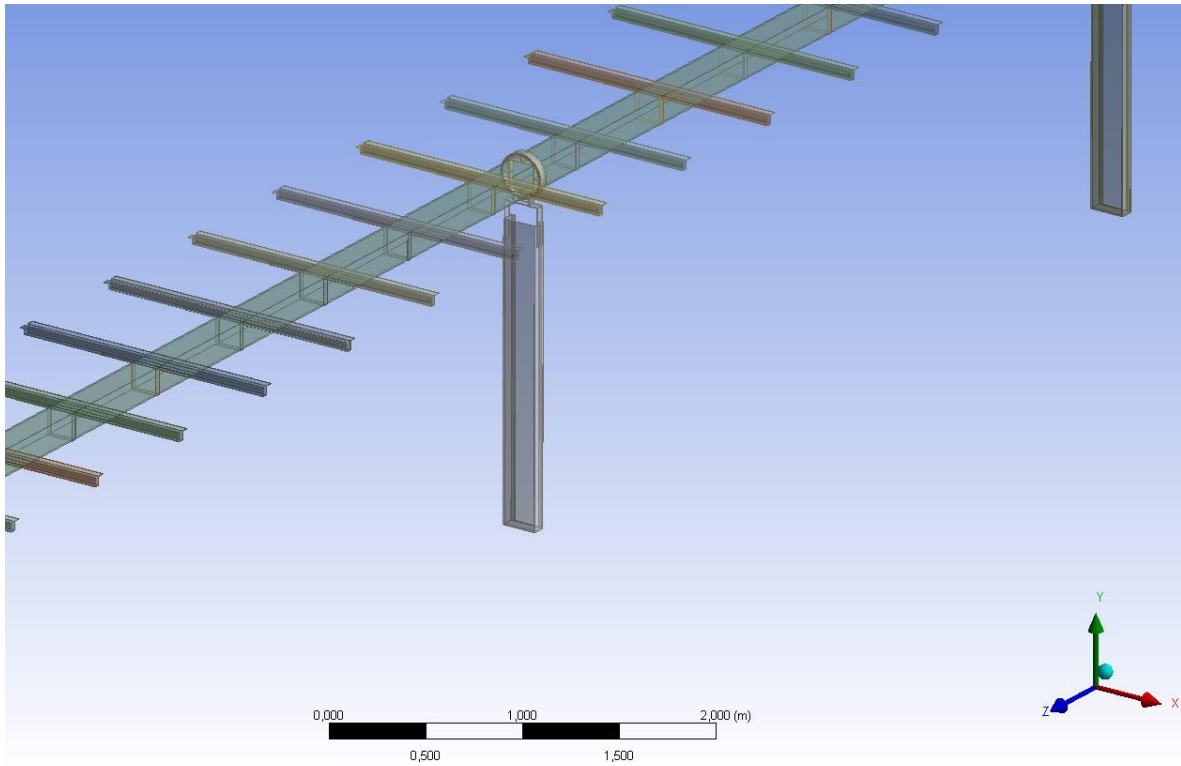
### **4.1. PREPARACIÓN**

Para hacer esta simulación, el modelo fue hecho en Autodesk Inventor, el cual se importó a ANSYS en donde se definieron los parámetros a evaluar. El primer paso es definir los materiales a utilizar. El único material utilizado, por las limitantes de la cantidad de información obtenida, es el acero S275, el cual es descrito en la Tabla 5.

1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup> ▼
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C <sup>-1</sup> ▼
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's ... ▼	
8	Young's Modulus	2,1E+05	MPa ▼
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa
11	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
16	Strain-Life Parameters		
24	Tensile Yield Strength	275	MPa ▼
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa ▼
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa ▼
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa ▼

**Figura 39: Propiedades del acero S275 ingresados en ANSYS.**

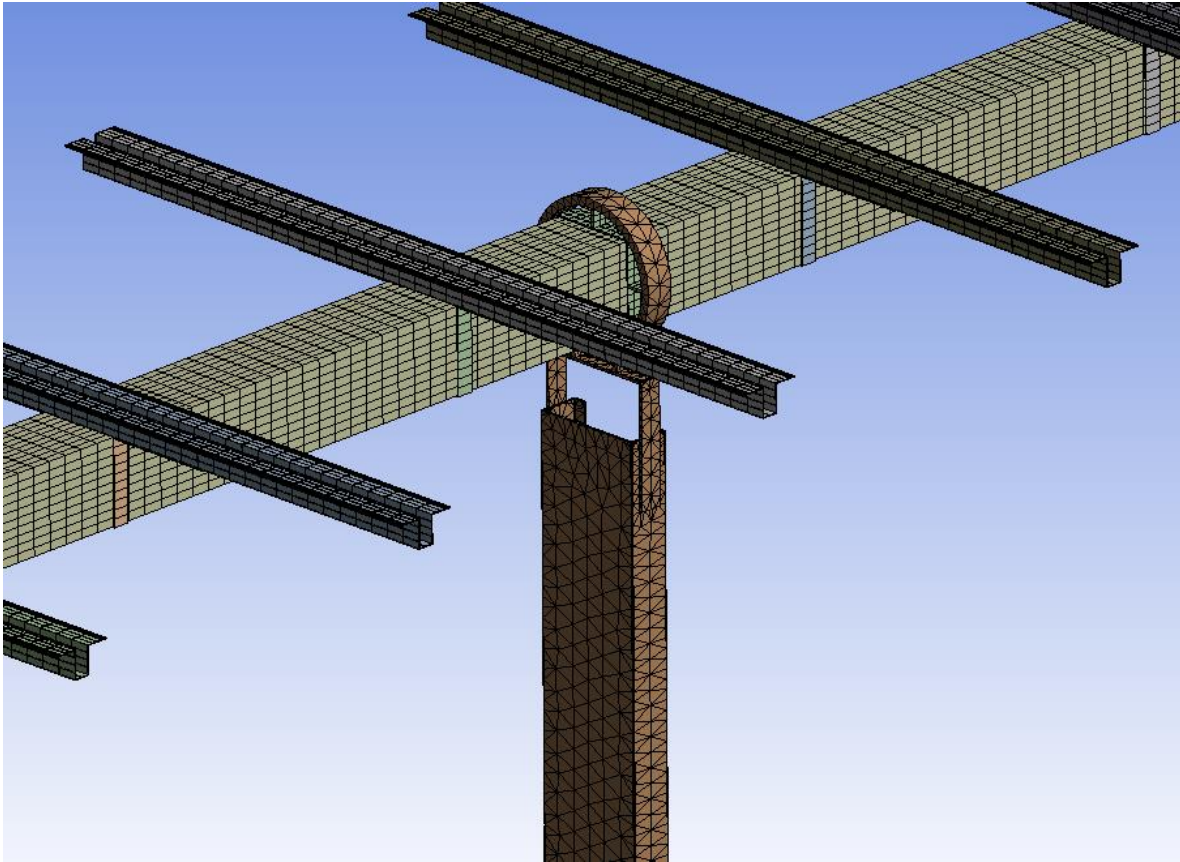
Posterior a esto, el modelo es importado desde Inventor, utilizando el formato STP para que pueda ser reconocido por ANSYS como un ensamble completo.



**Figura 40: Geometría importada desde Inventor.**

## 4.2. MALLADO

El siguiente paso es definir el mallado que será utilizado durante la simulación. El tipo de mallado es semiautomático ya que se modificaron algunos parámetros para que el mallado sea apropiado para las piezas de diferentes tamaños del mecanismo. El tamaño promedio de los elementos se ajustó en  $35\text{ mm}$  mientras que el tamaño mínimo del largo del borde de los elementos es de  $1,5\text{ mm}$ , ya que hay elementos mucho más pequeños ubicados en los espesores de las piezas y en los cambios de sección redondeados. Según el software, el número de elementos creados con el mallado es de 190.701, mientras que los nodos son 790.506.



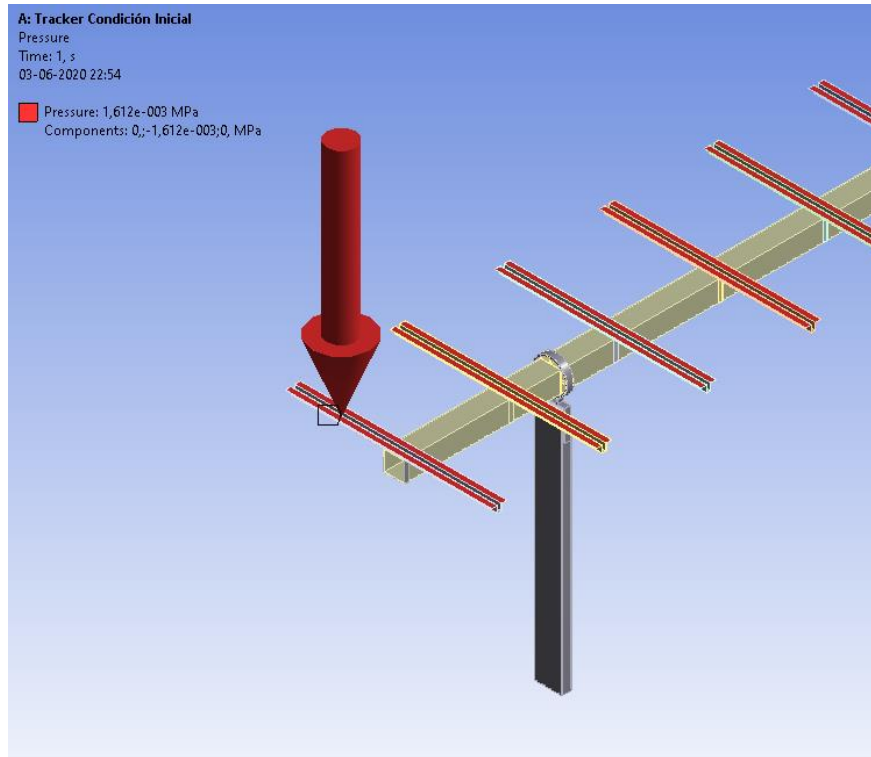
**Figura 41: Mallado del Solar Tracker.**

### **4.3. CONDICIONES DE OPERACIÓN EVALUADAS**

Las condiciones que se evaluarán se eligieron en base a la investigación hecha en el Capítulo 1.3.2, considerando los criterios más relevantes e intentando reflejar las condiciones reales de operaciones y las posibles situaciones de peligro.

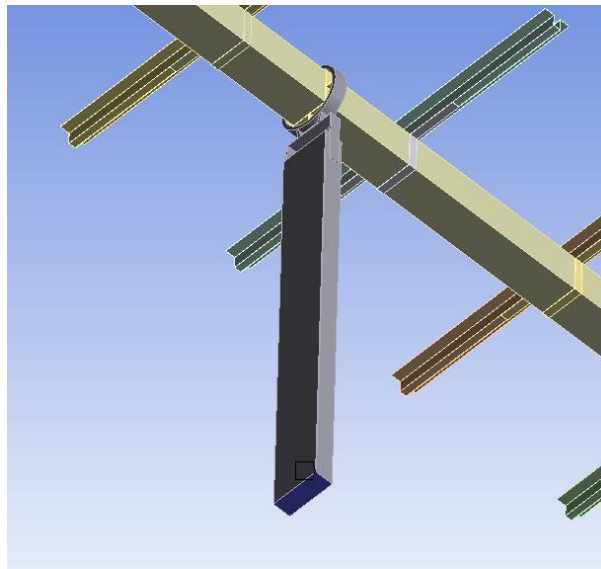
#### **4.3.1. CONDICIÓN ESTÁTICA INICIAL**

En este caso se evaluará como el Solar Tracker soporta su propio peso y el de los paneles sin considerar otras situaciones, es decir, asumiendo que no hay presencia de fuerzas externas y que el mecanismo se ubica en un plano sin inclinación. También se consideró que cada panel pesa  $20 [kg]$ , lo que se representa como una presión de  $1.612 [Pa]$  sobre cada cara de los soportes de módulos.



**Figura 42: Aplicación de presión representando el peso de los paneles.**

Además de esto, se estableció que las condiciones de bordé serán de empotramiento en la base de las cimentaciones. Esta consideración limita tanto el movimiento traslacional de la cimentación, como su rotación en el punto asignado, intentando simular las condiciones que generan una correcta sujeción del perfil al suelo.



**Figura 43: Condición de empotramiento de los perfiles en la zona azul.**

Por último, se aplicó en el software una condición de temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$  tal y como se calculó en el Capítulo 1.3.2.4, generando así las deformaciones por dilatación térmicas correspondientes a cada geometría.

#### 4.3.2. CARENCIA DE SOPORTE

Para la segunda evaluación se planteará un caso desafortunado en donde una de las cimentaciones perdió sujeción, ya sea por una mala instalación o por una mala condición del terreno, el cual como ya vimos en la Figura 15, no es un terreno nivelado, por lo que no se descarta la posibilidad de que el terreno pueda ceder lo suficiente como para dejar a una de las cimentaciones sin soporte. Este caso intenta simular que ocurre con la estructura cuando se da ese caso, y para ello se plantearon las mismas condiciones que el caso estático, solo que se eliminó la condición de empotramiento de una de las cimentaciones.

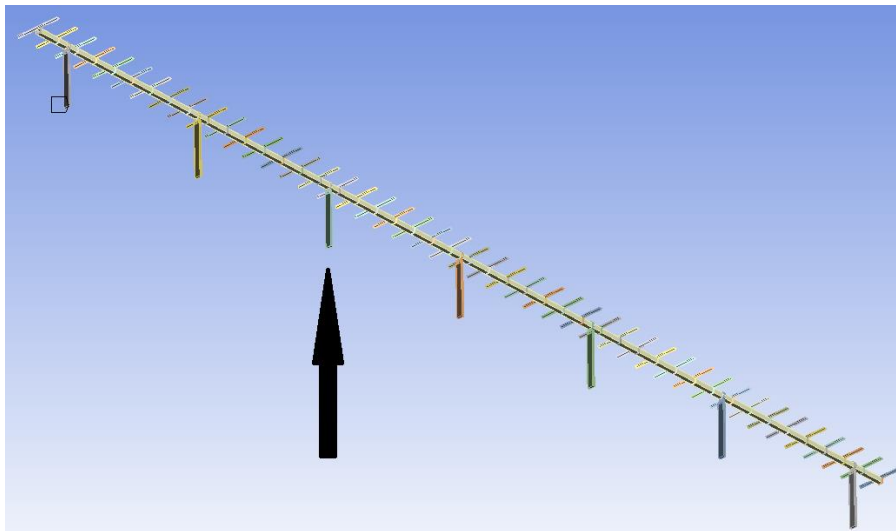


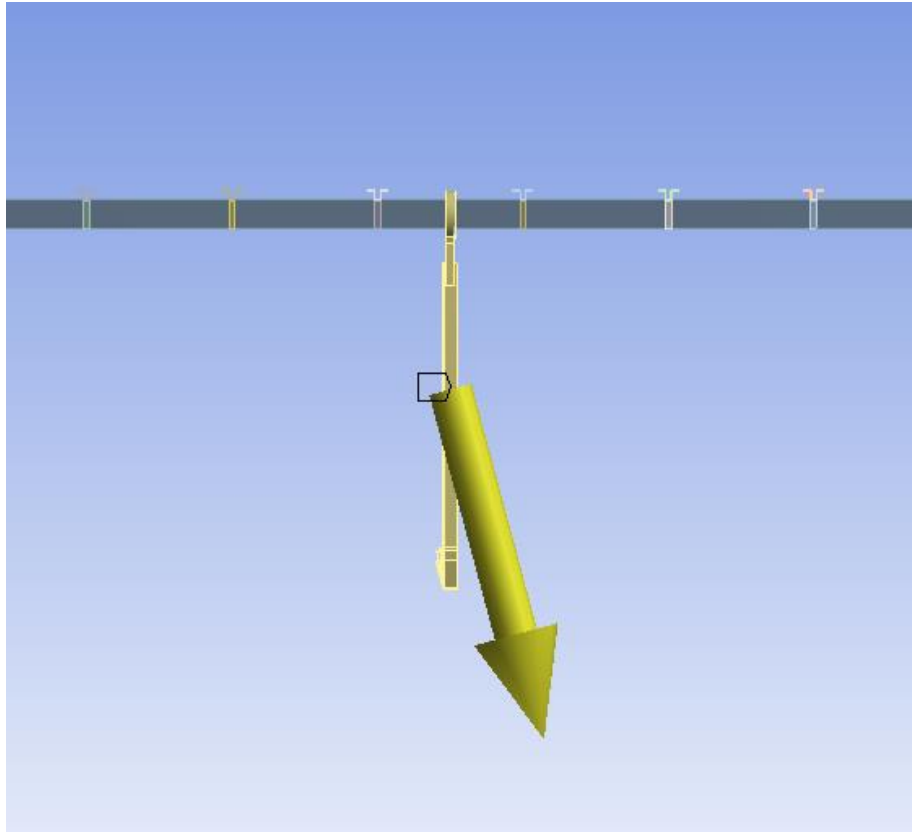
Figura 44: Cimentación elegida para la pérdida de soporte.

#### 4.3.3. INCLINACIÓN DEL TERRENO

La tercera condición ocurre cuando el Solar Tracker es instalado sobre un terreno que posee una inclinación. Dentro de este caso se estudiarán dos situaciones, cuando el sistema se encuentra inclinado en dirección Norte-Sur, y cuando se encuentra inclinado en dirección Este-Oeste. Como ya vimos en la Tabla 1, el fabricante define un límite diferente para cada eje de inclinación.

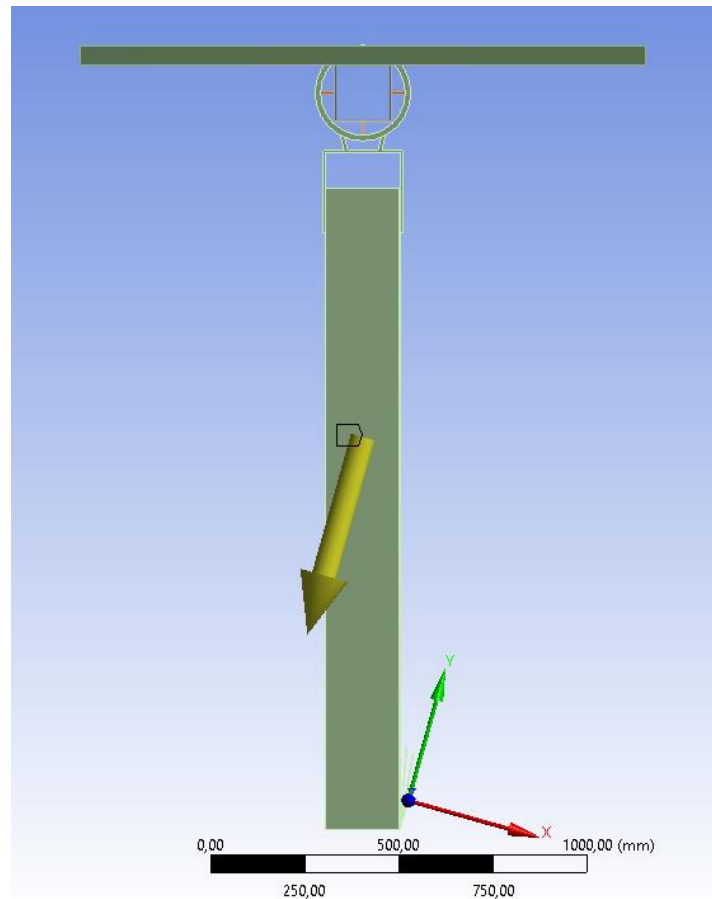
Para poder comenzar la simulación, la condición de fuerzas y montaje son casi las mismas que en el caso estático, sin embargo, para poder simular la inclinación del terreno, se modificó la dirección del vector gravedad.

Para que ANSYS pueda considerar el peso de la estructura, se debe configurar los efectos inerciales sobre el modelo, y a partir de eso se define el vector gravedad, el cual, junto con las propiedades físicas del material, determina un peso sobre la estructura. Debido a esto, si se quiere modificar la inclinación de la estructura se debe ajustar la dirección del vector de gravedad, de esta forma se simula una inclinación del plano.



**Figura 45: Inclinación de 15° en dirección Norte-Sur.**

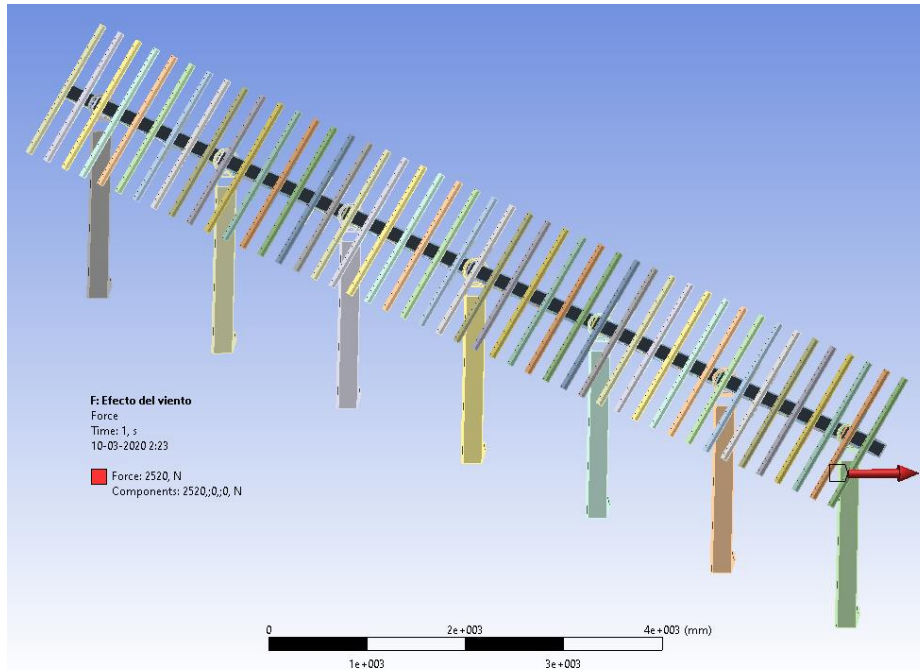
En la Figura 45 se muestra el vector gravedad, el cual se asocia a un sistema de referencia inclinado. Esta inclinación es de 15°, pero para poder evaluar las consecuencias de estas inclinaciones, también se simulará el caso estático para 5° y 10°. Estas mismas inclinaciones serán evaluadas para el caso Este Oeste, con un vector gravedad configurado como se muestra en la Figura 46, donde también se puede observar el sistema de referencia inclinado anteriormente mencionado.



**Figura 46: Inclinación de 15° en dirección Este-Oeste.**

#### **4.3.4. EFECTO DEL VIENTO**

El siguiente parámetro para evaluar será la fuerza que ejerce el viento sobre la estructura. Para ello se modificó un poco la posición del Solar Tracker. En los casos anteriores se consideró la simulación en una posición de reposo, es decir, con los soportes de módulos en posición horizontal, en otras palabras, con una posición de trabajo de 0°. Para este caso, se considerará la posición crítica cuando se trata de viento, y esta es cuando el mecanismo alcanza su máxima inclinación, que según el fabricante es de 60°. Se configurará además una velocidad de viento de 80 [km/hr], la cuál es la máxima velocidad de viento manifestada en forma de ráfagas que se presenta en el año para la zona geográfica en donde se ubica la planta Finis Terrae, según la información mostrada en la Tabla 2. Para poder ingresar este dato en el programa ANSYS, se hará en forma de fuerza aplicada sobre los soportes de módulos.



**Figura 47: Posición crítica para ráfagas de viento.**

Para poder determinar cuanta fuerza aplica un viento de 80 [km/hr] sobre los soportes de módulos en la posición de la Figura 47 se hará uso de la siguiente ecuación.

$$p [Pa] = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Siendo  $p$  la presión de un viento con densidad  $\rho$  medida en  $kg/m^3$  y una velocidad  $V$  medida en  $m/s$ . La densidad del aire en ese sector es de aproximadamente 1,1923 [ $kg/m^3$ ] considerando una presión atmosférica promedio de 1027 [hPa]. En base a esto la presión del viento considerada es de 294 [ $N/m^2$ ]. Si además consideramos que la superficie total de los paneles en un Solar Tracker es de máximo 120 [ $m^2$ ] según el fabricante, lo cual es acorde al diseño expuesto en la Figura 35, entonces la fuerza aplicada sobre todo el mecanismo es de:

$$294 [N/m^2] * 120 [m^2] = 35.280 [N]$$

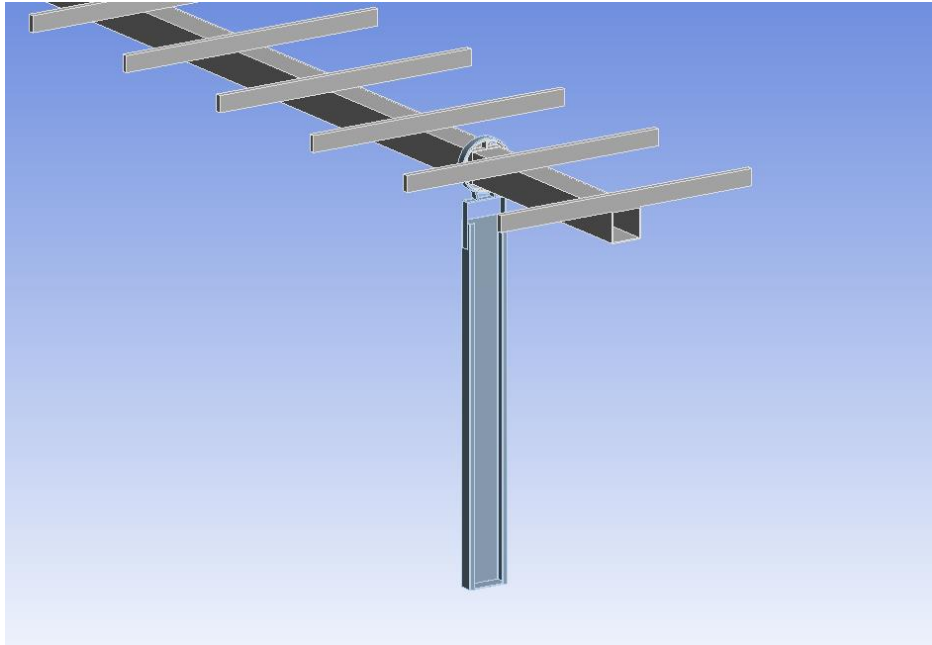
Debido a que en ANSYS solo se evalúa la estructura del Solar Tracker y no los módulos fotovoltaicos, esta fuerza debe ser transmitida a los soportes de módulos. Cada soporte de panel tiene dos caras que sujetan el panel, como se muestra en la Figura 32, y en total son 46 soportes en un Solar Tracker, por lo que son 92 caras que recibirán la fuerza del viento, es por esto por lo que la fuerza transmitida a cada cara es de 383,5 [N]. Este valor de fuerza es el que se proyectará sobre los soportes de paneles para simular una ráfaga de viento de 80 [km/hr], que además es la velocidad de viento máxima que tolera el sistema antes de

entrar en modo seguro, como asegura el fabricante. Para la simulación se considerarán dos situaciones, cuando la ráfaga de viento golpea los paneles desde la cara frontal, y desde la cara posterior.

#### **4.3.5. SIMULACIÓN TRANSITORIA**

Hasta el momento todas las evaluaciones han sido de condiciones estáticas, en donde se evalúan los efectos de diferentes condiciones de forma aislada unas de otras, sin embargo, esta última simulación pretende evaluar lo que ocurre con el Solar Tracker durante un lapsus de tiempo. Asumiendo que el mecanismo tendrá algunas deformaciones tras tolerar su propio peso, la simulación transitoria evaluará los efectos de estas pequeñas deformaciones en el mecanismo cuando este cumple con su función más básica, que es rotar a través de su eje. Lo que ocurre con el mecanismo teniendo un eje flectado es el principal foco de atención de esta parte de la investigación, y para poder observarlo se hará uso de la herramienta Transient Structural de ANSYS, la cual procesa varias evaluaciones estructurales estáticas, pero en diferentes lapsus de tiempo, generando así la información necesaria como para simular el trabajo del Solar Tracker en un periodo de tiempo determinado.

Debido a que esta herramienta necesita un ensamble con uniones móviles para trabajar, se tuvo que volver a diseñar el mecanismo, pero esta vez en el editor de ANSYS, una herramienta llamada SpaceClaim. Este proceso tuvo que realizarse debido a que el archivo exportado desde Inventor que es aceptado por ANSYS es un formato especial, que convierte automáticamente un ensamble funcional en un modelo estático.



**Figura 48: Rediseño del Solar Tracker en SpaceClaim.**

Este rediseño tuvo ciertas consideraciones, los soportes de paneles fueron modificados y reemplazados por piezas de acero S275 sólidas, esto permite representar el peso de los paneles y el de los soportes en forma de masas posicionadas en las sujeciones de los soportes, de esta forma ya no es necesario definir una fuerza que represente el peso de los paneles. Este cambio facilita el cálculo, puesto que ahora el peso de los paneles depende netamente de la dirección de gravedad y no de la posición de un vector de fuerza externa. Por lo demás no hay cambios, el nuevo diseño tiene las mismas geometrías, dimensiones y espesores que el diseño hecho en Inventor.

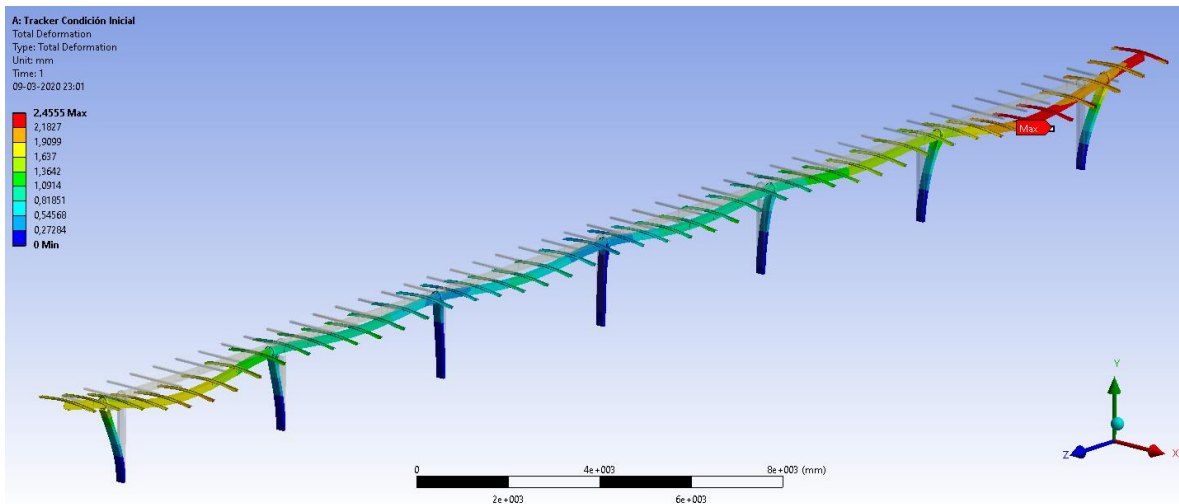
## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se especificarán todos los resultados obtenidos en las simulaciones, definiendo principalmente dos criterios de evaluación. En primer lugar, está la deformación total, la cual es la deformación neta de todos los nodos presentes en la geometría, medida entre su ubicación final, posterior a la simulación, y su posición inicial. En segundo lugar, está el esfuerzo equivalente de Von Mises, el cual funciona como un criterio de falla para materiales dúctiles. Este esfuerzo se calcula a partir de los esfuerzos principales sobre un elemento, y junto con el límite elástico presente en la Tabla 5, determina si existe una deformación permanente del material.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}{2}}$$

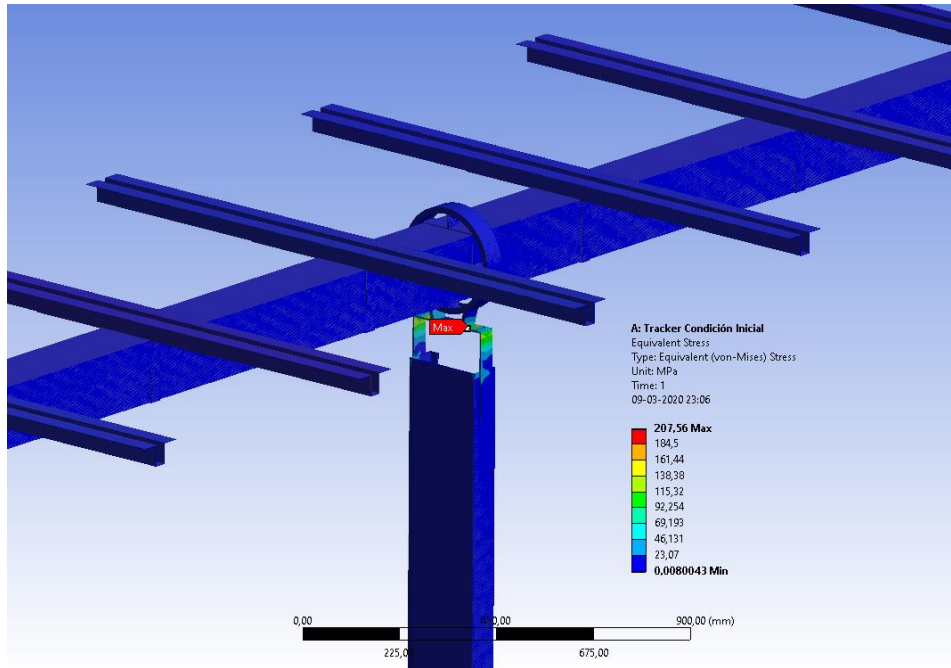
## 5.1. SIMULACIÓN ESTÁTICA INICIAL

Para esta simulación, como ya se había mencionado, solo se cargó la estructura con una presión de  $1,612 * 10^{-3} [MPa]$  en cada cara del soporte, la cual equivale a la mitad del peso de cada panel, y es la mitad porque cada panel es soportado por dos caras de sujeción de los soportes de panel, haciendo que cada soporte sostenga la mitad del peso de un panel con una de sus caras, y con la otra sostenga la mitad del peso del panel adyacente. De esta forma cada soporte tiene la labor de tolerar la presión equivalente de un panel de 20 [kg].

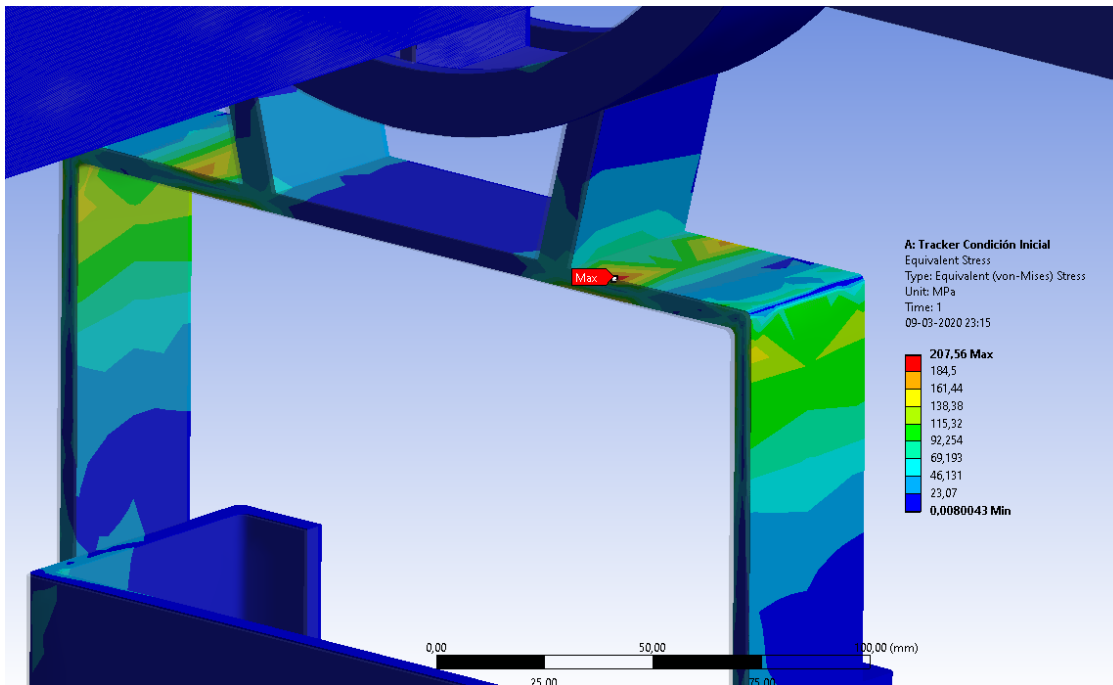


**Figura 49: Deformación total en condición estática inicial.**

En la Figura 49 se aprecia la deformación total del mecanismo cuando está soportando su propio peso y el de los paneles. En la imagen la deformación se encuentra escalada a  $3,7 * 10^2$  veces la deformación real, esto es solo para poder visualizar con mayor facilidad la magnitud de las deformaciones y su distribución. También se aprecia que la escala de colores permite reconocer fácilmente las mayores y menores deformaciones totales, siendo estas de tonalidad roja y azul respectivamente, mientras que los valores intermedios recorren la escala cromática entre estos dos colores, como se aprecia en la secuencia de colores del costado izquierdo.



**Figura 50: Esfuerzo equivalente de Von Mises en condición estática inicial.**



**Figura 51: Acercamiento al máximo valor de esfuerzo equivalente.**

Como se aprecia en la Figura 51, el esfuerzo equivalente de Von Mises máximo se concentra en esa pieza que sostiene el mecanismo de transmisión del eje, y aunque es una pieza simétrica, al igual que la mayor parte de la distribución de esfuerzos equivalentes, el método de elementos finitos y la malla utilizada determinan que el valor máximo está dado

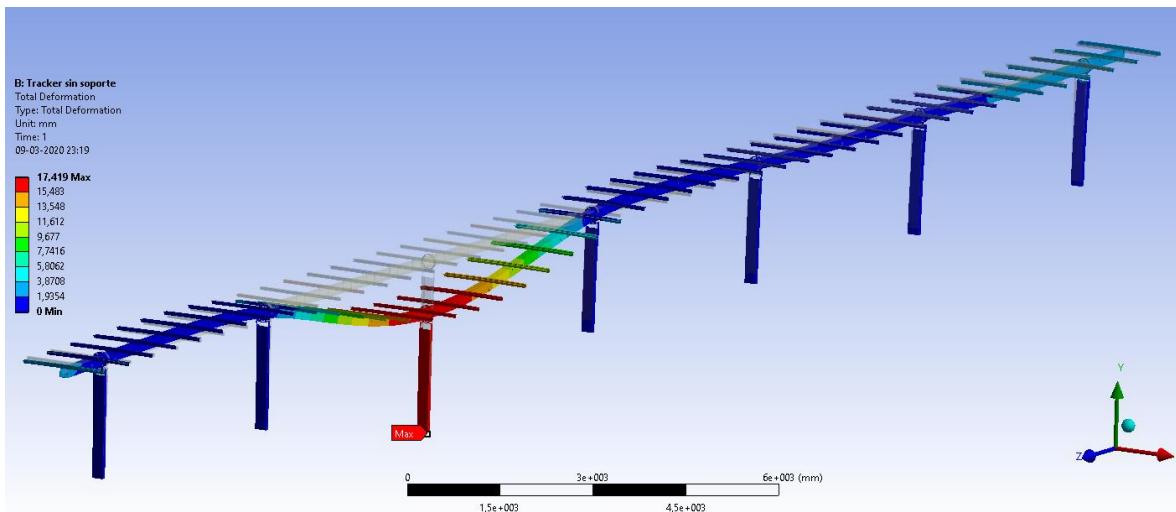
de ese lado del Solar Tracker. Para propósitos prácticos de evaluación y comparación de resultados, se tendrá en cuenta esta última observación.

**Tabla 6: Magnitudes obtenidas de la simulación estática inicial.**

Simulación Estática Inicial	Magnitud	Ubicación
Deformación Total Máxima [mm]	2,46	Soporte de panel y eje última sección
Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	207,56	Soporte de eje quinta cimentación

## 5.2. SIMULACIÓN CON PÉRDIDA DE SOPORTE

Para esta simulación se eliminó la condición de empotramiento de una de las cimentaciones, específicamente de la tercera cimentación.



**Figura 52: Deformación del mecanismo al perder soporte de una cimentación.**

Como se aprecia en la Figura 52, la deformación es bastante notoria y drástica, considerando además que el escalamiento de la imagen es de solo 49 veces la deformación real. Cabe señalar que las demás condiciones de simulación son las mismas que en el caso estático, el mecanismo solo está soportando su propio peso y el de los paneles.

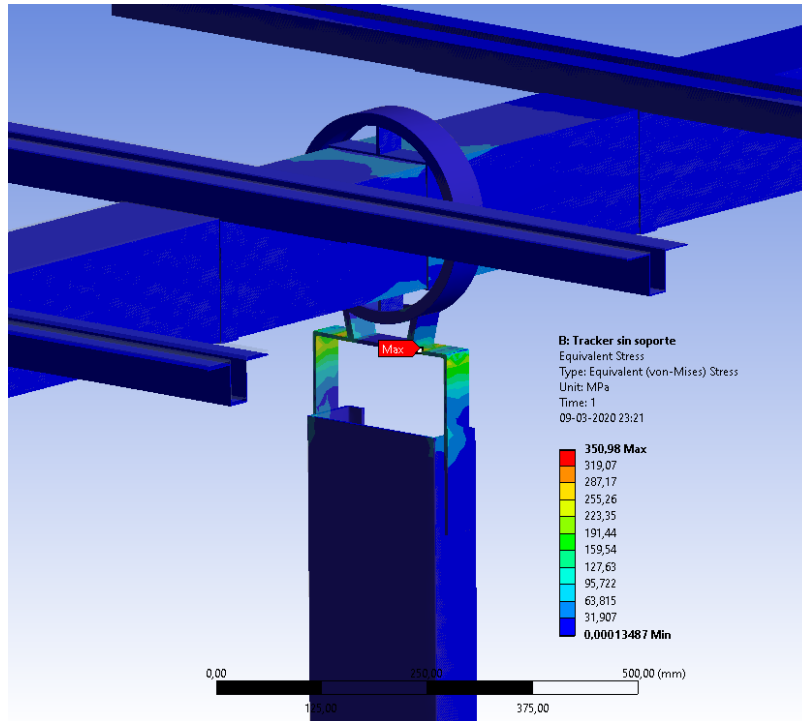


Figura 53: Esfuerzos equivalentes para el caso de pérdida de soporte.

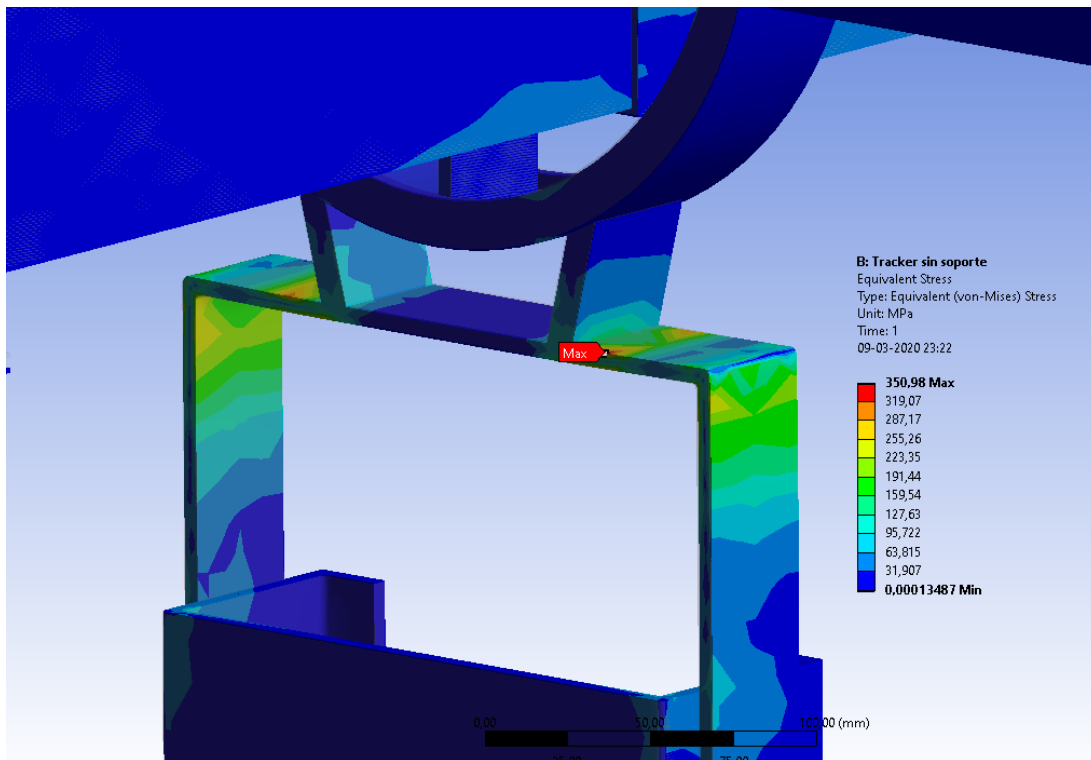


Figura 54: Acercamiento a la pieza con esfuerzo equivalente máximo.

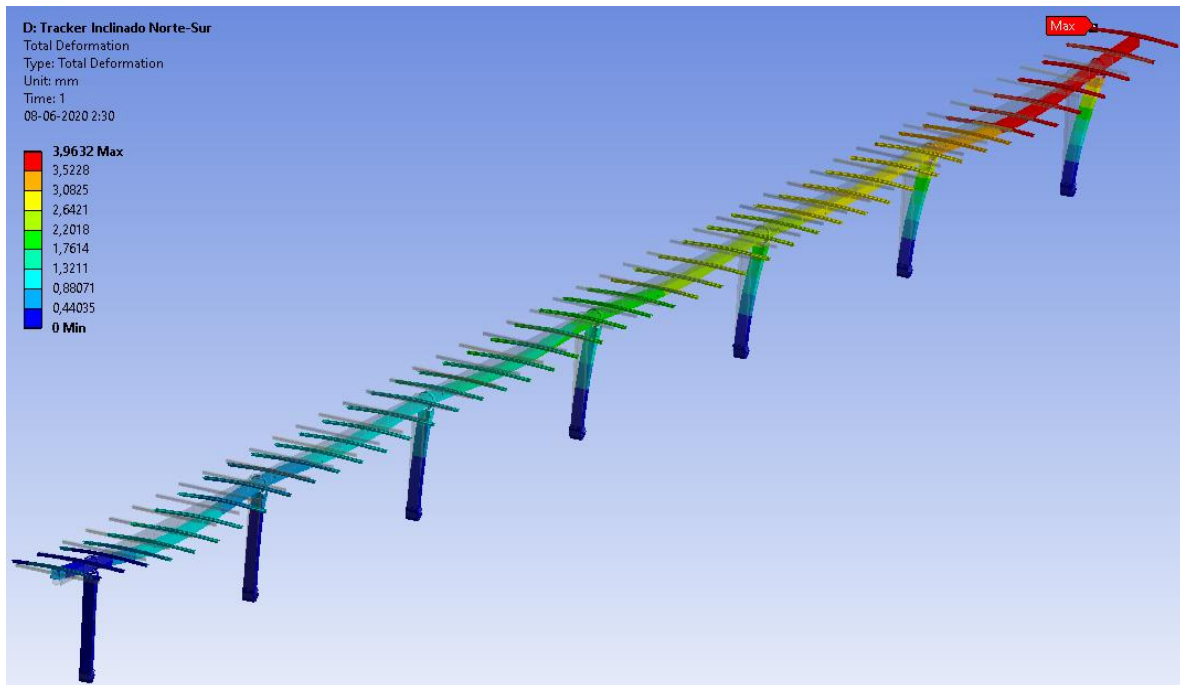
Al observar la Figura 54 se observa que el valor máximo de esfuerzo de Von Mises se ubica en casi la misma posición que el caso estático inicial, sin embargo esta vez, la pieza afectada es la que se ubica en la cimentación posterior a aquella que ha perdido el soporte, es decir, la cuarta cimentación contando de izquierda a derecha siguiendo como referencia la Figura 52. También gracias a la Figura 54 se observa que la pieza de soporte de eje vuelve a tener una distribución de esfuerzos casi simétrica con relación a la dirección del eje de transmisión de rotación, y también se repite el lado de esta pieza con el valor máximo de esfuerzo equivalente.

**Tabla 7: Magnitudes obtenidas de la simulación con pérdida de soporte.**

Simulación con Pérdida de Soporte	Magnitud	Ubicación
Deformación Total Máxima [mm]	17,42	Eje de cimentación sin soporte
Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	350,98	Soporte de eje cuarta cimentación

### 5.3. SIMULACIÓN CON INCLINACIÓN NORTE-SUR

Para esta simulación se consideró como referencia la dirección Norte-Sur para efectuar el desnivel del terreno, y para determinar cómo es que los distintos valores de inclinación del terreno pueden afectar a la estructura, se utilizó una inclinación de 5°, 10° y 15°. Como se explicó anteriormente, lo que en realidad se configura es un sistema de referencia secundario, inclinado en un ángulo determinado con respecto al sistema de referencia original, de esta forma el vector gravedad es direccionado bajo este sistema de referencia secundario, creando la simulación de un terreno inclinado. De la misma forma, el vector de presión que simula el peso de los paneles es direccionado con el mismo sistema de referencia secundario, quedando en concordancia con la dirección de gravedad.



**Figura 55: Deformación de la estructura con inclinación de 5° Norte-Sur.**

De la misma forma que en casos anteriores, la imagen es escalada de tal forma que las deformaciones puedan ser apreciadas. En este caso la deformación visual es  $2,2 \times 10^2$  veces la deformación real que adquiere el mecanismo con una inclinación de 5° dirección Norte-Sur. Los resultados para las deformaciones de 10° y 15° son visualmente muy similares, pero la deformación máxima visible en la Figura 55 con una etiqueta roja aumenta, que es lo que se espera al aumentar la inclinación. Gracias a esta última figura se puede apreciar la dirección de inclinación tan solo observando la deformación, ya que se puede ver que toda la estructura se carga en la dirección del eje, deformándose cada vez más a medida que se recorre este eje, hasta llegar al final del Solar Tracker en donde la deformación llega a su punto más alto. Esto refleja las consecuencias que genera el hecho de que el mecanismo tenga que tolerar su propio peso en una dirección que no sea netamente la vertical.

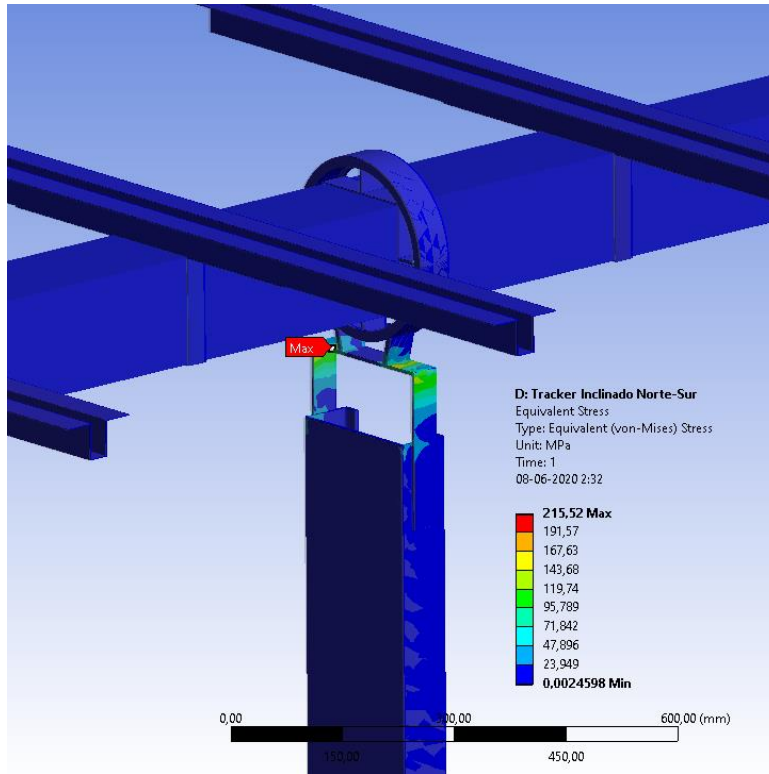


Figura 56: Esfuerzo equivalente con inclinación de 5° Norte-Sur.

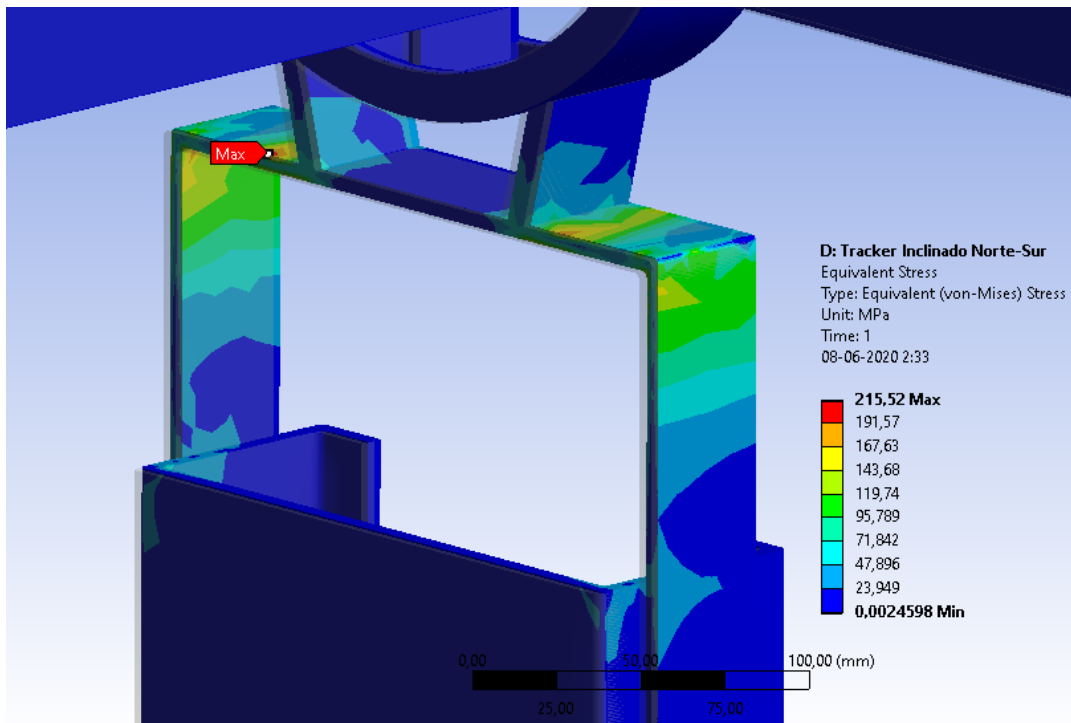


Figura 57: Acercamiento a la posición de máximo esfuerzo equivalente con inclinación de 5° Norte-Sur.

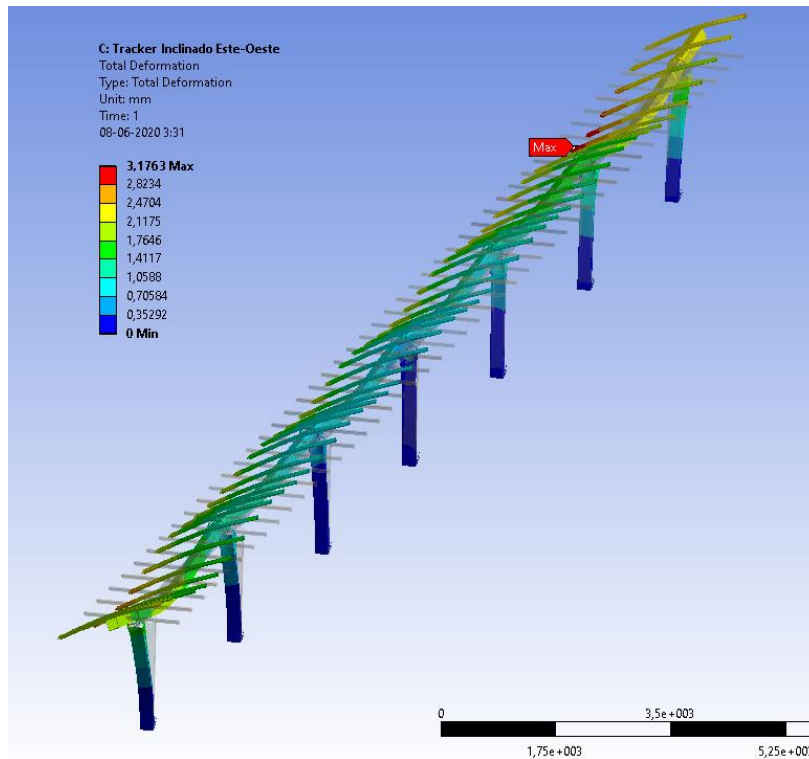
Se repitió el mismo procedimiento para las inclinaciones de 10° y 15°, obteniendo el mismo patrón que con las deformaciones máximas, a medida que aumenta la inclinación del terreno, los esfuerzos equivalentes de Von Mises máximos aumentan, sin embargo, siempre se manifiestan en la misma posición. El resumen de todos los datos obtenidos se encuentra en la siguiente tabla.

**Tabla 8: Magnitudes obtenidas de la simulación con inclinación Norte-Sur.**

Inclinación Norte-Sur		Magnitud	Ubicación
5°	Deformación Total Máxima [mm]	3,96	Último soporte y extremo del eje
	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	215,52	Soporte de eje sexta cimentación
10°	Deformación Total Máxima [mm]	5,63	Último soporte y extremo del eje
	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	225,75	Soporte de eje sexta cimentación
15°	Deformación Total Máxima [mm]	7,27	Último soporte y extremo del eje
	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	234,75	Soporte de eje sexta cimentación

#### 5.4. SIMULACIÓN CON INCLINACIÓN ESTE-OESTE

En este caso el sistema de aplicación es el mismo que el utilizado con la inclinación Norte-Sur, solo que el sistema de referencia secundario está inclinado a partir de la línea Este-Oeste, como se muestra en la Figura 46 (la diferencia entre ambas inclinaciones es apreciable al compararla con la Figura 45). Esta inclinación se aplica en la dirección de gravedad y en la de presión, generando así la siguiente deformación.



**Figura 58: Deformación con inclinación de 5° Este-Oeste.**

Gracias a la Figura 58 se aprecia la deformación ante una inclinación de 5° en dirección Este-Oeste, con un escalado de  $3,6 \times 10^2$  veces la deformación real. Toda la estructura se inclina hacia la pendiente, incluyendo los soportes de paneles, es por esto por lo que el punto de mayor deformación es la punta de uno de los soportes de paneles. Hay que recordar que la deformación total definida por el software identifica el cambio de posición de los elementos, es decir que ese punto no necesariamente es el que sufre mayor deformación del material, pero por su posición, se ve influenciado por la deformación de todo el resto de la estructura, por estar en la punta superior del mecanismo.

Posterior a esto se definieron los esfuerzos equivalentes de Von Mises para la inclinación de 5° Este-Oeste, y al igual que en la inclinación Norte-Sur, la posición del punto de máximo esfuerzo fue la pieza de soporte del eje en la sexta cimentación. Aunque en este caso los esfuerzos crecieron considerablemente más.

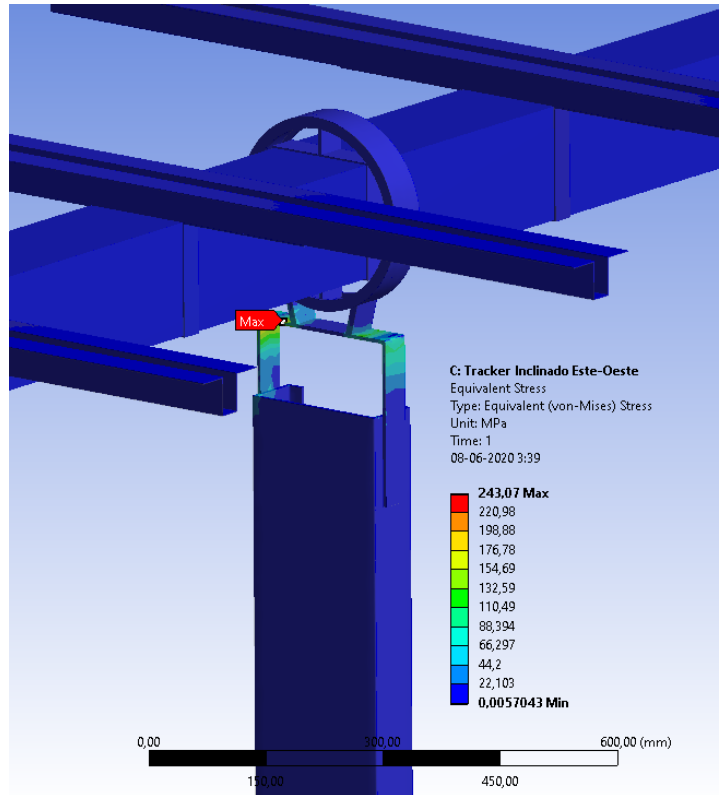


Figura 59: Esfuerzos equivalentes para una inclinación de 5° Este-Oeste.

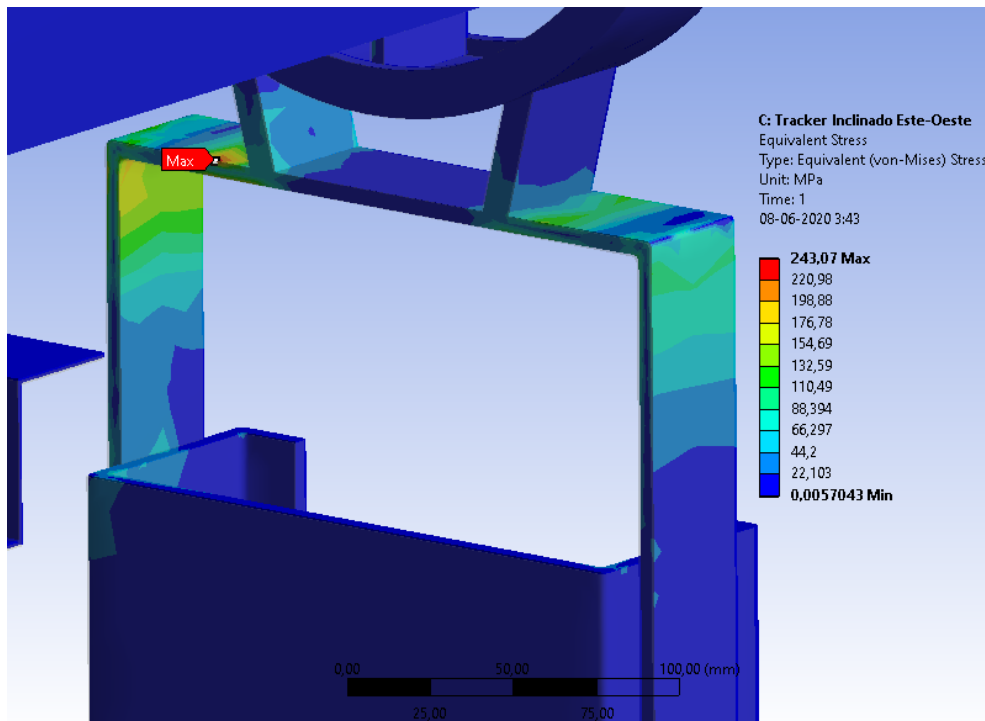


Figura 60: Acercamiento al máximo esfuerzo equivalente en inclinación de 5° Este-Oeste.

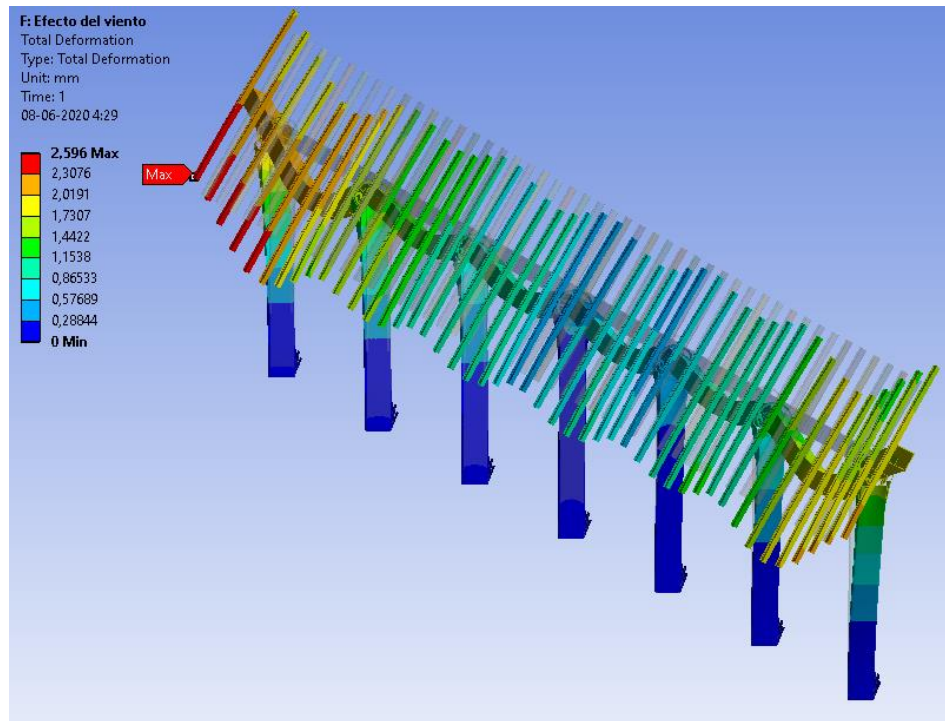
Nuevamente se repiten las mediciones para 10° y 15° de inclinación, observando que los puntos de máxima deformación y esfuerzo se mantienen para todos los ángulos evaluados. También se señala que, como es de esperarse, la distribución de esfuerzos en la pieza crítica ya no es simétrica, como en el caso de condición estática inicial, o en la pérdida de soporte. Para el caso inclinado, la mayor parte de los esfuerzos se concentran hacia el lado de la inclinación.

**Tabla 9: Magnitudes obtenidas de la simulación con inclinación Este-Oeste.**

Inclinación Este-Oeste		Magnitud	Ubicación
5°	Deformación Total Máxima [mm]	3,18	Soporte de panel y eje última sección
	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	243,07	Soporte de eje sexta cimentación
10°	Deformación Total Máxima [mm]	4,13	Soporte de panel y eje última sección
	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	281,76	Soporte de eje sexta cimentación
15°	Deformación Total Máxima [mm]	5,28	Soporte de panel y eje última sección
	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	323,3	Soporte de eje sexta cimentación

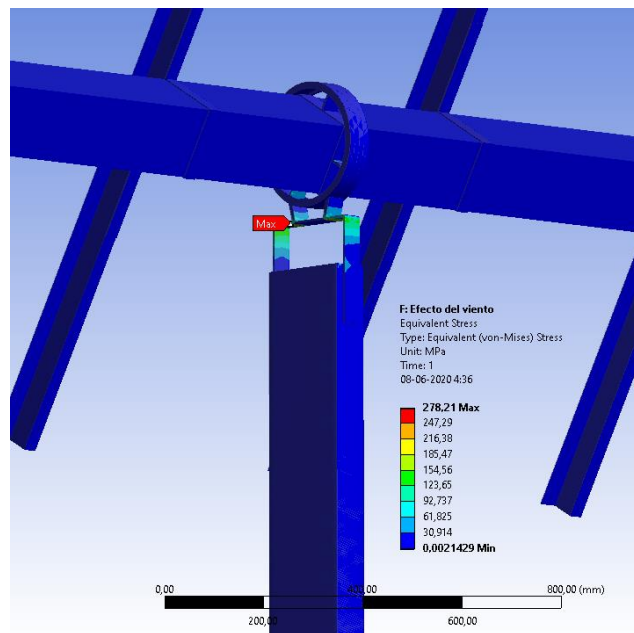
## 5.5. SIMULACIÓN CON EFECTO DEL VIENTO

Como ya se mencionó, para la simulación del efecto que tiene una fuerte ráfaga de viento sobre el Solar Tracker, se modificó su posición, tal y como se muestra en la Figura 47, y se evaluaron dos situaciones, cuando el viento golpea al mecanismo desde la zona frontal de los paneles y desde la zona posterior. Para esta simulación se agregó una fuerza horizontal que tiene la labor de representar un viento de 80 [km/hr], la cual tiene una magnitud de 383,5 [N] en cada cara del soporte de panel. Además, se consideró el peso de los paneles, como en todos los demás casos, y como solo se está evaluando la condición de vientos fuertes, la inclinación del terreno se ajustó en 0°.

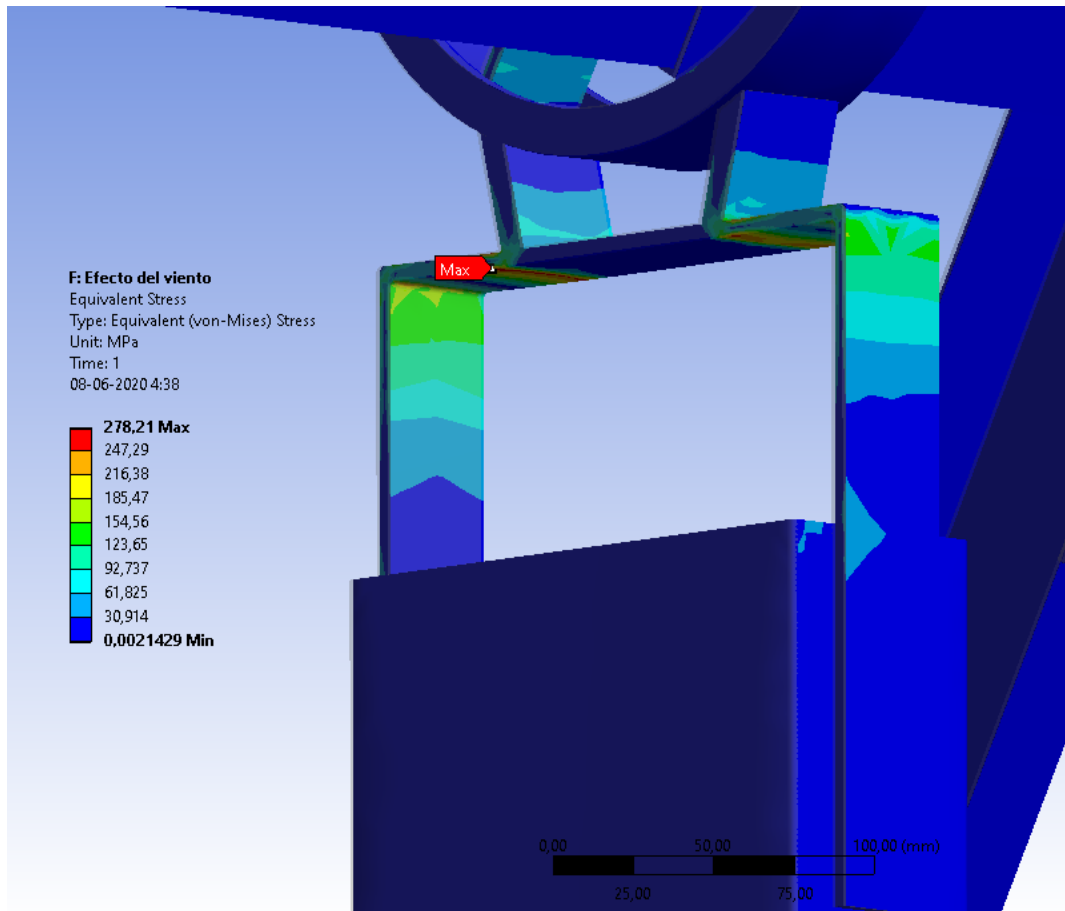


**Figura 61: Deformación por efecto del viento desde el lado frontal.**

La deformación de la imagen se ha escalado a  $3,3 \times 10^2$  veces la deformación real, y aunque aun así es difícil apreciarlo, la presión que ejerce el viento sobre los paneles genera una flexión en toda la estructura en la dirección de la ráfaga de viento, como si fuera la vela de una embarcación.



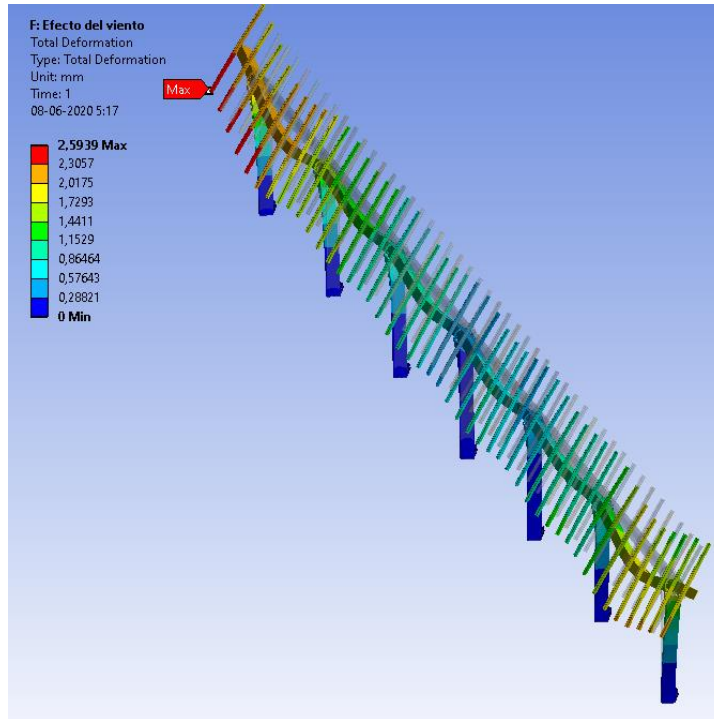
**Figura 62: Esfuerzos equivalentes por efecto del viento desde el lado frontal.**



**Figura 63: Acercamiento al esfuerzo máximo por efecto del viento desde el lado frontal.**

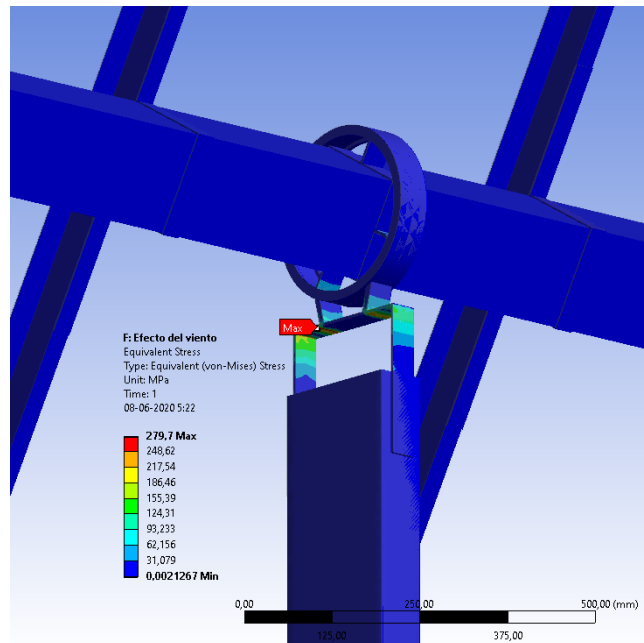
Como se aprecia en la Figura 63 el punto de máximo esfuerzo equivalente de Von Mises se ubica nuevamente en el soporte del eje, sin embargo esta vez se posiciona por debajo de la pieza, ya que el empuje del viento provoca una torsión en esa sección, además hay que señalar que, al igual que en las pruebas con inclinación, el soporte de eje de la sexta cimentación vuelve a ser la pieza con el mayor esfuerzo equivalente.

Para la simulación de viento desde el lado posterior de los paneles, simplemente se invirtió el signo del vector de fuerza del viento. De esta forma se despreja el efecto que tiene el viento sobre el eje y la cimentación para simplificar el problema, ya que, por sus dimensiones, los paneles serán los mayores concentradores de fuerza proveniente del viento.

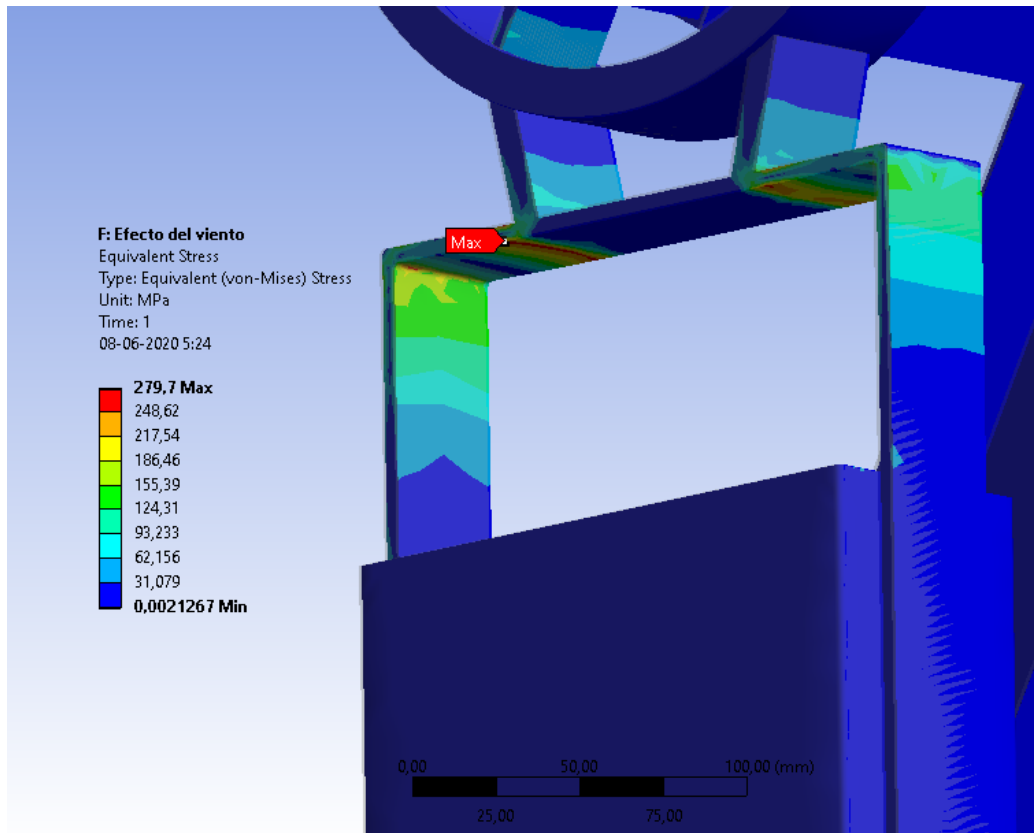


**Figura 64: Deformación por efecto del viento desde el lado posterior de los paneles.**

Nuevamente se aplica una escala para observar las deformaciones, de  $3,3 \times 10^2$  veces la deformación real, y aunque nuevamente no sea sencillo visualizar el sentido de la deformación, existe una leve inclinación de la estructura hacia la dirección del viento.



**Figura 65: Esfuerzos equivalentes por efecto del viento desde lado posterior.**



**Figura 66: Acercamiento al esfuerzo máximo por efecto del viento desde el lado posterior.**

Al comparar la Figura 63 con la Figura 66, se aprecia que los esfuerzos máximos son muy similares, incluso en el punto de aplicación, pero hay una leve diferencia a favor del viento posterior. Esto puede deberse a la posición del peso de los paneles, ya que cuando el viento golpea desde el lado frontal, ayuda a que el peso de los paneles tienda a dirigirse hacia el centro de la estructura, disminuyendo así el efecto de torsión, en cambio, cuando el viento golpea desde el lado posterior, se genera el efecto contrario, aunque también la fuerza del viento tienda a levantar los paneles en este caso, debido al ángulo de los soportes, por lo que de no ser por esto, probablemente el esfuerzo equivalente máximo sería mayor.

Finalmente se tabularon las magnitudes para el efecto del viento sobre el Solar Tracker, haciendo la distinción entre el caso frontal y posterior.

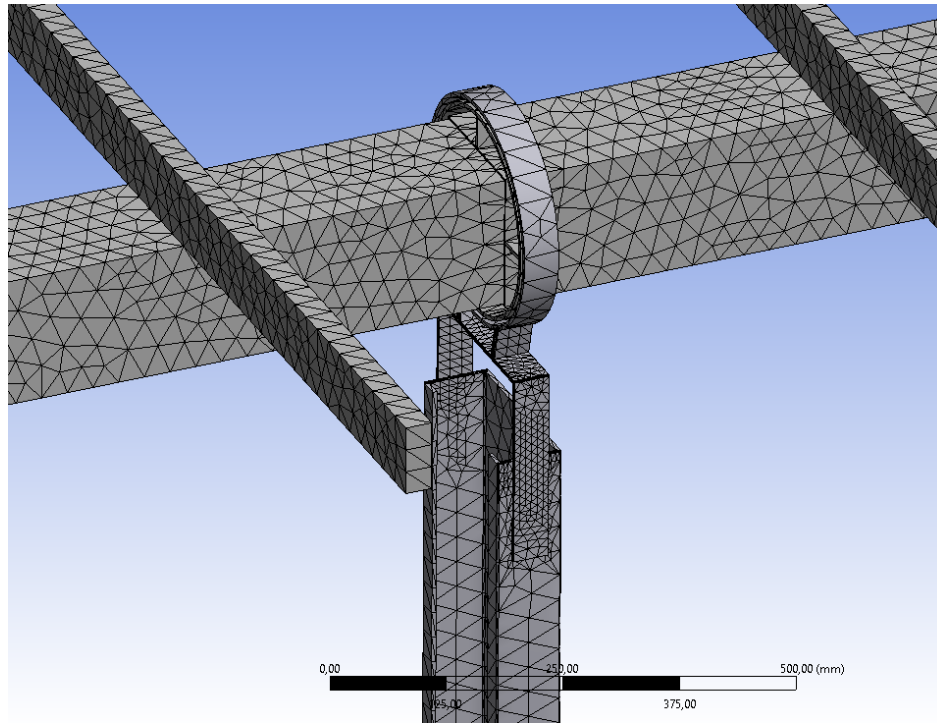
**Tabla 10: Magnitudes obtenidas de la simulación con efecto del viento.**

Efecto del Viento		Magnitud	Ubicación
Lado Frontal	Deformación Total Máxima [mm]	2,6	Último soporte de panel
	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	278,21	Soporte de eje sexta cimentación
Lado Posterior	Deformación Total Máxima [mm]	2,59	Último soporte de panel
	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]	279,7	Soporte de eje sexta cimentación

## 5.6. SIMULACIÓN TRANSITORIA

Al momento de configurar la simulación transitoria ya era evidente que el soporte del eje era la sección con mayores valores de esfuerzo equivalente de todo el mecanismo, es por esto por lo que se modificó la malla de la simulación, haciendo énfasis en esta sección. Se configuró un tamaño de elemento más uniforme en toda la geometría, con un tamaño máximo de 30 [mm] y un mínimo de 2,5 [mm], sin embargo, para la sección de mayor interés se agregó un refinamiento, el cual automáticamente ajusta un tamaño promedio de elemento mucho más pequeño, esto mejora la precisión de los resultados para esa sección, lo que es ideal cuando se tiene una parte específica de interés en el modelo de la simulación.

También se modificó un poco la estructura, reemplazando los soportes de módulos por secciones de material solido que simula el peso de los soportes y además el de los paneles, esto por razones de simplificación de cálculo, como ya se explicó en el Capítulo 4.3.5.

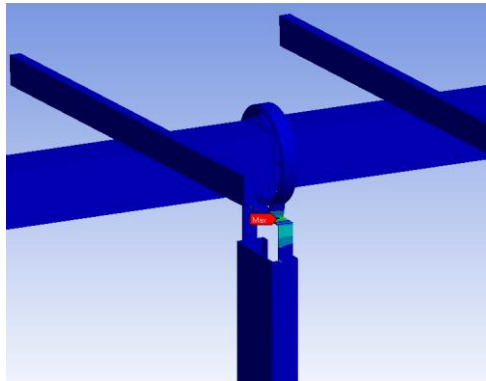


**Figura 67: Modificación del mallado para la simulación transitoria.**

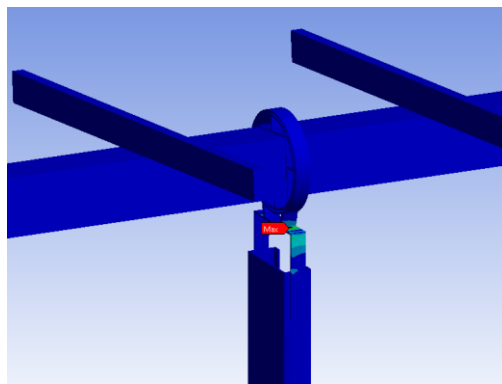
Como esta simulación trabaja con rangos de tiempo de evaluación, fue necesario configurar un rango de movimiento en ese rango de tiempo, por lo que se eligió evaluar el recorrido de  $0^\circ$  a  $10^\circ$  (considerando  $0^\circ$  como la posición horizontal de los paneles) en un periodo de 5 segundos. Este es un movimiento considerablemente más rápido que la velocidad de trabajo habitual, si tenemos un periodo de radiación solar de aproximadamente 10 horas, y sabemos que el rango de trabajo es de  $120^\circ$ , la velocidad de giro es de aproximadamente  $0,2^\circ/\text{min}$ , lamentablemente las limitaciones del software hacen que la velocidad de movimiento deba ser aumentada. Aunque también hay que considerar que el Solar Tracker posee un mecanismo de seguridad, que se activa al detectar vientos de  $80 \text{ [km/hr]}$ . Cuando esto ocurre, el mecanismo rápidamente se posiciona de forma horizontal, para no ser impactado por los fuertes vientos y producirse el efecto de vela observado en la simulación del Capítulo 5.5. De esta forma sabemos que el mecanismo será sometido a una velocidad de giro mucho más grande que la velocidad de trabajo normal, al menos una vez al año según la Tabla 2, lo que nos permite comprender que no es tan descabellado considerar una simulación transitoria con una velocidad de giro mayor a la velocidad de trabajo.

Teniendo todo esto en cuenta, se adicionó la condición de inclinación más crítica,  $15^\circ$  de inclinación en dirección Este-Oeste, que es la que mayores valores de esfuerzo generó sobre el soporte de eje.

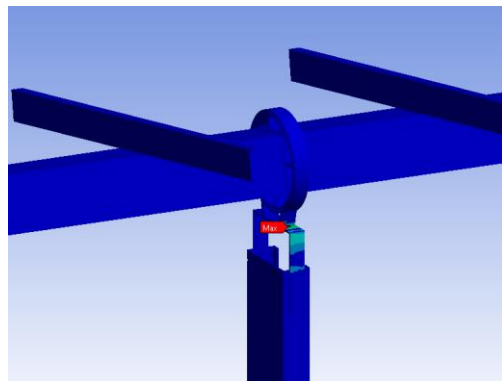
1,5 segundos



3 segundos



5 segundos



**Figura 68: Diferentes posiciones del mecanismo durante la simulación transitoria.**

Como se aprecia en las imágenes de la Figura 68, el punto de mayor esfuerzo equivalente de Von Mises se mantiene en el soporte de eje durante toda la evaluación, sin embargo, esta vez resulta ser el soporte de eje de la cuarta cimentación.

**Tabla 11: Esfuerzos equivalentes máximos en soporte de eje.**

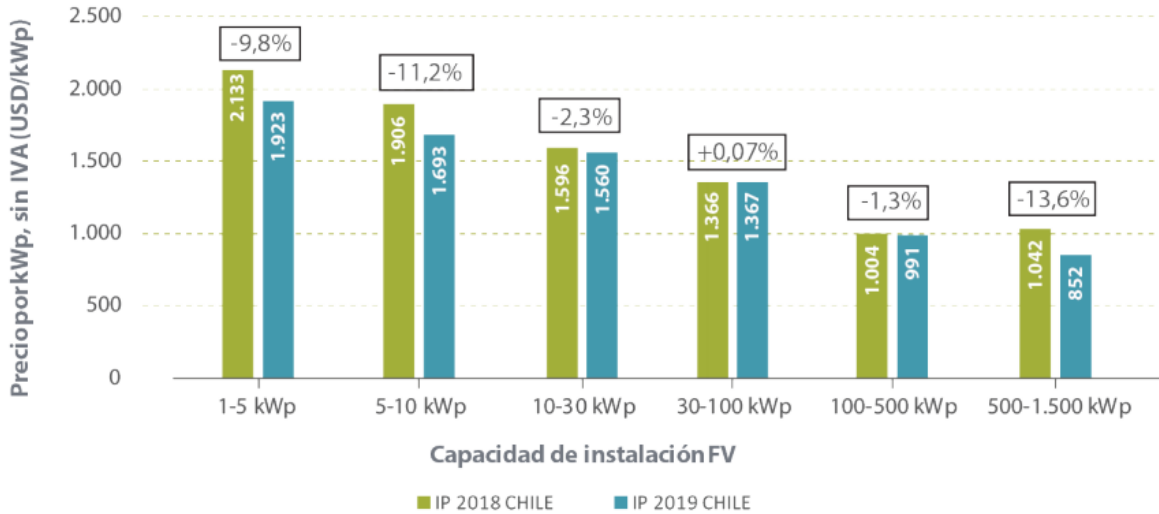
<b>Tiempo [s]</b>	<b>Esfuerzo Equivalente Máximo [MPa]</b>
0,5	748,66
1	770,34
1,5	614,42
2	717,97
2,5	615,9
3	583,92
3,5	617,03
4	510,87
4,5	537,21
5	496,04

La Tabla 11 resume los resultados obtenidos de la simulación transitoria, obteniendo un esfuerzo equivalente de Von Mises máximo de 770,34 [MPa], muy por encima de los resultados obtenidos en las anteriores simulaciones. Hay que considerar que en esta simulación el movimiento determina un factor clave, ya que, debido al peso y la inclinación, el mecanismo tiene una deformación inicial, y al combinar esta deformación de eje con una rotación de este sobre soportes que intentan mantener su forma, provoca que haya aumentos considerables de esfuerzos.

## **6. CONCLUSIONES**

Durante todo este proceso investigativo, se ha insistido en averiguar en qué condiciones trabaja el mecanismo Solar Tracker, y como estas condiciones afectan la integridad de su estructura. Por lo tanto, podríamos decir que la meta es saber cómo podría fallar un mecanismo de seguimiento solar, considerando por supuesto el contexto geográfico en el que trabaja, el cual es un punto muy importante que considerar, ya que, gracias a toda la investigación hecha, es un hecho de que la zona desértica del norte de Chile es un ambiente muy hostil para los mecanismos y sus materiales.

La motivación principal de alcanzar esta misión proviene del hecho de que, en la actualidad, los proyectos fotovoltaicos son un atractivo muy grande para las empresas energéticas, los costos de fabricación son cada vez más bajos y debido a esto hay una alta confianza en este método energético renovable.



**Figura 69: Comparación de precios promedio según capacidad instalada entre 2018 y 2019 en Chile. (Ministerio de Energía, 2020)**

Tan solo entre los años 2018 y 2019 hubo un descenso de costos de un 13,6% para instalaciones relativamente pequeñas. Este es un comportamiento que se ha mantenido desde aproximadamente el año 2010, es por esto por lo que los proyectos relacionados a energía solar han tenido tanta aceptación. Sin embargo, esto puede generar una problemática a mediano e incluso corto plazo. La excesiva confianza que se tiene en los bajos costos de instalación puede subestimar los niveles de costos de operación que se pueden llegar a tener, debido principalmente a fallas y detenciones. En estos momentos es un problema que se puede estar camuflando tras los beneficios de los fabricantes como garantías y asistencias técnicas de bajo costo, sin embargo, cuando este periodo de “prueba” caduque, nos enfrentaremos a planes de mantenimiento insuficientes y fallas casi imposibles de detener.

El primer paso, como ya se mencionó en el Capítulo 1.5 es tener muy claro cómo es que funciona este sistema y de que formas puede fallar. Luego de esto se puede seguir aplicando metodologías que nos permitan enfrentar de mejor manera las fallas inesperadas. Por lo tanto, esta memoria es un primer paso para cumplir ese objetivo.

Para definir concretamente la o las formas en las que el mecanismo puede fallar, primero se deben evaluar los resultados de todas las simulaciones. Para ello se hizo una tabla resumen de los principales resultados obtenidos, haciendo énfasis en las magnitudes y las secciones más afectadas.

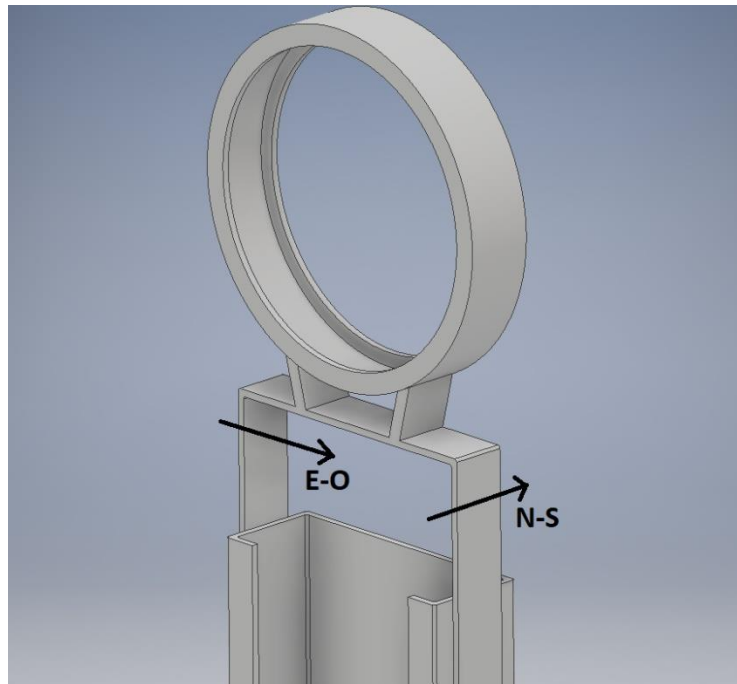
**Tabla 12: Resumen de los datos obtenidos a partir de las simulaciones.**

Simulaciones/Magnitudes		Deformación Total Máxima [mm]	Esfuerzo Equivalente Von Mises [MPa]
Simulación Estática Inicial		2,46	207,56
Simulación con Pérdida de Soporte		17,42	350,98
Inclinación Norte-Sur	5°	3,96	215,52
	10°	5,63	225,75
	15°	7,27	234,75
Inclinación Este-Oeste	5°	3,18	243,07
	10°	4,13	281,76
	15°	5,28	323,30
Efecto del Viento	Lado Frontal	2,60	278,21
	Lado Posterior	2,59	279,70
Simulación Transitoria		-	770,34

Lo primero que se puede observar es que los resultados están muy cerca del punto de fluencia del material (275 [MPa]), e incluso varios sobrepasan este valor, lo que implicaría que en varios casos la estructura terminaría con deformaciones permanentes. Hay que recordar que el diseño de este Solar Tracker está basado en los pocos datos disponibles sobre el modelo real. No es un diseño hecho para tolerar las condiciones de operación, simplemente está hecho para asimilar la forma del modelo original y de esta forma tener una idea de cómo este fallaría. Debido a esto, los datos serán evaluados en base a comparaciones entre una simulación y otra, haciendo énfasis en la magnitud del crecimiento y no en el valor mismo.

A partir de los datos obtenidos se puede concluir que el caso más crítico es la pérdida de soporte de alguna de las cimentaciones, ya sea por una mala instalación, o porque el terreno no tenía las cualidades necesarias para poder tolerar el peso de la estructura. Esta pérdida de soporte resulta fatal para la estructura, incrementando el esfuerzo máximo en casi 150 [MPa], lo que muchas veces resultaría en una deformación grave o incluso en una fractura de material. También hay que señalar que, para ese nivel de esfuerzo, la deformación es de casi 2 [cm], correspondiente a todo el perfil que desciende por la falta de soporte, y aunque parezca una medida pequeña, es un valor suficiente como para que aparezcan fracturas en algunas partes del mecanismo.

En segundo lugar, se encuentra la inclinación del terreno, específicamente en la dirección Este-Oeste. Si bien es cierto que en la dirección Norte-Sur hay un aumento del esfuerzo máximo al aumentar la inclinación, en el caso de la dirección Este-Oeste, este aumento es notoriamente más pronunciado, y las razones están directamente ligadas a la geometría de la sección más castigada de las simulaciones. Al observar la Figura 27, la Figura 28, la Figura 30 y la Figura 34 la geometría básica de este elemento resulta muy clara.



**Figura 70: Direcciones de inclinación que afectan al soporte del eje.**

A través de las simulaciones y al observar la geometría, la conclusión es que el soporte del eje no tolera bien las inclinaciones en la dirección Este-Oeste y la razón se muestra en la Figura 70, su geometría no posee la misma sección transversal cuando se trata de sostener el peso de la estructura para ambas direcciones de inclinación. Para la dirección Norte-Sur, la sección transversal es profunda, tiene la forma de un perfil al soportar una flexión, sin embargo, la sección transversal en la dirección Este-Oeste es propensa a flexionarse ya que su sección transversal tiene menor espesor y una geometría menos resistente.

Si llevamos esta información a datos, es posible afirmar que en comparación con la dirección Norte-Sur, la dirección Este-Oeste tiene un esfuerzo equivalente máximo que es 38% mayor en su inclinación de 15° que la dirección Norte-Sur. Para la inclinación de 10° esta diferencia es del 25%, mientras que para los 5°, el aumento es de 13%. Gracias a esto se puede afirmar que existe una tendencia, los esfuerzos máximos en la estructura crecen con mayor rapidez cuando la inclinación es en dirección Este-Oeste.

Por otra parte, la consideración de viento es un punto importante para analizar. Si bien no alcanza a tener esfuerzos tan altos como en la inclinación Este-Oeste, podemos afirmar que el efecto de ráfagas de viento críticas aumenta los esfuerzos máximos en el soporte del eje un 34% más que en el caso estático inicial. Esto es particularmente llamativo, ya que el sistema de seguridad indica que el mecanismo se pondrá en posición de seguridad cuando los vientos alcancen los 80 [ $km/hr$ ], sin embargo, para ese momento, la estructura ya estará sufriendo las consecuencias de este 34% más de esfuerzos sobre la sección crítica del diseño.

Por último, la simulación transitoria tiene como objetivo representar los esfuerzos en el mecanismo al considerar la rotación. Esta idea surge a partir del hecho de que existe una deformación inicial, producida por el mismo peso de la estructura, por lo que la duda es que pasa con la estructura cuando se rota un eje que está deformado. Naturalmente habrá repercusiones a nivel de esfuerzos producidos por estas deformaciones, las cuales se transmiten a través de los soportes.

Antes de analizar los esfuerzos máximos, se debe aclarar la razón de la ausencia de un valor de deformación para esta simulación transitoria, y es que el software ANSYS determina la deformación total como la diferencia entre la posición de un nodo antes y después de la simulación. Esto es útil para definir la deformación del material en condiciones estáticas, pero al haber movimiento, la deformación pasa a interpretarse como el cambio de posición debido principalmente a este movimiento rotatorio, lo que imposibilita la observación de una deformación de material.

Resulta muy alarmante el valor de esfuerzo máximo que alcanza la estructura, en el soporte del eje, cuando el mecanismo rota. Es un valor de esfuerzo máximo 270% mayor al esfuerzo en condición estática inicial. Este valor tiene que ver con lo que ya se ha mencionado, mezclar rotación con un eje deformado generará inevitablemente un aumento de esfuerzos en una estructura que no está preparada para este fenómeno. Es decir, se asume que los soportes de ejes, como el que aparece en la Figura 70, son elementos rígidos, que no están diseñados para otra cosa que no sea soportar el peso de la estructura y permitir la rotación. En la realidad, la geometría tiene un diseño que permite absorber estas deformaciones por flexión, sin embargo, esto es verdad hasta cierto punto. Se podría decir que no siempre se alcanzarán valores tan altos como los de la simulación transitoria, siempre y cuando no se sobrepasen los valores de deformaciones que estos soportes rotatorios toleran. Y ahí es donde recae la preocupación principal de esta simulación, cuanta deformación es capaz de absorber este mecanismo antes de presentar elevaciones drásticas del esfuerzo equivalente máximo al rotar el mecanismo teniendo un eje deformado.

Para concluir con esta investigación hay que recordar cual es el objetivo general propuesto al inicio.

- Determinar la forma en que un sistema de seguimiento de panel fotovoltaico basado en modelos utilizados en el norte de Chile puede fallar, considerando el contexto en el que opera.

De acuerdo con todo lo investigado, los mecanismos Solar Trackers implementados en el norte de Chile pueden fallar en torno a cuatro categorías principales, fallas de paneles fotovoltaicos, fallas del seguidor, fallas estructurales y por último fallas eléctricas y de comunicación.

Las fallas en paneles están asociadas principalmente a roturas, aunque también existen fallas en conectores y por punto caliente, estas no logran ser tan relevantes en cuanto a porcentaje de ocurrencia (CORFO, 2017). Las fallas por rotura pueden presentarse por diferentes razones, las más comunes es por vandalismo y por fatiga térmica, ocasionada al momento de lavado de los paneles.

Las fallas del seguidor están asociadas a aquellas que afectan al motor reductor y a la estructura sujeta a este que permite la rotación. Las fallas más comunes son de carácter mecánico, generalmente producidas por un mal sellado del reductor o por daños en la estructura de soporte.

Las fallas estructurales están muy ligadas a las fallas del seguidor, ya que el análisis hecho en esta investigación revela que parcialmente pueden estar siendo producidas por los mismos factores. Las cifras que arrojan las simulaciones indican que, factores que quizás no se están teniendo en cuenta a la hora de diseñar e instalar una planta fotovoltaica con seguidores solares, resultan ser más influyentes de lo que uno pensaría. Y es que imágenes como las que aparecen en la Figura 15 indican que la estabilidad del terreno, y su nivelación pueden ser factores dejados en segundo plano al momento de realizar una instalación.

Considerando todo esto, lo que se puede concluir con respecto a las fallas estructurales y aquellas relacionadas con el seguidor es que los puntos a los que más se les debe poner atención es a la estabilidad y solides del terreno, y a la inclinación con la que se está instalando el mecanismo. La estabilidad es muy importante, ya que no sirve de nada que el diseño del mecanismo sea robusto si el terreno es el que terminará cediendo. Lo que ocurriría en ese caso es que se estaría sometiendo a la estructura a una condición de esfuerzos para la que no está diseñada, debido a que tendría que tolerar el peso de los paneles y además el peso de una cimentación que no quedó correctamente apoyada, sin considerar que ocurriría lo observado en la simulación transitoria, se estaría rotando un eje severamente deformado por la caída de una de las cimentaciones, lo que, como ya vimos,

repercutiría en un severo aumento del esfuerzo máximo sobre el soporte del eje. Estos esfuerzos máximos que se concentran en el soporte del eje observado en la Figura 70 son los que están generando las peligrosas deformaciones, que, al sumarlas al constante movimiento rotatorio, pueden generar fallas en otras partes del mecanismo, las cuales, en una condición estática, podrían no ser candidatas a riesgo estructural.

Por último, las fallas eléctricas y de comunicación están asociadas a la pérdida de control y comunicación entre los Solar Trackers y el centro de control de la planta. Estas pueden ser muy variadas, desde fallas por cortes eléctricos a fallas en el software de control. Para poder estudiarlas es necesario hacerlo de forma presencial en la planta, es por esto por lo que no fueron foco de investigación en este documento, pero se espera que sea un tema en consideración al igual que lo son las fallas estructurales, ya que, a futuro, pueden representar una gran pérdida monetaria por el efecto que tienen en la eficiencia de los equipos.

## **7. RECOMENDACIONES**

A partir de las conclusiones hechas, se elaboraron una serie de recomendaciones con el objetivo de iniciar un proceso de análisis para asegurar un futuro plan de mantenimiento que evite las múltiples fallas que podrían llegar a producirse en las plantas fotovoltaicas con mecanismos de seguimiento solar, y todos los costos que eso significaría.

En primer lugar, es necesario verificar el diseño estructural de los seguidores, principalmente en la estructura que soporta el eje, ya que como ya concluimos, es el elemento con mayores esfuerzos equivalentes de la estructura. Se debe reforzar de tal forma que resista las inclinaciones del terreno y las flexiones producidas por el peso de la estructura o por elementos externos como lo son las fuertes ráfagas de viento observadas en el norte de Chile. Siempre se debe asumir que, aunque se especifique que la instalación debe ser muy rigurosa, existe la posibilidad de que no se haga de la forma correcta, y deje lugar a situaciones desafortunadas para la integridad estructural, es decir, diseñar el mecanismo para el peor de los casos es la opción más prudente si se quiere minimizar la tasa de falla a largo plazo.

También se debe evaluar correctamente el terreno, teniendo en cuenta la solidez y estabilidad de este, y en el caso de que no estuviera en óptimas condiciones, adaptarlo para que pueda resistir todos los años de vida útil que se le ha pronosticado a la planta, que en el caso de la planta Finis Terrae, son 25 años, una cifra para nada menor (Electricidad La revista energética de Chile, 2016). Para lograr esta correcta evaluación, se debe hacer uso de los elementos topográficos disponibles. El análisis de un topógrafo podría ser de mucha ayuda, sobre todo al momento de observar las inclinaciones del terreno.

Otro punto importante es evaluar las pérdidas energéticas producto de las deformaciones. Es posible que la estructura esté diseñada para deformarse hasta cierto grado, en muchos casos esto es parte de su función, le da mejor respuesta ante eventos adversos y posibles aumentos de esfuerzos. Una estructura que se diseña para deformarse es capaz de absorber la energía producto de aumentos repentinos en las distribuciones de esfuerzos. Sin embargo, no hay que olvidar que un Solar Tracker es un mecanismo que tiene como finalidad posicionar varios paneles fotovoltaicos lo más perpendicular posible a la dirección de la radiación solar directa. En otras palabras, cualquier desviación de esta perpendicularidad genera pérdidas en la obtención de energía, y si ponderamos estas pérdidas a largo plazo, considerando el número de seguidores solares instalados en las más de 500 hectáreas de terreno de la planta, nos podríamos estar topando con pérdidas significativas. Es por esto por lo que la deformación del mecanismo tiene dos caras, por un lado, está la integridad estructural y por otro lado está la eficiencia energética.

Además, se recomienda revisar los planes de mantenimiento actuales, ya que de lo que se pudo recopilar con respecto a este tema (ver Tabla 4), la mayoría de las inspecciones son visuales y con una frecuencia baja, sobre todo en partes como el seguidor. Para ello se debe tener mucho cuidado en la estrategia que se implementará, debido al tamaño considerablemente extenso de la planta y al número limitado de personal. Para ello lo más indicado es hacer uso de sensores que permitan tener un control preciso de la mayor cantidad de variables en la planta.

Además de las recomendaciones dirigidas hacia la industria, también están las recomendaciones para futuros memoristas, quienes puedan llegar a tener interés de seguir desarrollando temas relacionados al sector energético, principalmente al de plantas fotovoltaicas y seguidores solares. Aunque se trató de considerar la mayor cantidad de variables posibles, hay varios escenarios que tuvieron que quedar fuera de esta investigación, al menos desde el punto de vista más técnico. Algunos de estos escenarios son aquellos producidos por fallas en las comunicaciones. Se recomienda hacer una investigación precisa de este tema, ya que como se mencionó en el capítulo de conclusiones, es un escenario de gran peligro productivo para un corto o mediano plazo.

También se recomienda determinar los efectos de un evento sísmico de magnitud considerable. Nuestro país está ubicado en una zona de alta actividad volcánica y sísmica, lo que vuelve muy recurrente eventos de este tipo, pudiendo observar sismos de alta intensidad en las escalas de medición. Esto es muy preocupante y ha hecho que las normas de edificación se vuelvan más estrictas y minuciosas frente a este tipo de fenómenos. Sin embargo, no hay certeza por parte del fabricante de que se han tomado las medidas necesarias con respecto a este tema. Si los mecanismos Solar Trackers pueden responder

satisfactoriamente a un sismo de alta intensidad o no, es una duda que persiste y genera mucha preocupación, o al menos debería, teniendo en cuenta la inversión que estaría en riesgo, y sabiendo que la posibilidad de un sismo de alta intensidad en alguna parte de Chile ya es una certeza asumida, la única duda de eso es que tan pronto va a ocurrir.

Considerando todo esto, la recomendación para futuros memoristas que quieran tomar un tema similar a este, es que evalúen la respuesta de este tipo de mecanismos ante eventos sísmicos de diferentes intensidades. La utilización de herramientas de simulación como ANSYS o SolidWorks resultan muy conveniente para este tipo de trabajos. Entrega respuestas concluyentes a preguntas complejas para diferentes situaciones.

Por último, queda una última recomendación de análisis que podría resultar interesante. El efecto de fatiga sobre la estructura también podría llegar a ser un factor preocupante si se piensa a largo plazo. Hay que recordar que la estructura está ante constantes cambios de esfuerzos en cada una de las secciones, sobre todo en la sección más crítica, el soporte del eje. La estructura rota de un lado para otro durante todo el día, además de esto sufre ciclos térmicos significativos, y también podría haber factores de fatiga significativos de origen desconocido que vale la pena estudiar, como vientos cambiantes en cuanto a intensidad y dirección. Todos estos factores podrían estar alimentando un efecto de fatiga que, como bien sabemos en ingeniería mecánica, es un enemigo muy recurrente en los mecanismos modernos.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ben-Daya, M., Kumar, U., & Murthy, P. (2016). *Introduction to Maintenance Engineering: Modelling, Optimization, and Management*. John Wiley & Sons.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw-Hill Interamericana.

Cooperativa. (13 de Agosto de 2016). *cooperativa.cl*. Obtenido de <https://www.cooperativa.cl/noticias/tecnologia/energia/planta-solar-mas-grande-de-sudamerica-ya-esta-operativa-en-el-desierto/2016-08-13/111128.html>

CORFO. (2017). *Estudio Benchmarking de Plantas Solares Fotovoltaicas en Chile*. Santiago de Chile. Obtenido de [https://www.comitesolar.cl/wp-content/uploads/2017/04/Informe-Benchmarking-Plantas-Solares-Fotovoltaicas\\_actualizaci%C3%B3n.pdf](https://www.comitesolar.cl/wp-content/uploads/2017/04/Informe-Benchmarking-Plantas-Solares-Fotovoltaicas_actualizaci%C3%B3n.pdf)

Electricidad La revista energética de Chile. (3 de Marzo de 2016). Parque solar Finis Terrae tiene la mayor capacidad instalada en el país. *Electricidad La revista energética de*

Chile. Obtenido de <https://www.revistaei.cl/informes-tecnicos/parque-solar-finis-terrae-tiene-la-mayor-capacidad-instalada-en-el-pais/>

Hafez, A. Z., Yousef, A. M., & Harag, N. M. (2018). *Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.*

Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering: processes and systems.* Academic Press.

Meteored. (2020). *meteored.cl.* Obtenido de [https://www.meteored.cl/tiempo-en\\_Calama-America+Sur-Chile-Antofagasta-SCCF-sactual-18564.html](https://www.meteored.cl/tiempo-en_Calama-America+Sur-Chile-Antofagasta-SCCF-sactual-18564.html)

Ministerio de Energía. (21 de Febrero de 2020). *energia.gob.cl.* Obtenido de <https://www.energia.gob.cl/noticias/nacional/precios-de-sistemas-fotovoltaicos-bajan-hasta-136-en-el-ultimo-ano>

Ministerio de Energía. (2020). *Explorador Solar.* Obtenido de <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/inicio>

Mora Gutiérrez, A. (2009). *Mantenimiento: Planeación, Ejecución y Control.* México D.F.: Alfaomega.

Proveedor de Solar Trackers. (s.f.). *soltec.com.* Obtenido de <https://soltec.com/es/soltec-suministra-38-mw-de-seguidores-solares-al-proyecto-assurua/>

Proveedor de Solar Trackers. (s.f.). *soltec.com.* Obtenido de <https://soltec.com/es/soltec-suministra-101-mw-de-su-seguidor-solar-en-brasil/>

Proveedor de Solar Trackers. (s.f.). *soltec.com.* Obtenido de <https://soltec.com/es/soltec-supplies-sf-utility-trackers-for-utility-scale-test-bed-with-bi-facial-pv-modules/>

Proveedor de Solar Trackers. (s.f.). *soltec.com.* Obtenido de <https://soltec.com/es/soltec-to-supply-21-mw-of-solar-trackers-in-two-chilean-projects/>

SAE-JA1011. (1999). Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento centrado en Confiabilidad.

SAE-JA1012. (2002). Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).

Sarmiento, P. (1985). *Energía Solar Aplicaciones e Ingeniería.* Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso.

Singh, N. (22 de Enero de 2020). Las ocho fallas principales que afectan la producción de plantas fotovoltaicas en Chile según el Comité Solar de CORFO. *Energía Estratégica.*

Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/las-8-fallas-afectan-plantas-fotovoltaicas-segun-corfo-chile/>

Solargis. (2017). *solargis.com*. Obtenido de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/world>

Vera, R., Puentes, M., Araya, R., Rojas, P., & Carvajal, A. (2012). Mapa de corrosión atmosférica de Chile: resultados después de un año de exposición. *Revista de la construcción*, 11(2), 61-72. Obtenido de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000200007>