



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño de una estructura solar fotovoltaica en altura
(tracker)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Vidal Vidal, Alvar

Tutor/a: Martín Concepcion, Pedro Efrén

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

RESUMEN

El objetivo final de este Trabajo de fin de grado es el diseño y cálculo de una estructura solar fotovoltaica en altura para instalaciones solares que se encuentran en terrenos antes empleados para el cultivo, a fin de aportar una solución sostenible y económica al aumento de producción de este tipo de energía debido a los objetivos definidos y aprobados por la Unión Europea en el Tratado de París y el “Pacto Verde”.

Para el diseño de la estructura se ha realizado un estudio de los diferentes tipos de estructuras de seguimiento empleadas y se han analizado las cargas y las reacciones resultantes para el cálculo de los perfiles que forman la estructura. Finalmente se ha realizado un presupuesto detallado de los gastos de fabricación de la estructura diseñada en el proyecto.

Palabras clave: Estructura fotovoltaica, sostenibilidad, “tracker”.

RESUM

L'objectiu final d'aquest Treball de fi de grau és el disseny i càlcul d'una estructura solar fotovoltaica en altura per a instal·lacions solars que es troben en terrenys abans emprats per al cultiu, a fi d'aportar una solució sostenible i econòmica a l'augment de producció d'aquesta mena d'energia a causa dels objectius definits i aprovats per la Unió Europea en el Tractat de París i el "Pacte Verd".

Per al disseny de l'estructura s'ha realitzat un estudi dels diferents tipus d'estructures de seguiment emprades i s'han analitzat les càrregues i les reaccions resultants per al càlcul dels perfils que formen l'estructura. Finalment s'ha realitzat un pressupost detallat de les despeses de fabricació de l'estructura dissenyada en el projecte.

Paraules clau: Estructura fotovoltaica, sostenibilitat, "tracker".

ABSTRACT

The final objective of this Final Degree Project is the design and calculation of a solar photovoltaic structure on high altitude solar for installations located on land previously used for cultivation, in order to provide a sustainable and economic solution to the increase in production of this type of energy due to the objectives defined and approved by the European Union in the Treaty of Paris and the "Green Pact".

For the design of the structure, a study of the different types of tracking structures used has been carried out and the resulting loads and reactions have been analysed for the calculation of the profiles that form the structure. Finally, a detailed estimate of the manufacturing costs of the structure designed in the project has been made.

Key words: Photovoltaic structure, sustainability, tracker.

ÍNDICE

Lista de Figuras.....	6
Lista de Tablas.....	7
1. Memoria.....	8
1.1. Objeto del TFG.....	8
1.2. Antecedentes.....	9
1.2.1. Energía renovable: solar fotovoltaica.....	9
1.2.2. Problemática medioambiental.....	11
1.2.3. Agrovoltaica.....	13
1.3. Energía solar fotovoltaica.....	15
1.4. Factores de emplazamiento.....	16
1.5. Análisis de estructuras para instalaciones fotovoltaicas.....	18
1.5.1. Materiales normalizados.....	18
1.5.2. Tipos de estructuras.....	19
1.6. Normativa.....	22
1.7. Justificación y descripción de la solución adoptada.....	22
1.8. Cálculos y dimensionamiento.....	27
2. Planos.....	40
3. Pliego de condiciones.....	46
3.1. Objeto.....	46
3.2. Condiciones de los materiales.....	46
3.2.1. Estructura solar.....	47
3.2.2. Módulos solares fotovoltaicos.....	47
3.2.3. Acero para estructuras metálicas: perfiles.....	48
3.3. Condiciones de la ejecución.....	49
3.4. Programa de mantenimiento.....	50
4. Presupuesto.....	52

Conclusiones	56
Bibliografía	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Potencia fotovoltaica instalada en la Unión Europea – Fuente (UNEF).....	10
Figura 2. Generación eléctrica en España 2021 – Fuente (REE)	10
Figura 3. Potencia fotovoltaica instalada en España durante 2021,2022 y 2023 – Fuente (REE)	11
Figura 4. Mapa radiación solar media anual – Fuente (CTE)	13
Figura 5. Huerto agrovoltaico de Colorado – Fuente (NPR)	15
Figura 6. Potencia (W) y eficiencia (%) de módulos solares según la tecnología empleada – Fuente (EnergyTrend)	16
Figura 7. Orientación (α) e inclinación (β) de un módulo solar.....	17
Figura 8. Variación de la inclinación según la época del año.....	18
Figura 9. Esquema de estructura fija ajustable.....	19
Figura 10. Seguimiento en un eje	20
Figura 11. Seguimiento en dos ejes	21
Figura 12. Comparación energía generada entre estructuras fijas y móviles	24
Figura 13. Características mecánicas de los aceros	25
Figura 14. Objetivos de Desarrollo Sostenible – Fuente (ONU).....	26
Figura 15. Representación de la aplicación de la carga permanente (CP) sobre la estructura. .	27
Figura 16. Mapa de zonas de clima invernal – Fuente (CTE DB-SE-AE)	28
Figura 17. Representación de la aplicación de la nieve (N) sobre la estructura.....	29
Figura 18. Mapa zonas del valor básico de la velocidad del viento – Fuente (CTE DB-SE-AE) ...	30
Figura 19. Representación de la aplicación del viento succión (VS) y viento presión (VP) sobre la estructura.....	32

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Instalaciones fotovoltaicas más grandes de España – Fuente (MITECO).....	12
Tabla 2. Radiación solar media anual sobre superficie horizontal H – Fuente (CTE).....	13
Tabla 3. Comparativa entre los distintos tipos de estructuras solares fotovoltaicas.	23
Tabla 4. Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal (kN/m^2).	28
Tabla 5. Valores del coeficiente de exposición ce	30
Tabla 6. Valores de cp , net y cf para marquesinas a un agua.	31
Tabla 7. Resultados de los esfuerzos a los que el pilar está sometido, axil a tracción– Fuente (SAP200, elaboración propia).....	33
Tabla 8. Resultados de las tensiones SVM para IPE-160 a tracción.....	34
Tabla 9. Resultados de los esfuerzos a los que el pilar está sometido, axil a compresión– Fuente (SAP200, elaboración propia).....	35
Tabla 10. Resultados de las tensiones SVM para IPE-160 a compresión.....	35
Tabla 11. Resultados de las tensiones SVM para HE-120B a compresión.	36
Tabla 12. Resultados de los esfuerzos a los que el eje se encuentra sometido – Fuente (SAP2000, elaboración propia).....	37
Tabla 13. Resultados de las tensiones SVM para eje RCH de sección cuadrada.	38
Tabla 14. Cuadro de precios elementales.....	52
Tabla 15. Presupuestos descompuestos.....	54
Tabla 16. Precios descompuestos.....	55

1. Memoria

1.1. Objeto del TFG

Los objetivos principales de este trabajo de fin de grado son los siguientes:

- Planteamiento del problema a resolver con la propuesta del proyecto.
- Descripción de la energía solar y los factores que influyen en la producción de electricidad de las instalaciones fotovoltaicas.
- Estudio de los diferentes tipos de estructuras empleadas en las instalaciones fotovoltaicas.
- Diseño de una estructura fotovoltaica en altura para la zona de Requena, cálculo estructural del diseño proporcionado, así como cálculo debido a las cargas producidas por el viento siguiendo la normativa vigente para este tipo de instalaciones.

El desarrollo del proyecto se realiza en las siguientes partes:

- Descripción de la energía solar fotovoltaica y el aumento de producción en la Unión Europea y España.
- Explicación de la problemática medioambiental que supone la construcción de instalaciones fotovoltaicas de grandes potencias.
- Estudio de diferentes parámetros y tecnologías disponibles que influyen en la producción de energía solar fotovoltaica. Diseño de la estructura a fin de cumplir con las necesidades expuestas.
- Estudio de fuerzas y cálculos de dimensionamiento de la estructura.
- Planos de emplazamiento, necesario en el cálculo de fuerzas que actúan sobre la estructura, planos de fabricación de la estructura solar fotovoltaica, donde queda detallado las dimensiones entre las uniones de los distintos elementos que forman la estructura.
- Presupuesto, donde se indica el coste final de fabricación de la estructura diseñada en el proyecto.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Energía renovable: solar fotovoltaica

La producción de energía eléctrica es un aspecto importante para el crecimiento económico de un país, el desarrollo de la industria depende directamente de esta y necesita de precios competitivos. Además, es un gran influyente en el bienestar de las personas formando parte del día a día.

Desde el Acuerdo de París en 2015 hasta ahora la transición energética hacia las fuentes de energía limpias y renovables es un hecho constatable. El objetivo de la UE es reducir en un 55% las emisiones para el año 2030 respecto a los niveles de emisión del 1990 y que para el 2050 se alcance una UE climáticamente sostenible y neutra, para ello se debe reducir el uso de combustibles fósiles en la producción de energía eléctrica y sustituirlo por energía renovables (este trabajo de fin de grado se centra en la solar fotovoltaica).

A fin de lograr estos objetivos la Comisión Europea presentó el “Pacto Verde o Green Deal”, una hoja de ruta para limitar el calentamiento global y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el año 2020 la energía solar fotovoltaica supuso un 5,2% de la producción total de electricidad de la UE y la Comisión Europea prevé que para el año 2040 la energía solar satisfaga el 20% de la demanda eléctrica de la UE. Esto supone un incremento del número de instalaciones fotovoltaicas, que lleva en crecimiento más de una década. Según datos de la UE en 2011 la energía solar producía 52GW de la potencia total instalada de la UE frente a los casi 160GW en el año 2021. Además de los beneficios medioambientales que supone la transición a energías limpias otra de las razones es la situación geopolítica y del mercado en la que nos encontramos ahora. Debido a la invasión de Ucrania por parte de Rusia surge el plan REPowerEU cuyo objetivo es reducir la dependencia del gas natural ruso, aproximadamente un 85% de los europeos piensa que la UE debe reducir la dependencia de los combustibles fósiles rusos como medida de apoyo a Ucrania. El objetivo es producir 320GW de energía solar fotovoltaica para 2025 y alcanzar los casi 600GW de aquí a 2030, medida que supondría una disminución del consumo de gas natural en 9000 millones de m^3 .

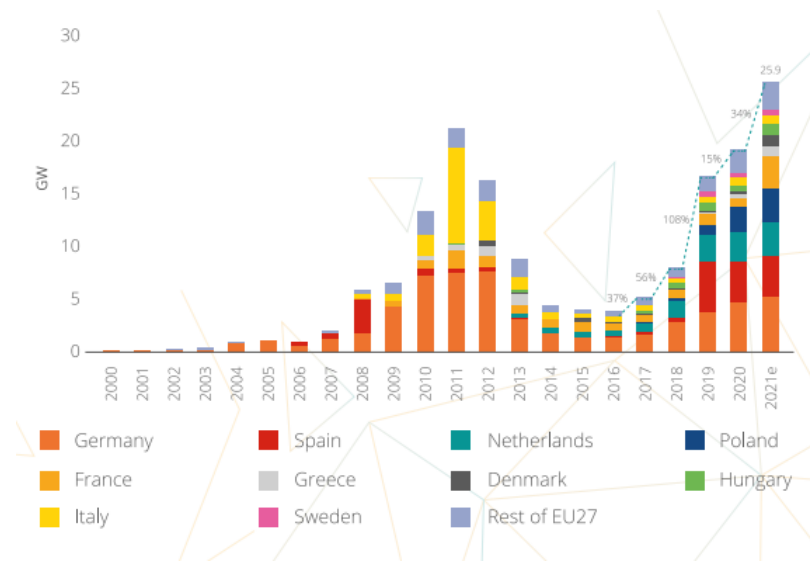


Figura 1. Potencia fotovoltaica instalada en la Unión Europea – Fuente (UNEF)

Gracias al avance de las tecnologías solares fotovoltaicas se está consiguiendo una mayor eficiencia energética, una mayor conversión a partir de la luz solar y una disminución en los costes tanto para la industria como para los consumidores. El sector de la energía solar fotovoltaica creó en 2020 357000 puestos de trabajo de forma directa e indirecta en la UE y se espera que estas cifras se dupliquen para el año 2030.

En lo que respecta a la energía solar fotovoltaica en el ámbito nacional en el año 2021 la potencia fotovoltaica aumentó hasta casi 15,3GW siendo España el tercer país de la UE por detrás de Alemania e Italia. El incremento continuado de la capacidad instalada de energía solar se traduce en un aumento del peso de este tipo de energía en el conjunto de generación. Dentro de las energías renovables en España, la fotovoltaica se posiciona con un 20% mientras que en los últimos años suponía entorno al 7% del total de las renovables.

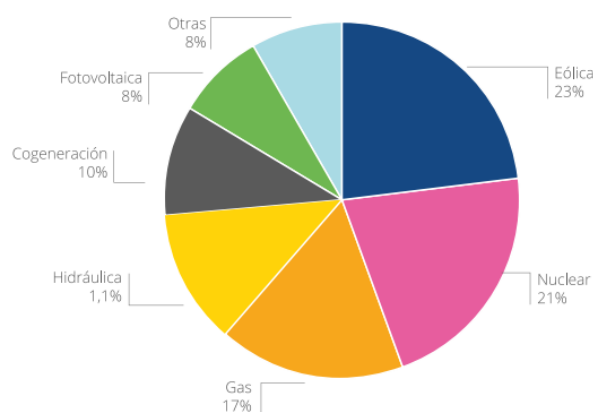


Figura 2. Generación eléctrica en España 2021 – Fuente (REE)

La energía solar fotovoltaica alcanza un 8% del conjunto total de generación eléctrica en España en el año 2021, frente a un 6,9% en el año 2020 y más de un 5% que en la última década.

Según datos de la Red Eléctrica Española la potencia instalada de energía fotovoltaica pasó de 15288 MW hasta 19946 MW en el año 2022, aumentando casi un 30% respecto a los datos del 2021. En lo que llevamos de 2023 la potencia instalada de energía fotovoltaica es de 20798 MW lo que representa entorno al 16% de la potencia instalada nacional.

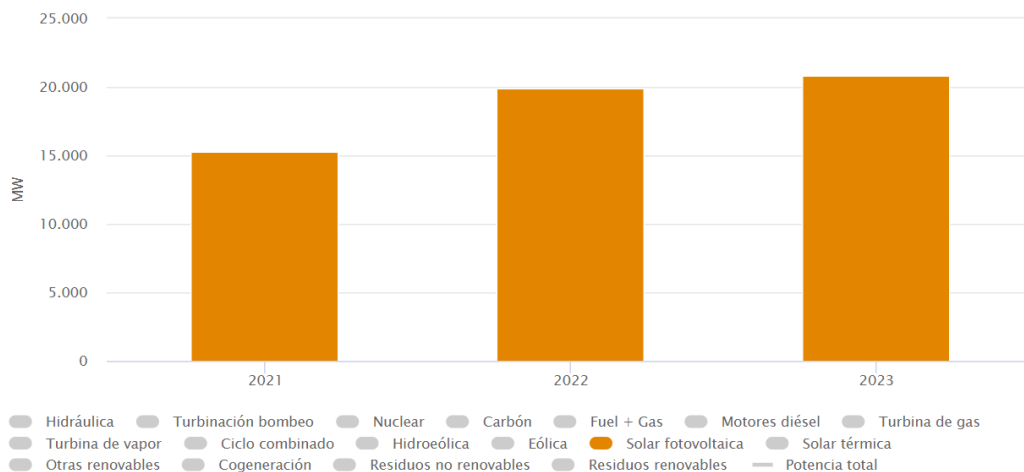


Figura 3. Potencia fotovoltaica instalada en España durante 2021,2022 y 2023 – Fuente (REE)

1.2.2. Problemática medioambiental

Pese a que la energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable cuyas emisiones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero son nulas en la producción de electricidad frente a las emisiones de las energías convencionales, la puesta en práctica de esta tecnología energética conlleva otros riesgos al medioambiente.

Las grandes instalaciones fotovoltaicas o también conocidos como huertos solares necesitan de grandes extensiones de terreno para su emplazamiento. Con el crecimiento de la potencia instalada para la energía fotovoltaica y los objetivos marcados por la UE y el gobierno español para el año 2030 cada vez son más las mega centrales fotovoltaicas que se están construyendo en España. La mayor central solar fotovoltaica de Europa se encuentra en Extremadura, con una potencia de 500 MW ocupa 1000 Ha de superficie siendo casi de igual tamaño que la ciudad de Badajoz. Y esta no es la única que se encuentra en territorio español, en la Tabla 1 se puede

observar la potencia de las centrales fotovoltaicas más grandes de España y la superficie que ocupan.

Instalación	Municipio	Provincia	Potencia [MW]	Área ocupada [Ha]
Nuñez de Balboa	Usagre	Badajoz	500	1000
Mula	Mula	Murcia	494	1000
Talayuela Solar	Talayuela	Cáceres	300	800
Talazol Solar	Talaván	Cáceres	300	600
La Isla	Alcalá de Guadaíra	Sevilla	182	520
Calzadilla B	Bienvenida	Badajoz	180	180
Don Rodrigo	Alcalá de Guadaíra	Sevilla	174	300
Guillena	Guillena	Sevilla	121	280

Tabla 1. Instalaciones fotovoltaicas más grandes de España – Fuente (MITECO)

Según el Ministerio de Transición Ecológica la superficie agraria representa casi la mitad del territorio español con más de veintitrés millones de hectáreas empleadas tanto para la agricultura como para la ganadería. De este porcentaje de superficie agraria más de diecisiete millones de hectáreas son empleadas para el cultivo. Las diferentes asociaciones agrícolas y ganaderas de las comunidades autónomas denuncian la falta de regularización a las empresas inversoras que, aportan beneficios a los arrendatarios de las parcelas, pero no generan empleo ni suponen un modelo social estable. Proponen el emplazamiento de los parques fotovoltaicos en parcelas sin uso agrícola-ganadero para de esta forma, no repercutir en la actividad de ningún territorio y sus habitantes. La actual situación política europea debido a la guerra de Ucrania ha provocado una crisis de abastecimiento de ciertos productos, los sindicatos agrarios defienden sobre todo la necesidad de proteger los campos de regadío, pastos y prados de siembra para garantizar la producción de alimentos. Según la UPA, en los últimos 30 años se han perdido más de un millón de hectáreas de terreno fértil, hecho que no solo afecta en la producción agrícola y ganadera, sino que favorece la despoblación de las zonas rurales. Esto por esto que las asociaciones reclaman una regulación estricta e instan a que las instituciones provinciales y estatales se impliquen en el asunto.

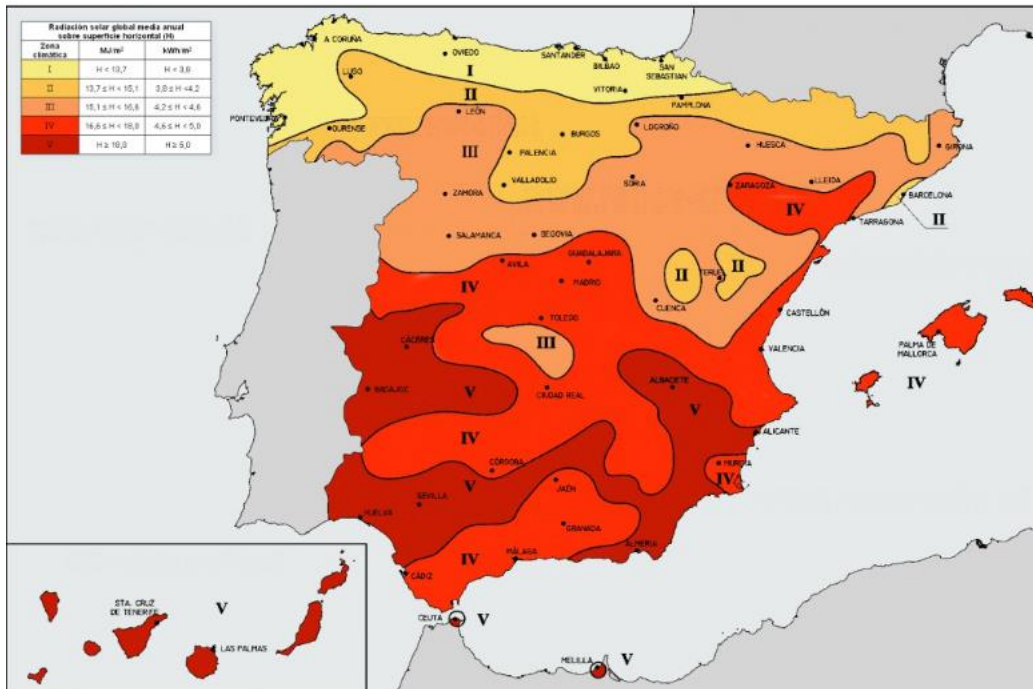


Figura 4. Mapa radiación solar media anual – Fuente (CTE)

Zona climática	MJ/m^2	kWh/m^2
I	$H < 13,7$	$H < 3,8$
II	$13,7 \leq H < 15,1$	$3,8 \leq H < 4,2$
III	$15,1 \leq H < 16,6$	$4,2 \leq H < 4,6$
IV	$16,6 \leq H < 18,0$	$4,6 \leq H < 5,0$
V	$H \geq 18,0$	$H \geq 5,0$

Tabla 2. Radiación solar media anual sobre superficie horizontal H – Fuente (CTE)

Del Código Técnico de la Edificación se extrae el mapa de la Figura 4 con su respectiva tabla. A partir de esta información se puede afirmar que los terrenos de las comunidades de Extremadura, Andalucía, Murcia, Baleares, Canarias y parte de la Comunidad Valenciana serán los que más se vean afectados debido a la calidad solar.

1.2.3. Agrovoltaica

Tanto para la producción de energía solar fotovoltaica como para el cultivo se necesita una irradiación solar directa para garantizar el máximo rendimiento en la producción, es por ello,

que las empresas instaladoras de placas solares buscan terrenos sin sombras y con la máxima exposición a la radiación solar. De la necesidad de combinar las actividades agrícolas y ganaderas con la producción de energía surge esta nueva práctica, la agrovoltaica, con el fin de obtener el máximo aprovechamiento del suelo.

La agrovoltaica es una nueva disciplina que puede aportar grandes beneficios al mundo rural, de momento solo se han realizado ensayos en pequeñas parcelas de terreno. En el desarrollo de estos ensayos se ha comprobado que la presencia de placas solares alivia la radiación solar a las plantas y limita la evaporación de agua gracias a las sombras, hecho que produce que las necesidades hídricas de la tierra se vean reducidas considerablemente. Esto último es un factor de gran importancia debido a las largas temporadas de sequía que se están produciendo. Además, no solo son las plantas y cultivos las que se ven beneficiadas de esta simbiosis, la evaporación procedente de los cultivos ayuda a la refrigeración de las placas solares aumentando el rendimiento ya que este se ve afectado al aumentar la temperatura de superficie de las placas.

El empleo de esta práctica también tiene repercusiones sociales, incluye al mundo rural a la transición energética, mitigando la despoblación de zonas rurales creando empleos y una industria sostenible. Permite la posibilidad de mantener cultivos autóctonos, que debidos al cambio climático se ven afectados. Las placas solares ofrecen una protección sobre el terreno en el que se encuentran, evitando golpes de calor excesivos, granizo y reduciendo la necesidad hídrica gracias a la sombra.

Ya existen algunos proyectos que emplean la agrovoltaica, pero todos ellos se encuentran en las primeras fases de desarrollo. En Colorado, Estados Unidos, se ha creado un huerto bajo una instalación fotovoltaica de 3200 paneles. También tenemos ejemplos de agrovoltaica en España, como es el caso de la planta solar Augusto situada en Mérida.



Figura 5. Huerto agrovoltaico de Colorado – Fuente (NPR)

A la hora de diseñar un proyecto agrovoltaico es importante satisfacer las necesidades del cultivo seleccionado para garantizar el éxito de la instalación. Se debe tener en cuenta que el tipo de cultivo no necesite gran cantidad de luz de manera constante ya que, la producción se verá notablemente afectada por la sombra de los paneles. Otros aspectos por tener en consideración es la altura de los cultivos, el tamaño de la maquinaria empleada en las labores agrícolas y como se realiza la cosecha, todo esto se verá repercutido en la altura de la estructura que necesitará ser más robusta.

Pese a aportar diferentes beneficios la situación de la agrovoltaica en España también presenta problemas. Al ser una práctica reciente existe una falta de proyectos que sirven como guía, unido al hecho de que España posee un clima muy variado donde las exigencias para cada proyecto son distintas. No existe una legislación clara y la normativa respecto a este tipo de instalaciones es escasa, además de los numerosos obstáculos que pone la administración pública para el desarrollo del proyecto. Por último la falta de legislación clara provoca que no exista una línea de ayudas y subvenciones para el desarrollo de la agrovoltaica en España.

1.3. Energía solar fotovoltaica

Se conoce como energía solar fotovoltaica a aquella que emplea la radiación solar para producir electricidad y como ya es sabido se trata de una fuente de energía renovable. La producción de electricidad se basa en el efecto fotoeléctrico por el cual ciertos materiales son capaces de

absorber fotones procedentes de los rayos del sol y liberar electrones, creando así corriente eléctrica.

Las placas solares se forman a partir de unas celdas o células fotovoltaicas que pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- **Células monocristalinas:** se obtienen al cortar finamente un único cristal de silicio puro. El rendimiento obtenido está entre el 15% y el 20%, siendo las que mejor rendimiento tienen de los tres grupos, pero a mayor coste.
- **Células policristalinas:** se obtienen a partir de un bloque formado por varios cristales de silicio. Estas son más económicas que las anteriores y su rendimiento está alrededor del 12% y 14%.
- **Células CIS amorfas:** son células compuestas por cobre, indio y selenio. Se fabrican depositando capas de material fotovoltaico en un sustrato. Su rendimiento varía entre un 7% y 12%, no obstante, son la alternativa más económica.



Figura 6. Potencia (W) y eficiencia (%) de módulos solares según la tecnología empleada – Fuente (EnergyTrend)

1.4. Factores de emplazamiento

En el desarrollo de este apartado se van a exponer los principales factores a tener en cuenta a la hora de optimizar la captación solar de la instalación fotovoltaica.

La orientación y la inclinación son los factores principales que se deben tener en cuenta a la hora de ubicar los módulos solares.

- **Orientación:** se representa por el ángulo de acimut α , se define como el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del panel solar. En España, al encontrarse en el hemisferio norte los módulos se deben orientar al sur, es decir, $\alpha = 0^\circ$. Los valores positivos de α indican una orientación hacia el oeste y los negativos hacia el este.

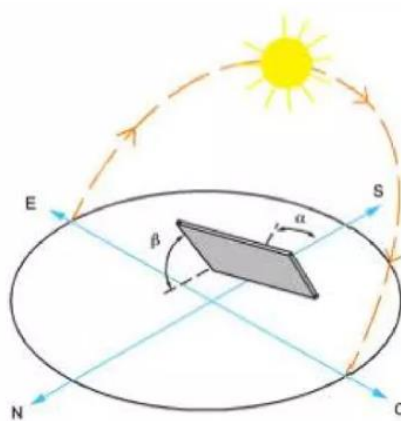


Figura 7. Orientación (α) e inclinación (β) de un módulo solar

- **Inclinación:** este factor depende de la latitud del emplazamiento y la época del año. La radiación solar que reciben los módulos depende del ángulo que forman con la superficie horizontal. Cuando el ángulo entre la radiación incidente y la posición de los módulos se consigue máxima captación y, por lo tanto, máxima eficiencia. En España cuanto más al norte se encuentre la instalación, mayor será la latitud y mayor será el ángulo de inclinación. Además, también varía dependiendo de la época del año en la que nos encontremos como se puede observar en la Figura 5.

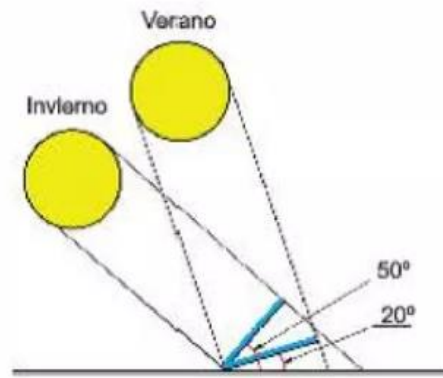


Figura 8. Variación de la inclinación según la época del año

- **Sombras:** para conseguir la máxima eficiencia de la instalación y por consiguiente la máxima producción de energía es fundamental prever la disposición de filas de una instalación para evitar que se proyecten sombras sobre los módulos. Estas sombras pueden ser debidas a edificios cercanos, montañas, árboles o incluso las propias filas de módulos pueden llegar a proyectar sombras sobre las filas contiguas. Por eso es necesario calcular la distancia mínima adecuada entre las filas de módulos. La distancia mínima (d) depende tanto de la altitud del lugar (Φ) como de la altura (h) entre la parte más alta de una fila y la más baja de la otra y se calcula a través de esta expresión:

$$d = \frac{h}{\tan(61 - \Phi)}$$

1.5. Análisis de estructuras para instalaciones fotovoltaicas.

El desarrollo de este apartado del proyecto se va a centrar en las estructuras de suelo, aquellas que se encuentran en parques o huertos fotovoltaicos, ya que es lo que concierne al proyecto.

1.5.1. Materiales normalizados

Las estructuras que soportan los módulos solares pueden estar fabricadas de distintos materiales, los más empleados en este tipo de estructuras son el aluminio, el acero al carbono y el acero inoxidable.

- **Aluminio:** es un material que se emplea en estructuras de pequeño y mediano tamaño. Por el pequeño peso que tienen comparado con el hierro, la resistencia que presentan

ante las cargas, su comportamiento ante la oxidación y durabilidad las aleaciones de aluminio son un material bastante empleado en la construcción de estructuras.

- **Acero al carbono:** material fabricado principalmente de hierro con un porcentaje de carbono inferior al 2% y pequeños porcentajes de otros elementos. Este material es ampliamente utilizado en estructuras fotovoltaicas que van a ser sometidas a grandes esfuerzos ya sea por el gran peso de los paneles o por condiciones climáticas extremas como fuertes vientos.
- **Acero inoxidable:** se tratan de aquellos aceros con un porcentaje elevado de cromo, mínimo del 10,5%, y otros elementos como níquel y carbono. Gracias al elevado porcentaje de cromo que posee este acero su comportamiento frente a la corrosión mejora, lo que lo hace un material óptimo para ambientes agresivos como las zonas próximas a la costa.

1.5.2. Tipos de estructuras

Las estructuras soporte para paneles solares se dividen en función de su nivel de regulación y se distinguen los siguientes tipos:

- **Estructuras fijas no ajustables:** son aquellas estructuras que tienen la misma posición durante todo el año, es decir, su inclinación no puede variarse. Para conseguir la máxima radiación solar se debe estudiar la orientación y la inclinación de los módulos solares. Debido a su simplicidad es la opción más económica.
- **Estructuras fijas ajustables:** son aquellas estructuras que permiten variar el ángulo de inclinación a lo largo del año. Suelen poseer dos o más posiciones de regulación y el ajuste de inclinación se realiza de forma manual, por lo que el acceso a este tipo de estructuras debe de ser sencillo. Pese a que su coste es algo más elevado respecto a las estructuras fijas no ajustables con este tipo se consigue un mayor rendimiento.

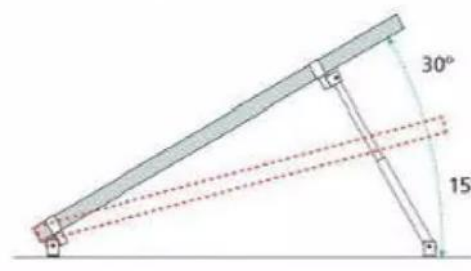


Figura 9. Esquema de estructura fija ajustable.

- **Estructuras móviles:** son aquellas que siguen la trayectoria del sol para recibir los rayos solares perpendicularmente durante todo momento. Dicho seguimiento se consigue mediante uno o dos ejes rotación, según el tipo de estructura móvil. Son las estructuras más costosas y complejas, pero resultan rentables en grandes instalaciones fotovoltaicas al aprovechar al máximo la radiación solar. Dentro de las estructuras móviles existen dos tipos según el tipo de seguimiento solar.
 - Seguimiento en un eje: la estructura sigue la trayectoria del sol mediante un solo eje. Se puede tratar de un seguimiento en acimut donde la inclinación del panel es fija y la estructura gira de este a oeste en torno a un eje vertical o bien, seguimiento de la altura solar o cenital donde los módulos se encuentran sobre un eje horizontal orientado de norte a sur que se mueve de este a u oeste para recibir la radiación de manera perpendicular.

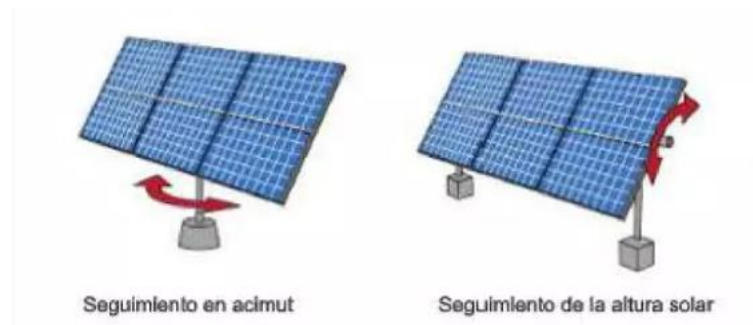


Figura 10. Seguimiento en un eje

- Seguimiento en dos ejes: son los sistemas que combinan el seguimiento en acimut y cenital descritos anteriormente de manera simultánea. Mediante un eje vertical se consigue el seguimiento en acimut mientras que gracias a un eje vertical se consigue el seguimiento cenital.



Figura 11. Seguimiento en dos ejes

La función de las estructuras móviles es el seguimiento de la trayectoria del sol para aprovechar la energía de manera más eficiente que las estructuras fijas. Este seguimiento puede ser producido por clases de métodos:

- **Seguimiento pasivo:** es aquel que consigue mover la estructura sin necesidad de consumir parte de la energía eléctrica que produce la propia instalación. El principio emplea el calor procedente del sol para distribuir el peso de la estructura y variar la trayectoria. Estos tipos de seguidores pasivos constan de dos tubos depósitos que se colocan a los lados este-oeste de la estructura y van rellenos de un líquido de bajo punto de ebullición, el cual suele ser freón y una serie de placas metálicas que distribuyen el calor procedente del sol. El líquido al estar expuesto a la luz solar aumenta su temperatura y entra en estado de ebullición, al amanecer el lado expuesto se calienta mientras el otro se mantiene frío y, por lo tanto, en estado líquido. Los gases producidos durante la ebullición se dirigen a una zona más fría donde se condensan y aumentan su peso, fenómeno que hace mover la estructura. A medida que transcurre el día el sol va calentando las placas metálicas que regulan la circulación de los gases y el movimiento. Una desventaja de estos sistemas es que en climas fríos el inicio del seguimiento se puede alargar demasiado.
- **Seguimiento activo:** es el que emplea distintos dispositivos que consumen energía eléctrica. Al consumir energía eléctrica se debe hacer un estudio de la rentabilidad de este tipo de seguimiento para la instalación. Por lo general, en grandes instalaciones fotovoltaicas como los huertos solares, es una alternativa muy recomendable ya que tanto el coste como el consumo eléctrico de estos dispositivos es infinitamente menor a la cantidad de energía generada.

1.6. Normativa

- **CTE DB-SE.** Seguridad estructural
- **CTE DB-SE-A.** Seguridad estructural: Acero
- **UNE-EN 1090:2.** Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero.
- **UNE-EN 1991-1-4:2018.** Eurocódigo 1: acciones en estructuras. Parte 1-4 acciones generales, acciones de viento.

1.7. Justificación y descripción de la solución adoptada

De la necesidad de seguir contribuyendo a la transición energética del país hacia fuentes de energía renovables y la protección del terreno fértil para su uso agrario y/o ganadero surge la idea de este trabajo de fin de grado, una propuesta sostenible al modelo actual de producción de energía solar fotovoltaica en los grandes huertos solares.

El trabajo se basa en el diseño y cálculo estructural de una estructura fotovoltaica para parques solares, pero con la peculiaridad de que está se encuentra en altura, es decir, las placas solares fotovoltaicas se hayan elevadas del terreno dejando espacio suficiente para las labores agrícolas del terreno. De esta forma se consigue emplear el terreno para ambas funciones, la producción de electricidad y la producción agraria o pasto. Se trata de una idea innovadora en el sector, ya que no existe nada parecido en la actualidad. Esto permite a los arrendatarios de terreno, normalmente agricultores que encuentran mayor beneficio en el alquiler de sus parcelas que en la explotación agrícola, poder obtener un sobresueldo gracias a la producción de energía solar fotovoltaica sin dejar de lado la producción de alimentos. Se trata de una apuesta sostenible que busca complacer tanto a las asociaciones agrarias como a las grandes empresas de energía y el “Pacto Verde” de la Unión Europea.

La metodología que se ha seguido para el diseño de la estructura consiste en el análisis de los distintos tipos de estructuras ya expuestas sobre una serie de parámetros importantes a la hora de llevar a cabo el proyecto. En la siguiente tabla se van a comparar los parámetros para poder escoger la solución óptima.

	Fija	Fija ajustable	Móvil
Productividad	Es el tipo con menos productividad energética de las tres.	Con mayor productividad que la fija en los meses de invierno donde de forma manual se cambia la inclinación de la instalación.	La producción de energía aumenta entre un 15%-25% en las estructuras de un solo eje, dependiendo del eje sobre el que rote (acimut o cenital) y hasta un 35% en las de seguimiento de dos ejes.
Emplazamiento	Si el coste del terreno es bajo se recomienda emplear este tipo de estructuras en la instalación fotovoltaica.	Se emplean en terrenos cuyo coste es medio.	Este tipo de estructuras es recomendable emplearlas en terrenos con coste elevado para poder rentabilizar al máximo la instalación. Además, las estructuras móviles son las que se suelen utilizar en grandes parques fotovoltaicos.
Coste	Debido a su sencillez son las de menor coste.	Con similar a las estructuras fijas, pero bastante menor que las estructuras móviles.	Para las estructuras de seguimiento en un eje el coste es alrededor de un 5% mayor respecto a las estructuras fijas, y entorno a un 10% más para seguimiento con dos ejes.
Mantenimiento y reparaciones	Como con el coste, debido a la sencillez el mantenimiento es menos frecuentes y su coste menor.	Es similar a las estructuras fijas.	Los sistemas de seguimiento encarecen las reparaciones y requieren de un mantenimiento más preventivo.
Potencia	Se emplean para instalaciones con una potencia $P < 20\text{kW}$	Para potencias $20\text{kW} < P < 100\text{kW}$ se recomienda este tipo de estructuras.	Si $100\text{ kW} < P < 500\text{kW}$ se recomienda estructuras móviles de un eje y para $P > 500\text{kW}$ seguimiento de dos ejes.
Radiación solar	Nivel de radiación baja	Nivel de radiación baja.	Niveles de radiación media y alta.

Tabla 3. Comparativa entre los distintos tipos de estructuras solares fotovoltaicas.

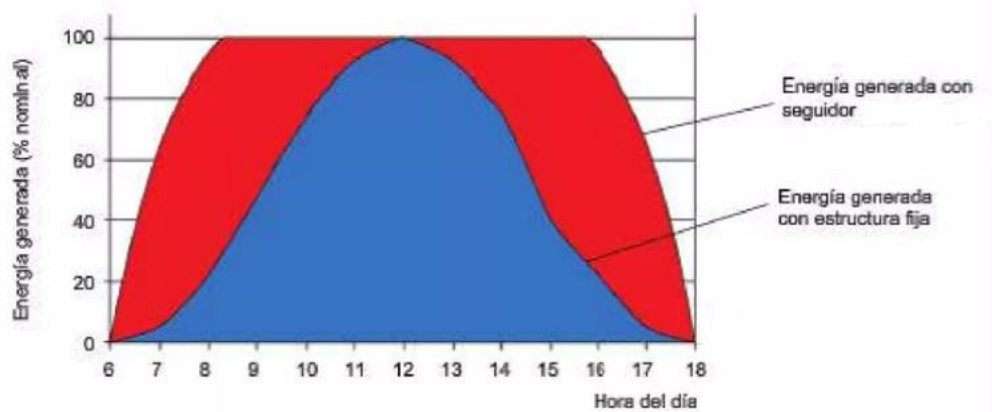


Figura 12. Comparación energía generada entre estructuras fijas y móviles

El diseño de la estructura de este trabajo de fin de grado pretende emplearse en terrenos que también se utilizan para la producción agrícola y ganadera por lo que se trata de instalaciones grandes, que manejan grandes potencias y el coste del emplazamiento es elevado. Por todo esto y lo expuesto en la tabla se ha diseñado una estructura móvil de seguimiento en un eje que se situará en altura por las razones ya explicadas. Se ha escogido la estructura móvil frente a la fija ya que como se puede observar en la Figura 12, este tipo de estructuras genera más energía y permitirá amortizar la instalación en un periodo de tiempo menor.

El emplazamiento de este proyecto se ha escogido en el polígono de la Serratilla, Requena, Valencia. Se trata de una parcela de 11.000 m^2 de superficie donde no existen árboles o estructuras alrededor que puedan proyectar sombras sobre las placas solares, consiguiendo la mayor eficiencia en la producción de energía.

La estructura está formada por tres pilares que se encuentran a una distancia suficiente que permita la instalación de seis paneles solares entre los pilares y en uno de los extremos un voladizo donde se instalarán dos paneles más. La unión entre los pilares y el eje se realiza a través de una rueda que permite el giro del eje y se encuentra fijada al pilar, las dimensiones y detalle de la unión entre las patas de la estructura y el eje viene dada en el apartado de planos. Los paneles solares que se van a emplear en la instalación se encuentran situados a lo largo del eje que une los pilares. Estos paneles se encuentran fijos a un eje rectangular de acero mediante un soporte de fijación que viene detallado en los planos del proyecto. La estructura está diseñada para recorrer un total de 60° , es decir, tiene un desfase de $\pm 30^\circ$ desde la posición de reposo, que es la horizontal al suelo. La estructura se ha diseñado con una altura de los pilares de 4,5m, por lo que en posición $\pm 30^\circ$ se obtiene una altura libre de 4m, dejando espacio suficiente para la maquinaria que se emplea en las labores agrícolas.

La altura tan elevada de la estructura solar fotovoltaica permite ampliar la variedad de cultivos para los que se puede emplear el terreno, no limita el uso agrícola a verduras que crecen a baja altura, sino que también permite la plantación de árboles frutales. Además, al estar tan elevado las horas de sol que reciben los cultivos son mayores. Las horas donde más sombra se producirán serán las horas en las que el sol está en su punto más alto las placas se encuentran en posición horizontal, previniendo así también de golpes de calor excesivo sobre los cultivos.

Para la fabricación de la estructura y su consiguiente cálculo se ha decidido emplear perfiles de acero S275 cuyo límite elástico es mayor que el del acero S235, el cual se suele emplear en este tipo de estructuras. Los cálculos se van a desarrollar en base a una hipótesis principal en la que se ha escogido un perfil IPE-160 para los pilares y un perfil RCH de 150x150mm con un espesor nominal de base y altura de 4mm para el eje. Las dimensiones y características mecánicas de los perfiles se obtienen del prontuario de perfiles metálicos. Para la tornillería de la estructura se ha decidido emplear tornillería de acero inoxidable.

Los paneles o módulos fotovoltaicos escogidos para para la instalación son paneles de 72 celdas con un peso aproximado de 24kg y un tamaño de 195x100cm. Tienen una potencia nominal de producción de entre 400 y 500 vatios. A efectos de cálculo, las fijaciones donde se encuentran montados los paneles al eje se han representado con el mismo perfil que el eje a fin de poder aplicar las cargas. Durante el desarrollo del siguiente apartado se comprobará si los perfiles escogidos para los pilares y el eje cumplen y son capaces de soportar los esfuerzos a los que la estructura se encuentra sometida.

CTE DB SE-A (aceros en chapas y perfiles)	espesor nominal t (mm)			
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)			Tensión de rotura f_u (N/mm ²)
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$3 \leq t \leq 100$
S235	235	225	215	360
S275	275	265	255	410
S355	355	345	335	470
S450	450	430	410	550

Figura 13. Características mecánicas de los aceros

El desarrollo de este trabajo de fin de grado pretende cumplir con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), una serie de objetivos y metas adoptados por la Organización de las Naciones Unidas en 2015 para la Agenda 2030. Se trata de un plan de actuación global diseñado por la ONU que pretende erradicar problemas mundiales como: el hambre, la desigualdad, la paz y el cambio climático entre otros.



Figura 14. Objetivos de Desarrollo Sostenible – Fuente (ONU)

La finalidad de estos objetivos es proteger el planeta y asegurar la prosperidad logrando un desarrollo mundial sostenible. La construcción de estructuras solares fotovoltaicas influye en alguno de los 17 objetivos:

- **ODS 1. Fin de la pobreza:** La construcción de estructuras como la diseñada en este proyecto genera empleo inclusivo y contribuye al crecimiento económico.
- **ODS 2. Hambre cero:** El diseño de la estructura solar fotovoltaica en altura tiene como objetivo principal el aprovechamiento de los terrenos para la producción de energía y cultivos, por lo al implementar este tipo de infraestructuras se incrementa la producción de alimentos para hacer frente a los problemas de hambre.
- **ODS 3. Salud y bienestar:** La estructura mejora la salud y bienestar de las personas debido al cambio de fuente en la producción de energía, que al ser solar fotovoltaica no produce los gases de efecto invernadero procedentes de los combustibles fósiles tan dañinos para la salud.
- **ODS 7. Energía asequible y no contaminante:** El diseño de la estructura promueve la investigación de las fuentes de energía limpias y renovables y su instalación aumenta la producción de energía abaratando los costes y aumentando el porcentaje de esta procedente de fuentes renovables contribuyendo a la transición ecológica.
- **ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico:** Como en el ODS 1, la construcción de las estructuras genera empleo y contribuye al crecimiento económico.
- **ODS 9. Industria innovación e infraestructura:** La construcción de la estructura significa una inversión en infraestructuras que promueve la industrialización inclusiva y sostenible aportando nuevas tecnologías y permitiendo un uso eficiente de los recursos.

Este diseño supone una solución innovadora y un progreso tecnológico clave ante el desafío medioambiental.

- **ODS 12. Producción y consumo responsables:** La construcción de la estructura contribuye activamente con este objetivo, ya que la estructura se ha diseñado en acero, el cual será tratado contra agentes corrosivos haciendo que el ciclo de vida de las estructuras sea muy elevado.
- **ODS 13. Acción por el clima:** Con la construcción de nuestra estructura solar fotovoltaica se pretende reducir los niveles de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero que provocan el aumento de la temperatura año tras año cumpliendo con lo estipulado en el Acuerdo de París en el 2015.

1.8. Cálculos y dimensionamiento

A continuación, se van a definir las acciones a las que está sometida la estructura solar fotovoltaica del trabajo para posteriormente calcular los esfuerzos mediante el programa de cálculo estructural SAP 2000 y poder dimensionar los pilares y el eje por condición de resistencia.

Cargas permanentes (CP)

Son las acciones derivadas del peso propio de los paneles y el peso de las fijaciones. La norma UNE-EN-62215 establece que la suma del peso de los paneles y las fijaciones provoca una acción de $0,2 \frac{kN}{m^2}$.

La acción del peso viene representada sobre la estructura de la siguiente forma donde, $CP = 0,2 \frac{kN}{m^2}$.

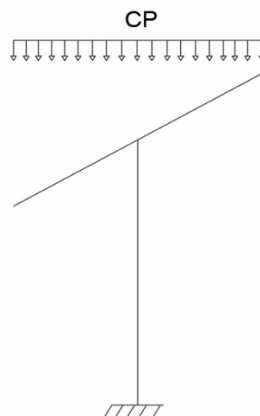


Figura 15. Representación de la aplicación de la carga permanente (CP) sobre la estructura.

Nieve



Figura 16. Mapa de zonas de clima invernal – Fuente (CTE DB-SE-AE)

Altitud (m)	Zona de clima invernal						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
200	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
400	0,6	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
500	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2
600	0,9	0,9	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2
700	1,0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2
800	1,2	1,1	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2
900	1,4	1,3	0,6	1,0	0,8	0,9	0,2
1.000	1,7	1,5	0,7	1,2	0,9	1,2	0,2
1.200	2,3	2,0	1,1	1,9	1,3	2,0	0,2
1.400	3,2	2,6	1,7	3,0	1,8	3,3	0,2
1.600	4,3	3,5	2,6	4,6	2,5	5,5	0,2
1.800	-	4,6	4,0	-	-	9,3	0,2
2.200	-	8,0	-	-	-	-	-

Tabla 4. Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal (kN/m^2).

El emplazamiento escogido para la instalación se encuentra en Requena. De la Figura 16 se obtiene la zona de clima, en el caso de Requena se trata de la Zona 5 y con una altitud de 692m se obtiene una sobrecarga de nieve de $N = 0,6 \frac{kN}{m^2}$.

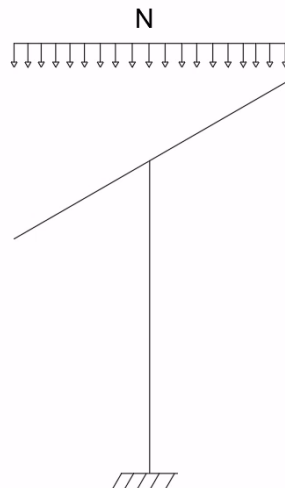


Figura 17. Representación de la aplicación de la nieve (N) sobre la estructura.

Viento

La acción del viento sobre la estructura viene expresada de la siguiente forma:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \text{ donde,}$$

q_b es la presión dinámica, c_e el coeficiente de exposición y c_p el coeficiente eólico.

El valor de la presión dinámica, q_b , para cada localidad se obtiene del mapa de la siguiente figura. Los valores son $0,42 \text{ kN/m}^2$, $0,45 \text{ kN/m}^2$ y $0,52 \text{ kN/m}^2$ respectivamente para las zonas A, B y C del mapa.

En el caso de este trabajo de fin de grado Requena pertenece a la zona A por lo que, $q_b = 0,42 \text{ kN/m}^2$.

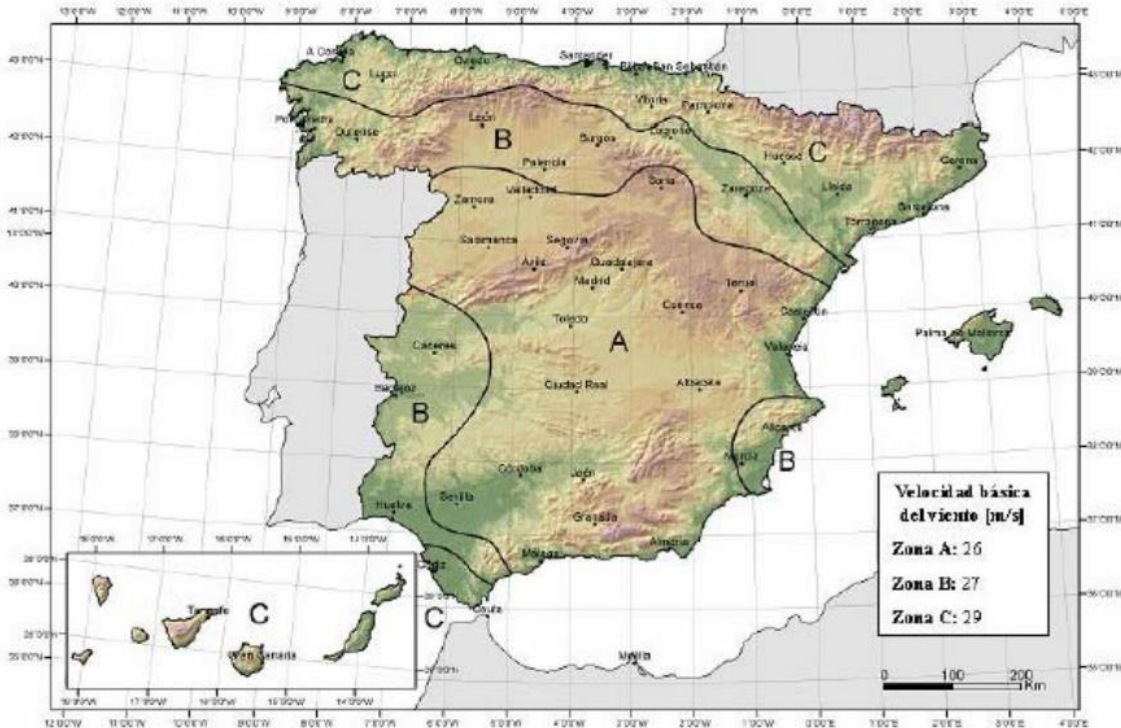


Figura 18. Mapa zonas del valor básico de la velocidad del viento – Fuente (CTE DB-SE-AE)

El coeficiente de exposición c_e , tiene en cuenta las turbulencias que se generan debido a la topografía y al relieve del terreno. Los valores se extraen de una tabla teniendo en cuenta la altura de la estructura y el tipo de entorno en el que se encuentra la misma.

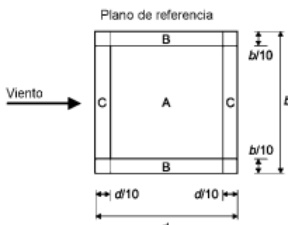
Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia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

Tabla 5. Valores del coeficiente de exposición c_e

De la tabla, teniendo que el tipo de entorno es III y la altura del punto considerado 6m, se obtiene un coeficiente de exposición $c_e = 2,0$.

El coeficiente eólico global c_p , se obtiene de la siguiente tabla teniendo en cuenta el ángulo de inclinación de la estructura. Para el caso de este proyecto, se ha definido que la estructura es de tipo móvil con un seguimiento de $\pm 30^\circ$, por lo que el ángulo máximo de la estructura es 30° . De la tabla se obtiene un coeficiente global de presión y de succión dependiendo del signo, el cual indica el sentido de aplicación.

Tabla 7.6 - Valores de $c_{p,net}$ y c_f para marquesinas a un agua

			Coeficientes de presión neta $c_{p,net}$		
					
Ángulo de la cubierta α	Bloqueo ϕ	Coeficiente global de fuerza c_f	Zona A	Zona B	Zona C
0°	Valor máximo para cualquier ϕ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Valor mínimo para $\phi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Valor mínimo para $\phi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Valor máximo para cualquier ϕ	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Valor mínimo para $\phi = 0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Valor mínimo para $\phi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Valor máximo para cualquier ϕ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Valor mínimo para $\phi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Valor mínimo para $\phi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,6	- 2,7
15°	Valor máximo para cualquier ϕ	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Valor mínimo para $\phi = 0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Valor mínimo para $\phi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Valor máximo para cualquier ϕ	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Valor mínimo para $\phi = 0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Valor mínimo para $\phi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Valor máximo para cualquier ϕ	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Valor mínimo para $\phi = 0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Valor mínimo para $\phi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Valor máximo para cualquier ϕ	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Valor mínimo para $\phi = 0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Valor mínimo para $\phi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7

NOTA Los valores + indican una acción neta en sentido descendente.
Los valores - indican una acción neta en sentido ascendente.

Tabla 6. Valores de $c_{p,net}$ y c_f para marquesinas a un agua.

Coeficiente global de presión \downarrow : 1,2

Coeficiente global de succión \uparrow : 1,8

Una vez obtenidos todos los coeficientes necesarios para el cálculo de la acción del viento sobre la estructura se obtiene dos acciones respectivamente:

- Viento Presión, $VP = 0,42 \cdot 2 \cdot 1,2 = 1,008 \text{ kN/m}^2$
- Viento Succión, $VS = 0,42 \cdot 2 \cdot 1,8 = 1,512 \text{ kN/m}^2$

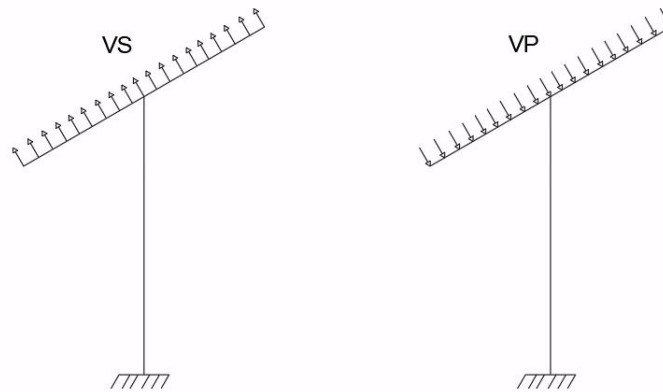


Figura 19. Representación de la aplicación del viento succión (VS) y viento presión (VP) sobre la estructura.

Una vez se han definido las acciones y su aplicación sobre la estructura se van a definir las combinaciones de las acciones para poder calcular los esfuerzos N_x , V_z y M_y más desfavorables a la estructura.

A la combinación también se le conoce como estado límite último (ELU), y viene definido por la siguiente fórmula:

$$ELU_n = \gamma_G \cdot CP + \gamma_{Q,i} \cdot Q_i + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \varphi_{0,i} \cdot Q_i \text{ donde,}$$

$$\gamma_G \begin{cases} \text{Desfavorable} - 1,35 \\ \text{Favorable} - 1 \end{cases}, \gamma_Q \begin{cases} \text{Desfavorable} - 1,5 \\ \text{Favorable} - 1 \end{cases}, \varphi_0 \begin{cases} \text{Nieve} - 0,5 \\ \text{Viento} - 0,6 \end{cases} \text{ y } Q \text{ la acción variable (viento o nieve).}$$

Los distintos tipos de combinación de las acciones que actúan en la estructura solar fotovoltaica son las siguientes:

- $ELU_1 = 1,35 \cdot CP$
- $ELU_2 = 1,35 \cdot CP + 1,5 \cdot N$
- $ELU_3 = 1,35 \cdot CP + 1,5 \cdot VP$
- $ELU_4 = 1,0 \cdot CP + 1,5 \cdot VS$
- $ELU_5 = 1,0 \cdot CP + 1 \cdot N + 1,5 \cdot 0,6 \cdot VS$
- $ELU_6 = 1,0 \cdot CP + 1 \cdot N + 1,5 \cdot 0,6 \cdot VP$
- $ELU_7 = 1,35 \cdot CP + 1,5 \cdot VP + 1,5 \cdot 0,5 \cdot N$
- $ELU_8 = 1 \cdot CP + 1,5 \cdot VP + 1,0 \cdot 0,5 \cdot N$

Una vez se han definido las magnitudes de las acciones y las diferentes combinaciones posibles se ha modelado la estructura fotovoltaica en el programa de cálculo estructural SAP2000 y

seguidamente se han calculado los esfuerzos resultantes en los pilares y el eje para posteriormente dimensionarlos. El programa SAP2000 proporciona unas tablas con los resultados de los esfuerzos.

Pilares

De la tabla de esfuerzos se ha ordenado el axil N_x de mayor a menor para ver los esfuerzos a tracción cogiendo la combinación donde el axil y el momento flector son mayores para comprobar si la hipótesis inicial de cálculo, IPE-160, cumple. Los resultados que se han obtenido son los siguientes.

OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
ELU 4	Combination	23,174342945	-11,49032093	0	0	0	-28,59076425	3-1	0
ELU 4	Combination	17,976831228	-10,32566947	0	0	0	-26,85755046	6-1	0
ELU 4	Combination	8,1482511684	-6,172697688	0	0	0	-20,6806875	59-1	0
ELU 6	Combination	-27,48468606	8,1303406826	0	0	0	-16,48952131	3-1	4,5000320168
ELU 3	Combination	-21,08403338	7,9319603184	0	0	0	-16,03331081	3-1	4,5000320168
ELU 6	Combination	-23,36563799	7,2889023348	0	0	0	-13,95637552	6-1	4,5000320168
ELU 5	Combination	1,6932442182	-5,415074852	0	0	0	-13,56851720	3-1	0
ELU 3	Combination	-18,34985691	6,9966026733	0	0	0	-13,21640846	6-1	4,5000320168
ELU 5	Combination	0,7646179095	-4,74587514	0	0	0	-12,57386834	6-1	0
ELU 5	Combination	-0,168670140	-3,917743131	0	0	0	-11,33892221	59-1	0
ELU 4	Combination	8,1482511684	-6,172697688	0	0	0	-6,792018886	59-1	2,2500160084
ELU 4	Combination	17,976831228	-10,32566947	0	0	0	-3,624628855	6-1	2,2500160084
ELU 3	Combination	-7,862382623	3,6761291304	0	0	0	-3,211361870	59-1	4,5000320168
ELU 4	Combination	23,174342945	-11,49032093	0	0	0	-2,737358216	3-1	2,2500160084
ELU 5	Combination	-0,168670140	-3,917743131	0	0	0	-2,523937451	59-1	2,2500160084
ELU 5	Combination	0,7646179095	-4,74587514	0	0	0	-1,895573302	6-1	2,2500160084
ELU 2	Combination	-7,087232813	-1,377703793	0	0	0	-1,633474067	59-1	0
ELU 2	Combination	-14,22950564	0,6590065748	0	0	0	-1,575043393	6-1	4,5000320168
ELU 6	Combination	-10,60463055	3,1320392688	0	0	0	-1,429380043	59-1	4,5000320168

Tabla 7. Resultados de los esfuerzos a los que el pilar está sometido, axil a tracción– Fuente (SAP200, elaboración propia)

De la tabla podemos decir que la combinación ELU4 es la que más esfuerzos tracción somete a la estructura.

- $N_x = 23,17 \text{ kN}$
- $V_z = 11,49 \text{ kN}$
- $M_y = 28,59 \text{ kNm}$

Para comprobar si el perfil cumple se emplea la siguiente expresión:

$$\sigma_{SVM} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_{adm}$$

$$\sigma = \frac{N_x}{A} + \frac{M_y}{W_y} - \frac{M_z}{W_z} \rightarrow \text{Ley de Navier}$$

$$\tau \approx \frac{V_z}{A_{vz}}$$

$$\sigma_{adm} = f_{yd}$$

Por lo tanto, sustituyendo todos los términos la ecuación resultante es:

$$\sigma_{SVM} = \sqrt{\left(\frac{N_x}{A} + \frac{M_y}{W_y}\right)^2 + 3\left(\frac{V_z}{A_{vz}}\right)^2} \leq f_{yd} \text{ donde,}$$

- N_x : axil
- A : área
- M_y : momento flector, y
- W_y : módulo resistente, y
- V_z : cortante, z
- A_{vz} : área cortante

La aplicación de la ecuación por condición de resistencia se ha llevado a cabo a través de una hoja Excel y los resultados para la comprobación del IPE-160 a tracción se muestran en la Tabla 8.

DATOS ENTRADA							
ESFUERZOS	AXIL	Cortante Vz	Cortante Vy	Torsión, Mx	Flector, Z	Flector, Y	
kN, m	23	11	0	0	0	28,5	
LONGITUDES	LONGITUD PANDEO, Y		LONGITUD PANDEO, Z		LONGITUD PANDEO FLEXION		
PANDEO, m	1		1		1		
	Valor coef. Imperfección Pandeo, Y	Valor coef. imperfección a Pandeo, Z	Valor imperfección Pandeo LAT	Coef C1 pandeo LAT			
	b	c	b	c	Carga puntual		
	0,34		0,49		0,34		1,36
Material	Tipo de acero	f_{yk} Manual	f_{yk} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	Epsilon	Clase a Compresión	Clase a Flexión
Clase Sección	S275	275	275	262	0,92	0	0
SECCION	FALSO		PESO Kg/m	Area	Inercia Y, Z	Módulo Resis Y,Z	Radio giro Y, Z
IPE	Base, b	120	15,80	2010,00	8693000	108700	65,80
PERFIL mm	Altura, h	120	Area Cortante	966,00	683100	16660	18,40
IPE 160	Espesor ala	3	Inercia Torsión	36000			
	Espesor alma	3	Módulo Torsión	4865			
RESULTADOS TENSIONES NORMALES Y TANGENCIALES							
31/05/2023	TENSIONES NORMALES				TENSIONES TANGENCIALES		
Tensiones, MPa	Axil	Pandeo	Flector Y	Flector Z	Cortantes		Torsión
	11,4	14,8	262,2	0,0	11,4		0,0
	TENSIONES NORMALES TOTALES		TENSIONES TANGENCIALES TOTALES				
	Sin Pandeo	Con Pandeo			SVM, sin Pandeo	SVM, con Pandeo	SVM, Inestabilidad
	273,6	277,0	11,4		274,3	277,7	300,9
Unidades	Resistencia a Tracc	Coef. Reductor P	Carga Crítica, kN	Rest Flexión, Y	ResitFlexión, Z	Cof. Reductor Lat	Momento Crítico
kN, m	526,4	0,771	526,4	28,5	4,4	0,919	28,5

Tabla 8. Resultados de las tensiones SVM para IPE-160 a tracción.

Para el caso a tracción no existe coeficiente de pandeo, como se puede observar en la tabla el resultado de la tensión SVM sin pandeo es de 274,3 MPa. De la ecuación expuesta antes se puede concluir que el perfil IPE-160 no cumple para los esfuerzos, ya que 274,3 MPa > 262 MPa. El valor de la tensión obtenida se encuentra muy cercano a la condición definida para el cumplimiento del perfil, antes de probar con el siguiente se procede a comprobar el mismo IPE sometido a los esfuerzos de compresión.

Ordenando el axil N_x de menor a mayor obtenemos los esfuerzos a compresión, se puede observar que para este caso la combinación más crítica es la ELU6.

OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
ELU 6	Combination	-27,48468606	8,1303406826	0	0	0	20,097272065	3-1	0
ELU 6	Combination	-27,48468606	8,1303406826	0	0	0	1,8038753756	3-1	2,2500160084
ELU 6	Combination	-27,48468606	8,1303406826	0	0	0	-16,48952131	3-1	4,5000320168
ELU 6	Combination	-23,36563799	7,2889023348	0	0	0	18,843918351	6-1	0
ELU 6	Combination	-23,36563799	7,2889023348	0	0	0	2,4437714141	6-1	2,2500160084
ELU 6	Combination	-23,36563799	7,2889023348	0	0	0	-13,95637552	6-1	4,5000320168
ELU 3	Combination	-21,08403338	7,9319603184	0	0	0	19,660764582	3-1	0
ELU 3	Combination	-21,08403338	7,9319603184	0	0	0	1,8137268878	3-1	2,2500160084
ELU 3	Combination	-21,08403338	7,9319603184	0	0	0	-16,03331081	3-1	4,5000320168
ELU 3	Combination	-18,34985691	6,9966026733	0	0	0	18,268527583	6-1	0
ELU 3	Combination	-18,34985691	6,9966026733	0	0	0	2,5260595633	6-1	2,2500160084
ELU 3	Combination	-18,34985691	6,9966026733	0	0	0	-13,21640846	6-1	4,5000320168
ELU 2	Combination	-16,51726254	0,5759785785	0	0	0	1,2688856720	3-1	0
ELU 2	Combination	-16,51726254	0,5759785785	0	0	0	-0,027075350	3-1	2,2500160084
ELU 2	Combination	-16,51726254	0,5759785785	0	0	0	-1,323036372	3-1	4,5000320168
ELU 2	Combination	-14,22950564	0,6590065748	0	0	0	1,3905072930	6-1	0
ELU 2	Combination	-14,22950564	0,6590065748	0	0	0	-0,09226805	6-1	2,2500160084
ELU 2	Combination	-14,22950564	0,6590065748	0	0	0	-1,575043393	6-1	4,5000320168
ELU 6	Combination	-10,60463055	3,1320392688	0	0	0	12,664896944	59-1	0

Tabla 9. Resultados de los esfuerzos a los que el pilar está sometido, axil a compresión– Fuente (SAP200, elaboración propia)

- $N_x = 27,48 \text{ kN}$
- $V_z = 8,13 \text{ kN}$
- $M_y = 20,1 \text{ kNm}$

Para comprobar el perfil IPE-160 a compresión se emplean las mismas expresiones para el cálculo de la tensión por condición de resistencia expuestas anteriormente.

DATOS ENTRADA							
ESFUERZOS	AXIL	Cortante Vz	Cortante Vy	Torsión, Mx	Flector, Z	Flector, Y	
kN, m	27	8	0	0	0	20	
LONGITUDES	LONGITUD PANDEO, Y		LONGITUD PANDEO, Z		LONGITUD PANDEO FLEXION		
PANDEO, m	9		9		1		
	Valor coef. Imperfección Pandeo, Y	Valor coef. imperfección a Pandeo, Z		Valor imperfección Pandeo LAT		Coef C1 pandeo LAT	
	b	c		b		Carga puntual	
	0,34	0,49		0,34		1,36	
Material	Tipo de acero	f_{yk} Manual	f_{yk} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	Epsilon	Clase a Compresión	Clase a Flexión
Clase Sección	S275	275	275	262	0,92	0	0
SECCION	FALSO		PESO Kg/m	Area	Inercia Y, Z	Módulo Resis Y,Z	Radio giro Y, Z
IPE	Base, b	120	15,80	2010,00	8693000	108700	65,80
PERFIL mm	Altura, h	120	Area Cortante	966,00	683100	16660	18,40
IPE 160	Espesor ala	3	Inercia Torsión	36000			
	Espesor alma	3	Módulo Torsión	4865			
RESULTADOS TENSIONES NORMALES Y TANGENCIALES							
31/05/2023	TENSIONES NORMALES				TENSIONES TANGENCIALES		
Tensiones, MPa	Axil	Pandeo	Flector Y	Flector Z	Cortantes		Torsión
	13,4	461,6	184,0	0,0	8,3		0,0
	TENSIONES NORMALES TOTALES		TENSIONES TANGENCIALES TOTALES				
	Sin Pandeo	Con Pandeo			SVM, sin Pandeo	SVM, con Pandeo	SVM, Inestabilidad
	197,4	645,6	8,3		197,9	645,7	662,0
Unidades	Resistencia a Tracc	Coef. Reductor P	Carga Crítica, kN	Rest Flexión, Y	ResitFlexión, Z	Cof. Reductor Lat	Momento Crítico
kN, m	526,4	0,029	17,5	28,5	4,4	0,919	28,5

Tabla 10. Resultados de las tensiones SVM para IPE-160 a compresión.

En el caso a compresión sí que existe pandeo, por lo que es necesario utilizar los coeficientes de pandeo. La tensión obtenida del SVM con pandeo es de 645,7 MPa como se puede observar en la Tabla 10. Este valor es mucho mayor que el f_{yd} , siendo 262 MPa. El perfil IPE-160 tampoco cumple para los esfuerzos a compresión.

Comparando los resultados obtenidos a tracción y compresión se observa que los esfuerzos a compresión a los que la estructura se ve sometida provocan tensiones mucho más elevadas, por lo tanto, se puede afirmar que el caso a compresión es más restrictivo. Teniendo esto último en cuenta se va a comprobar un perfil HE-120 B a compresión, dado que las alas del perfil HEB son más anchas que las alas del perfil IPE.

Se ha decidido cambiar de un perfil IPE con forma de doble “T”, a un perfil HEB con forma de “H”, ya que debido a la altura de la estructura la sección necesaria para soportar las cargas que se producen es mayor.

Los esfuerzos a compresión se extraen de la Tabla 9 y son los mismos que los empleados para el IPE-160.

- $N_x = 27,48 \text{ kN}$
- $V_z = 8,13 \text{ kN}$
- $M_y = 20,1 \text{ kNm}$

Introduciendo los esfuerzos a compresión y los datos del perfil HE- 120 B se han obtenido los siguientes resultados.

DATOS ENTRADA							
ESFUERZOS	AXIL	Cortante Vz	Cortante Vy	Torsión, Mx	Flector, Z	Flector, Y	
kN, m	27	8	0	0	0	20	
LONGITUDES	LONGITUD PANDEO, Y		LONGITUD PANDEO, Z		LONGITUD PANDEO FLEXION		
PANDEO, m	9		9		1		
Valor coef. Imperfección Pandeo, Y		Valor coef. imperfección a Pandeo, Z		Valor imperfección Pandeo LAT		Coef C1 pandeo LAT	
b	0,34	c	0,49	b	0,34	Carga puntual	1,36
Material	Tipo de acero	f_{yk} Manual	f_{yk} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)	Epsilon	Clase a Compresión	Clase a Flexión
Clase Sección	S275	275	275	262	0,92	0	0
SECCION	otras secciones		PESO Kg/m	Area	Inercia Y, Z	Módulo Resis Y,Z	Radio giro Y, Z
HE		120	26,70	3400,00	8644000	144100	50,40
PERFIL mm		120	Area Cortante	1096,00	3175000	52920	30,60
HE 120 B		3	Inercia Torsión	138400			
		3	Módulo Torsión	1258			
RESULTADOS TENSIONES NORMALES Y TANGENCIALES							
31/05/2023	TENSIONES NORMALES				TENSIONES TANGENCIALES		
Tensiones, MPa	Axil	Pandeo	Flector Y	Flector Z	Cortantes		Torsión
	7,9	104,8	138,8	0,0	7,3		0,0
	TENSIONES NORMALES TOTALES		TENSIONES TANGENCIALES TOTALES				
	Sin Pandeo	Con Pandeo			SVM, sin Pandeo	SVM, con Pandeo	SVM, Inestabilidad
	146,7	243,6		7,3	147,3	244,0	250,2
Unidades	Resistencia a Tracc	Coef. Reductor P	Carga Crítica, kN	Rest Flexión, Y	ResitFlexión, Z	Cof. Reductor Lat	Momento Crítico
kN, m	890,5	0,076	81,2	37,7	13,9	0,957	37,7

Tabla 11. Resultados de las tensiones SVM para HE-120B a compresión.

La condición para el cumplimiento del perfil por condición de resistencia es $\sigma_{SVM} \leq \sigma_{adm}$, observando los resultados obtenidos $244 \text{ MPa} \leq 262 \text{ MPa}$, por lo tanto, el perfil HE-120 B cumple y es el escogido para los pilares de la estructura.

Eje

Para el dimensionamiento de los ejes se sigue la misma metodología y procedimiento que el aplicado para el dimensionamiento de los pilares. Del programa de cálculo estructural SAP2000 se extrae la tabla de los esfuerzos a los que el eje se encuentra sometido. Igual que en los pilares, se han tenido en cuenta las diferentes combinaciones de fuerzas que actúan sobre el eje. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.

Puesto que el momento flector y es el término que más contribuye en la ecuación para el cálculo de la tensión por condición de resistencia se han ordenado los resultados de M_y de mayor a menor, siendo la combinación ELU4 la más crítica para el eje.

OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
ELU 4	Combination	4,8578431057	-11,56304798	0	0	0	22,41047269	39-1	1
ELU 4	Combination	5,3564844300	-9,887261009	0	0	0	20,030221738	23-1	1
ELU 4	Combination	4,8578431057	-11,56304798	0	0	0	16,628948699	39-1	0,5
ELU 4	Combination	5,3564844300	-9,887261009	0	0	0	15,086591233	23-1	0,5
ELU 6	Combination	1,1670149167	-4,136640598	0	0	0	11,521967981	55-1	1
ELU 4	Combination	4,8578431057	-11,56304798	0	0	0	10,847424708	39-1	0
ELU 4	Combination	5,3564844300	-9,887261009	0	0	0	10,142960728	23-1	0
ELU 6	Combination	-0,17462587	0,1610820543	0	0	0	9,8449169981	51-1	0
ELU 3	Combination	1,6992004528	-2,909863242	0	0	0	9,8342650102	55-1	1
ELU 6	Combination	-0,17462587	0,1610820543	0	0	0	9,764375971	51-1	0,5
ELU 6	Combination	-0,17462587	0,1610820543	0	0	0	9,6838349438	51-1	1
ELU 6	Combination	1,1670149167	-4,136640598	0	0	0	9,4536476820	55-1	0,5
ELU 6	Combination	2,5086557032	-8,434363251	0	0	0	9,0623783659	58-1	1
ELU 3	Combination	3,0408412393	-6,196883169	0	0	0	8,6014527509	58-1	1
ELU 3	Combination	1,6992004528	-2,909863242	0	0	0	8,3793333890	55-1	0,5
ELU 4	Combination	2,8453819259	-7,985339218	0	0	0	8,3318482331	43-1	1
ELU 3	Combination	0,3575596663	0,3771566845	0	0	0	8,1572140271	51-1	0
ELU 6	Combination	-1,516266656	4,4588047071	0	0	0	8,0067839607	47-1	0
ELU 3	Combination	0,3575596663	0,3771566845	0	0	0	7,9686356848	51-1	0,5

Tabla 12. Resultados de los esfuerzos a los que el eje se encuentra sometido – Fuente (SAP2000, elaboración propia)

- $N_x = 4,86 \text{ kN}$
- $V_z = 11,56 \text{ kN}$
- $M_y = 22,41 \text{ kNm}$

Para el dimensionamiento del eje también se ha de tener en cuenta la tensión tangencial por torsión que sufre un eje de sección rectangular que viene provocada por el momento torsor $M_T = 15 \text{ kNm}$.

DATOS ENTRADA							
ESFUERZOS	AXIL	Cortante Vz	Cortante Vy	Torsión, Mx	Flector, Z	Flector, Y	
kN, m	5	11	0	15	0	22	
LONGITUDES	LONGITUD PANDEO, Y		LONGITUD PANDEO, Z		LONGITUD PANDEO FLEXION		
PANDEO, m	1		1		1		
Valor coef. Imperfección Pandeo, Y	Valor coef. imperfección a Pandeo, Z		Valor imperfección Pandeo LAT		Coef C1 pandeo LAT		
b	0,34		c		0,34		Carga puntual
					1,36		
Material	Tipo de acero	f _{yk} Manual	f _{yk} (Mpa)	f _{yd} (Mpa)	Epsilon	Clase a Compresión	Clase a Flexión
Clase Sección	S275	275	275	262	0,92	2	1
SECCION	Seccion Rectangular		PESO Kg/m	Area	Inercia Y, Z	Módulo Resis Y,Z	Radio giro Y, Z
RCH	Base, b	150	18,34	2336,00	8305259	110737	59,63
PERFIL mm	Altura, h	150	Area Cortante	1200,00	8305259	110737	59,63
RHC Entrada	Espesor base	4	Inercia Torsión	12448544			
	Espesor altura	4	Módulo Torsión	170528			
RESULTADOS TENSIONES NORMALES Y TANGENCIALES							
31/05/2023	TENSIONES NORMALES				TENSIONES TANGENCIALES		
Tensiones, MPa	Axil	Pandeo	Flector Y	Flector Z	Cortantes		Torsión
	2,1	2,1	198,7	0,0	9,2		88,0
	TENSIONES NORMALES TOTALES		TENSIONES TANGENCIALES TOTALES				
	Sin Pandeo	Con Pandeo			SVM, sin Pandeo	SVM, con Pandeo	SVM, Inestabilidad
	200,8	200,8	97,1		262,0	262,0	262,0
Unidades	Resistencia a Tracc	Coef. Reductor P	Carga Crítica, kN	Rest Flexión, Y	ResitFlexión, Z	Cof. Reductor Lat	Momento Crítico
kN, m	611,8	1,000	611,8	29,0	29,0	1,000	29,0

Tabla 13. Resultados de las tensiones SVM para eje RCH de sección cuadrada.

De los resultados obtenidos se puede afirmar que el perfil rectangular RCH de 150x150mm y 4 mm de espesor escogido en la hipótesis de diseño cumple, la tensión SVM obtenida es de 262 MPa que es igual a la tensión admisible del material.

Obtenido el resultado, se escoge el perfil hueco cuadrado RHC de 160x160mm y 5mm de espesor viendo que el perfil anterior a este, de menor tamaño que la hipótesis no cumpliría por resistencia.

Pilotes

En este apartado se va a calcular las cargas que pueden soportar los pilotes enterrados, estos pilotes son los pilares del perfil escogido, HE-120 B que se entierran a una profundidad de 1,5m y hacen de anclaje al suelo para la estructura. La metodología por seguir es la siguiente, se han de calcular las cargas a compresión y tracción que pueden soportar los pilotes y se comparan con los datos obtenidos del pilar en el SAP2000.

La carga a compresión del pilote viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{comp} = \frac{\gamma_f}{\gamma_P} (\chi \cdot Q \cdot A \cdot f_y)$$

- $\gamma_P = 1,5$
- $\gamma_f = 0,9$
- $\chi = 0,8$
- $Q = 1$
- $A = \text{área de sección}$

- $f_y = \text{límite elástico}$

$$P_{comp} = \frac{0,9}{1,5} (0,8 \cdot 1 \cdot 3400 \cdot 275) = 448,8 \text{ kN}$$

El pilote enterrado es capaz de soportar una carga a compresión de 448,8 kN, de la tabla de esfuerzos del programa se conoce que el axil máximo de compresión al que se somete el pilar es de 27,48 kN, por lo tanto, el pilote aguantará los esfuerzos a compresión.

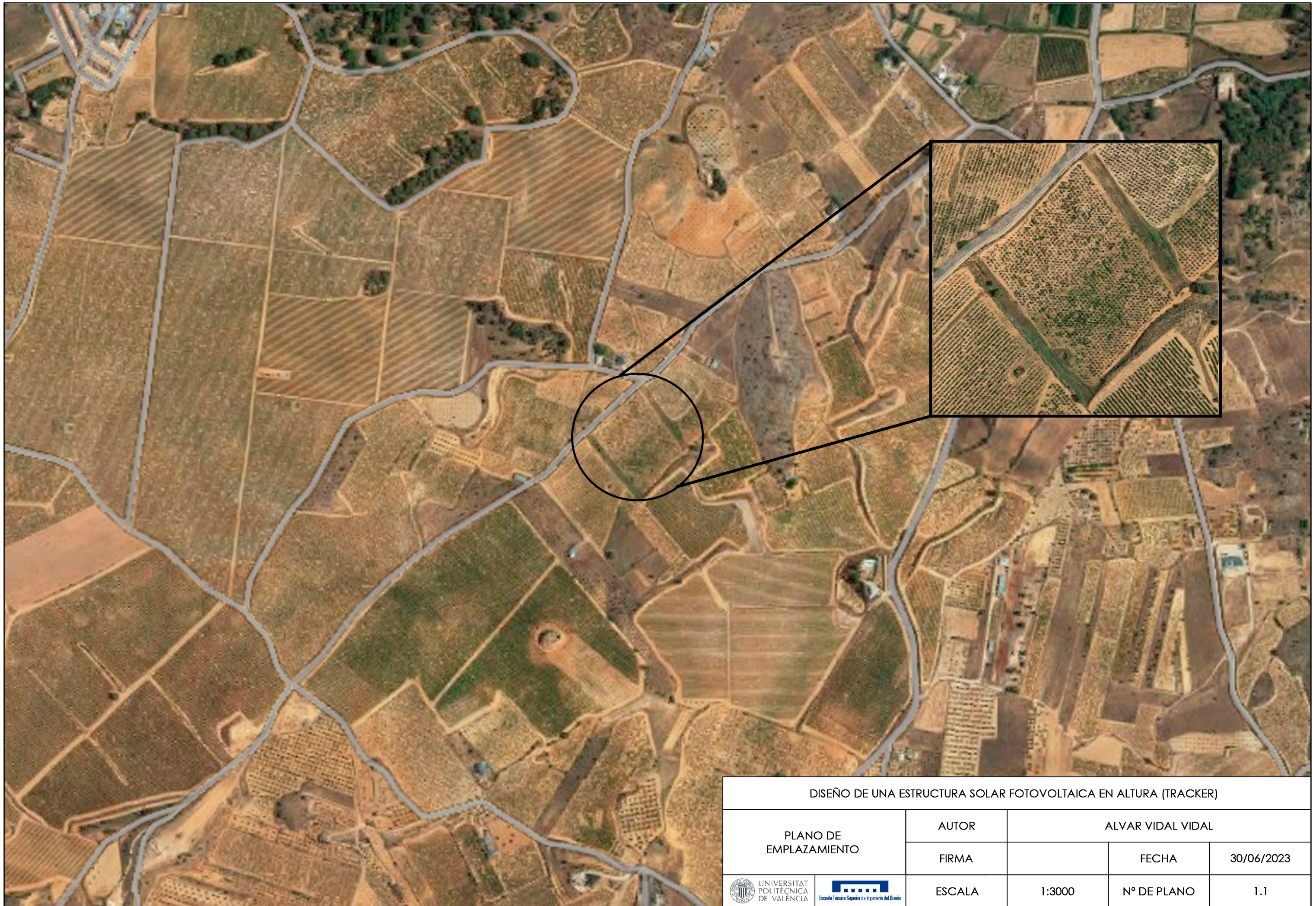
La carga a tracción del pilote viene dada por la ecuación:

$$P_{trac} = 0,6 \cdot \frac{\gamma_f}{\gamma_p} (\chi \cdot Q \cdot A \cdot f_y) = 0,6 \cdot P_{comp}$$

$$P_{trac} = 0,6 \cdot 448,8 = 269,28 \text{ kN}$$

A tracción el pilote es capaz de soportar una carga de 269,28 kN, de la Tabla 7 se obtiene el valor máximo del axil a tracción, siendo este de 23,17 kN, el pilote soportará los esfuerzos a tracción.

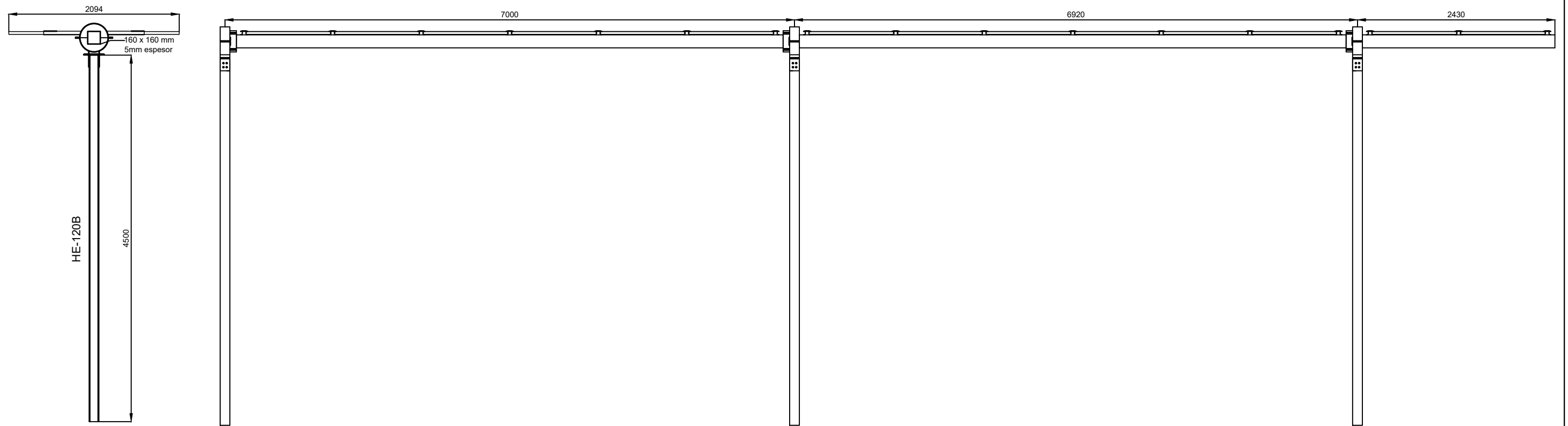
2. Planos



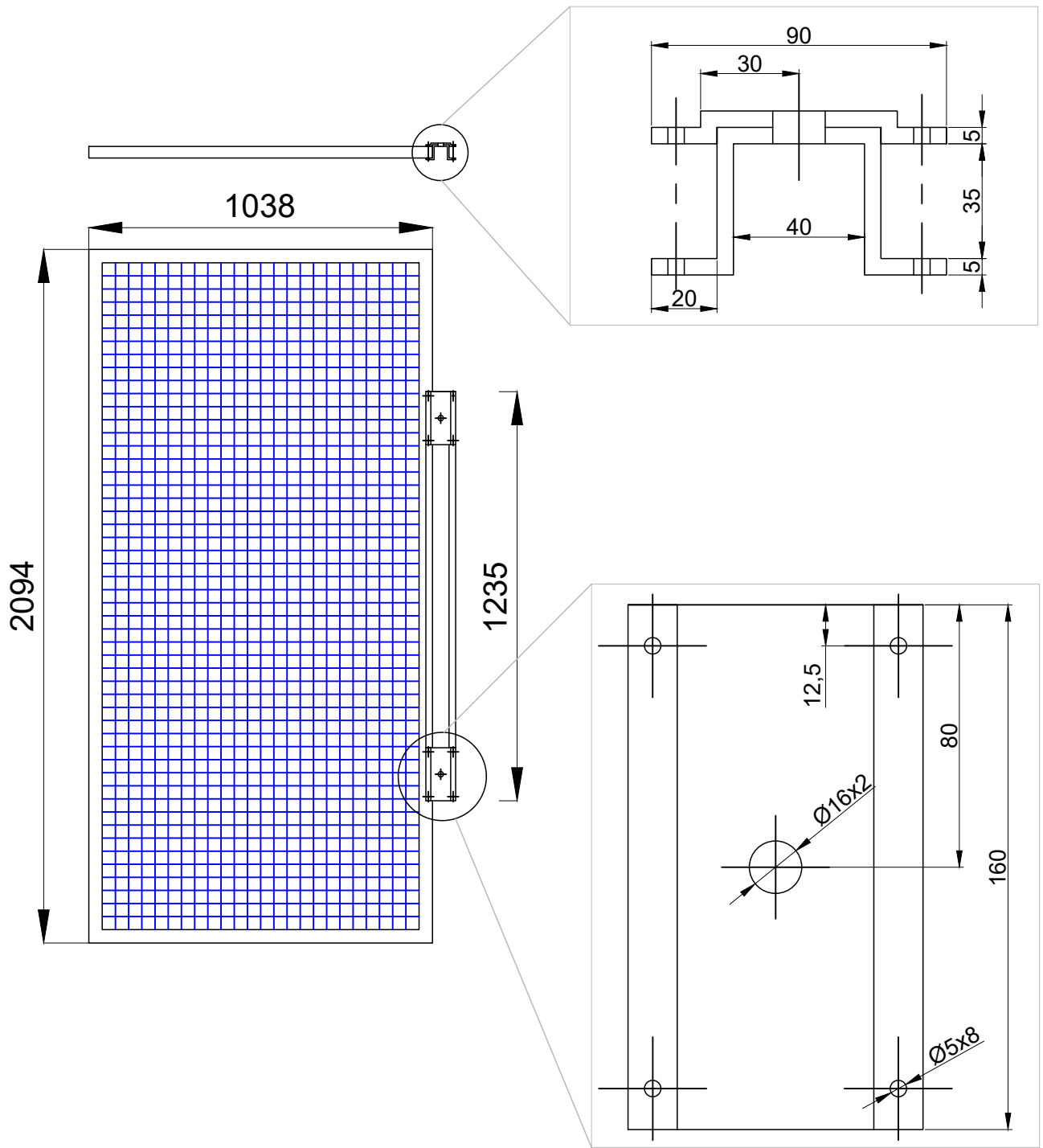
DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ALTURA (TRACKER)				
PLANO DE EMPLAZAMIENTO	AUTOR	ALVAR VIDAL VIDAL		
	FIRMA		FECHA	30/06/2023
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA 	ESCALA	1:3000	Nº DE PLANO	1.1





DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ALTURA (TRACKER)				
PLANO DE EMPLAZAMIENTO	AUTOR	ALVAR VIDAL VIDAL		
	FIRMA	FECHA	30/06/2023	
	ESCALA	1:3000	Nº DE PLANO	1.2
 UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALÈNCIA		 Escola Tècnica Superior d'Enginyeria del Disseny		

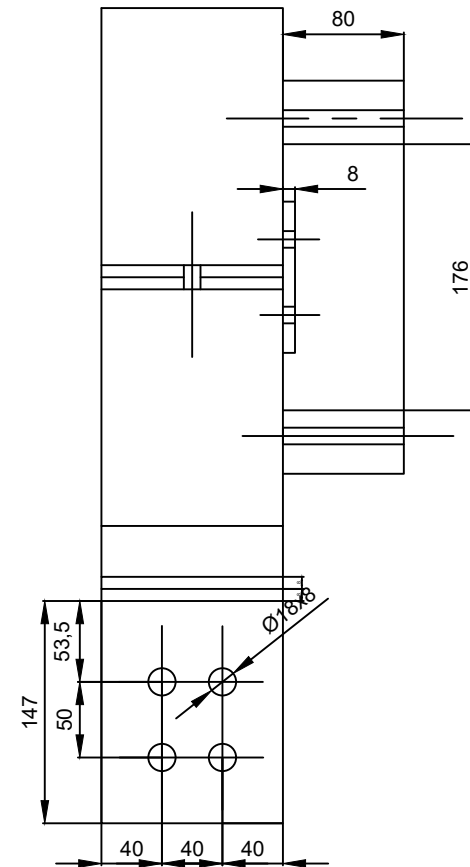
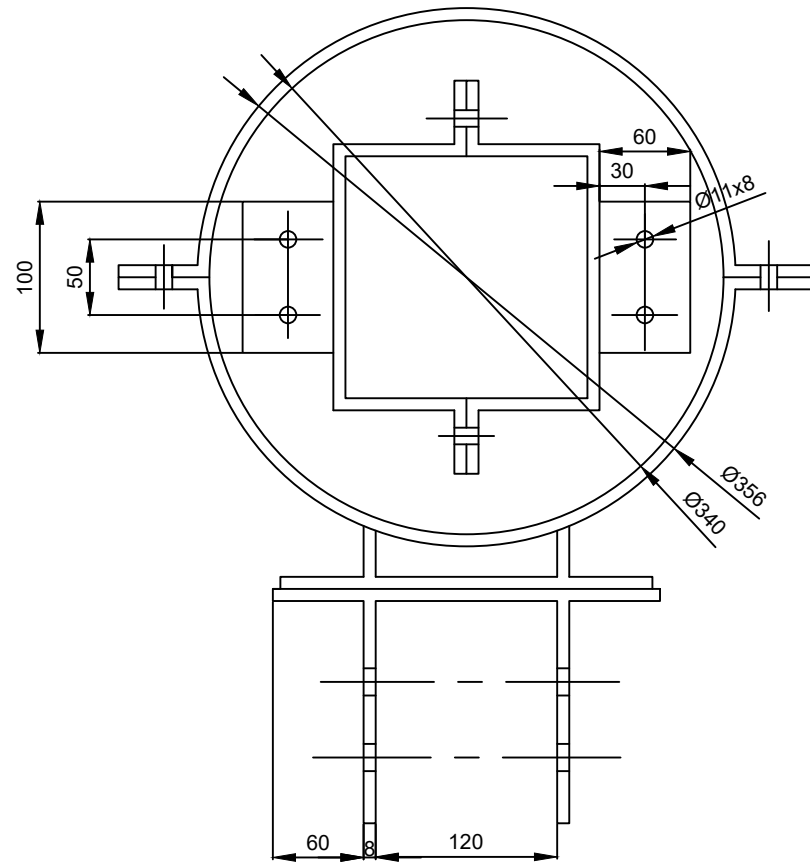


DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ALTURA (TRACKER)					
PLANO ESTRUCTURA TRACKER	AUTOR	ALVAR VIDAL VIDAL			
	FIRMA		FECHA	30/06/2023	
 UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALÈNCIA	 Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño	ESCALA	1:50	Nº DE PLANO	2





DETALLE DE ANCLAJE A EJE PANEL SOLAR (TRACKER)

PLANO ESTRUCTURA TRACKER	AUTOR	ALVAR VIDAL VIDAL			
	FIRMA		FECHA	30/06/2023	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	 Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño	ESCALA	1:15	Nº DE PLANO	3



DETALLE UNIÓN PILAR-EJE (TRACKER)

PLANO ESTRUCTURA TRACKER	AUTOR	ALVAR VIDAL VIDAL			
	FIRMA		FECHA	30/06/2023	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	 Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño	ESCALA	1:5	Nº DE PLANO	4

3. Pliego de condiciones

3.1. Objeto

El presente pliego de condiciones recoge los aspectos referentes a las condiciones de los materiales, la ejecución y las pruebas de servicio referentes al desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado. El objetivo de este pliego de condiciones es describir los requisitos mínimos para la instalación de una estructura solar fotovoltaica de seguimiento en altura para un terreno en la localidad de Requena, con el fin de aplicar una alternativa sostenible a la producción de energía en los grandes parques solares. Debido al continuo crecimiento de las energías renovables, en concreto la energía solar fotovoltaica, grandes hectáreas de terreno hasta ahora empleadas para el cultivo se están transformando en huertos solares. Con el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado se busca satisfacer la demanda energética y de productos agrícolas al mismo tiempo y de una forma totalmente sostenible.

El ámbito de este pliego de condiciones y del presente TFG se centra en los aspectos mecánicos de la instalación, dejando a un lado los aspectos sistemas eléctricos y electrónicos que forman parte de la instalación.

3.2. Condiciones de los materiales

A continuación, se van a describir los materiales que se han de emplear en la construcción de la estructura solar fotovoltaica diseñada para este proyecto de TFG. Se van a especificar las propiedades y medidas de los materiales junto con los controles de calidad que han de superar a fin de garantizar la seguridad estructural del proyecto.

Para ello se van a seguir las pautas definidas por el Código Técnico de la Edificación (CTE), más concretamente el Documento Básico de Seguridad Estructural (DB-SE) que recoge los requisitos relativos a la resistencia mecánica y la estabilidad de la estructura, de igual manera que la durabilidad de esta y la aptitud al servicio.

Debido a que alguno de los materiales empleados en la construcción de la estructura solar fotovoltaica es de acero, se ha empleado juntamente con el DB-SE el Documento Básico de Seguridad Estructural Acero (DB-SE-A) y las especificaciones de diferentes normativas vigentes.

3.2.1. Estructura solar

Las Normas Básicas de la Edificación (NBE) y las demás normas aplicables dictan los requisitos para la ejecución de la estructura solar fotovoltaica de seguimiento.

Según se especifica en la norma básica de la edificación CTE DB SE Acciones la estructura deberá resistir las sobrecargas producidas por el viento con los módulos instalados.

Las dilataciones térmicas han de ser consideradas tanto en el diseño como en la construcción de la estructura y el sistema de fijación de los módulos a fin de evitar la transmisión de cargas que puedan dañar el estado de los módulos, siguiendo en todo momento las indicaciones del fabricante.

Para evitar que aparezcan flexiones superiores a las especificadas por el fabricante en los módulos fotovoltaicos, la estructura deberá contar con los suficientes puntos de sujeción teniendo en cuenta el área de apoyo de estos.

El diseño de la estructura deberá tener en cuenta la orientación de los módulos, y para este caso el ángulo de inclinación variará a lo largo del día. Además, el diseño tendrá en cuenta las labores de montaje, desmontaje y mantenimiento de la instalación facilitando los accesos a los elementos.

La estructura ha de estar superficialmente protegida frente a la acción de los agentes ambientales.

La tornillería ha de ser realizada en acero inoxidable, cumpliendo con la norma CTE DB SE Acero. En el caso de que la estructura sea galvanizada se aceptará tornillería galvanizada, excepto para las sujeciones de los módulos que han de ser de acero inoxidable.

3.2.2. Módulos solares fotovoltaicos

Todos los módulos solares fotovoltaicos deben de cumplir las especificaciones dictaminadas por la norma UNE EN 61215 correspondiente para los módulos de silicio cristalino o bien, UNE-EN 61646 para módulos de fotovoltaicos de capa delgada.

Los módulos deberán poseer un certificado oficial otorgado por un laboratorio que los cualifique para la instalación.

El modelo y nombre o logotipo del fabricante debe ser claramente visible, así como, el número de serie o identificación que permita conocer la fecha de fabricación del módulo.

Los módulos han de tener diodos de derivación para prevenir posibles averías de las células que los forman, el grado de protección de los circuitos debe ser IP65.

Los marcos laterales empleados en la instalación de los módulos serán de acero inoxidable o aluminio en el caso que existan.

La potencia máxima y corriente de cortocircuito reales en condiciones de operación estándar deberá estar comprendidas en el $\pm 10\%$ de los valores nominales proporcionados por el fabricante en el catálogo para aceptar el módulo. Cualquier defecto de fabricación en cualquiera de sus elementos o falta de alineación de las células será motivo de rechazo del módulo.

Por motivos de seguridad y para facilitar el mantenimiento de la instalación, los elementos necesarios en la desconexión se instalarán de forma independiente a cada una de las ramas del resto de módulos.

3.2.3. Acero para estructuras metálicas: perfiles

Las características de los materiales empleados en la instalación deberán estar documentadas.

Los aceros se deberán transportar de una forma segura, de manera que los daños superficiales sean mínimos y que no se produzcan deformaciones permanentes.

A fin de comprobar las tolerancias de los perfiles definidas por la norma EN 10034:2020 se emplearán los métodos e instrumentos para las mediciones indicados en UNE-EN-ISO 7976-1:1989 y UNE-EN-ISO 7976-2:1989, comprobando la precisión de las medidas obtenidas de acuerdo con UNE-EN-ISO 8322-2005.

Los perfiles prefabricados deberán estar apilados y almacenados por encima del suelo sin llegar a estar en contacto con este. Se deberá evitar en todo momento la acumulación de agua, se mantendrán limpios y colocados de forma ordenada para evitar deformaciones.

La comprobación de las propiedades mecánicas de los aceros exigibles a este material se realizará según la norma vigente.

Aquellos materiales que hayan estado almacenados durante un largo periodo de tiempo o de forma que puedan haber sufrido algún deterioro deberán ser comprobados antes de su instalación, asegurando que todavía cumplen con la norma del producto correspondiente.

Los perfiles metálicos deberán ser almacenados en condiciones que cumplan las instrucciones del fabricante.

Bajo ningún concepto se emplearán materiales que hayan superado la vida útil indicada por el fabricante.

Se realizarán ensayos para identificar defectos internos o imperfecciones, fisuras y grietas en los materiales. Algunos de estos ensayos para garantizar la seguridad estructural son: inspección por partículas, ensayo por ultrasonidos, ensayo radiográficos y ensayo por líquidos penetrantes.

3.3. Condiciones de la ejecución

En el desarrollo de este apartado se especifica el proceso de ejecución de la obra para la instalación de la estructura solar fotovoltaica, asegurando que se cumplan los niveles de calidad previstos. Se hace referencia a las condiciones en la que debe finalizarse la instalación, así como las pruebas de servicio que sean necesarias para garantizar la integridad y calidad de la estructura. Las condiciones de ejecución se pueden dividir en las siguientes fases:

- Acondicionamiento del terreno. Se limpiará el terreno hasta una profundidad mínima de 25 cm empleando medio mecánicos, y se procederá a la retirada los materiales excavados.
- Las estructuras se dispondrán de manera que ni los módulos ni la estructura proyecten sombras sobre las estructuras contiguas según se especifica en el plano de disposición en el terreno.
- Montaje de la estructura metálica. Se preparará y limpiará el plano de apoyo. Se marcarán los ejes y se colocarán y fijarán provisionalmente los elementos. Se ejecutarán las uniones. Se repararán los defectos superficiales.
- Se comprobará que las cargas se transmiten de forma adecuada a la estructura.
- Se realizarán ensayos destructivos sobre muestras de los perfiles a fin de determinar el límite elástico, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, alargamiento y estricción según UNE-EN-ISO 6892-1. Dichos ensayos serán llevados a cabo por un laboratorio acreditado que realizará un informe con los resultados de los ensayos realizados.

3.4. Programa de mantenimiento

La estructura solar fotovoltaica cuenta con un plan de inspección y mantenimiento que permitirá asegurar el funcionamiento de la instalación, aumentar la productividad, evitar posibles averías graves y prolongar la vida útil de la instalación.

Para ello se ha diseñado un programa de actuación que consta de dos partes:

- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento correctivo

El mantenimiento preventivo se llevará a cabo a través de revisiones periódicas de la instalación que aseguran las condiciones óptimas de la estructura. El mantenimiento preventivo consistirá en inspecciones visuales donde se realizarán las siguientes comprobaciones:

- Comprobación del estado de los módulos fotovoltaicos.
- Comprobación de las deformaciones de la estructura solar fotovoltaica mediante el uso de galgas extensiométricas.
- Comprobación de la integridad y el estado de la estructura y los elementos que la componen, donde se dará especial importancia en la localización de grietas, fisuras o corrosión de los elementos.

La empresa instaladora encargada del mantenimiento preventivo deberá realizar un informe en cada una de las visitas donde se refleje el estado general de la instalación y las incidencias encontradas durante la inspección.

El plan de mantenimiento correctivo incluye las actividades llevadas a cabo en la reparación de fallos y/o averías de la instalación. Este tipo de mantenimiento se llevará a cabo una vez se ha producido una avería en la instalación. Dentro del mantenimiento correctivo encontramos dos tipos:

- Mantenimiento programado: este se llevará a cabo en el caso de que la avería no influya en la producción de la instalación. Se realizará un análisis y estudio de los trabajos y reparaciones necesarias para el correcto funcionamiento de la instalación y las actividades de reparación se realizarán en periodos de tiempo que no alteren la producción.
- Mantenimiento no programado: se llevará a cabo en el caso de que la avería no permita continuar con la producción y debe ser reparada de inmediato.

Todas las actividades de reparación posibles serán realizadas *in situ*, en el caso de no ser posible la empresa instaladora dispondrá de un plazo de tiempo determinado para realizar el desmontaje, reparación y montaje del elemento dañado.

Todas las actividades del mantenimiento, tanto preventivo como correctivo serán realizadas por personal técnico cualificado bajo la responsabilidad de la empresa instaladora.

Todas las operaciones deberán ser registradas en un libro donde constará la identificación del personal que ha realizado el mantenimiento, la fecha, la operación realizada y las incidencias a destacar.

4. Presupuesto

Cuadro de precios elementales

Materiales			
Referencia	Unidad	Descripción	Precio
mt07ala010dbb	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales, de la serie HEB, acabado con imprimación antioxidante. Trabajado y montado en taller, para colocar con uniones soldadas en obra.	1,92 €
mt07ala005d	kg	Acero UNE-EN 10210-1 S275J0H, en perfiles huecos acabados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales, de las series redondo, cuadrado o rectangular, acabado galvanizado en caliente. Trabajado y montado en taller, para colocar en obra.	3,42 €
mq08sol020	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	3,10 €
m5	ud.	Panel solar fotovoltaico modelo Atersa A-450M de 72 células, incluido marco de aleación de aluminio anodizado.	133,10 €
m6	ud.	Accesorios y materiales para la instalación de paneles solares	12,00 €
m7	h	Maquinaria de elevación	30,00 €
MO			
mo047	h	Oficial 1º montador de estructura metálica.	22,27 €
mo094	h	Ayudante montador estructura metálica.	21,15 €
h1	h	Oficial 1º electricista	24,40 €
h2	h	Ayudante electricista	17,80 €
	%	Costes directos complementarios	2%
	%	Costes indirectos	3%
	%	Medios auxiliares	5%

Tabla 14. Cuadro de precios elementales

Referencia	Unidad	Descripción	Precio	Cantidad	Total
d1	kg	Acero UNE-EN 10025 S275JR, en pilares formados por piezas simples de perfiles laminados en caliente de la serie HEB, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			

 Materiales

mt07ala010dbb	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en perfiles laminados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales.	1,92 €	1,000	1,92 €
mq08sol020	h	Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	3,42 €	0,018	0,06 €

MO

mo047	h	Oficial 1º montador de estructura metálica.	22,27 €	0,019	0,42 €
mo094	h	Ayudante montador estructura metálica.	21,15 €	0,011	0,23 €
	%	Costes directos complementarios	2%	2,637	0,05 €
				Total por kg	2,69 €

d2	kg	Acero UNE-EN 10210-1 S275J0H, en vigas formadas por piezas simples de perfiles huecos acabados en caliente de las series redondo, cuadrado o rectangular, acabado galvanizado en caliente, simplemente apoyado, a una altura de más de 3 m. El precio incluye los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
-----------	----	---	--	--	--

 Materiales

mt07ala005d	kg	Acero UNE-EN 10210-1 S275J0H, en perfiles huecos acabados en caliente, piezas simples, para aplicaciones estructurales, de las series redondo, cuadrado o rectangular, acabado galvanizado en caliente. Trabajado y montado en taller, para colocar en obra.	3,39 €	1	3,39 €
--------------------	----	--	--------	---	--------

MO

mo047	h	Oficial 1º montador de estructura metálica.	22,27 €	0,013	0,29 €
mo094	h	Ayudante montador estructura metálica.	21,15 €	0,013	0,27 €
	%	Costes directos complementarios	2%	3,954	0,08 €

				Total por kg	4,03 €
d3	ud.	Ud. De módulo solar fotovoltaico, incluido la estructura soporte			
 Materiales					
m5	ud.	Panel solar fotovoltaico modelo Atersa A-450M de 72 células, incluido marco de aleación de aluminio anodizado.	133,10 €	1	133,10 €
	%	IVA	21%	133,10 €	27,95 €
m6	ud.	Accesorios y materiales para la instalación de paneles solares	12,00 €	1	12,00 €
m7	h	Maquinaria de elevación	30,00 €	1	30,00 €
MO					
h1	h	Oficial 1º electricista	24,40 €	1	24,40 €
h2	h	Ayudante electricista	17,80 €	1	17,80 €
	%	Medios auxiliares	5%	245,25 €	12,26 €
				Total	257,51 €

Tabla 15. Presupuestos descompuestos

Precios descompuestos

Referencia	Unidad	Descripción	Precio	Cantidad	Total
d1	kg	Acero UNE-EN 10025 S275JR, en pilares formados por piezas simples de perfiles laminados en caliente de la serie HEB, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.	2,69 €	360,45	969,61 €
d2	kg	Acero UNE-EN 10210-1 S275J0H, en vigas formadas por piezas simples de perfiles huecos acabados en caliente de las series redondo, cuadrado o rectangular, acabado galvanizado en caliente, simplemente apoyado, a una altura de más de 3 m. El precio incluye los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.	4,03 €	27,65	111,43 €
d3	ud.	Ud. De módulo solar fotovoltaico, incluido la estructura soporte	257,51 €	14	3.605,14 €
	%	Beneficio industrial	6%	4.686,18 €	281,17 €
	%	IVA	21%	4.967,35 €	1.043,14 €
				Total	6.010,49 €

Tabla 16. Precios descompuestos

El presupuesto de la estructura solar fotovoltaica tiene un coste de Seis Mil Diez Euros con Cuarenta y Nueve Céntimos.

Conclusiones

En conclusión, este trabajo de fin de grado ha mostrado la importancia de la innovación en la transición energética de los países de la Unión Europea y España. A través del diseño de una estructura solar fotovoltaica en altura de seguimiento, se ha observado una mejora significativa de eficiencia de las instalaciones de este tipo, así como numerosos beneficios tanto para la instalación como para el terreno.

Los resultados obtenidos del diseño y cálculo estructural junto con los resultados del presupuesto muestran que el coste de fabricación de una estructura de estas características es más elevado que el coste de las estructuras solares fotovoltaicas convencionales. No obstante, el empleo de nuestro diseño aporta una serie de ventajas que no nos ofrecen las convencionales.

La estructura en altura permite optimizar el uso del terreno, empleándolo para la producción agrícola o ganadera. Minimiza el impacto ambiental de la actividad humana. La sombra de los paneles protege los cultivos de la irradiación solar y reduce la necesidad hídrica del terreno. El uso combinado aumenta la eficiencia de la instalación evitando el sobrecalentamiento de las placas. Además, acerca la transición energética y tecnologías innovadoras a las zonas más rurales, creando puestos de trabajo y evitando la despoblación.

En definitiva, las estructuras solares en altura aportan un modelo de obtención de energía renovable sostenible con el medio ambiente que debe ser considerado a la hora de diseñar instalaciones solares fotovoltaicas.

BIBLIOGRAFÍA

Agrovoltaica: Qué es, ventajas y situación en España. (n.d.). Tunergia.Es. Recuperado el 14 de julio, 2023, de <https://www.tunergia.es/post/agrovoltaica>

Alonso, J. A. (20 de enero de 2022). *Los 10 paneles solares más eficientes del mercado 2019-2023 - SunFields.* SunFields. Empresa de Placas y Equipos Solares; SunFields Europe. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/los-10-paneles-solares-mas-eficientes-del-mercado/>

Álvarez, C., & Zafra, M. (23 de enero de 2021). *Cuánto ocupan las megacentrales solares: investigadores alertan del impacto del 'boom' fotovoltaico.* Ediciones EL PAÍS S.L. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2021-01-23/cuanto-ocupan-las-megacentrales-solares-investigadores-alertan-del-impacto-del-boom-fotovoltaico.html>

Barahona, I. (27 de abril de 2022). *Una Ley para proteger la tierra de cultivo frente a las placas solares: los sindicatos agrarios se unen.* La Opinión de Zamora. <https://www.laopiniondezamora.es/comarcas/2022/04/27/ley-proteger-tierra-cultivo-frente-65443548.html>

COAG desaprueba los grandes proyectos de energía solar fotovoltaica de fondos de inversión sin un modelo social. (17 de enero de 2022). Onda Regional de Murcia. <https://www.orm.es/informativos/noticias-2022/coag-desaprueba-los-grandes-proyectos-de-energia-solar-fotovoltaica-de-fondos-de-inversion-sin-un-modelo-social/>

Communications. (10 de marzo de 2022). *Agrovoltaica: cultivos a la sombra de los paneles fotovoltaicos.* BBVA. <https://www.bbva.com/es/es/sostenibilidad/agrovoltaica-cultivos-a-la-sombra-de-los-paneles-fotovoltaicos/>

Cantos Serrano, Julián. *Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas.* Paraninfo, 2016.

Corporativa, I. (n.d.). *¿Cómo funcionan las plantas fotovoltaicas?* Iberdrola. Recuperado el 14 de julio, 2023, de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>

Energía. (12 de junio de 2007). *[Fotovoltaica] Impacto ambiental.* Ecologistas en Acción. <https://www.ecologistasenaccion.org/10057/fotovoltaica-impacto-ambiental/>

Gamez, M. J. (17 de septiembre de 2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

iLeón. (26 de abril de 2021). *El sindicato agrario UPA pide que se impida instalar en terreno fértil huertos solares*. iLeón. https://ileon.eldiario.es/actualidad/sindicato-agrario-upa-pide-impida-instalar-terreno-fertil-huertos-solares_1_9489362.html

La UE y el acuerdo de París: hacia la neutralidad climática. (19 de noviembre de 2019). Europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20191115STO66603/la-ue-y-el-acuerdo-de-paris-hacia-la-neutralidad-climatica?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience=&at_topic=Climate_policies&gclid=CjwKCAjw3ueiBhBmEiwA4BhspDdi6-edoZJqdR3nrQa-C0NzuZ-HKPHwGACL2FWrtYUTtvz_2PgnUBoCdIIQAvD_BwE

Pacto Verde Europeo: clave para una UE climáticamente neutral y sostenible. (25 de junio de 2020). Europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20200618STO81513/pacto-verde-europeo-clave-para-una-ue-climaticamente-neutral-y-sostenible?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=Sitelink&at_goal=TR_G&at_audience=&at_topic=Green_Deal&gclid=CjwKCAjw3ueiBhBmEiwA4BhspFsSStAVcuu_4VPFBqEp3tsl2Z83Zqx3uKdmJQzABpVuWgnz_01sBBoCp50QAvD_BwE

REPowerEU: una energía asequible, segura y sostenible para Europa. (n.d.). Comisión Europea. Recuperado el 14 de julio, 2023, de https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_es

Ruiz, A. (9 de noviembre de 2022). *En funcionamiento una nueva central solar en Badajoz*. esenergia. <https://esenergia.es/central-solar-badajoz/>

Siegler, K. (14 de noviembre de 2021). This Colorado “solar garden” is literally a farm under solar panels. *NPR*. <https://www.npr.org/2021/11/14/1054942590/solar-energy-colorado-garden-farm-land>

Tema destacado. La energía solar: aprovechando el poder del sol. (n.d.). Comisión Europea.

Recuperado el 14 de julio, 2023, de https://commission.europa.eu/news/focus-solar-energy-harnessing-power-sun-2022-09-13_es

UAGA defiende la tierra agraria fértil ante grandes proyectos de parques solares. (21 de mayo de 2021). UAGA. <https://www.uaga.eus/uaga-defiende-la-tierra-agricola-fertil-ante-grandes-proyectos-de-parques-solares/>