



Universidad de  
Oviedo



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.**

## **MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

### **ÁREA DE CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN**

**Planta fotovoltaica para seguidores solares. Diseño de estructura e  
implantación**

**D. MARTÍN FERNÁNDEZ, DAVID  
TUTOR: D. SUÁREZ MÉNDEZ, PABLO**

**FECHA: JUNIO DE 2023**

# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS Y ALCANCE .....</b>	<b>10</b>
<b>3.</b>	<b>DATOS DEL CLIENTE .....</b>	<b>11</b>
3.1.	PRODUCTO 1V .....	11
3.1.1.	<i>Estructura y componentes .....</i>	<i>11</i>
3.1.2.	<i>Disposiciones geométricas.....</i>	<i>13</i>
3.1.3.	<i>Detalles de implantación .....</i>	<i>15</i>
3.2.	LOCALIZACIÓN Y NORMATIVA.....	17
3.3.	DATOS DE PROYECTO .....	17
3.3.1.	<i>Panel y disposición del seguidor solar .....</i>	<i>17</i>
3.3.2.	<i>Ambiente y terreno.....</i>	<i>18</i>
3.3.3.	<i>Materiales.....</i>	<i>19</i>
<b>4.</b>	<b>CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO .....</b>	<b>21</b>
4.1.	DISEÑO GEOMÉTRICO.....	21
4.2.	CÁLCULO ESTÁTICO Y SÍSMICO .....	23
4.2.1.	<i>Peso propio .....</i>	<i>23</i>
4.2.2.	<i>Cargas de viento .....</i>	<i>24</i>
4.2.3.	<i>Cargas de nieve.....</i>	<i>25</i>
4.2.4.	<i>Carga sísmica.....</i>	<i>26</i>
4.3.	COMPROBACIÓN DEL MOTOR.....	27
4.4.	CORROSIÓN .....	28
4.5.	MODELADO EN CYPE .....	31
4.6.	MODELADO EN SAP 2000 .....	34
4.7.	DIMENSIONAMIENTO .....	38
4.8.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DINÁMICA .....	40
4.8.1.	<i>Fenómenos de inestabilidad aeroelástica.....</i>	<i>40</i>
4.8.2.	<i>Comprobación de estabilidad .....</i>	<i>43</i>
<b>5.</b>	<b>IMPLANTACIÓN.....</b>	<b>48</b>
<b>6.</b>	<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>53</b>
6.1.	RESUMEN .....	53
6.2.	ELEMENTOS ESTRUCTURALES .....	54
6.3.	PIECERÍO Y TORNILLERÍA.....	54

6.4.	ELEMENTOS COMERCIALES .....	55
6.5.	ELEMENTOS DE CONTROL DE PLANTA.....	55
6.6.	OBRA CIVIL.....	56
6.7.	COSTE FINAL.....	56
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>58</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>60</b>

<b>ANEXOS</b>	
<b>Anexo I</b>	<b>Cálculo de cargas de viento</b>
<b>Anexo II</b>	<b>Cálculo de corrosión</b>
<b>Anexo III</b>	<b>Mantenimiento preventivo y correctivo</b>
<b>Anexo IV</b>	<b>Planos</b>
<b>Anexo V</b>	<b>Elementos comerciales</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1- NORMATIVA DE REFERENCIA .....	17
TABLA 3.2- DATOS DE PANEL Y DISPOSICIÓN DEL SEGUIDOR .....	17
TABLA 3.3- ANÁLISIS DE CORROSIÓN DEL AMBIENTE .....	18
TABLA 3.4- ANÁLISIS DE CORROSIÓN DEL TERRENO .....	19
TABLA 3.5- VALORES DE LÍMITE ELÁSTICO Y RESISTENCIA ÚLTIMA A TRACCIÓN .....	19
TABLA 3.6- VALORES DE LÍMITE ELÁSTICO Y RESISTENCIA ÚLTIMA A TRACCIÓN PARA TORNILLOS SEGÚN EUROCÓDIGO .....	20
TABLA 3.7- VALORES DE LÍMITE ELÁSTICO Y RESISTENCIA ÚLTIMA A TRACCIÓN PARA TORNILLOS DE ACERO INOXIDABLE SEGÚN EUROCÓDIGO .....	20
TABLA 4.1- CARGAS DE PESO PROPIO APLICADAS SOBRE EL TRACKER .....	23
TABLA 4.2- VALORES DE CARGA DE VIENTO EN PANELES PARA UNA ESTRATEGIA DE DEFENSA DE 3º-3º ..	24
TABLA 4.3- VALORES DE CARGA DE VIENTO EN PANELES PARA UNA ESTRATEGIA DE DEFENSA DE 30º-3º	24
TABLA 4.4- CARGAS SUPERFICIALES EN CADA ZONA DE LA CUBIERTA (PANELES) .....	25
TABLA 4.5- CARGAS Y MOMENTOS DE NIEVE .....	26
TABLA 4.6- NORMATIVA A CONSIDERAR PARA LA CORROSIÓN AMBIENTAL .....	29
TABLA 4.7- NORMATIVA A CONSIDERAR PARA LA CORROSIÓN DEL TERRENO .....	29
TABLA 4.8- COMPROBACIÓN DEL ESPESOR DEL PRE-GALVANIZADO .....	29
TABLA 4.9- COMPROBACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE GALVANIZADO APLICADO .....	30
TABLA 4.10- LÍMITES ELS DE FLECHA EN LAS VIGAS Y DE GIRO EN EL EXTREMO .....	34
TABLA 4.11- PERFILES OBTENIDOS DEL DIMENSIONAMIENTO Y SUS APROVECHAMIENTOS PARA LOS SEGUIDORES EXPUESTOS.....	38
TABLA 4.12- PERFILES OBTENIDOS DEL DIMENSIONAMIENTO Y SUS APROVECHAMIENTOS PARA LOS SEGUIDORES RESGUARDADOS .....	38
TABLA 4.13- VALORES ELS PARA LOS ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA .....	39
TABLA 4.14- RESUMEN DE PERFILES EMPLEADOS PARA LA ESTRUCTURA DE LOS SEGUIDORES SOLARES..	39
TABLA 4.15- FRECUENCIAS NATURALES DE LA ESTRUCTURA .....	43

TABLA 4.16- VELOCIDADES CRÍTICAS APLICANDO COEFICIENTES DE SEGURIDAD DE LA ESTRUCTURA CON Y SIN AMORTIGUACIÓN .....	44
TABLA 4.17- COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD .....	47
TABLA 5.1- DATOS OBTENIDOS DURANTE LA IMPLANTACIÓN.....	52
TABLA 6.1- RESUMEN DEL PROYECTO.....	53
TABLA 6.2- COSTES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES .....	54
.....	54
TABLA 6.3- COSTES DE TORNILLERÍA.....	54
TABLA 6.4- COSTES DE PIECERÍO Y UNIONES .....	55
TABLA 6.5- COSTES DE ELEMENTOS COMERCIALES.....	55
TABLA 6.6- COSTES DE ELEMENTOS DE CONTROL DE PLANTA .....	56
TABLA 6.7- COSTES DE OBRA CIVIL .....	56
TABLA 6.8- COSTE FINAL DEL PROYECTO .....	57

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1- REPRESENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PRODUCTO 1V MONOFILA .....	12
FIGURA 3.2- ESQUEMA DE UNIONES DEL SEGUIDOR 1V MONOFILA.....	13
FIGURA 3.3- DETALLES GEOMÉTRICOS DEL TRACKER MONOFILA .....	14
FIGURA 3.4- ESQUEMA DE UNA IMPLANTACIÓN DE TRACKERS EXPUESTOS Y RESGUARDOS .....	16
FIGURA 3.5- ESQUEMA DE SEGUIDORES EXPUESTOS Y RESGUARDOS DE FORMA ESCALONADA.....	16
FIGURA 4.1- ENTRADA DE DATOS GEOMÉTRICOS EN EL SOFTWARE SIZESMART DE GONVARRI SOLAR STEEL .....	22
FIGURA 4.2- COMPROBACIÓN DEL PAR ESTÁTICO DEL MOTOR PARA LA ESTRATEGIA DE DEFENSA 3º-3º.	27
FIGURA 4.3- COMPROBACIÓN DEL PAR ESTÁTICO DEL MOTOR PARA LA ESTRATEGIA DE DEFENSA 30º-3º .....	28
FIGURA 4.4- ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DE ALEACIONES ZINC-MAGNESIO.....	30
FIGURA 4.5- MODELO DE LOS SEGUIDORES SOLARES EN CYPE 3D .....	31
FIGURA 4.6- INTRODUCCIÓN DE PAÑOS Y CARGAS .....	32
FIGURA 4.7- SOLUCIÓN FINAL DEL DIMENSIONAMIENTO DE PERFILES DE LA ESTRUCTURA .....	33
FIGURA 4.8- INTRODUCCIÓN DE PAÑOS PARA CUBIERTAS SEGÚN EUROCÓDIGO .....	33
FIGURA 4.9- MODELO DE TRACKER EN POSICIÓN DE DEFENSA (3º) .....	35
FIGURA 4.10- ALZADO DE LOS MODELOS GENERADOS.....	35
FIGURA 4.11- MODELO DE TRACKER EN POSICIÓN DE FUNCIONAMIENTO (55º) .....	36
FIGURA 4.12- REPRESENTACIÓN DE LA DEFORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	37
FIGURA 4.13- CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DE ACERO CONFORMADO .....	37
FIGURA 4.14- CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DE ACERO LAMINADO.....	37
FIGURA 4.15- PROCESO DE INESTABILIDAD AEROELÁSTICA DE UN SEGUIDOR SOLAR .....	41
FIGURA 4.16- DIAGRAMA DE ESTABILIDAD DE UN SEGUIDOR SOLAR .....	42
FIGURA 4.17- DIAGRAMA DE ESTABILIDAD MODIFICADO CON LA INCLUSIÓN DE AMORTIGUADORES .....	42
FIGURA 4.19- CURVA DE ESTABILIDAD DE UN TRACKER EXPUESTO SIN AMORTIGUACIÓN.....	45
FIGURA 4.20- CURVA DE ESTABILIDAD DE UN TRACKER RESGUARDO SIN AMORTIGUACIÓN .....	45
FIGURA 4.21- CURVA DE ESTABILIDAD DE UN TRACKER EXPUESTO CON AMORTIGUACIÓN.....	46

FIGURA 4.22- CURVA DE ESTABILIDAD DE UN TRACKER RESGUARDO CON AMORTIGUACIÓN .....	46
FIGURA 5.1- ARCHIVO DEL TERRENO PROPORCIONADO POR EL CLIENTE .....	48
FIGURA 5.2- VENTANA DE INTRODUCCIÓN DE DATOS DE PVCASE.....	49
FIGURA 5.3- EMPLAZAMIENTO ANTES DE REALIZAR LA IMPLANTACIÓN .....	50
FIGURA 5.4- EMPLAZAMIENTO TRAS REALIZAR LA IMPLANTACIÓN .....	50
FIGURA 5.5- CLASIFICACIÓN DE SEGUIDORES EXPUESTOS Y RESGUARDOS .....	51
FIGURA 5.6- MOVIMIENTO DE TIERRAS NECESARIO .....	52

# 1. INTRODUCCIÓN

La energía se ha convertido en uno de los pilares fundamentales de la sociedad del siglo XXI. Sin ella no podrían funcionar industrias, negocios, transportes... Tradicionalmente, esta energía se obtenía mediante procesos contaminantes, tales como centrales térmicas o nucleares. No obstante, debido a la situación que atraviesa el planeta y al interés en auge por proteger el medioambiente, se ha tratado de reducir el uso de este tipo de mecanismos de generación de energía perjudiciales para el ecosistema. Los organismos internacionales se reúnen en cumbres que cada vez son más relevantes (como la COP), de modo que los países se comprometen en adoptar medidas energéticas verdes. Gracias a esta situación, las energías renovables cobraron una gran importancia, entre las cuales destaca la energía solar fotovoltaica. España es uno de los países mundiales que más apuesta por este mecanismo de obtención energética. Y es que aprovechar un recurso natural como el sol para generar energía eléctrica es una gran solución para proteger el planeta.

La energía solar fotovoltaica se basa en el efecto fotovoltaico. Este emplea materiales semiconductores (como el silicio) para absorber fotones procedentes de la radiación solar y emitir electrones. Cuando un electrón en la última capa del átomo de silicio se ve golpeado por un fotón, absorbe energía. Al superar la atracción del núcleo del silicio, dicho electrón se desprende. De esta manera, se establece un flujo de estos, generando energía eléctrica. Todo este efecto sucede en las denominadas células fotovoltaicas, las cuales se agrupan para formar los paneles fotovoltaicos. Empleando un conjunto de paneles que reciban radiación procedente del sol es posible establecer esta generación eléctrica que, posteriormente, se puede destinar al consumo en viviendas, industrias, transportes...

Aunque el autoconsumo disponiendo de paneles fotovoltaicos en una vivienda personal es cada vez más habitual, la parte mayoritaria la componen los conocidos parques solares. Grandes extensiones de terreno con placas fotovoltaicas interconectadas son capaces de obtener elevadas cantidades de energía. Es importante que estos módulos estén orientados hacia el sol para maximizar la radiación incidente. No obstante, el sol cambia su posición en el transcurso del día por la rotación terrestre. Por ello, la aparición de sistemas de seguimiento de este movimiento era necesaria. Los seguidores solares (o *"trackers"*) son estructuras sobre las que se montan grupos de

paneles fotovoltaicos. Estas tienen uno o dos ejes que emplean la rotación para orientar las placas perpendiculares al sol. El funcionamiento se basa en un sistema de control que cada cierto tiempo rota el eje. Si la radiación incidente después de este giro es mayor, repite el proceso. Si por el contrario es menor, regresa a su posición anterior. De esa forma se asegura que la radiación es siempre máxima. Con todo ello, el conjunto de módulos fotovoltaicos y trackers hacen posible la construcción optimizada de los mencionados parques solares.

## **2. OBJETIVOS Y ALCANCE**

El objeto de este proyecto es el cálculo y dimensionamiento de los componentes estructurales y sistemas mecánicos de una planta fotovoltaica ejecutada con seguidores solares en Alange, Badajoz. Se partirá de unos datos iniciales proporcionados por el cliente para poder desarrollar un planteamiento constructivo viable tanto técnica como económicamente. Asimismo, se diseñará la estructura conforme los módulos definidos; así como a los requerimientos ambientales y de suelo para dotar al sistema de protección contra la corrosión durante una vida útil de 25 años. De esta manera, se establecerán todas las características geométricas y los perfiles empleados en la estructura. Finalmente, se realizará una implantación de la solución constructiva en el terreno del cliente, y se elaborarán los planos del layout y fabricación. Por último, se realizará un presupuesto preliminar que recoja una aproximación del coste del proyecto. Todos los cálculos se realizarán en base a la normativa existente, en este caso CTE y Eurocódigo debido a que la planta se ubica en España. Además, para lograr dichos objetivos se emplearán diversas herramientas informáticas tanto comerciales (tales como CYPE, SAP 2000, AutoCAD, PVCase...) como desarrolladas internamente.

Se realizará la justificación de la estructura por completo, pero no se contemplará el diseño de la cimentación necesaria. Asimismo, no se dimensionarán las uniones entre componentes ni se comprobará la tornillería a esfuerzos. Los elementos de control vienen propuestos por el cliente, por lo que no se analizarán. Finalmente, se incluirá un presupuesto de suministro de los componentes necesarios en el que no se englobarán los costes asociados al transporte.

## **3. DATOS DEL CLIENTE**

### **3.1. Producto 1V**

El TrackSmart+ 1V es uno de los productos desarrollados por Gonvarri Solar Steel. Este consiste en una estructura de seguidor solar que emplea un eje rotativo sobre el que se montan los paneles solares. Los seguidores se colocan con su eje alineado en la dirección Norte-Sur. De esta manera, mediante la rotación del mismo se consigue modificar la inclinación de los paneles para orientarlos perpendiculares al sol. Dentro de este producto aparecen los trackers monofilas entre otros, los cuales consisten en una estructura simple de un solo eje con un sistema motriz. El sistema encargado de realizar esa rotación se denomina “slewdrive”. Esta es una unidad de giro compuesta por un reductor sinfín corona y accionado por un motorreductor epicicloidal. Este último dispone de un pequeño motor de corriente continua alimentado a 24V y de potencia máxima de 240W.

La designación 1V corresponde a la configuración de los paneles. Esta se compone de una sola fila de paneles dispuestos en posición vertical (la parte más estrecha es la que se coloca en el eje). Además, se tiene una unidad de control en cada seguidor controlada por una unidad maestra que permite monitorizar y controlar la rotación del eje en base a la energía incidente en los paneles.

Finalmente, se añade adicionalmente amortiguadores a la estructura. Estos son elementos disipadores de energía que evitan las vibraciones y la entrada en resonancia del seguidor (galope torsional), ya que este es un efecto que puede darse en este tipo de estructuras con baja rigidez torsional. La inclusión de estos elementos se justifica al ser más económicos que reforzar la estructura con una mayor sección de acero.

#### **3.1.1. Estructura y componentes**

Los trackers monofila se componen de diferentes partes estructurales:

- Pilar motor (MP), que es el pilar sobre el que se coloca el motor y el reductor (slewdrive). Los perfiles empleados son tipo W o IPE-A laminados en caliente.
- Pilar general (GP), que son todos aquellos pilares de la estructura que no son el pilar motor. Los perfiles empleados son tipo C conformados en frío.

- Vigas principales (Beam 1, 2...), que son todos aquellos tramos de vigas que componen el eje del seguidor solar. Se emplean tubos de sección cuadrada de 130mm con diferentes espesores.
- Vigas secundarias (SB), que son vigas perpendiculares a las principales sobre las cuales se colocan los paneles solares. Se emplean perfiles tipo omega.

Toda esta estructura se puede observar en la Figura 3.1:

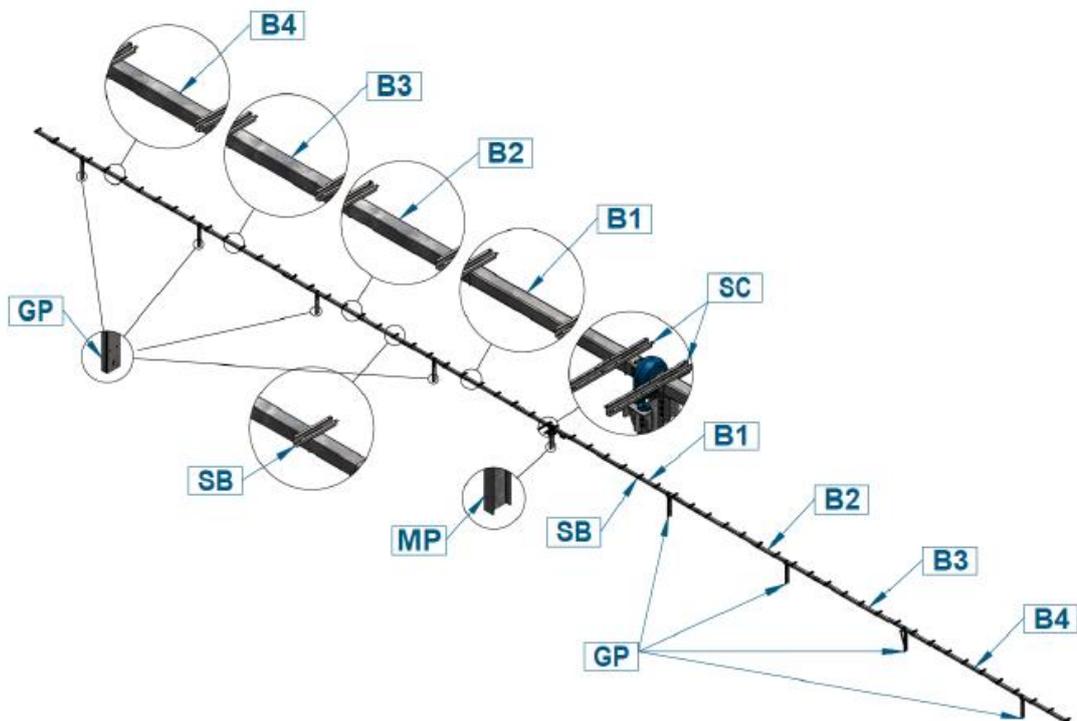


Figura 3.1- Representación de la estructura del producto 1V monofila<sup>1</sup>

Conociendo los elementos estructurales del producto, es necesario presentar las uniones empleadas entre todos ellos.

- Soporte del motor (MS), que es la unión entre el slewdrive y el pilar central.
- Entronque del motor (MC), que es la unión entre el slewdrive y el eje. Los brazos del reductor a los que se unen las vigas principales deberán tener un tamaño acorde a la viga. Cabe recordar que el tubo es un SHS de 130mm de lado, pero el hueco interior en el que se introducen los brazos del slewdrive dependen del espesor del primer tramo de viga.
- Soporte de las vigas (BS), que es la unión entre los pilares generales y el eje.

<sup>1</sup> Fuente: Manual de montaje TrackSmart+ 1V pág 9, Gonvarri Solar Steel

- Unión entre vigas (BC), que es la unión entre los diferentes tramos de vigas que componen el eje.
- Unión secundaria (SF), que es la unión entre las vigas secundarias y el eje.
- Soporte para amortiguador (DS), que es la unión entre los amortiguadores y los pilares generales y eje del tracker. El empleo de amortiguadores se explicará más adelante en el apartado de estabilidad.

Esto se representa en la Figura 3.2:

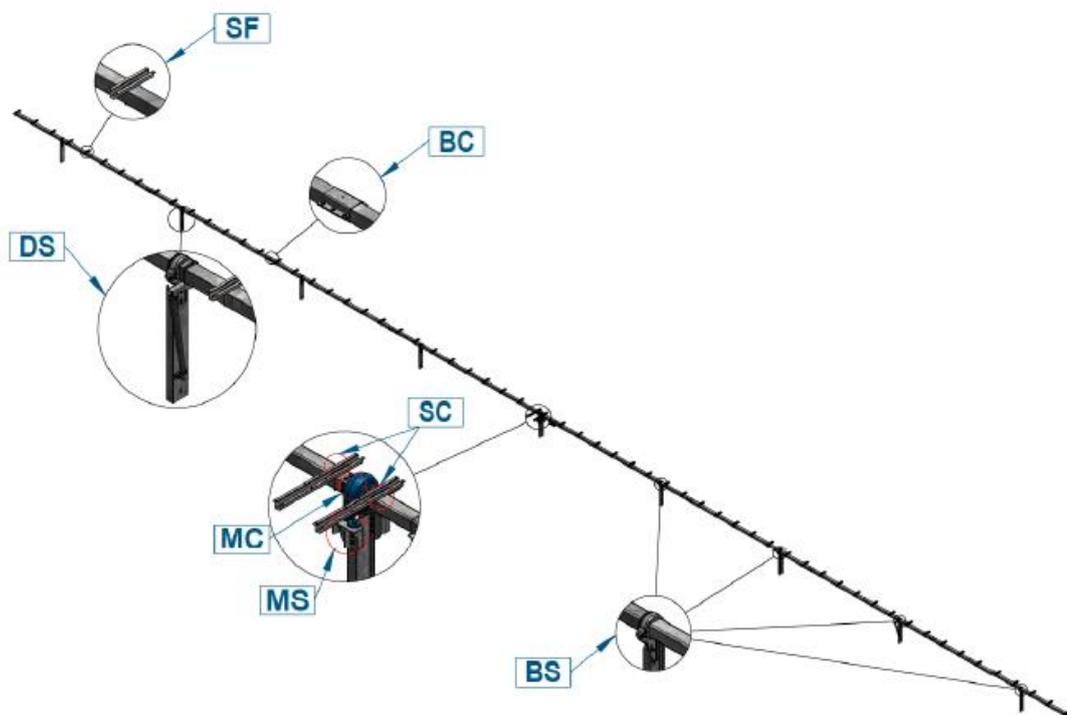


Figura 3.2- Esquema de uniones del seguidor 1V monofila<sup>2</sup>

### 3.1.2. Disposiciones geométricas

Como se ha descrito anteriormente, los paneles solares se colocan sobre las vigas secundarias, atornillándose a los agujeros situados en la parte trasera de los mismos. Los paneles suelen tener dos amarres, uno “corto” (generalmente separados a 400mm) y uno “largo” variable. La longitud de la viga secundaria depende del panel elegido por el cliente y de las cargas, pues si son demasiado

<sup>2</sup> Fuente: Manual de montaje TrackSmart+ 1V pág 12, Gonvarri Solar Steel

exigentes se deberá optar por el amarre largo y no el corto. En este caso se empleará el amarre de 400mm.

Por otra parte, la longitud de los pilares la marca la altura del eje. Esta se obtiene a partir de las dimensiones del panel y de la mínima distancia del panel al suelo (establecida por el cliente). Conociendo la inclinación máxima que tomarán los paneles, su largo y esta distancia mínima al suelo se puede calcular fácilmente la altura del eje.

Finalmente, la longitud del eje depende de varios factores. En primer lugar, el número de paneles totales permite calcular el ancho total que ocupan. Además, se necesita añadir una distancia adicional entre el último panel y el final de la viga "d". En el centro del tracker se debe destinar un hueco al slewdrive "b". Por último, existe un pequeño hueco "c" entre paneles originado por la separación entre los brazos de la viga secundaria. Todo esto se representa en la Figura 3.3:

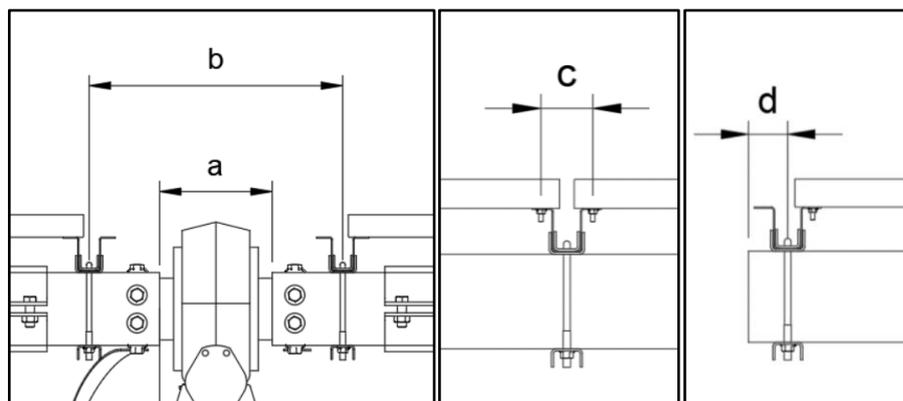


Figura 3.3- Detalles geométricos del tracker monofila

Para calcular el largo de cada tramo de viga, primero es imprescindible conocer la separación entre pilares. El número de pilares necesario se obtiene a partir de la longitud total del eje. Se recomienda no tener tramos de vigas apoyadas de más de 8m ya que la flecha sería excesiva. Asimismo, es importante analizar el tramo de voladizo en el extremo del tracker. Este debería establecerse entre 1200mm y 3200mm también restringidos por la flecha. Finalmente, se ha de respetar una distancia mínima hasta las vigas secundarias (cuya separación es siempre fija y depende del ancho del panel).

Conociendo esta longitud total del eje y la separación entre pilares, se debe dividir el eje en varios tramos de viga. Esto ocurre por la imposibilidad de transportar un tubo de una longitud mayor a

11900mm. Se recomienda establecer las uniones de vigas a una distancia aproximada  $L/4$  de los pilares (siendo  $L$  la distancia entre estos). No obstante, se tiene que respetar un margen hasta las secundarias. Con todo esto, se determinan las longitudes de cada tramo.

Cabe destacar que el proceso de dimensionar la distancia entre pilares y la longitud de los tramos de vigas es un proceso iterativo. Una solución válida geoméricamente podría no proporcionar valores de flecha admisibles o resistencia mínima requerida, por lo que se debería modificar. Evidentemente, reducir la flecha en vigas modificando la distancia entre pilares (sin variar el número de estos) es mucho más económica que emplear un tubo mayor.

### **3.1.3. Detalles de implantación**

Una vez se realice la implantación de los trackers en el terreno, se debe considerar dos clases de seguidores: los expuestos y los resguardados. De esta manera, se puede establecer una distinción de dos tipos de trackers que se emplee como estrategia de optimización del suministro, basada en un estudio de cargas de viento en función del layout de la planta.

Los trackers expuestos son aquellos que reciben las cargas de viento en su totalidad. Por ejemplo, son seguidores expuestos los que se sitúan en el contorno del terreno. Por otro lado, los trackers a resguardo son aquellos que no sufren las cargas de viento en su totalidad, ya que los expuestos les protegen de parte de ella. Este efecto se considera a partir de un coeficiente de resguardo o factor de abrigo recogido en el Eurocódigo 1 Parte 1-4, apartado 7.4.2. Dependiendo de la inclinación de los paneles y de la separación entre filas de seguidores se puede determinar el factor de abrigo que generan los trackers expuestos a los resguardos. Esto se detalla más en profundidad en el Anexo I de este documento.

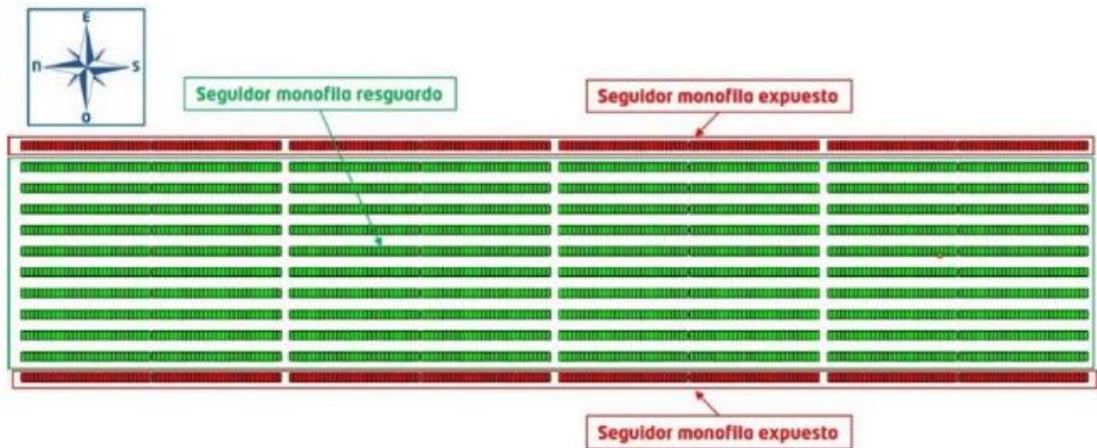


Figura 3.4- Esquema de una implantación de trackers expuestos y resguardos<sup>3</sup>

En cambio, si el terreno no permite una disposición cuadrada como la anterior, se deberán colocar de forma escalonada. En este caso, se considera que, si la longitud tapada de un tracker es al menos dos tercios del total, este será un seguidor resguardado. En el caso contrario, será un tracker expuesto. En la Figura 3.5 se presentan de color rojo los seguidores expuestos y de color verde los resguardados por los primeros.

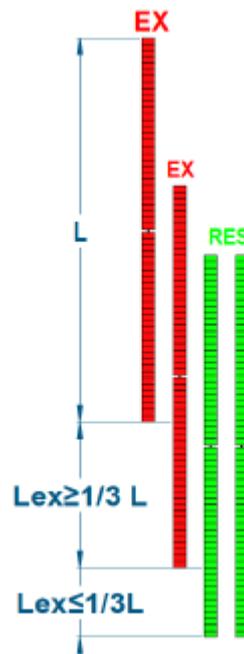


Figura 3.5- Esquema de seguidores expuestos y resguardos de forma escalonada<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Fuente: Manual de montaje TrackSmart+ 1V pág 23, Gonvarri Solar Steel

<sup>4</sup> Fuente: Manual de montaje TrackSmart+ 1V pág 24, Gonvarri Solar Steel

### 3.2. Localización y normativa

El proyecto en cuestión se localiza en el municipio de Alange, situado en la provincia de Badajoz. Por lo tanto, se trata de un proyecto situado en España, aplicándose la normativa española y europea relacionada. Las normas de referencia para cargas, combinaciones y comprobaciones de elementos se recogen en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1- Normativa de referencia

<b>NORMAS DE REFERENCIA Y DOCUMENTOS</b>	
<b>CARGAS:</b>	CTE.DB-SE-AE “Acciones en la Edificación”
	Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones Generales. Cargas de viento.
	Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte 1-3: Acciones Generales. Cargas de Nieve
	NCSE-02: Norma de Construcción Sismorresistente.
<b>COMBINACIONES:</b>	Eurocódigo 0: Bases de Proyecto
<b>COMPROBACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES:</b>	Eurocódigo 3: Diseño de estructuras de acero - Parte 1-1: Normas generales y normas de construcción
	Eurocódigo 3: Diseño de estructuras de acero - Parte 1-3: Normas generales Reglas adicionales para perfiles y chapas de paredes delgadas conformadas en frío.

### 3.3. Datos de proyecto

#### 3.3.1. Panel y disposición del seguidor solar

Los datos del proyecto son todos aquellos de los cuales se parte para poder realizar todos los cálculos, diseños y dimensionamientos. En primer lugar, los datos relativos al panel y a la disposición de ellos se recogen en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2- Datos de panel y disposición del seguidor

<b>PANEL Y DISPOSICIÓN DEL SEGUIDOR</b>	
<b>PANEL:</b>	TRINA VERTEX - DEG19C.20
<b>TAMAÑO PANEL:</b>	2384 x 1096mm
<b>PESO PANEL:</b>	28.6 kg
<b>DISTANCIA ENTRE TALADROS VERTICAL:</b>	400 mm
<b>DISTANCIA ENTRE TALADROS HORIZONTAL:</b>	1057 mm
<b>LONGITUD ADICIONAL DE LA SECUNDARIA:</b>	50 mm (25 mm por cada lado)
<b>STRINGS DEL TRACKER:</b>	2 strings de 27 módulos
<b>INCLINACIÓN MÁXIMA:</b>	55º
<b>DISTANCIA MÍNIMA AL SUELO:</b>	380 mm
<b>SEPARACIÓN ENTRE FILAS:</b>	6 m
<b>INCLINACIÓN DEL TERRENO:</b>	N-S: 15%      E-O: 0%
<b>CICLO DE VIDA</b>	25 años

### 3.3.2. Ambiente y terreno

Conociendo los datos del panel y de la disposición de los seguidores, se ha de presentar la información relativa al ambiente y al terreno para el posterior análisis de la corrosión:

Tabla 3.3- Análisis de corrosión del ambiente

<b>ANÁLISIS CORROSIÓN AMBIENTAL</b>	
<b>CORROSIÓN AMBIENTAL:</b>	C3
<b>AÑOS DE GARANTÍA:</b>	25

Tabla 3.4- Análisis de corrosión del terreno

ANÁLISIS CORROSIÓN TERRENO	
<b>INFORME GEOTÉCNICO:</b>	RWG-022.04.21-IM2-066-A. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL PROYECTO SOLAR "ALCONERA", UBICADO EN ALANGE, BADAJOZ, ESPAÑA. Elaborado por GEOINTEC con fecha mayo de 2021.
<b>RESULTADO:</b>	Altamente Corrosivo

### 3.3.3. Materiales

Finalmente, se han de definir los materiales a emplear. Para los componentes de la estructura principal se asignan los siguientes materiales:

- Vigas secundarias: Acero S350GD
- Resto de la estructura: Acero S355

Los valores de límite elástico y de resistencia última a tracción de estos se recogen en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5- Valores de límite elástico y resistencia última a tracción

TIPO DE ACERO	ESPESOR NOMINAL (mm)			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} \leq t \leq 80$ mm	
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
S355	355	510	335	470
Todos t.				
S350GD	350	420		
Q355b	355	470		

No obstante, hay componentes fabricados en otros materiales diferentes del acero:

- Cabeza de giro: Compuesto por acero S355, aluminio Al-T5, plástico PA-6 y acero S420N
- Motor y soporte: Fundición QT-600-3

Por otra parte, las uniones serán atornilladas en su totalidad. La calidad empleada será 12.9, 8.8 y 6.8 a excepción de la unión con los paneles, que será tornillería de acero inoxidable A2-70. Los valores de límite elástico y resistencia última se presentan a continuación:

Tabla 3.6- Valores de límite elástico y resistencia última a tracción para tornillos según Eurocódigo

CLASE DE TORNILLO	6.8	8.8	12.9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	480	640	1080
$f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	600	800	1200

Tabla 3.7- Valores de límite elástico y resistencia última a tracción para tornillos de acero inoxidable según Eurocódigo

CLASE DE TORNILLO	A2-50	A2-70	A2-80
$f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	500	700	800

## 4. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO

### 4.1. Diseño geométrico

En primer lugar, se debe realizar un prediseño de la estructura y sus componentes. Se deberá seguir el orden expuesto en el punto 3.1.2. Para los cálculos geométricos se empleará una herramienta informática desarrollada internamente por Gonvarri Solar Steel. Con ella se pueden realizar los diseños comprobando fácilmente si se incumplen distancias entre las vigas secundarias, pilares, uniones de vigas...

La estructura a diseñar debe acoger 2 strings (número de paneles conectados en serie) de 27 paneles fotovoltaicos cada una. Por lo tanto, se obtiene un total de 54 módulos. Contando con todas las limitaciones geométricas expuestas anteriormente (como los parámetros  $b$ ,  $c$  y  $d$ ) el largo total de la estructura es de 61780mm. Por lo tanto, cada lado cuenta con 30890mm de longitud. Las viguetas secundarias están equiespaciadas cada 1132mm debido al valor constante de la anchura del panel.

A partir de esto, se calcula la distancia entre pilares. No superando el límite de vanos de 8 m, se podrá soportar la estructura empleando solamente 9 pilares. Se estima un valor preliminar de separación de 7350mm entre pilares a excepción del extremo, que se colocará a 6750mm. De esta manera se obtiene un voladizo de 2090mm.

Finalmente, se deberá dividir el eje en varios tramos de viga principal. Respetando el límite máximo de viga de 11900mm, se tomarán tres tramos por cada lado del slewdrive con medidas de 8920mm, 11190mm y 10680mm respectivamente (desde el centro hacia los extremos). De esta forma se respetan las distancias mínimas hasta los pilares y las vigas secundarias, uniéndose aproximadamente a  $L/4$  de los primeros. El primer tramo es el más corto ya que está sometido a mayores cargas y, por lo tanto, tendrá un perfil mayor y más costoso. Por último, la altura del eje se calcula independientemente y resulta un valor de 1285mm. Todos los valores se recogen en la Figura 4.1:

### Parámetros Geométricos y Calculados

Separación entre vigas Secundarias s=	1132	mm	
Longitud total del Tracker L=	61780	mm	
Altura de los pilares AH=	1285	mm	<input type="checkbox"/> Calculada
Distancia del Panel al Suelo=	380	mm	
Distancia Admisible del Panel al Suelo=	200	mm	
Δ Cálculo longitud Vigüeta=	45	mm	
Nº filas Expuestas =	1		

---

### Estructura del Tracker

Lado Norte. Ln=30890mm
Lado Sur. Ls=30890mm

#### Disposiciones Geométricas

Longitud de voladizo=  mm

Distancia entre pilares P=  mm  Variable

	Referencia Pilar	Distancia entre pilares P(mm)
	P0	7350
	P1	7350
▶	P2	7350
	P3	6750

	Referencia Viga	Longitud tramos vigas B(...)	Borra
	B0	8920	🗑️
	B1	11190	🗑️
	B2	10680	🗑️
*			🗑️

Figura 4.1- Entrada de datos geométricos en el software SizeSmart de Gonvarri Solar Steel

## 4.2. Cálculo estático y sísmico

### 4.2.1. Peso propio

Las cargas de peso propio son las generadas por el peso de los paneles y demás elementos. Estas se calculan mediante el programa de cálculo desarrollado por la empresa de la siguiente manera:

$$Peso\ propio = \frac{Peso\ (kg) * g}{1000 * \text{Área panel}\ (m^2)} \frac{kN}{m^2} = 0.104 \frac{kN}{m^2}$$

Esta carga se aplicará en las vigas secundarias como una carga distribuida vertical hacia abajo en dos paños, uno en la mitad superior y otro en la mitad inferior. Por lo tanto, se deberá tener en cuenta una excentricidad de esta carga, calculada como:

$$E_c = \frac{d_4}{2} + \frac{P_1 (d_1 + d_2 + d_3) + P_2 \left(\frac{d_2}{2} + d_3\right) + P_3 \left(\frac{d_2}{2} + d_3\right)}{P_1 + P_2 + P_3} = 0.156\ m$$

Donde:

- d1: Espesor del panel
- d2: Espesor de las vigas secundarias
- d3: espesor de los refuerzos
- d4: Sección viga principal
- P1: Peso paneles
- P2: Vigas secundarias
- P3: Peso elementos de refuerzo
- Ec: excentricidad (m)

Conociendo la carga y la excentricidad se calculan mediante dicho programa los momentos generados por el peso propio sobre el eje para las posiciones de 3º y 55º (en el siguiente punto se justificarán dichas inclinaciones):

Tabla 4.1- Cargas de peso propio aplicadas sobre el tracker

CARGA DE PESO PROPIO			
TRACKER	POSICIÓN	PESO PROPIO PANEL (kN/m <sup>2</sup> )	MOMENTO (kN.m)
MONOFILA	3º	0.104	0.002
	55º	0.104	0.034

#### 4.2.2. Cargas de viento

La carga de viento es la más crítica para un seguidor solar. Esto se debe a que los paneles reciben la carga aerodinámica con parte o la totalidad su superficie, transmitiéndola a la estructura. Por ello, se tienen dos posibles estrategias de defensa:

- La primera consiste en colocar los paneles expuestos a 30° y los resguardos a 3°. De esta manera, se sacrifica la estructura de los expuestos (que deberá ser mucho más robusta) con el fin de aligerar los resguardos, que al ser la mayor parte resultaría más económico. No obstante, el par motor necesario en los expuestos sería mucho mayor y podría superar el admisible.
- La segunda consiste en orientar todos los trackers a 3°. Supondría la pérdida del efecto abrigo que realizarían los expuestos, pero se tendría una estructura global aligerada y se reduciría el par motor necesario (que se comprobará en el siguiente apartado).

Se realizarán los cálculos de las cargas de viento para ambas posibilidades. Mediante el procedimiento expuesto en el “Anexo I: Cálculo de cargas de viento”, se obtienen los siguientes resultados finales de cargas superficiales tanto en la mitad superior del panel como en la inferior:

Tabla 4.2- Valores de carga de viento en paneles para una estrategia de defensa de 3°-3°

CARGA DE VIENTO EN PANELES CON DEFENSA 3°-3°					
POSICIÓN		PRESIÓN		SUCCIÓN	
		F <sub>INF</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	F <sub>SUP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	F <sub>INF</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	F <sub>SUP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
MONOFILA EXPUESTO	3°	-0.523	0.214	0	0
	55°	-0.523	0.214	0.250	-0.611
MONOFILA RESGUARDO	3°	-0.523	0.214	0	0
	55°	-0.161	0.066	0.075	-0.183

Tabla 4.3- Valores de carga de viento en paneles para una estrategia de defensa de 30°-3°

CARGA DE VIENTO EN PANELES CON DEFENSA 30°-3°					
POSICIÓN		PRESIÓN		SUCCIÓN	
		F <sub>INF</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	F <sub>SUP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	F <sub>INF</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	F <sub>SUP</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
MONOFILA EXPUESTO	30°	-2.006	0.820	0	0
	55°	-0.523	0.214	0.250	-0.611
MONOFILA RESGUARDO	3°	-0.161	0.066	0	0
	55°	-0.161	0.066	0.075	-0.183

Adicionalmente, se analizará un nuevo caso para el cálculo de las vigas secundarias de acuerdo con Eurocódigo. Se introducirán las cargas correspondientes a cada zona para el dimensionamiento de las mismas (Anexo I-A.5):

Tabla 4.4- Cargas superficiales en cada zona de la cubierta (paneles)

			FUERZAS (kN/m <sup>2</sup> )	
			PRESIÓN	SUCCIÓN
3º	PAÑO INFERIOR	ZONA A	1,521	-1,149
		ZONA B	2,602	-3,345
		ZONA C	2,771	-2,061
	PAÑO SUPERIOR	ZONA A	-0,622	0,470
		ZONA B	-1,064	1,368
		ZONA C	-1,133	0,843
55º EXP	PAÑO INFERIOR	ZONA A	0,694	-1,017
		ZONA B	1,017	-1,480
		ZONA C	1,249	-1,110
	PAÑO SUPERIOR	ZONA A	-0,284	0,416
		ZONA B	-0,416	0,605
		ZONA C	-0,510	0,454
55º RES	PAÑO INFERIOR	ZONA A	0,486	-0,712
		ZONA B	0,712	-1,036
		ZONA C	0,874	-0,777
	PAÑO SUPERIOR	ZONA A	-0,199	0,291
		ZONA B	-0,291	0,423
		ZONA C	-0,357	0,318

### 4.2.3. Cargas de nieve

La carga de nieve está producida por la acumulación de esta sobre los paneles. Cuando se detecta que comienza a nevar, el tracker adopta la posición de seguridad frente a la nieve: 55º. Esto se debe a que en esa posición se escurre la nieve y no se acumula sobre el panel. Por lo tanto, cualquier inclinación se calculará con una capa de nieve “fresca” de 5 cm (correspondiente con el marco del panel) ya que si fuese mayor se situaría en posición de defensa. La carga de nieve total procedente del CTE se aplica a 55º de inclinación. Se comprobará también la carga correspondiente a 3º por la combinación de cargas con el viento. Los cálculos se realizarán con la siguiente expresión:

$$S = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_k$$

Siendo:

- $\mu_i$ : factor de forma. De acuerdo con la geometría de la estructura tendrá un valor de 0.8 para una inclinación de 3° y un valor de 0.13 a 55°.
- $C_e$ : coeficiente de exposición. Tiene un valor de 1.
- $C_t$ : coeficiente térmico. Tiene un valor de 1.
- $S_k$ : valor característico de la carga de nieve sobre el terreno. Para la localización del proyecto, se tiene Zona 4 a 350m de altitud, por lo que se tendrá un valor de 0.28 kN/m<sup>2</sup>.

Todos estos valores se obtienen del apartado 3.5 y del Anejo E del CTE DB SE-AE. Con todo ello, se calculan las cargas y los momentos generados por la nieve sobre la estructura mediante el mismo software mencionado anteriormente:

Tabla 4.5- Cargas y momentos de nieve

CARGA DE NIEVE			
TRACKER	POSICIÓN	CARGA DE NIEVE VERTICAL S (kN/m <sup>2</sup> )	MOMENTO (kN·m)
MONOFILA	3°	0.040	0.001
	55°	0.021	0.007

#### 4.2.4. Carga sísmica

El cálculo dinámico de sismo se realizará en un modelo de CYPE mediante la normativa NCSE-02.

Para ello, se tendrán en cuenta los siguientes parámetros:

- Aceleración básica: 0.05g (por localización)
- Coeficiente de contribución: 1.30
- Acción sísmica según X e Y
- Coeficiente de riesgo de importancia normal (de un valor 1)
- Tipo de suelo II
- Ductilidad baja
- No considerar efectos de segundo orden

En base a estos se obtendrán los resultados del análisis sísmico.

### 4.3. Comprobación del motor

Una vez obtenidas todas las cargas de diseño del proyecto, se debe realizar la comprobación del par. El motor para el que se ha diseñado la estructura tiene un par máximo de 50 kNm. Por lo tanto, el par estático exigido por la estructura debe ser menor a este.

El cálculo del par motor se realizará mediante la herramienta informática desarrollada por la empresa. No obstante, el procedimiento consiste en resolver la suma de los pesos de los paneles, vigas secundarias y refuerzos. Se obtiene el centro de gravedad de la estructura, y posteriormente se multiplica dicho sumatorio de pesos por la excentricidad. Este corresponde con el momento generado por el peso propio. Por otro lado, se calcula el momento generado por el viento. Finalmente, se combinan con los coeficientes correspondientes para obtener el par motor. Todo esto se refleja en la Figura 4.2 y Figura 4.3:

Cálculo de Excentricidad				
Elemento	Peso(kg)	Número	Peso Total(kN)	d(m)
1. Panel	28.60	54.00	15.14	0.035
2. Viguetas	2.62	56.00	1.44	0.050
3. Refuerzo	0.29	56.00	0.16	0.003
4. Tubo				0.130
Centro de Gravedad				0.147
Excentricidad				0.008

Momento debido al peso propio	
( Peso panel + peso vigueta + peso refuerzo ) x excentricidad =	0,128 kN-m

Momento debido al viento	
qp x LL x Area panel x Cm x n° de paneles =	30,984 kN-m

Par estático del Motor			
		n° de Motores	Par motor
Par Total = Mpp x 1,35 + Mviento x 1,5	46.65	1.00	46.65
			kN-m

Figura 4.2- Comprobación del par estático del motor para la estrategia de defensa 3º-3º

Cálculo de Excentricidad				
Elemento	Peso(kg)	Número	Peso Total(kN)	d(m)
1. Panel	28.60	54.00	15.14	0.035
2. Viguetas	2.62	56.00	1.44	0.050
3. Refuerzo	0.29	56.00	0.16	0.003
4. Tubo				0.130
Centro de Gravedad				0.147
Excentricidad				0.074

Momento debido al peso propio	
( Peso panel + peso vigueta + peso refuerzo ) x excentricidad =	1,229 kN-m

Momento debido al viento	
qp x LL x Area panel x Cm x nº de paneles =	118,843 kN-m

Par estático del Motor			
		nº de Motores	Par motor
Par Total = Mpp x 1,35 + Mviento x 1,5	179.92	1.00	179.92
			kN-m

Figura 4.3- Comprobación del par estático del motor para la estrategia de defensa 30º-3º

Como se puede observar, el par exigido con la estrategia de defensa de 3º-3º cumple con el permitido. En cambio, en el caso de 30º-3º el par necesario sobrepasa ampliamente el admisible. Por lo tanto, se puede descartar esta estrategia al no contar con un motor compatible que soporte el par exigido. Se realizará pues el modelo en CYPE solamente de la estrategia de 3º-3º.

#### 4.4. Corrosión

La localización en la que se ejecutará el proyecto cuenta con un ambiente y terreno corrosivos. Por lo tanto, es necesario aplicar una capa protectora a los perfiles de la estructura para evitar dicho efecto. Para ello, se ha encargado el informe geotécnico a GEOINTEC, una empresa especializada en este tipo de estudios. A partir de los resultados, es posible realizar el cálculo del espesor del recubrimiento necesario. La normativa que regula la corrosión ambiental y del terreno se recoge en las siguientes tablas:

Tabla 4.6- Normativa a considerar para la corrosión ambiental

<b>NORMATIVA:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO 9223:2012 “Corrosion of Metals and Alloys – Corrosivity of Atmospheres- Classification, Determination and Estimation”.</li> <li>• ISO 9224:2012 “Corrosion of Metals and Alloys – Corrosivity of Atmospheres- Guiding Values for the Corrosivity Categories”.</li> <li>• ISO 9225:2012 “Corrosion of Metals and Alloys – Corrosivity of Atmospheres- Measurement of Environmental parameters Affecting corrosivity of Atmospheres”.</li> <li>• ISO 9226:2012 “Corrosion of Metals and Alloys – Corrosivity of Atmospheres- Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity”.</li> </ul>
-------------------	--

Tabla 4.7- Normativa a considerar para la corrosión del terreno

<b>CARACTERIZACIÓN DE LA CORROSIVIDAD DEL TERRENO:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO 1461:2009 “Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles-Specifications and test methods”</li> </ul>
<b>DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RWG-022.04.21-IM2-066-A. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL PROYECTO SOLAR “ALCONERA”, UBICADO EN ALANGE, BADAJOZ, ESPAÑA. Elaborado por GEOINTEC con fecha mayo de 2021.</li> </ul>

El desarrollo del cálculo de la estructura frente a corrosión se presenta en el Anexo II de este documento. Por consiguiente, se optará por aplicar un pre-galvanizado Z350 a la estructura aérea de modo que se deposite un recubrimiento de Zinc mayor al consumido durante la vida útil del proyecto por corrosión ambiental. Se tiene en cuenta 12 meses de protección adicional por demoras en el montaje.

Tabla 4.8- Comprobación del espesor del pre-galvanizado

ACABADO	RECUBRIMIENTO DE ZINC APLICADO (µm)		CAPA DE ZINC CONSUMIDA EN LA VIDA ÚTIL DE LA ESTRUCTURA AÉREA (µm)	
Z350	25	≥	20,92	✓

Por otra parte, las vigas secundarias (fabricadas en S350 GD) deberán poseer un revestimiento de aleación de Zinc, Aluminio y Magnesio (Magnelis), contando con garantía del fabricante para la vida útil de la estructura. Será suficiente un recubrimiento ZM310 al tener 24 micras de espesor frente a las 21 micras necesarias calculadas en el anexo.

Designación del recubrimiento	Masa total mínima de recubrimiento <sup>a</sup> , ambas superficies g/m <sup>2</sup>		Valores indicativos teóricos para el espesor del recubrimiento por superficie en el ensayo en un punto μm		Densidad g/cm <sup>3</sup>
	Ensayo de tres puntos	Ensayo en un punto	Valor habitual <sup>b</sup>	Rango	
ZM190 <sup>c</sup>	190	160	15	10 a 20	6,2 a 6,6 <sup>d</sup>
ZM200 <sup>c</sup>	200	170	15	10 a 20	
ZM250 <sup>c</sup>	250	215	19	13 a 25	
ZM300 <sup>c</sup>	300	255	23	17 a 30	
ZM310 <sup>c</sup>	310	265	24	18 a 31	
ZM350 <sup>c</sup>	350	300	27	19 a 33	
ZM430 <sup>c</sup>	430	365	35	26 a 46	

Figura 4.4- Espesor de recubrimiento de aleaciones Zinc-Magnesio<sup>5</sup>

Finalmente, los elementos en contacto con el terreno necesitan un galvanizado en caliente (HDG). De este modo, se dispone de un recubrimiento que conserva los pilares en buen estado. El espesor aplicado se presenta en la Tabla 4.9:

Tabla 4.9- Comprobación del recubrimiento de galvanizado aplicado

ELEMENTOS	ESPESOR MEDIO DEL RECUBRIMIENTO APLICADO (μm)		CAPA DE ZINC CONSUMIDA EN LA VIDA ÚTIL DE LA ESTRUCTURA (μm)	
			CORROSIÓN DEL TERRENO	CORROSIÓN AMBIENTAL
Pilares	100	≥	86	20,92

Cabe destacar que, debido a la composición y corrosividad del terreno, se ha decidido considerar un espesor de sacrificio en los pilares de 1 mm. Así, se tiene un cálculo de la estructura más conservador y del lado de la seguridad.

<sup>5</sup> Fuente: UNE-EN 10346:2015. Tabla 12 (Pág 27)

## 4.5. Modelado en CYPE

Tras determinar las cargas de diseño y la estrategia de defensa adecuada, se debe realizar un modelo informático en una herramienta de cálculo para dimensionar la estructura. Se empleará el software CYPE3D. Este es un software comercial dedicado al cálculo de estructuras mediante las comprobaciones recogidas en la normativa de diversos países. Se puede dimensionar tanto los componentes como la cimentación, uniones y demás elementos estructurales.

Para el dimensionamiento de los perfiles empleados, se modelizará la estructura de dos trackers a 3º en el que uno cuente con las cargas del expuesto y otro con las del resguardo; y dos modelos a 55º siguiendo el mismo procedimiento.

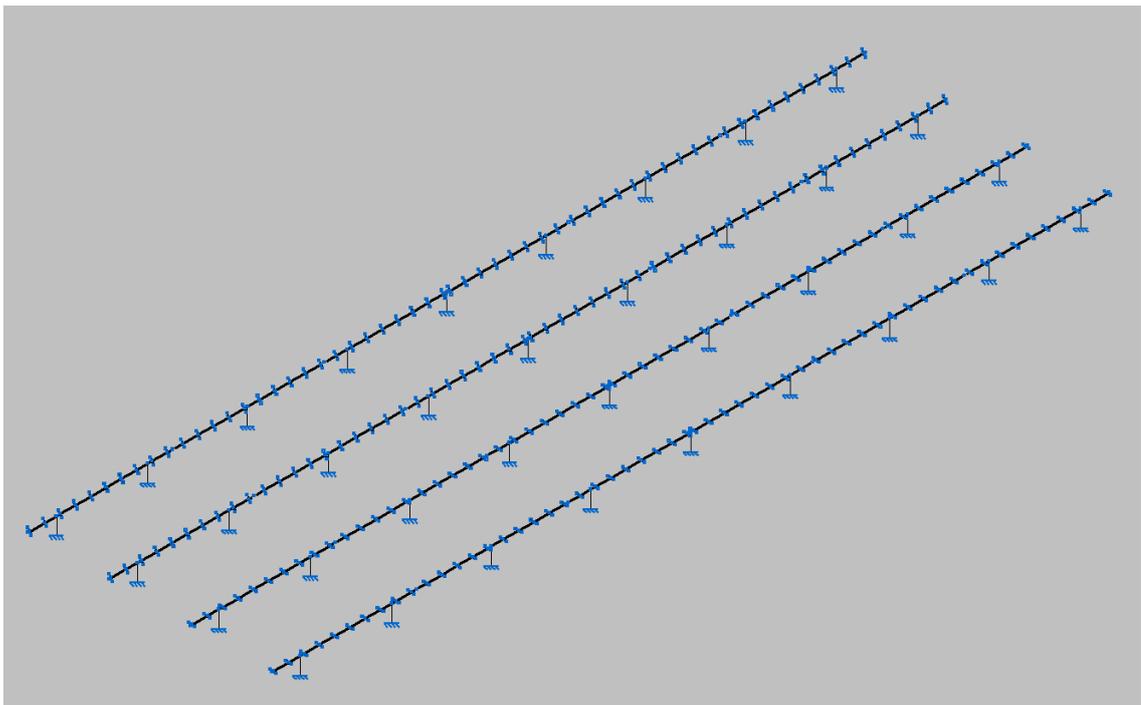


Figura 4.5- Modelo de los seguidores solares en CYPE 3D

Se generan los paños y se introducen sobre ellos las cargas recogidas en la Tabla 4.1 (peso propio), Tabla 4.2 (viento) y Tabla 4.5 (nieve). Cabe recordar que deberá existir un paño para la mitad superior de los paneles y otro para la mitad inferior. El resultado se presenta en la Figura 4.6:

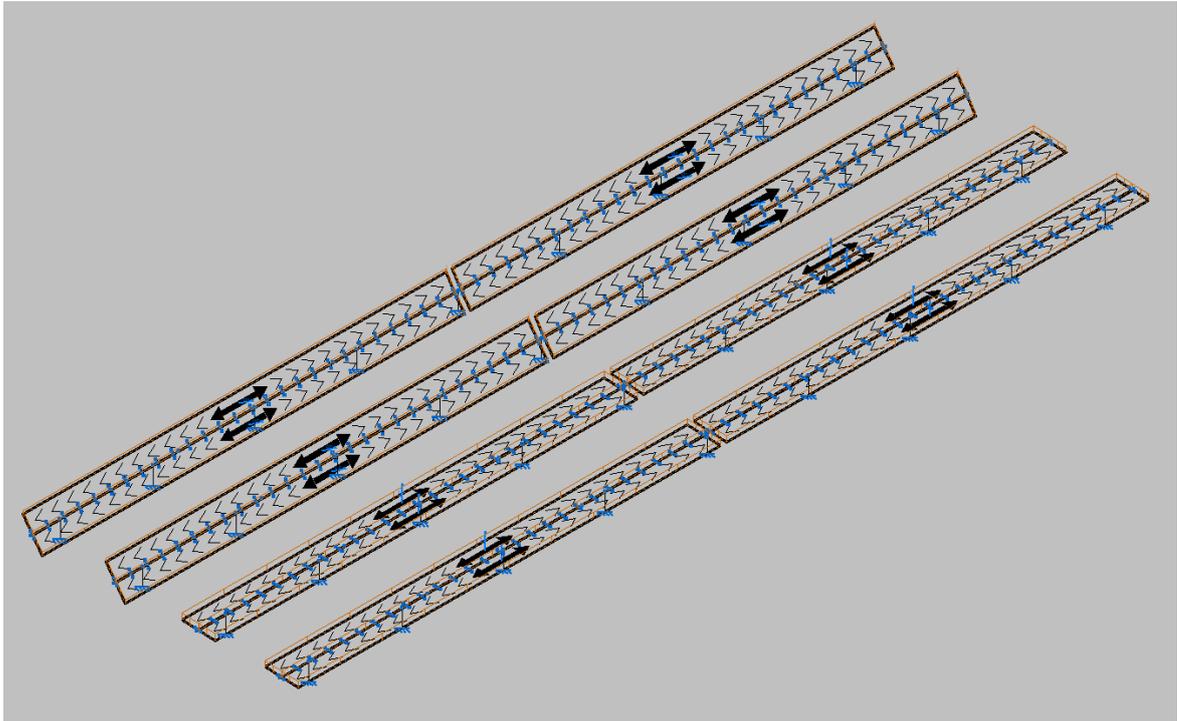


Figura 4.6- Introducción de paños y cargas

Se debe introducir adicionalmente los momentos generados por la excentricidad de las secundarias por nieve, viento y peso propio sobre el eje del seguidor. Posteriormente, se configuran los coeficientes de pandeo de las barras. Para los pilares se toma una beta igual a 2 (ya que es una barra empotrada-libre). Las vigas se introducen mediante longitud de pandeo siendo esta igual a la separación entre pilares. En el voladizo se toma una longitud igual al doble de esta (correspondiente a una beta igual a 2). Por último, se configuran los perfiles, materiales y el cálculo sísmico.

Se realiza un proceso iterativo de cálculo para obtener las secciones mínimas que resistan las cargas de diseño, sabiendo que el límite estipulado de aprovechamiento es de un 90% para pilares y de un 100% para el resto de las componentes.

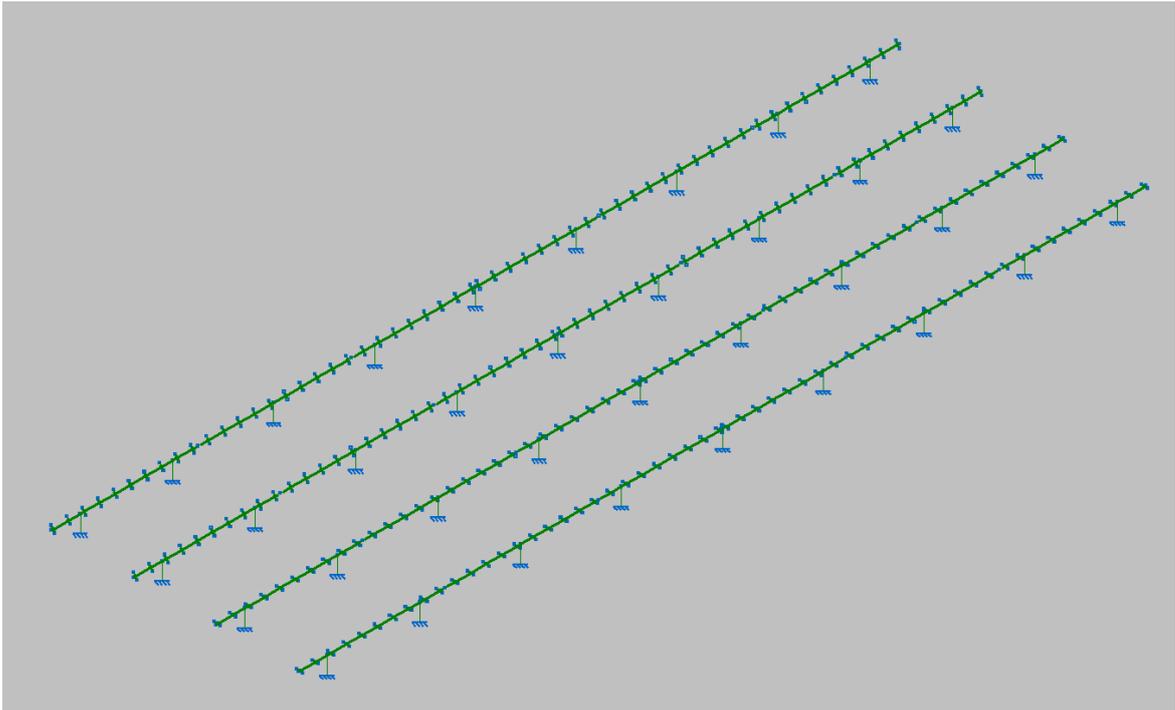


Figura 4.7- Solución final del dimensionamiento de perfiles de la estructura

Posteriormente, se introducen los paños para el dimensionamiento de las secundarias como si fueran cubiertas según normativa. De esta manera, se puede establecer qué perfiles son necesarios para soportar los paneles y sus cargas. El procedimiento de cálculo se muestra en el Anexo I.

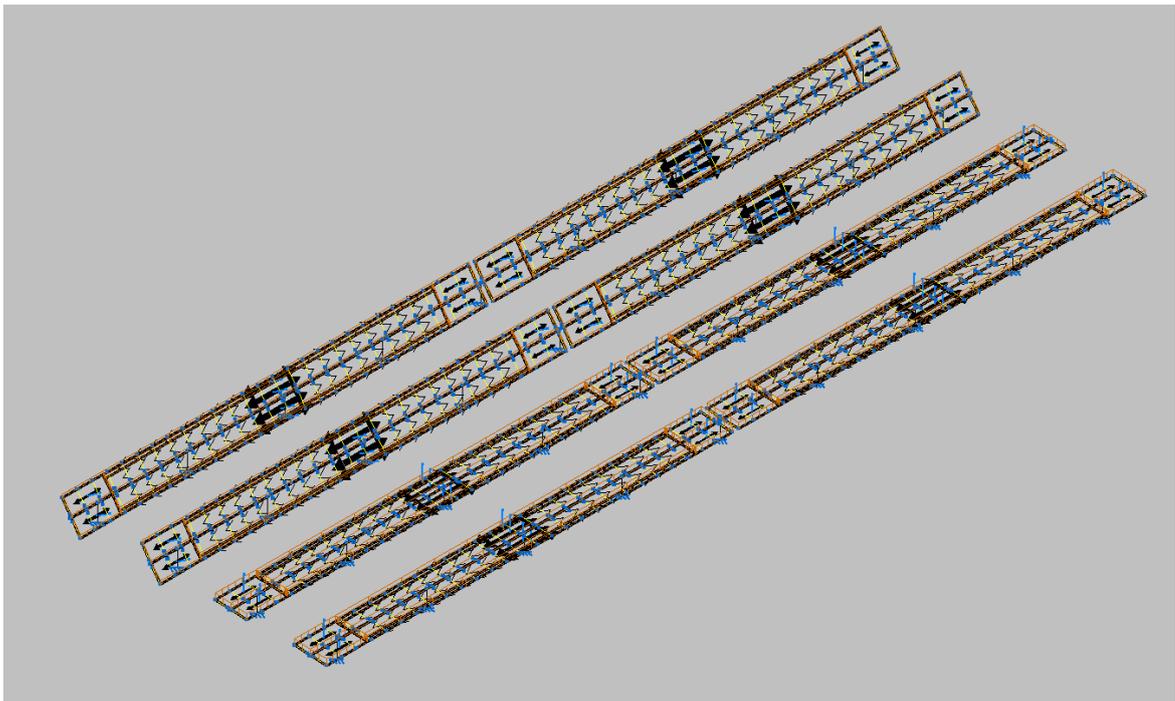


Figura 4.8- Introducción de paños para cubiertas según Eurocódigo

Además, se deberán considerar los límites normativos de ELS para flechas. Para ello, la geometría propuesta inicialmente cobra una gran importancia. Para unas mismas cargas, si los vanos son muy grandes se generarán flechas considerables. El voladizo es también un elemento importante a analizar. Si este es grande, se generará una flecha por caída del tramo. Por otro lado, si es pequeño y la distancia entre pilares en el último tramo es grande, la flecha podría ser hacia arriba (que es igualmente indeseable). Por lo tanto, la distancia entre pilares es un factor determinante en ella. De esta forma, en el caso de existir una flecha excesiva, la solución más deseable sería variar el vano para evitar el aumento de la sección de las vigas que resultaría más costoso.

Por otra parte, existe un límite de giro en el extremo debido a la torsión del tubo. Un giro en el extremo de 10º conllevaría que cuando el slewdrive orienta el eje a 3º, el extremo estaría inclinado a 13º. Por lo tanto, este es un problema tan indeseable como la flecha. Todos los límites de ELS se recogen en la Tabla 4.10:

Tabla 4.10- Límites ELS de flecha en las vigas y de giro en el extremo

LÍMITES ELS	
LÍMITE FLECHA VOLADIZO (2L/300)	0,0139 m
LÍMITE FLECHA VIGAS (L/200)	0,0338 m
LÍMITE FLECHA VIGUETAS (2L/300)	0,0029 m

## 4.6. Modelado en SAP 2000

Adicionalmente, se realizará un modelizado de la estructura en el software de cálculo de estructuras SAP 2000. Este es uno de los programas informáticos comerciales punteros dedicado al cálculo de estructuras. Gracias a este se pueden realizar las comprobaciones estructurales que la normativa exige. De esta manera, se llevará a cabo un dimensionamiento con dicha herramienta para comparar y verificar los resultados con los obtenidos en CYPE.

Serán necesarios cuatro modelos diferentes, siendo dos de ellos con una inclinación de 3º (correspondientes con el expuesto y el resguardo) y otros dos a 55º. En ellos se deberán introducir

las vigas principales, secundarias, pilares y las áreas correspondientes con los paneles. Los modelos se representan en la Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11:

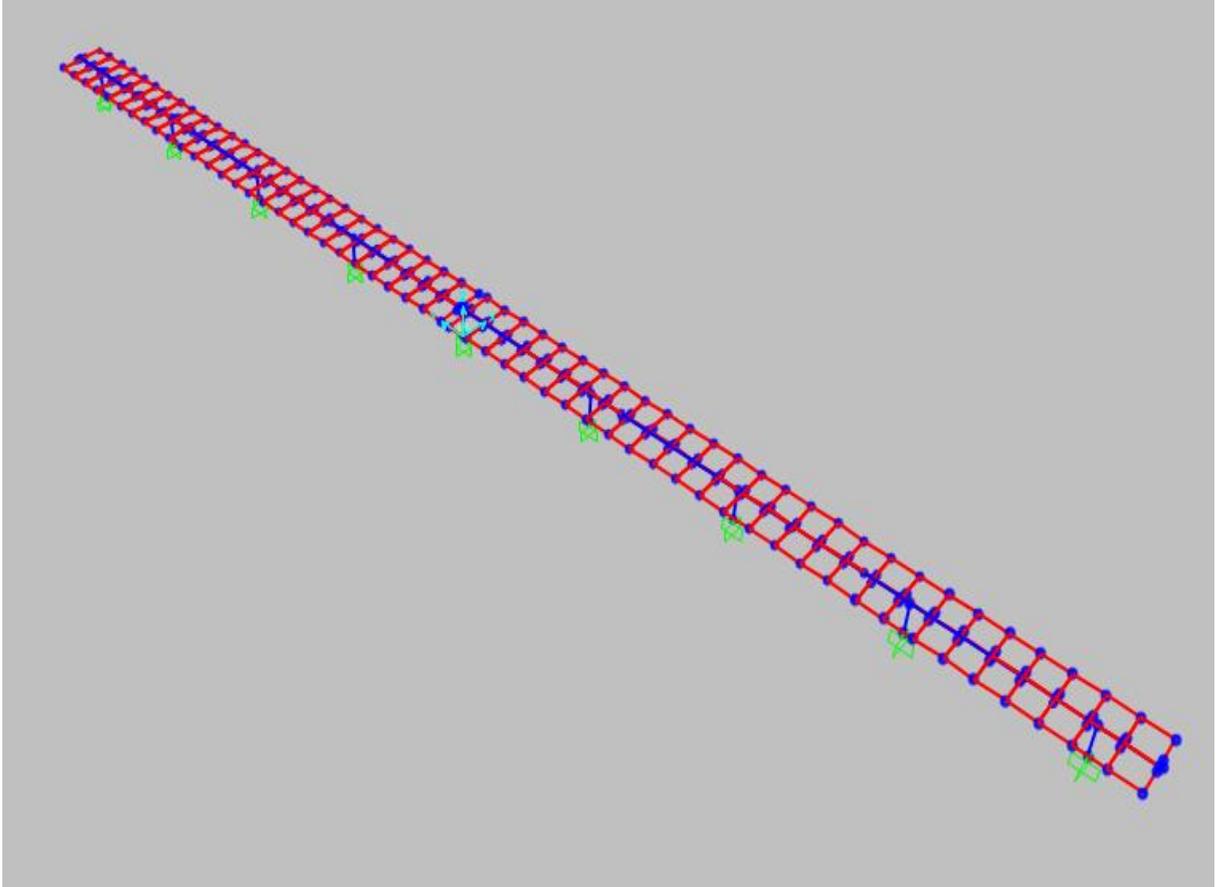


Figura 4.9- Modelo de tracker en posición de defensa (3º)

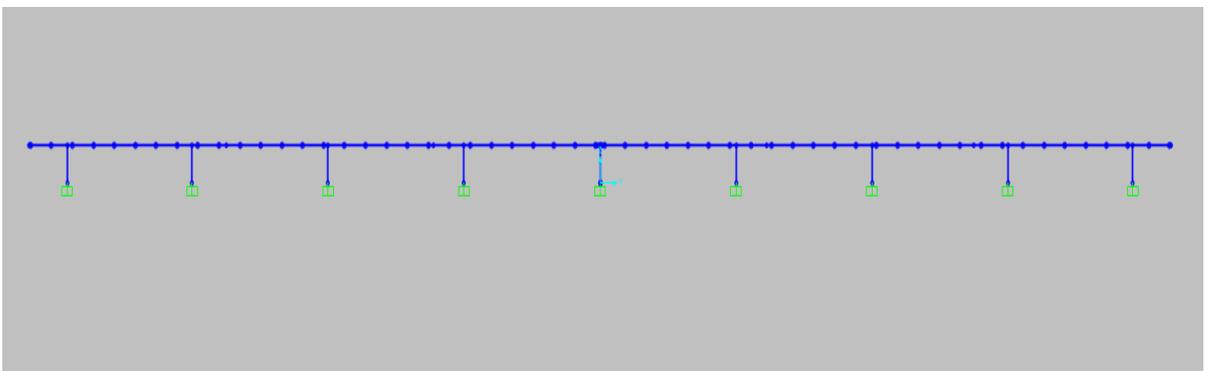


Figura 4.10- Alzado de los modelos generados

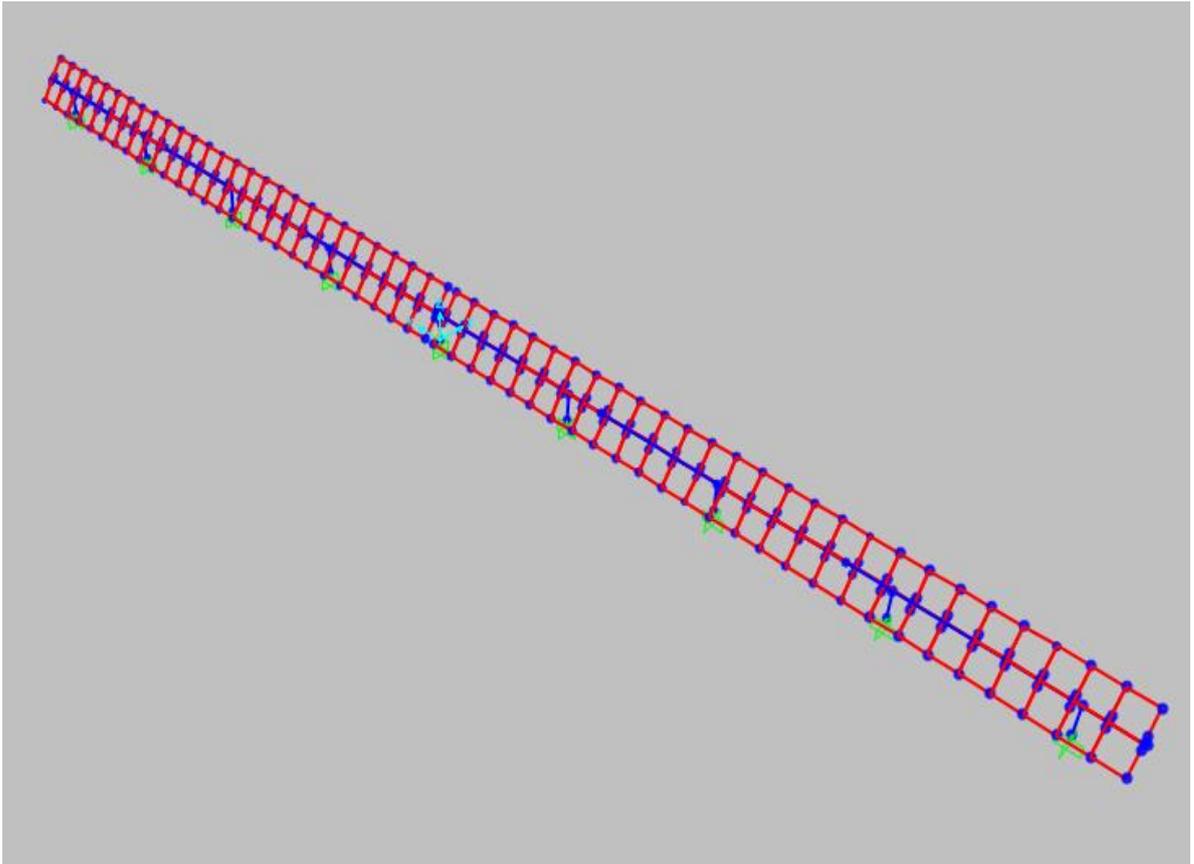


Figura 4.11- Modelo de tracker en posición de funcionamiento (55°)

Para el cálculo de la estructura, se han introducido las cargas de peso propio, viento y nieve correspondientes a los paños en CYPE en el área de los paneles de SAP2000. Se distingue nuevamente entre cargas aplicadas en la mitad superior y en la mitad inferior. Además, se introduce el valor de momento generado por peso propio, nieve y viento en el eje de la estructura. Se realiza también la comprobación para el cálculo de las vigas secundarias del mismo modo que en CYPE.

Finalmente, se realiza el cálculo iterativo y se dimensionan los perfiles necesarios en base al aprovechamiento obtenido y a las flechas de los elementos. Cabe mencionar que SAP 2000 realiza distinción entre perfiles laminados y conformados en el cálculo y presentación de los resultados.

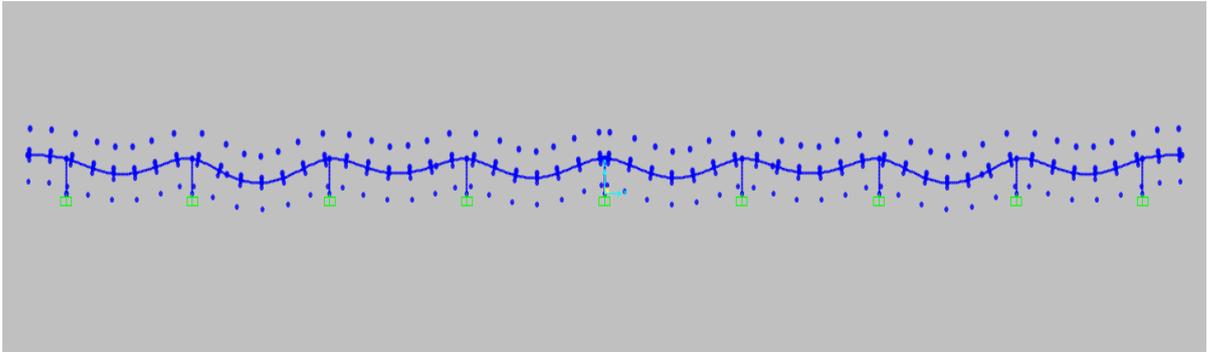


Figura 4.12- Representación de la deformación de la estructura

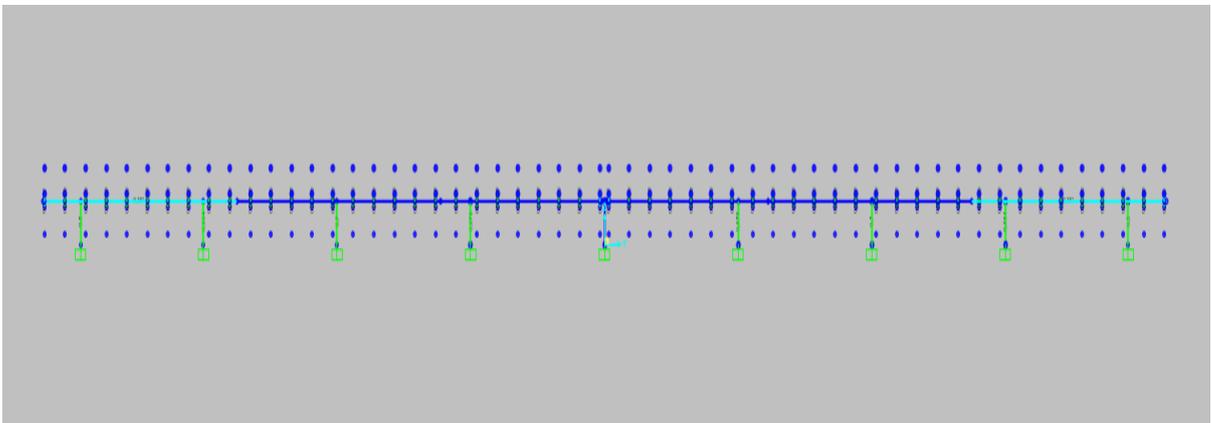


Figura 4.13- Cálculo de los componentes de acero conformado

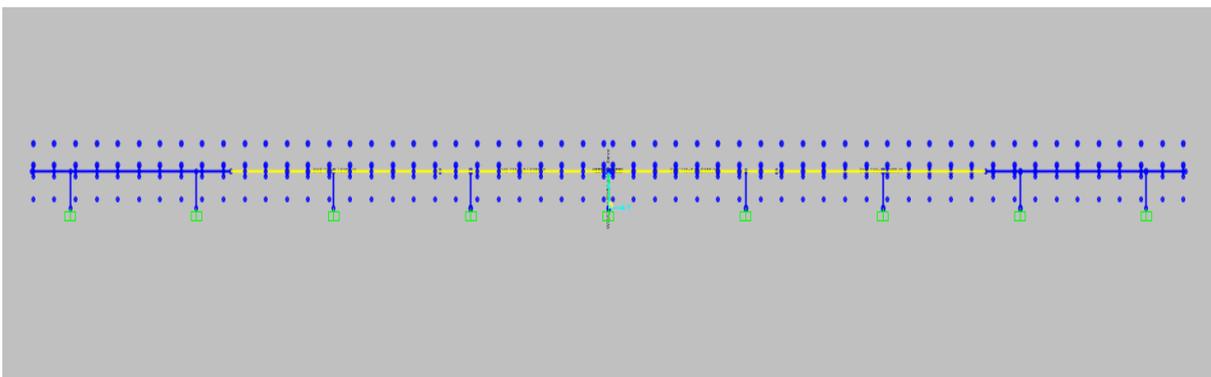


Figura 4.14- Cálculo de los componentes de acero laminado

### 4.7. Dimensionamiento

Tras el proceso de cálculo expuesto anteriormente, se obtienen los perfiles mínimos necesarios para soportar las solicitaciones y no superar las flechas máximas. De esta manera, se minimiza el peso de la estructura del seguidor, resultando más económica (siempre dentro de la seguridad).

Los modelos de CYPE y SAP2000 coinciden en sus resultados, proporcionando unas conclusiones muy similares. Se tomarán los datos de SAP2000 al ser ligeramente más restrictivos en sus aprovechamientos. Todos los valores obtenidos se recogen en las siguientes tablas:

Tabla 4.11- Perfiles obtenidos del dimensionamiento y sus aprovechamientos para los seguidores expuestos

	3º EXP		55º EXP	
	PERFIL	APROVECHAMIENTO	PERFIL	APROVECHAMIENTO
<b>GP1</b>	C150X70X18X3	19%	C150X70X18X3	68%
<b>GP2</b>		24%		70%
<b>GP3</b>		21%		66%
<b>GP4</b>		16%		50%
<b>MP</b>	W8X18	62%	W8X18	80%
<b>SB</b>	OH-70X25,1X4	98%	OH-70X25,1X4	43%
<b>B1</b>	130X4,5	75%	130X4,5	92%
<b>B2</b>	130X3,5	76%	130X3,5	93%
<b>B3</b>	130X2,3	55%	130X2,3	68%

Tabla 4.12- Perfiles obtenidos del dimensionamiento y sus aprovechamientos para los seguidores resguardados

	3º RES		55º RES	
	PERFIL	APROVECHAMIENTO	PERFIL	APROVECHAMIENTO
<b>GP1</b>	C150X70X18X3	18%	C150X70X18X3	32%
<b>GP2</b>		24%		32%
<b>GP3</b>		21%		31%
<b>GP4</b>		16%		23%
<b>MP</b>	W8X18	62%	W8X18	27%
<b>SB</b>	OH-70X25,1X4	98%	OH-70X25,1X4	30%
<b>B1</b>	130X4	93%	130X4	38%
<b>B2</b>	130X3	88%	130X3	36%
<b>B3</b>	130X2,3	55%	130X2,3	28%

Tabla 4.13- Valores ELS para los elementos de la estructura

	3º EXP	55º EXP	3º RES	55º RES
<b>FLECHA MÁXIMA (mm)</b>	9,10	10.85	8.98	5,60
<b>FLECHA MÁXIMA (%)</b>	26%	28%	26%	17%
<b>FLECHA VOLADIZO (mm)</b>	4,47	3,41	4,37	2,38
<b>FLECHA VOLADIZO MÁXIMA (%)</b>	32%	25%	32%	17%
<b>FLECHA VIGUETAS (mm)</b>	0,686	0,247	0,686	0,17
<b>FLECHA VIGUETAS (%)</b>	24%	9%	24%	6%
<b>GIRO (mRad)</b>	413,896	458,340	458,510	165,710
<b>GIRO (º)</b>	23,714	26,261	26,271	9,494

El diseño geométrico propuesto inicialmente era válido, ya que la flecha no resulta restrictiva en el dimensionamiento. Por lo tanto, solamente las solicitaciones participan en el dimensionamiento de los perfiles. Como se puede observar, los pilares generales resisten las cargas aplicadas empleando la sección más pequeña de las posibles (C150x70x18x3). Por otra parte, los pilares motor se encuentran mucho más solicitados, necesitando un W8x18 para resistir las cargas. Asimismo, las vigas principales se encuentran muy exigidas en la parte central (B1), donde se emplean tubos de 4,5mm de espesor; mientras que los tramos extremos (B3) resisten con el menor perfil posible. Las vigas secundarias necesitan también de un perfil considerable para soportar las cargas normativas. La estructura final de los trackers se presenta en la Tabla 4.14:

Tabla 4.14- Resumen de perfiles empleados para la estructura de los seguidores solares

	EXP	RES
<b>GP1</b>	C150X70X18X3	C150X70X18X3
<b>GP2</b>		
<b>GP3</b>		
<b>GP4</b>		
<b>MP</b>	W8X18	W8X18
<b>VIGUETA</b>	OH-70X25,1X4	OH-70X25,1X4
<b>B1</b>	130X4,5	130X4
<b>B2</b>	130X3,5	130X3
<b>B3</b>	130X2,3	130X2,3

Se ha considerado adicionalmente aumentar la capa de galvanizado de los componentes para evitar el cálculo de la estructura con el milímetro de sacrificio en el espesor. Sin embargo, tras realizar el análisis se han obtenido los mismos resultados. Por lo tanto, se mantendrá la capa de galvanizado expuesta originalmente y calculada en el Anexo correspondiente.

## 4.8. Análisis de estabilidad dinámica

### 4.8.1. Fenómenos de inestabilidad aeroelástica

Un seguidor solar es una estructura oscilante, esbelta y muy flexible. Por ello, se produce una interacción con el viento produciendo efectos de inestabilidad por fenómenos aeroelásticos. Esta inestabilidad se manifiesta en 1 grado de libertad (la torsión del eje).

Las inestabilidades se clasifican principalmente en dos tipos. En primer lugar, se produce el bataneo (*Buffeting*). Este sucede cuando existe una incidencia del aire sobre el tracker, lo cual conlleva a un fenómeno de vibraciones inducidas por el desprendimiento de vórtices (VIV). Si dichas vibraciones coinciden con la frecuencia natural de la estructura, esta entrará en resonancia.

Si este proceso persiste, se llega a producir un segundo efecto: el galope (*Galloping o fluttering*). Este sucede cuando la velocidad del viento incidente alcanza una velocidad crítica. Se genera una carga fluctuante perpendicular a la dirección del viento que, si el tracker no está retenido en este movimiento, pasa al desprendimiento y readherencia de la capa límite (Stall) al igual que sucede en el ala de un avión. En este punto, la estructura entra en un fenómeno de inestabilidad completamente divergente. Pequeños aumentos de velocidad conllevan a aumentos de desplazamiento vertical (amplitud) enormes hasta producirse el fallo mecánico de la estructura. Todo este efecto se representa en la Figura 4.15:

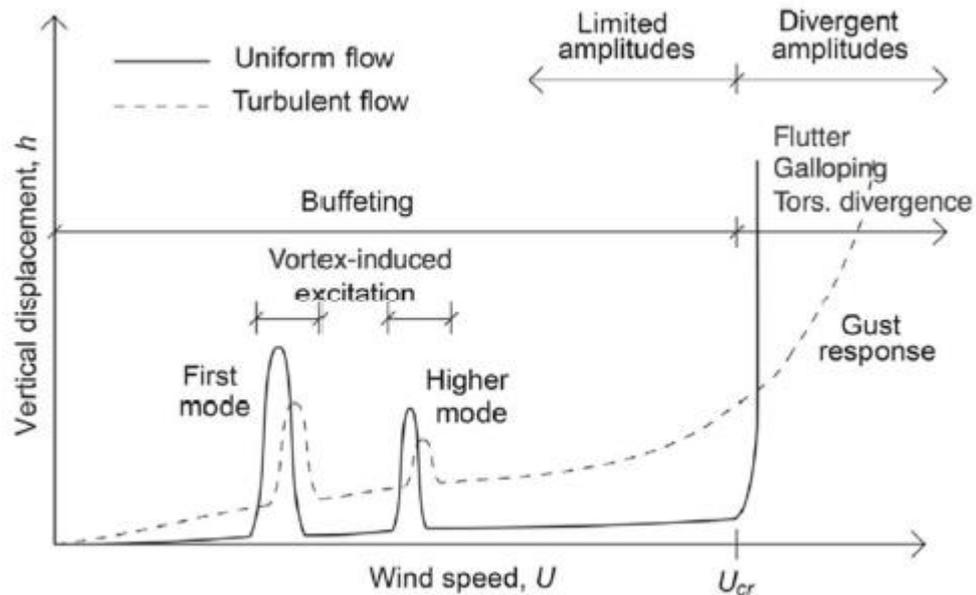


Figura 4.15- Proceso de inestabilidad aeroelástica de un seguidor solar<sup>6</sup>

Como se observa en la Figura 4.15, en un flujo uniforme (como en túnel de viento) se ven claramente diferenciados estos fenómenos. Se comienza por el bataneo, alcanzando los modos de vibración de la estructura. Finalmente, si aumenta la velocidad incidente del viento, la estructura entra en galope. Para un flujo turbulento propio del ambiente de cualquier proyecto, todo esto se corresponde de igual forma.

Sin embargo, un fabricante de seguidores solares debe saber aplicar dicho conocimiento para discernir si la estructura será estable o no. Para ello, se emplea el conocido diagrama de estabilidad. Este es una gráfica obtenida experimentalmente a través de ensayos de túnel de viento en la que se presenta la velocidad crítica para cada inclinación del panel solar. Si la velocidad incidente del viento es menor a la crítica, el tracker será estable. En cambio, si la velocidad para algún ángulo supera la crítica, se esperará la aparición de inestabilidades aeroelásticas. Esto se presenta en la Figura 4.16:

<sup>6</sup> Fuente: T. Abbas, Bauhaus University Weimar

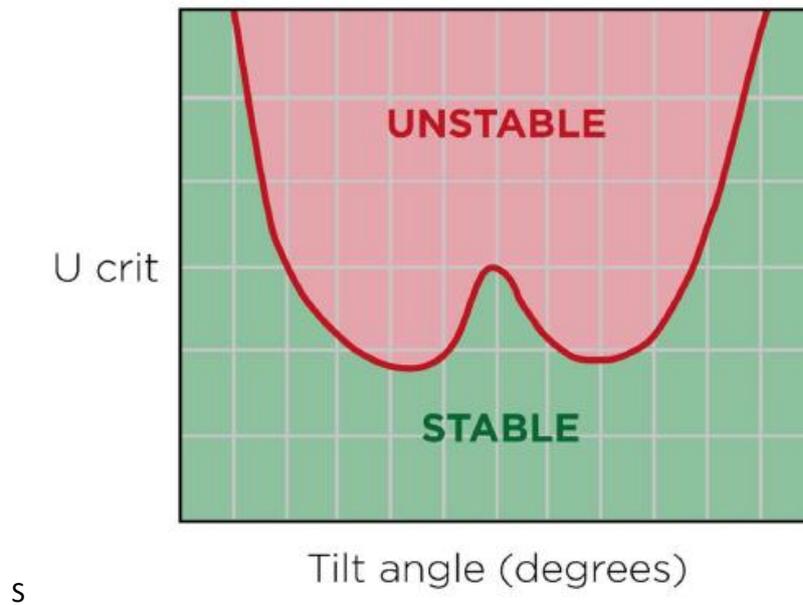


Figura 4.16- Diagrama de estabilidad de un seguidor solar

Como se ha mencionado anteriormente, siempre que el tracker se encuentre en la franja verde, no se espera la aparición de fenómenos de inestabilidad. Por lo tanto, ese es el objetivo de diseño de las estructuras de los seguidores solares. Se ha comprobado que el factor más influyente y deseable económicamente e industrialmente es introducir amortiguadores en la estructura. El empleo de estos consigue “apagar” la curva. Esto significa que el diagrama de estabilidad se estrecha, evitando estos efectos para inclinaciones que anteriormente producían inestabilidades. Además, la velocidad crítica aumenta globalmente en toda la curva. Esto se ve representado en la Figura 4.17:

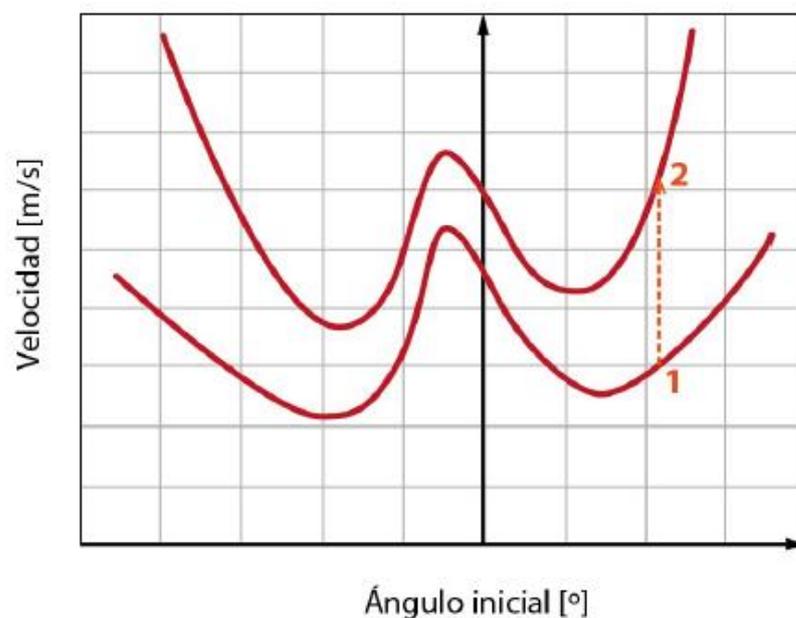


Figura 4.17- Diagrama de estabilidad modificado con la inclusión de amortiguadores

La línea 1 hace referencia a la curva de estabilidad para un tracker sin amortiguación. La línea 2 es la nueva curva cuando se añaden dichos amortiguadores. Se puede apreciar ese efecto de “apagado” para inclinaciones grandes. No obstante, debe recordarse que incluir estos nuevos componentes pueden amortiguar el primer modo de vibración, pero podría aparecer un segundo modo.

Como conclusión, la solución a adoptar para evitar problemas de estabilidad es añadir amortiguadores que limiten este grado de libertad torsional a la estructura de los seguidores solares. Se recomienda que se sitúen en los penúltimos pilares, siendo esta la localización más efectiva.

#### 4.8.2. Comprobación de estabilidad

Por último, conociendo el diseño final de la estructura calculado anteriormente, se ha de realizar una última comprobación: la estabilidad aeroelástica. Existe normativa relativa a este tema, como el Anexo E del Eurocódigo 1 Parte 1-4. A partir de ella, se puede comprobar si una estructura cumple las condiciones para ser estable. Sin embargo, al tratarse de cálculos complejos, se empleará una base de datos de resultados experimentales recabados de ensayos en túnel de viento. En primer lugar, se calculan mediante programas internos los modos de vibración torsionales de la estructura. Los resultados se observan en la Tabla 4.15:

Tabla 4.15- Frecuencias naturales de la estructura

ESTRUCTURA	PRIMER MODO (Hz)	SEGUNDO MODO (Hz)
NO AMORTIGUADA	1.617	4.328
AMORTIGUADA	4.328	6.761

Posteriormente, se parte de estos resultados para determinar el diagrama de estabilidad del seguidor. Por otra parte, la tabla a continuación recoge los resultados de velocidad crítica para cada orientación y la constante del amortiguador necesaria:

Tabla 4.16- Velocidades críticas aplicando coeficientes de seguridad de la estructura con y sin amortiguación

<b>TRACKER:</b>	<b>AMORTIGUADO</b>	<b>NO AMORTIGUADO</b>
<b>ÁNGULO (º)</b>	<b>VELOCIDAD (m/s)</b>	<b>VELOCIDAD (m/s)</b>
-45	26,60	26,60
-40	26,60	26,60
-35	26,60	26,60
-30	24,80	26,60
-25	19,91	9,01
-20	18,40	8,58
-15	18,52	8,84
-10	20,26	9,77
-7,5	22,58	10,90
-5	25,50	12,49
-3	25,89	12,85
0	25,70	12,58
3	22,50	10,91
5	20,40	9,89
7,5	19,89	9,54
10	19,66	9,36
15	20,10	9,45
20	21,55	9,99
25	24,35	11,10
30	26,60	12,48
35	26,60	14,37
40	26,60	26,60
45	26,60	26,60
<b>CTE DAMPER (Ns/m)</b>	66.346,38	

Si toda esta información se representa gráficamente, se obtienen las siguientes figuras:

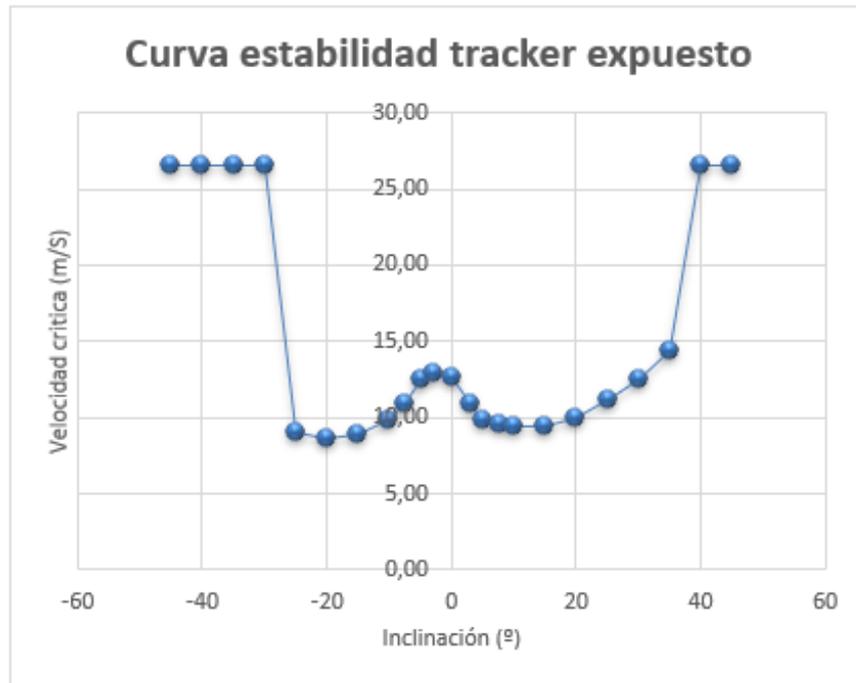


Figura 4.18- Curva de estabilidad de un tracker expuesto sin amortiguación



Figura 4.19- Curva de estabilidad de un tracker resguardo sin amortiguación

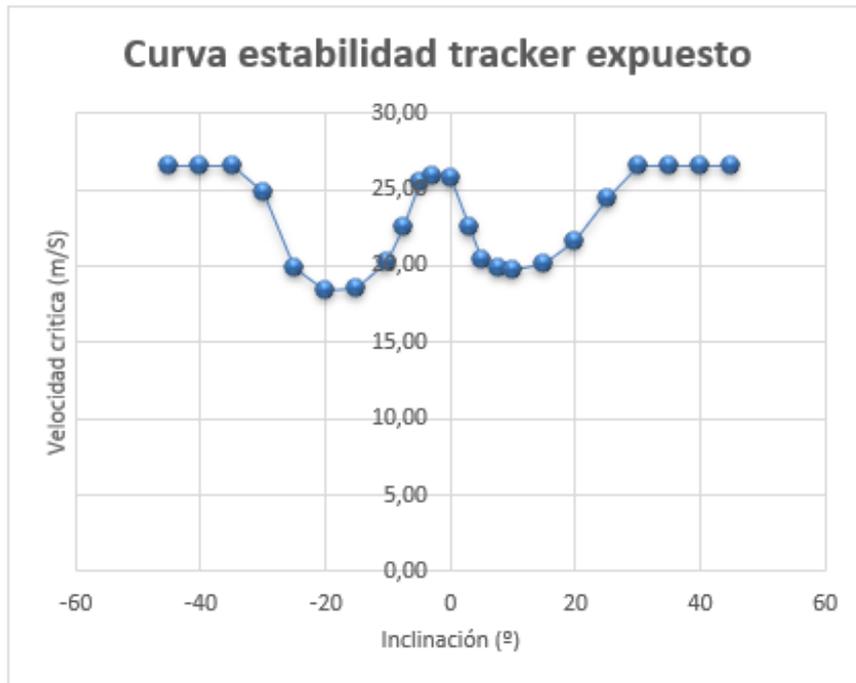


Figura 4.20- Curva de estabilidad de un tracker expuesto con amortiguación

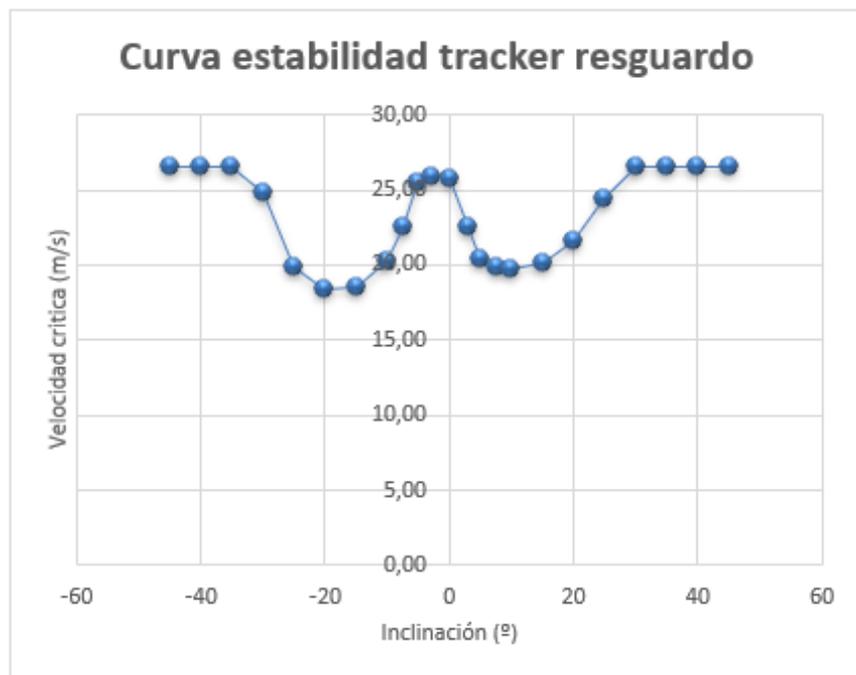


Figura 4.21- Curva de estabilidad de un tracker resguardo con amortiguación

Como se puede observar, la introducción de amortiguación en la estructura de un seguidor solar permite aumentar las velocidades críticas de las inclinaciones bajas. La comprobación de estabilidad se presenta en la Tabla 4.17:

Tabla 4.17- Comprobación de estabilidad

SITUACIÓN	TIPO	AMORTIGUADO	NO AMORTIGUADO	$V_m$ (m/s)
		$V_{CRIT}$ (m/s)	$V_{CRIT}$ (m/s)	
DEFENSA	EXPUESTO	25,89	12,85	19,17
	RESGUARDO	25,89	12,85	
OPERACIÓN	EXPUESTO	18,40	8,58	7,46
	RESGUARDO	21,99	10,25	

Los valores de velocidad crítica han de compararse con la velocidad del viento incidente en los paneles. Según se ha comentado en el Anexo I destinado a las cargas de viento, se tiene una velocidad de viento básica de 27 m/s, con la que se puede calcular la velocidad media (incluida en la última columna de la Tabla 4.17). Como se observa, la estructura sin amortiguación tiene velocidades críticas menores a las de proyecto, por lo que podría esperarse la aparición de fenómenos de inestabilidad. Sin embargo, cuando se añade la amortiguación la velocidad crítica aumenta considerablemente. Esto permite construir trackers seguros estructuralmente, ya que dicha velocidad es mayor a la de proyecto.

No obstante, el amortiguador con mayor constante de los que dispone la empresa Gonvarri Solar Steel cuenta con una igual a 65 000 Ns/m. Como se ha mostrado anteriormente, la necesaria es de 66 346 Ns/m, que es ligeramente superior a la disponible. Por ello, se colocarán dos amortiguadores en los penúltimos pilares de la estructura en lugar de uno, cumpliendo así los límites necesarios.

## 5. IMPLANTACIÓN

Una vez finalizado el proceso de diseño y dimensionamiento de los seguidores que se emplearán en el proyecto, se debe establecer la ubicación y el reparto de estos en el terreno de la obra. Para ello, se realiza una implantación o layout mediante el software PVCase, un complemento del programa de diseño AutoCAD. Este permite calcular automáticamente la distribución de trackers en un emplazamiento a partir de unos inputs referentes al tamaño y forma de la estructura, así como al terreno.

El cliente proporciona el archivo del terreno del proyecto. Ahí se muestra diversa información, entre las que se encuentran curvas de nivel, ríos cercanos, límites de la parcela... En este caso, se incluye adicionalmente un camino preestablecido que se desea respetar, así como la ubicación de los diferentes puntos donde se colocarán inversores. Por lo tanto, la solución propuesta deberá satisfacer dichos requisitos optimizando el espacio para poder instalar el mayor número de seguidores posibles. De esta manera, se tendrá una planta fotovoltaica con la máxima generación posible. Este archivo base se presenta en la Figura 5.1:



Figura 5.1- Archivo del terreno proporcionado por el cliente

La zona rellena de color rojo en la parte Este de la parcela delimita un área en el que no se puede construir debido a la necesidad de enterrar tuberías y otros elementos. De la misma manera, las líneas rojas en la parte Oeste representan una zona de cableado de alta-media tensión. La línea amarilla del contorno es el límite de la parcela, y la roja junto a ella es el vallado de la misma. Finalmente, las curvas marrones son las curvas de nivel, las cuales trazan la inclinación del terreno.

Habiendo analizado la parcela, se procede a la implantación de los trackers. Empleando el complemento PVCCase, se introducen todos los datos necesarios acerca de la estructura a construir.

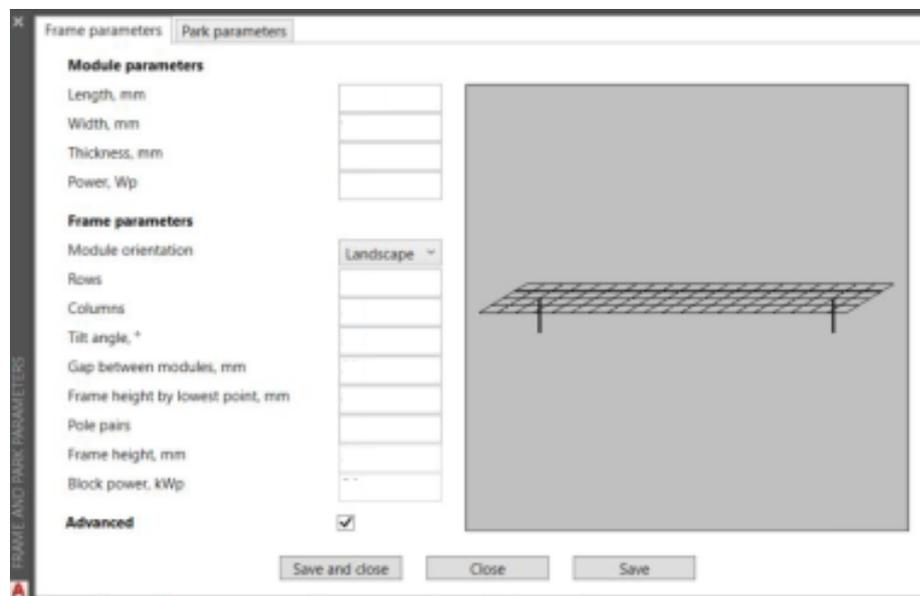


Figura 5.2- Ventana de introducción de datos de PVCCase

Una vez importados todos los inputs necesarios, el software comenzará a realizar iteraciones hasta hallar la solución óptima de aprovechamiento del emplazamiento. El resultado se puede observar en la Figura 5.3 y Figura 5.4:



Figura 5.3- Emplazamiento antes de realizar la implantación



Figura 5.4- Emplazamiento tras realizar la implantación

Posteriormente, se deberán distinguir entre seguidores expuestos y resguardos. Para ello, se seguirá el procedimiento expuesto en el apartado 3.1 de este documento. Se pigmentan de color rojo aquellos trackers expuestos, mientras que los resguardados se mantienen de color azul.

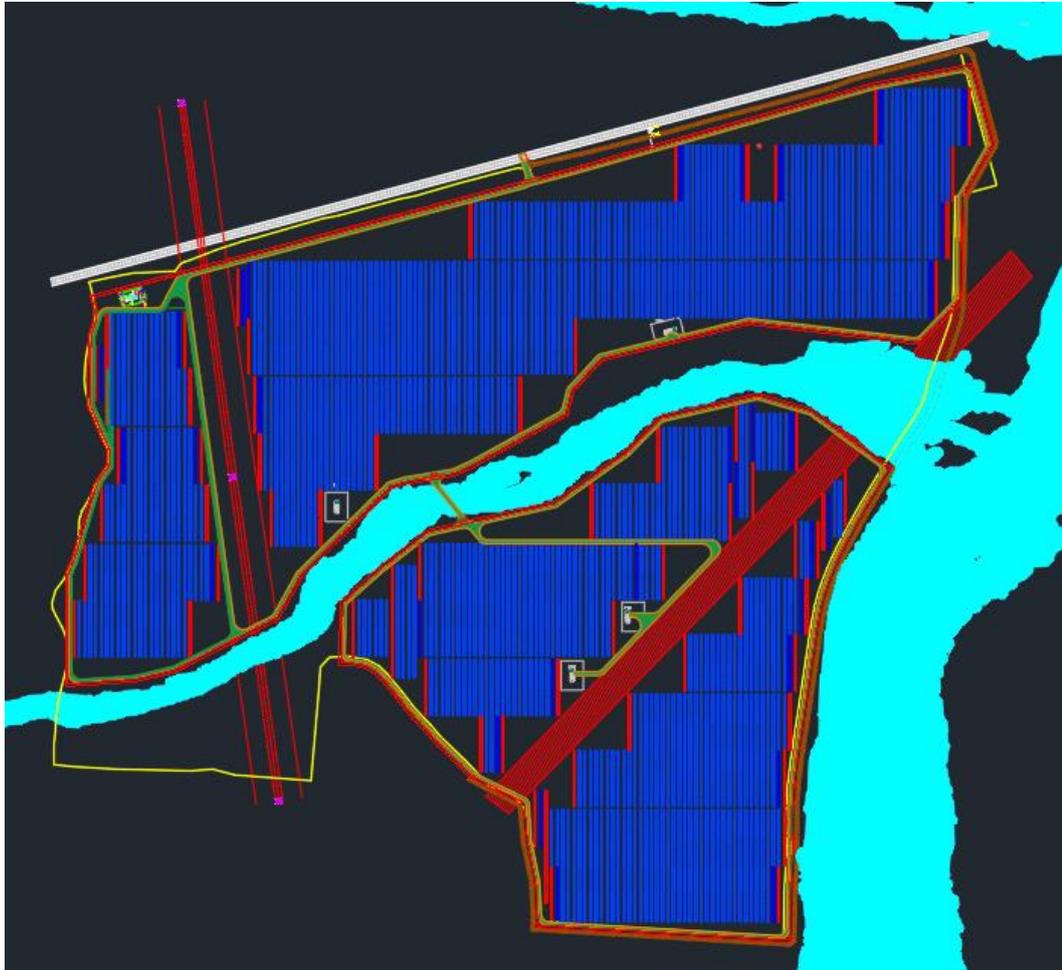


Figura 5.5- Clasificación de seguidores expuestos y resguardos

Habiendo realizado esta distinción, solamente resta conocer los movimientos de tierras que será necesario realizar para colocar los seguidores dentro de las tolerancias de pendiente permitidas. El resultado de esto se presenta en la Figura 5.6:

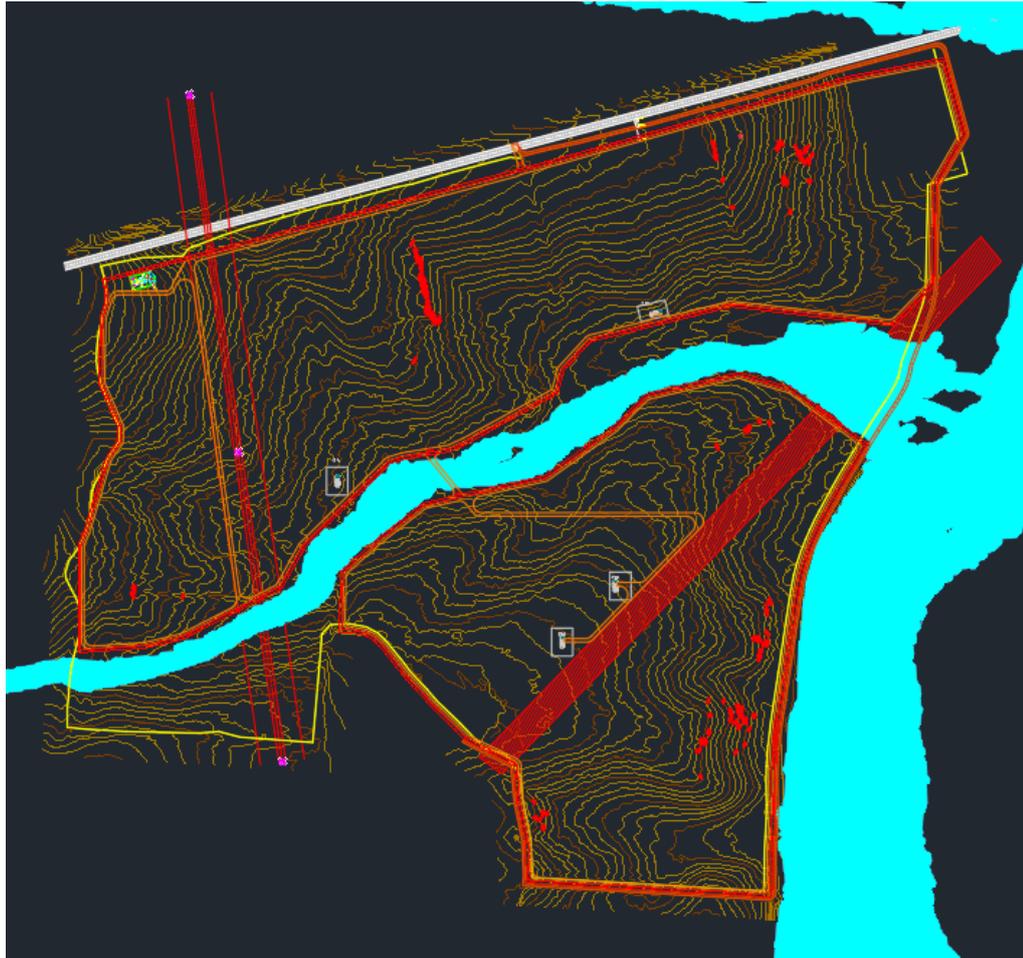


Figura 5.6- Movimiento de tierras necesario

Todos los planos generados durante este procedimiento se incluyen en el Anexo IV. El resumen de datos obtenidos se recoge en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1- Datos obtenidos durante la implantación

<b>POTENCIA</b>	27.13 MW
<b>Nº TRACKERS TOTALES</b>	922
<b>Nº EXPUESTOS</b>	65
<b>Nº RESGUARDOS</b>	857
<b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>	1716 m <sup>3</sup>

## 6. PRESUPUESTO

Tras haber realizado el diseño del proyecto expuesto anteriormente, es importante incluir un presupuesto que recoja los principales costes del mismo. De este modo, el cliente es capaz de estimar los gastos de materiales, control, uniones... Los costes del proyecto se organizan en diferentes bloques dependiendo de su origen.

### 6.1. Resumen

En primer lugar, es conveniente realizar un resumen de las principales características del proyecto. Este servirá como base sobre la que partir para construir el presupuesto. Todos los datos se recogen en la Tabla 6.1:

Tabla 6.1- Resumen del proyecto

<b>ALANGE - ALCONERA</b>	
Potencia del proyecto MW	27,13
Potencia del modulo	545
Tamaño string	27
Strings / tracker 1V	2,0
Nº total de filas	922
%expuesto	7,0%
%resguardo	93,0%
Nº expuestos	65
Nº resguardos	857
Galvanizado pilares	HDG100
Galvanizado estructura aerea	Z350
Galvanizado secundaria	ZM310

## 6.2. Elementos estructurales

Conociendo los datos de diseño del proyecto, el primer bloque a analizar se compone por aquellos elementos que forman la estructura principal de los seguidores solares. Pilares, vigas y viguetas constituyen este grupo. Los costes derivados de todos ellos se muestran en la Tabla 6.2:

Tabla 6.2- Costes de elementos estructurales

	ELEMENTO	SECCIÓN	LONGITUD (m)	PESO LINEAL (kg/m)	Uds/tracker	UNIDADES TOTALES	PESO TOTAL (kg)	€/kg	PRECIO TOTAL (€)	% COSTE
EXP	Pilar central	W8x18	1,3	26,64	1	65	2.251	2,19 €	4.931,55 €	0,21%
	Pilar general	C175x70x18x3	1,3	7,19	8	520	4.860	1,78 €	8.635,79 €	0,36%
	Viga central	130x4,5	8,92	17,25	2	130	20.003	1,51 €	30.272,69 €	1,26%
	1º Viga	130x3,5	11,19	13,5	2	130	19.638	1,51 €	29.720,83 €	1,24%
	2º Viga	130x2,3	10,68	9,04	2	130	12.551	1,51 €	18.994,89 €	0,79%
	Viga secundaria	OH-70x40x25,1x4	0,43	6,52	56	3.640	10.205	1,84 €	18.777,39 €	0,78%
RES	Pilar central	W8x18	1,3	26,64	1	857	29.680	2,19 €	65.020,64 €	2,70%
	Pilar general	C175x70x18x3	1,3	7,19	8	6.856	64.083	1,78 €	113.859,53 €	4,74%
	Viga central	130x4	8,92	15,38	2	1.714	235.143	1,51 €	355.865,38 €	14,80%
	1º Viga	130x3	11,19	11,74	2	1.714	225.169	1,51 €	340.771,08 €	14,17%
	2º Viga	130x2,3	10,68	9,04	2	1.714	165.482	1,51 €	250.440,31 €	10,42%
	Viga secundaria	OH-70x40x25,1x4	0,43	6,52	56	47.992	134.550	1,84 €	247.572,68 €	10,30%
<b>Total elementos</b>									<b>1.484.862,76 €</b>	<b>61,76%</b>

## 6.3. Piecerío y tornillería

Es importante también considerar todos los elementos de unión necesarios para conectar los componentes expuestos en el punto anterior. Además, se incluye piecerío adicional destinado a la instalación, tales como latiguillos, tapones, capuchones... Esto se adjunta en las siguientes tablas:

Tabla 6.3- Costes de tornillería

ELEMENTO	PESO (kg)	Uds/tracker	UNIDADES TOTALES	PESO TOTAL (kg)	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)	% COSTE
Conjunto tornillería tracker HDG	24,4	1	922	22.497	57,68 €	53.184,65 €	2,21%
Conjunto tornillería tracker Inox	3,3	1	922	3.043	18,32 €	16.890,58 €	0,70%
<b>Total tornillería</b>						<b>70.075,23 €</b>	<b>2,91%</b>

Tabla 6.4- Costes de piecerío y uniones

ELEMENTO	PESO (kg)	Uds/tracker	UNIDADES TOTALES	PESO TOTAL (kg)	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)	% COSTE
Soporte del motor (MS)	10,6	1	922	9.773	17,40 €	16.042,34 €	0,67%
Soporte de vigas (BS)	2,8	8	7.376	20.653	3,43 €	25.277,55 €	1,05%
Unión entre vigas (BC)	5,4	4	3688	19915,2	8,33 €	30.706,29 €	1,28%
Unión secundaria (SF)	0,4	56	51632	20652,8	0,52 €	26.719,56 €	1,11%
Soporte para amortiguador (DS)	3,9	4	3688	14383,2	8,02 €	29.561,16 €	1,23%
Capuchón motor	0,3	1	922	239,72	0,56 €	519,55 €	0,02%
Tapones plástico laterales	0,1	2	1844	184,4	0,81 €	1.484,42 €	0,06%
Latiguillo puesta a tierra	0,1	1	922	129,08	4,12 €	3.795,87 €	0,16%
Soporte antena	0,1	1	922	55,32	0,92 €	848,24 €	0,04%
Piecerío TSC	0,6	1	922	553,2	11,44 €	10.549,99 €	0,44%
Piecerío conexión sensores	16,8	-	30	504	-	655,50 €	0,03%
<b>Total piecerío</b>						<b>146.160,47 €</b>	<b>6,08%</b>

## 6.4. Elementos comerciales

En este bloque aparecen todos aquellos componentes que se adquirirán a suministradores externos. Elementos como los slewdrives o amortiguadores son esenciales en la estructura de los seguidores solares. Asimismo, también se deben añadir piezas que permitan la comunicación y el control de la inclinación de los paneles conforme a la posición del sol (unidad de control). Por ello, los costes relacionados se recogen en la Tabla 6.5:

Tabla 6.5- Costes de elementos comerciales

ELEMENTO	PESO (kg)	Uds/tracker	UNIDADES TOTALES	PESO TOTAL (kg)	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)	% COSTE
Motor+Slewdrive	57,0	1	922	52.554	350,75 €	323.391,50 €	13,45%
Dampers	5,1	4	3.688	18.809	27,17 €	100.219,56 €	4,17%
Unidad control+Panel dedicado	8,0	1	922	7.376	229,29 €	211.402,61 €	8,79%
<b>Total piecerío</b>						<b>635.013,67 €</b>	<b>26,41%</b>

## 6.5. Elementos de control de planta

Para asegurar el correcto funcionamiento de la planta solar fotovoltaica, es esencial contar con elementos de control de planta. Estos gestionan las comunicaciones entre trackers y sensores,

orientando los paneles en base a las medidas obtenidas. Además, se encargan de enviar una señal a los seguidores (unidad de control) cuando es necesario acudir a posición de defensa. El cliente ha especificado la cantidad de unidades maestras de controladores a establecer. Por ello, los costes totales son los siguientes:

Tabla 6.6- Costes de elementos de control de planta

ELEMENTO	PESO (kg)	UNIDADES TOTALES	PESO TOTAL (kg)	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO TOTAL (€)	% COSTE
Unidad maestra de control	5,8	15	87	1.702,77 €	25.541,56 €	1,06%
Workstation	7,0	1	7	1.544,85 €	1.544,85 €	0,06%
Servidores	25,0	1	25	10.527,88 €	10.527,88 €	0,44%
Estación meteorológica	85,0	1	85	10.070,15 €	10.070,15 €	0,42%
<b>Total elementos de control de planta</b>					<b>47.684,44 €</b>	<b>1,98%</b>

## 6.6. Obra civil

Finalmente, conociendo los gastos procedentes de componentes estructurales, de control, uniones... solamente resta presentar aquellos costes relacionados con la obra a realizar. Como se ha expuesto al principio de este documento, el producto 1V no debe situarse en grandes inclinaciones del terreno. Por ello, es necesario realizar movimientos de tierras en el emplazamiento que compensen esta deficiencia. Tras el diseño de la implantación de los trackers, se conocen los detalles relacionados con la obra a realizar:

Tabla 6.7- Costes de obra civil

ELEMENTO	CANTIDAD (m <sup>3</sup> )	€/m <sup>3</sup>	Precio total (€)	% COSTE
Movimiento de tierras	1716,0	11,83 €	20.300,28 €	0,84%
<b>Total obra civil</b>			<b>20.300,28 €</b>	<b>0,84%</b>

## 6.7. Coste final

Agrupando los costes parciales de los bloques presentados anteriormente, se puede estimar la cuantía total del proyecto. El coste final a pagar por el cliente se presenta en la Tabla 6.8:

Tabla 6.8- Coste final del proyecto

Coste total proyecto	2.404.096,84 €
Beneficio Industrial	7%
Gastos generales	13%
IVA	21%
<b>COSTE FINAL</b>	<b>3.389.776,55 €</b>
<b>€/Wp</b>	<b>0,12 €</b>

## 7. CONCLUSIÓN

Tras llevar a cabo el diseño y dimensionamiento del anterior proyecto, se puede concluir que se han cumplido los objetivos establecidos y se han obtenido unos resultados acordes con las expectativas.

A partir de los datos propuestos por el cliente, se ha realizado una implantación que posibilita la instalación de 27 MW de energía solar fotovoltaica. Asimismo, se ha diseñado un tracker seguro desde el punto de vista estructural (cargas de viento, nieve, sísmicas, dinámicas...) y acorde con la normativa local vigente. Adicionalmente, se ha estimado un presupuesto de alrededor de 3,4 millones de euros para el suministro de los materiales necesarios.

No obstante, es esencial evaluar la viabilidad financiera del proyecto y considerar la posibilidad de emplear otras tecnologías renovables en su lugar. Aunque actualmente la energía eólica terrestre es la fuente más económica, la energía solar también puede llegar a ser una opción rentable en España debido a su clima soleado. De esta manera, se podría competir con otras formas de obtener energía.

Según datos extraídos del Informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), el precio medio aproximado de la construcción de una planta de energía eólica terrestre en Europa es de aproximadamente 1623 USD/kW<sup>7</sup>. Por ello, para un proyecto de la misma envergadura se tendría un precio estimado de 40 millones de euros. Por otra parte, la energía hidroeléctrica cuenta con resultados similares, con un coste de 1634 USD/kW para una planta menor de 50MW. Cabe recordar que el presupuesto proporcionado en este documento no tiene en cuenta factores como la cimentación, transporte, montaje o los propios paneles en sí. Incluyendo un precio estimado de los módulos, se podría alcanzar un coste del proyecto de alrededor de 25 millones de euros (a falta de otros costes). Por lo tanto, existe una diferencia entre el coste de ambas tecnologías, situando la fotovoltaica como la opción más favorable.

---

<sup>7</sup> Fuente: "Renewable Power Generation Costs in 2021", IRENA, Tabla 2.1.

Por último, es importante justificar aspectos medioambientales. Teniendo en cuenta las estructuras de los aerogeneradores y las enormes cimentaciones necesarias para una instalación de 27 MW, se tendría un gran impacto ambiental tanto visual como a los hábitats autóctonos. Por otra parte, un proyecto fotovoltaico no genera tanto daño al medioambiente, contando con una infraestructura más pequeña y mejor adaptada a la zona. Por lo tanto, se puede concluir que, por todos los aspectos expuestos anteriormente, este proyecto es viable técnica, ambiental y económicamente, y se justifica el empleo de la energía fotovoltaica en lugar de cualquiera de sus competidores verdes.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- (IRENA), International Renewable Energy Agency. «Renewable Power Generation Costs in 2021.» 2022. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2021.pdf?rev=34c22a4b244d434da0accde7de7c73d8](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021.pdf?rev=34c22a4b244d434da0accde7de7c73d8) (último acceso: 27 de Abril de 2023).
- AENOR. «Eurocódigo 0: Bases de cálculo de estructuras (UNE-EN 1990).» Madrid, Abril 2019.
- AENOR. «Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-3: Acciones Generales. Cargas de Nieve (UNE-EN 1991-1-3).» Madrid, Febrero 2018.
- AENOR. «Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento (UNE-EN 1991-1-4).» Norma, Madrid, Septiembre 2007.
- AENOR. «Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios (UNE-EN 1993-1-1).» Madrid, Octubre 2020.
- AENOR. «Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-3: Reglas generales. Reglas adicionales para perfiles y chapas de paredes delgadas conformadas en frío. (UNE-EN 1993-1-3).» Madrid, Junio 2012.
- Cumbre Pueblos. *Efecto Fotovoltaico*. Febrero 2023. [https://cumbrepuebloscop20.org/energias/solar/efecto-fotovoltaico/?utm\\_content=cmp-true](https://cumbrepuebloscop20.org/energias/solar/efecto-fotovoltaico/?utm_content=cmp-true).
- DIN. *DIN 50929-3:2018. Corrosion Of Metals - Corrosion Likelihood Of Metallic Materials When Subject To Corrosion From The Outside - Part 3: Buried And Underwater Pipelines And Structural Components*. Beuth-Verlag, Enero 2018.
- DVGW. «DVGW GW9:2021. Assessment of Corrosion Loads on Buried Pipelines and Tanks Made of Unalloyed Low-alloyed Ferrous Materials in Soils.» Agosto 2021.
- GEOINTEC. «Estudio Geotécnico para el proyecto solar "Alconera", ubicado en Alange, Badajoz, España. .» Mayo 2021.
- Gonvarri Solar Steel SLU. «Manual de mantenimiento TrackSmart+ 1V.» Asturias, España, 2022.
- Gonvarri Solar Steel SLU. «Manual de montaje TrackSmart+ 1V.» Asturias, España, 2022.
- ISO. "ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation." Ginebra, Febrero 2012.

- ISO. "ISO 9224:2012. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Guiding values for the corrosivity categories." Ginebra, Febrero 2012.
- ISO. "ISO 9225:2012. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres." Ginebra, Febrero 2012.
- ISO. «ISO 9226:2012. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.» Ginebra, Febrero 2012.
- Ministerio de Fomento, Gobierno de España. «Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02).» Madrid, 2009.
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. «Documento Básico Seguridad Estructural. Acciones en la edificación.» Abril 2009.
- R. Blevins, H. Saunders. *Flow-Induced Vibration*. 2ª. Krieger Pub Co, 2001.
- Red Eléctrica de España. «El sistema eléctrico español. Avance 2021.» 11 de Enero de 2022.  
[https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2022/03/downloadable/Avance\\_ISE\\_2021.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/publication/2022/03/downloadable/Avance_ISE_2021.pdf) (último acceso: Febrero de 2023).
- SLU, Gonvarri Solar Steel. «Manual de montaje TrackSmart+ 1V.» Asturias, 2022.
- Táctica Desarrollo Industrial. «Justificación efectos aeroelásticos seguidor Tracksmart.» Marzo 2021.
- Trina Solar. "Trina Solar Vertex (TSM-DE19)." 2020.  
[https://static.trinasolar.com/sites/default/files/MA\\_Datasheet\\_Vertex\\_DE19\\_202011.pdf](https://static.trinasolar.com/sites/default/files/MA_Datasheet_Vertex_DE19_202011.pdf) (accessed Febrero 2022).