



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES Y DE  
LUZ SOLAR PARA LA ORIENTACIÓN DE LA NAVE  
INDUSTRIAL**

*Autor:*

**Gonzalo Fajardo, Pablo**

*Tutores:*

**Cacho Pérez, Mariano**

**García Terán, José María**

**Construcciones Arquitectónicas, I.T. y  
M.M.C. y Teoría de Estructuras**

**Valladolid, junio, 2024**



## RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado consiste en un estudio de la influencia de las condiciones ambientales para la orientación de una nave industrial, con especial atención al viento y a la luz solar, que permitirá la generación de energía eléctrica a través de placas solares instaladas sobre su cubierta. Para ello, se diseñará un caso de referencia en el programa de diseño estructural Robot y se calculará el correcto dimensionamiento de las barras de la estructura, así como la producción fotovoltaica de los módulos solares gracias a la herramienta digital PVGIS. Por último, se estudiarán varias posibilidades en la orientación e inclinación de la cubierta, con el fin de analizar los resultados.

**Palabras clave:** orientación, nave industrial, placas solares, cubierta, generación eléctrica.

## ABSTRACT

This Final Degree Project consists of a study of the influence of environmental conditions on the orientation of an industrial unit, paying special attention to wind and sunlight, which would allow the electricity generation through solar panels installed on its roof. For this purpose, a reference case will be designed with the Robot structural software and the accurate sizing of the structural bars will be calculated, as well as the photovoltaic production of the solar modules thanks to the PVGIS digital tool. Finally, various possibilities in the orientation and the roof's angle will be considered, in order to analyze the results.

**Key words:** orientation, industrial unit, solar panels, roof, electricity generation.



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia y amigos por estar a mi lado todos estos años, por ser mi mayor apoyo y por ayudarme a ser quien soy hoy.

A Mariano, por su paciencia y colaboración.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1.....	1
SITUACIÓN .....	1
1.1. Introducción .....	3
1.2. Antecedentes y estado del arte.....	4
1.3. Objetivos .....	6
1.4. Estructura.....	7
CAPÍTULO 2.....	9
PLANTEAMIENTO .....	9
2.1. Premisas iniciales .....	11
2.1.1. Localización .....	11
2.1.2. Dimensiones .....	12
2.1.3. Grupos de barras .....	13
2.2. Herramientas empleadas .....	16
2.2.1. PVGIS.....	16
2.2.2. Robot Structural Analysis.....	22
2.3. Cargas aplicadas sobre la estructura.....	24
2.3.1. Acción variable de nieve.....	24
2.3.2. Acción variable de viento .....	26
2.3.3. Acción variable de sobrecarga de uso.....	29
2.3.4. Acción permanente de peso de la cubierta y las placas solares.....	30
2.3.5. Acción permanente de peso propio .....	31
2.4. Combinaciones de carga.....	32
CAPÍTULO 3.....	33
CASO DE REFERENCIA.....	33
3.1. Datos de partida .....	35
3.2. Diagramas de esfuerzos .....	35
3.3. Dimensionamiento estructural .....	38
3.3.1. Ejemplificación de cálculos: pilares de esquina .....	39
3.3.2. Verificación y dimensionado de barras .....	52
3.4. Introducción de datos en PVGIS .....	60

CAPÍTULO 4.....	61
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	61
4.1. Variables de influencia .....	63
4.2. Cubierta a un agua .....	66
4.3. Cubierta a dos aguas.....	69
4.4. Comparación de las dos cubiertas.....	75
CAPÍTULO 5.....	77
CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	77
5.1. Conclusiones.....	79
5.2. Líneas futuras .....	82
CAPÍTULO 6.....	83
ESTUDIO ECONÓMICO .....	83
6.1. Clasificación de costes .....	85
6.1.1. Costes directos .....	85
6.1.2. Costes indirectos .....	87
6.1.3. Costes totales .....	88
CAPÍTULO 7.....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	89
Referencias Bibliográficas .....	91
CAPÍTULO 8.....	93
ANEXOS.....	93
ANEXO 1: FIGURAS .....	95
ANEXO 2: TABLAS .....	96







# CAPÍTULO 1

## SITUACIÓN



## 1.1. INTRODUCCIÓN

La instalación de placas solares sobre las cubiertas de edificios y naves es una realidad y no una moda pasajera. Cada vez son más los interesados en reducir su factura de luz a través de una inversión en generación de energía fotovoltaica, instalando paneles sobre la superficie de sus tejados. Y por ello, cada vez surgen más preguntas relacionadas con este tema.

Ya sea un particular o una empresa, la interesada en sacarle partido a la cubierta de su nave industrial, que, hasta ahora, actuaba como mera protección de las inclemencias meteorológicas, y de la que podría obtener un rendimiento generando electricidad de una fuente renovable, es muy probable que le surjan las siguientes dudas:

¿Con qué orientación de las placas produciré más energía? ¿Cuánto debo inclinar la cubierta de la nave? ¿Cómo afectan estas variables al diseño estructural?

### **Figura 1**

*Ilustraciones de nave industrial y panel solar*



*Nota.* (Pexels, 2020)

A lo largo de este trabajo se intentará dar respuesta a estas preguntas, estudiando la influencia que tienen la orientación de una nave industrial en el espacio y la pendiente de su cubierta sobre la energía eléctrica que generarán los paneles solares situados sobre esta y sobre el diseño completo de la estructura.

## 1.2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

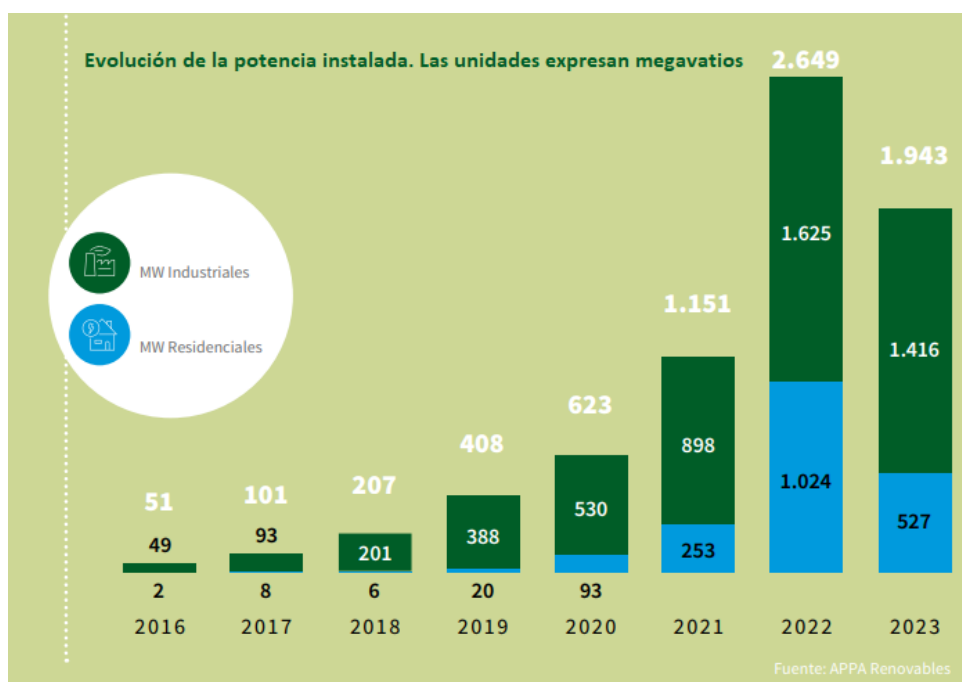
La primera célula solar capaz de transformar luz en energía eléctrica fue construida en 1883 por Becquerel, un físico francés que recubrió una muestra de selenio semiconductor con un pan de oro, con una eficiencia de tan solo el 1%. No fue hasta más de un siglo después, cuando se lograron fabricar los primeros paneles comerciales, que alcanzaban una conversión energética de entorno al 6% y cuya finalidad era equipar de ellos los primeros satélites espaciales (Buñuel, 2023).

En la actualidad, los módulos solares comerciales, al alcance de cualquiera, superan el 20% de eficiencia energética y en los últimos años, se ha percibido un gran aumento en su uso, representando la energía fotovoltaica el 20,3% del cómputo total de potencia instalada en España en 2023, instalándose en esta comunidad autónoma, Castilla y León, 454 MW (Red Eléctrica, 2024).

También los particulares son partícipes de este crecimiento, y muestra de ello es el aumento del 58% del autoconsumo en España entre 2021 y 2023 (Muñoz, 2024). Y es que los tejados y cubiertas de los edificios son en muchas ocasiones el lugar elegido en donde colocar placas solares.

**Figura 2**

*Crecimiento del autoconsumo en los últimos 8 años [MW]*



Nota. (APPA Renovables, 2023)

Las naves industriales, que son edificaciones donde se desarrollan actividades de carácter industrial, constan en su mayoría de grandes superficies de cubierta, idóneas para tal fin y es más que habitual en proyectos de nueva construcción implementarlas.

Hacerlo, supone múltiples ventajas frente a situarlas en el suelo, ya que no se requiere de un terreno adicional para llevarlo a cabo, lo que se traduce en un ahorro en la compra o alquiler de este, además de un menor impacto ambiental. Por otra parte, al encontrarse las naves industriales, principalmente, en polígonos de carácter industrial, se dispone de la infraestructura eléctrica necesaria para la distribución de la energía generada, incluso para la disipación del excedente, por lo que no es necesaria una inversión mayor en este aspecto.

Previo a la realización del proyecto, se ha consultado abundante bibliografía sobre naves industriales y múltiples trabajos que ahondan en el diseño de naves industriales, y otros que atienden a la elección de placas solares y su rendimiento. En un ejercicio de reflexión surgió la idea de intentar entrelazar ambos temas y profundizar en un aspecto que a menudo se pasaba por alto a la hora de diseñar una nave industrial común, su orientación en el espacio.

La práctica más habitual consiste en situar la nave con el pórtico frontal de cara a la vía de acceso más próxima, pero son muchas las veces en que el espacio permite variar la orientación de la nave. Nos hicimos entonces, profesor y alumno, la pregunta de cuál sería la orientación ideal para obtener el máximo rendimiento de los paneles solares y cómo le afectaría la orientación al cálculo estructural, es decir, si existen posiciones que nos permiten dimensionar la nave de manera diferente.

Para ello, se definieron dos casos de estudio: una nave con la cubierta a un agua y una nave industrial con la cubierta a dos aguas. Ambos casos partirán de unas premisas comunes, más adelante definidas, para que compararlas sea lo más realista posible.

### 1.3. OBJETIVOS

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado es conocer la influencia de la orientación y la pendiente de la cubierta de una nave industrial sobre la producción de energía solar fotovoltaica producida por paneles solares sobre su tejado y sobre el dimensionamiento estructural de la nave. Se tratará de encontrar la configuración óptima de una nave industrial, con el fin de maximizar la generación eléctrica de los paneles solares y, por otro lado, hallar la configuración de la estructura que minimice el material necesario a emplear en su construcción, buscando la máxima eficiencia.

Para lograrlo, nos apoyaremos en los conocimientos sobre cálculo estructural obtenidos en las múltiples asignaturas cursadas de la rama de resistencia de materiales y en las herramientas digitales que nos facilitarán los cálculos requeridos, así como en la bibliografía consultada, y en la experiencia en realización de proyectos industriales obtenida a lo largo de la carrera académica y el desempeño profesional del autor.

En segundo plano, también se destacan como objetivos, los siguientes:

- Comprender en mayor profundidad el funcionamiento de la herramienta digital PVGIS, que nos permitirá calcular cuánta energía eléctrica es posible producir con paneles solares.
- Estudiar las condiciones climatológicas más desfavorables de la ubicación escogida para la construcción de la nave industrial a través del análisis estadístico de valores históricos.
- Comprender el ejercicio de cálculo que el programa de diseño estructural Robot Structural Analysis realiza a la hora de verificar el estado de límite último de las barras que conforman la estructura.
- Alcanzar un dimensionamiento de todos los casos de estudio de la estructura de acero de la nave lo más realista posible, dentro de una ventana en la que no penalicemos el diseño dimensionando en exceso o en defecto las barras que la componen.



## 1.4. ESTRUCTURA

La estructura del documento es la siguiente:

En primer lugar, en este capítulo se plantea el proyecto en su conjunto, desde la explicación de su origen hasta la definición de los objetivos que se persiguen.

En segundo lugar, el capítulo 2 aborda el planteamiento de todo lo necesario para realizar este estudio. Comenzará exponiéndose todas las premisas para el análisis que tendrá lugar a lo largo del documento, justificando las decisiones tomadas, como lo son:

- Ubicación exacta y orientación en el espacio de la nave industrial.
- Las dimensiones de la nave, independiente de la cubierta elegida y de la pendiente de esta.
- Los grupos de barras en que dividimos la estructura.
- Los casos de carga que se tendrán en cuenta, detallando los criterios escogidos y los cálculos realizados.

A continuación, se explicarán en detalle las dos herramientas principalmente empleadas, que son:

- La herramienta digital PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), del centro de ciencia de la Unión Europea, que podemos encontrar en la página web de la Comisión Europea.
- El software de análisis y diseño estructural del grupo Autodesk, Robot Structural Analysis.

Una vez está la parte común del proyecto completamente definida, se ahondará a lo largo del tercer capítulo en el desarrollo del primero de los casos, el de la nave industrial con cubierta a un agua y pendiente de la cubierta de 5 grados, que servirá de caso de referencia para las futuras modificaciones de la estructura. Este caso, será el hilo conductor para exponer cómo se han realizado los cálculos, las decisiones técnicas que se han tomado y finalmente cómo se han logrado obtener los resultados esperados. Se profundizará en los siguientes aspectos técnicos:

- Combinaciones de carga y coeficientes de seguridad empleados.
- Visualización de diagramas de esfuerzos y deformada en Robot.
- Las variables que introducimos en nuestras herramientas y las que estas nos devuelven.

- El dimensionamiento estructural de acero que Robot realiza. Donde se expondrá un ejemplo de cálculo y el modo de funcionamiento por iteraciones de este software.

El siguiente capítulo, el cuarto, recogerá los resultados obtenidos, tanto en materia de generación eléctrica gracias a las placas solares como del dimensionamiento de la estructura de barras de acero de la nave industrial y se realizará un análisis de sensibilidad sobre todos ellos.

Se empezará por el caso de cubierta a un agua, previamente detallado, y con los valores obtenidos se podrán sacar las primeras conclusiones. Para ello, se introducen varios conceptos para tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados, con el fin de no cometer errores de interpretación y de explotar al máximo toda la información recopilada hasta el momento.

Después, se abordará el segundo caso de estudio, el de una nave industrial con la cubierta a dos aguas. Se trata de la solución técnica más habitual en el sector de construcción de naves industriales y por ello debe ser tenida en cuenta. Como se explicará más adelante, este caso requiere de introducir una variable más, la orientación. No se detallará el proceso de cálculo porque el fundamento es el mismo que en el caso anterior, por lo que directamente se expondrán los resultados. Se realizará un exhaustivo análisis de sensibilidad, aislando variables y dándoles valores, con el fin de conocer la influencia de cada variable en el resultado final. Por último, en este capítulo, tendrá lugar una comparación entre las dos posibilidades de cubierta estudiadas, enfrentando la mejor solución en cada caso, según lo que el usuario final desee.

El quinto capítulo, recogerá las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto, exponiéndolas con datos y contrastándolas con los objetivos planteados al comienzo del documento. Además, se plantearán varias líneas de trabajo futuras, que den continuidad a este estudio, en otros ámbitos.

Finalmente, se encontrará un breve presupuesto del proyecto, que describe el impacto económico que ha tenido, seguido de las referencias bibliográficas y los anexos, donde se adjuntan todas las tablas y figuras a las que se ha hecho referencia a lo largo del escrito.

# CAPÍTULO 2

## PLANTEAMIENTO



## 2.1. PREMISAS INICIALES

Antes de comenzar con cualquier caso de estudio, debemos fijar las que serán las bases del proyecto, los puntos que tendrán en común todos los casos posibles, y que permitirán más adelante, que exista una relación entre ellos, facilitando comparar los resultados.

Identificamos todas las variables que podemos fijar desde el inicio porque sus valores serán iguales para cualquier caso:

- Localización de la nave industrial  
Aunque lo analizado en este proyecto tiene un carácter general ya que pretende que sus conclusiones puedan aplicarse a múltiples situaciones, debemos acotar una ubicación concreta para realizar dicho caso de estudio.
- Dimensiones de la nave industrial  
Que las diferentes propuestas se asemejen al máximo en todas las medidas que no son parte del caso de estudio, permitirá su comparación y análisis.
- División en grupos de barras de la estructura  
De la misma forma, emplear una solución común al diseño estructural con barras de acero, que facilitará el futuro análisis estructural.

En cuanto a los paneles solares instalados sobre la cubierta de las naves, únicamente se tendrá en cuenta la posibilidad de instalarlos directamente sobre esta, con sus correspondientes anclajes, pero sin una estructura adicional que modifique su pendiente.

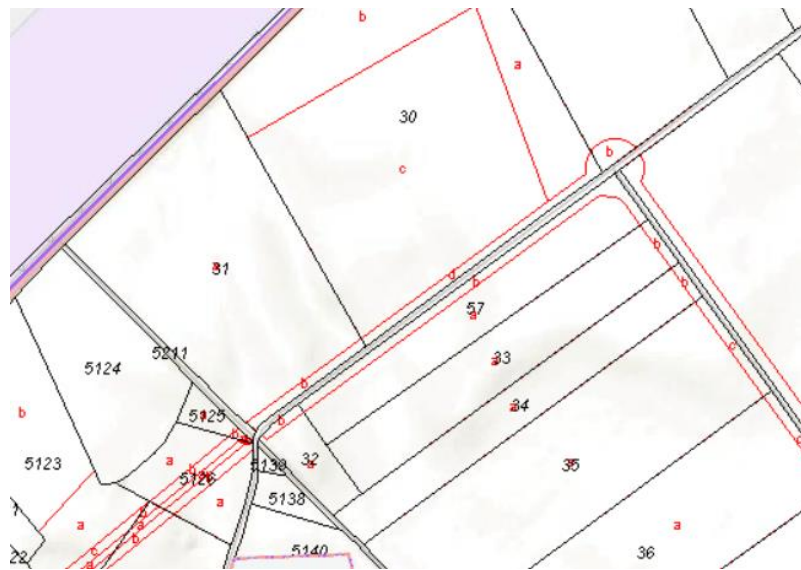
### 2.1.1. Localización

Hemos decidido emplazar la nave industrial en una ubicación muy próxima al Aeropuerto de Villanubla, en el municipio del mismo nombre, en la provincia de Valladolid. Esta elección no es arbitraria, se ha escogido este sitio porque el Aeropuerto de Villanubla cuenta con una estación de AEMET (Agencia Española de Meteorología) que recoge datos climatológicos desde 1981, lo que nos ayudará, a lo largo del ejercicio, a obtener valores históricos de viento en la zona.

Las coordenadas exactas de la nave son (41.709, -4.836) en formato decimal, es decir, 41° 42' 54" Norte y 4° 50' 16" Oeste. El terreno se encuentra a una altitud de 843 metros sobre el nivel del mar. Es un terreno de uso industrial, próximo a un polígono de tal índole, pero sin edificaciones en sus inmediaciones.

### Figura 3

Finca n° 32 elegida para la nave sobre plano catastral



Nota. (Dirección General del Catastro, 2024)

### 2.1.2. Dimensiones

Se deciden establecer las siguientes dimensiones para todas las posibles naves que se vayan a diseñar a lo largo de este proyecto.

**Tabla 1**

Dimensiones comunes estructurales [m]

Longitud	35
Luz (sobre planta)	24
Altura mínima	7
Distancia entre pilares de las fachadas laterales	5
Distancia entre los pilares de los pórticos frontal y trasero	6

Además, contaremos con siete correas por pórtico, sin contar las vigas de los extremos.

La nave estará cerrada a excepción de cuatro huecos, dos en la cara frontal y otros dos en la trasera, simétricamente dispuestos, de cuatro metros de ancho por seis de alto cada uno, que representan las puertas del edificio.

El único dato geométrico de la nave que faltaría definir es la pendiente de la cubierta. Se emplearán tres valores diferentes, dentro de un rango razonable para una nave de uso industrial. Probaremos con inclinaciones de 5, 10 y 15 grados. Este valor, nos permitirá obtener, el resto de información que necesitamos para realizar el mallado en Robot y comenzar el diseño de la estructura.

### 2.1.3. Grupos de barras

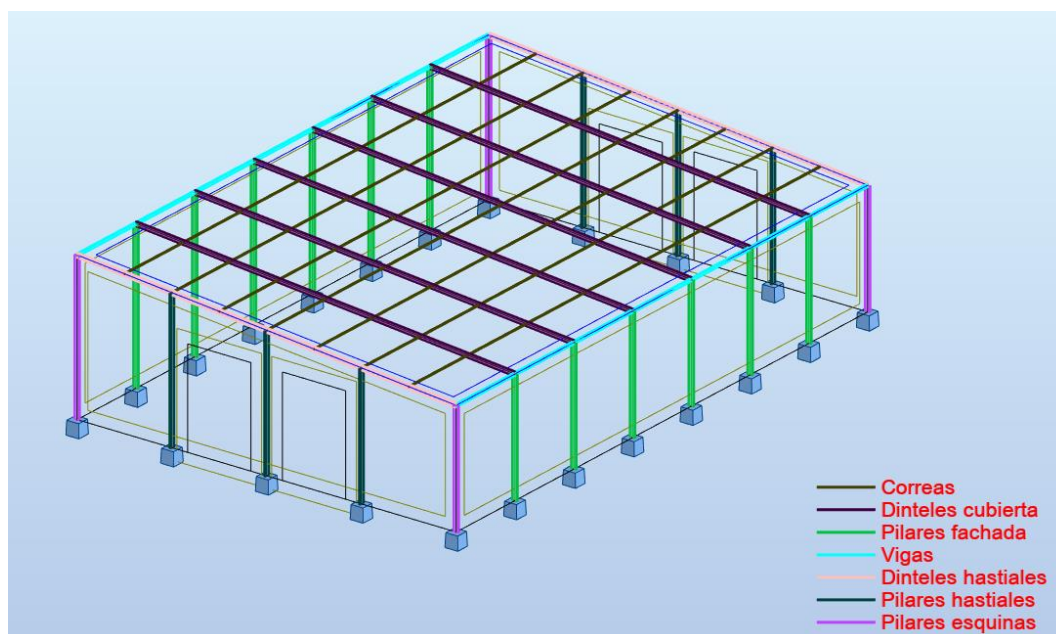
El software de elementos finitos de Robot permite colaborar con el usuario en el dimensionamiento de la estructura. Además de indicarnos si una barra está dentro del rango de sollicitación deseado, o no, si se agrupan las barras en divisiones, nos mostrará, para la barra más solicitada de cada grupo, una configuración OK, es decir, con un ratio de sollicitación inferior a la unidad, y las siguientes configuraciones más próximas a esta, una por debajo por si buscamos un factor de seguridad mayor y otra por encima de la unidad, en la que la estructura no cumpliría con los requerimientos.

Por tanto, nos interesa enormemente, clasificar desde un primer momento, todas las barras de la nave, porque nos permitirá dimensionar acorde a los casos de carga, pero de una manera ordenada.

En primer lugar, dividiremos los pilares en tres grupos: hastiales, los que conforman los pórticos frontal y trasero; de fachada, los que soportan las fachadas laterales de la nave y, por último, los cuatro de las esquinas. En segundo lugar, habrá un grupo para las vigas que unen los pilares de la nave, en sus laterales, y otro para las barras que forman la parte superior de cada pórtico, los dinteles. Por último, agruparemos todas las correas que irán colocadas perpendicularmente a los dinteles, en un único grupo. Más adelante, observaremos si esta clasificación es la más adecuada para lograr un dimensionamiento correcto de las barras de acero de la estructura.

**Figura 4**

Grupos de barras de la estructura



*Nota.* Se muestran sobre el caso de referencia, de cubierta a un agua con pendiente de cinco grados, los siete grupos de barras inicialmente planteados.

Para comenzar el con el primer caso de estudio, debemos introducir una configuración inicial para cada grupo de barras de la estructura. Hemos decidido simplificar la resolución del ejercicio, así que para todos los casos emplearemos barras de acero S235 (límite elástico como su nombre indica, 235N/mm<sup>2</sup>), laminadas en caliente.

**Tabla 2**

*Composición del acero S235 seleccionado, según un análisis de cuchara*

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
≤0,220	≤0,050	≤0,600	≤0,300	≤0,040	≤0,040	≤0,300	≤0,012	≤0,300

*Nota.* Composición química basándose en el análisis de cuchara según Gost 27772,% (METINVEST, 2023).



Se ha decidido emplear perfiles IPN para los pilares y las vigas, dado que su espesor variable en las alas les permite resistir cargas más pesadas (Structuralia, 2023) y con perfiles IPE para el resto de las barras: dinteles y correas. Estas decisiones no son relevantes para la consecución de los objetivos de este proyecto, por lo que cualquier otra elección de perfiles es igualmente válida.

**Tabla 3**

*Clasificación de barras en grupos*

<b>Clasificación de barras</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Perfil</b>	<b>Sección inicial</b>
Pilares fachada	12	IPN	320
Pilares hastiales	6	IPN	320
Pilares esquinas	4	IPN	320
Vigas	14	IPN	200
Dinteles hastiales	4	IPE	270
Dinteles cubierta	12	IPE	270
Correas	49	IPE	100

Realizando la suma, cada nave dispondrá de un total de 101 barras de acero.

## 2.2. HERRAMIENTAS EMPLEADAS

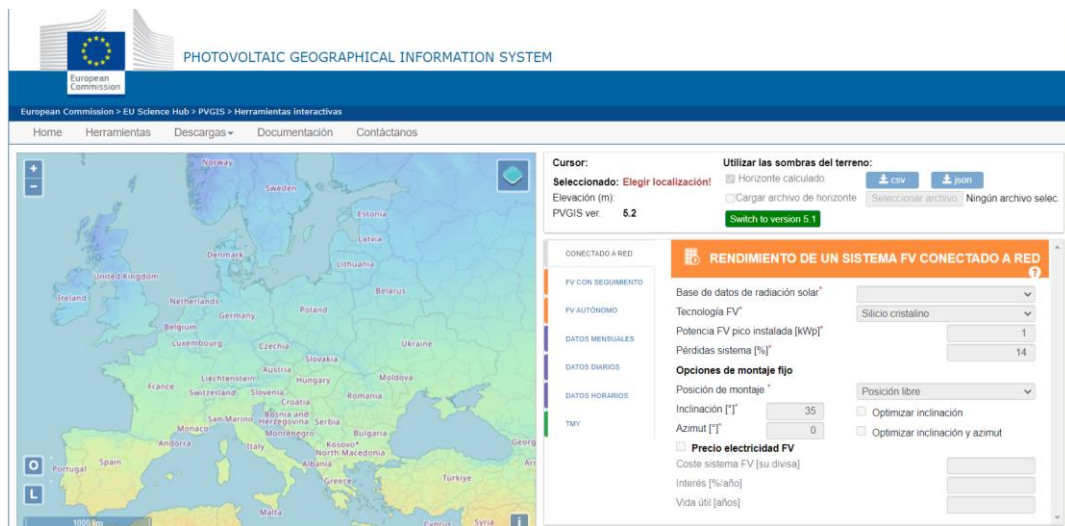
Con el fin de alcanzar los objetivos del trabajo de una manera eficiente y fiable, se utilizarán dos principales herramientas digitales: la plataforma PGVIS y el software estructural Robot. A lo largo de este apartado se describen detalladamente su funcionalidad y su aplicación a este proyecto.

### 2.2.1. PVGIS

En la sección del centro de ciencia de la página web de la Comisión Europea, encontramos **PVGIS** (Photovoltaic Geographical Information System). “La herramienta de PVGIS permite calcular la producción fotovoltaica media mensual y anual de un sistema FV conectado a la red eléctrica, sin sistema de almacenamiento con baterías. En el cálculo se tiene en cuenta la radiación solar disponible, la temperatura del módulo FV, la velocidad del viento y el tipo de módulo FV.” (European Commission, 2024).

#### Figura 5

#### Herramienta digital PVGIS



Nota. Vista de la web de la Comisión Europea de la herramienta PVGIS (European Commission, 2024).

De todas las posibilidades que este software permite, para este proyecto emplearemos las siguientes:

- Sistema FV

En primer lugar, elegiremos la opción “Rendimiento de un sistema FV conectado a red”, dado que es la más habitual cuando en nuestro país, un particular, ajeno a la industria de la generación eléctrica, desea instalar paneles solares en un terreno propio.

- Base de datos de radiación solar

La herramienta cuenta con 5 bases de datos de radiación solar diferentes con una resolución temporal horario. PVGIS-SARAH2 (0.05° x 0.05°) es una base de datos está basada en el algoritmo desarrollado por CMSAF y sustituye a su predecesora SARAH-1. Se encuentra disponible en Europa, África, Asia y partes de América del Sur. Intervalo temporal: 2005-2020 (European Commission, 2024). La escogemos por ser la más actualizada de las bases de datos disponibles. Todos los cálculos de este trabajo se nutrirán de esta base de datos satélite.

- Tecnología FV

PVGIS ofrece tres posibilidades: células de Silicio cristalino, módulos de lámina delgada de CIS (CuInSe) (también conocidos como de Silicio amorfo) o CIGS (CuInGaSe) y módulos de lámina delgada de Teluro de Cadmio (CdTe) (European Commission, 2024).

Investigando el sector, encontramos que el Silicio cristalino es la solución comercial que mayor rendimiento ofrece (REPSOL, 2022), porque lo que acudimos al mercado de los paneles solares en búsqueda de un panel de esta tecnología, de características intermedias entre un panel solar de uso doméstico y el de una gran explotación de una empresa eléctrica. Encontramos un módulo comercial, de silicio monocristalino y 132 células, con las siguientes especificaciones técnicas.

**Tabla 4***Datos eléctricos*

Potencia máxima nominal (Pmax) [W]	650
Voltaje de circuito abierto (Voc) [V]	45.65
Voltaje de potencia máximo (Vmp) [V]	37.29
Corriente de cortocircuito (Isc) [A]	18.49
Corriente de potencia máxima (Imp) [A]	17.44
Eficiencia del módulo [%]	20.92%
Tolerancia de potencia	0~+5W
Coefficiente de temperatura de Isc ( $\alpha_{Isc}$ )	0.046%/°C
Coefficiente de temperatura de Voc ( $\beta_{Voc}$ )	-0.277%/°C
Coefficiente de temperatura de Pmax ( $\gamma_{Pmp}$ )	-0.351%/°C
STC	Irradiancia 1000W / m <sup>2</sup> , temperatura de celda 25°C, AM1.5G

**Tabla 5***Datos mecánicos*

Peso	35,8 kg ± 3%
Dimensiones	2384 mm × 1303 mm × 35 mm
Tamaño de la sección transversal del cable	4 mm <sup>2</sup>
No. de celdas	132(6x22)
Caja de conexiones	IP68, 3 diodos
Conector	Control de calidad 4,10 (1000 V) / Control de calidad 4,10-35 (1500 V)
Longitud del cable (conector incluido)	1400 mm (+) / 1400 mm (-)
Configuración de empaque	30 piezas / paleta, 540 piezas / contenedor de 40 pies

- Potencia FV pico instalada [kW]:

Para calcular esta variable, la web nos ayuda con la siguiente fórmula:

$$Potencia\ FV\ pico\ instalada = \frac{1kW}{m^2} * \text{área} * \frac{eficiencia}{100} \quad (1)$$

Así que, con los datos técnicos de las placas solares que vamos a instalar:

$$Potencia\ FV\ pico\ instalada = \frac{1\ kW}{m^2} * \text{área} * \frac{20,92}{100}$$

El área será la suma de todos los paneles solares instalados sobre la cubierta, así que primero debemos hallar el área de esta. Conocemos el valor de la altura mínima, 7m, y la luz de la nave, 24m. Así que el valor del área de la cubierta dependerá de la pendiente de esta. Aplicando trigonometría, cada falda de la cubierta (una o dos aguas) será un triángulo rectángulo, del que conocemos el cateto contiguo (24m) y el ángulo (pendiente cubierta) entre cateto contiguo e hipotenusa. Esta última será nuestra incógnita.

$$hipotenusa\ (m) = \frac{cateto\ contiguo}{\cos(pendiente\ cubierta)} \quad (2)$$

El área de la cubierta será:

$$área\ cubierta\ (m^2) = hipotenusa \cdot longitud\ nave \quad (3)$$

Por último, aplicamos un coeficiente del 95%, sobre el total del área de la cubierta, ya que es imposible cubrir todo el tejado con módulos solares.

$$área\ efectiva\ solar\ (m^2) = 0,95 \cdot área\ cubierta \quad (4)$$

- Pérdidas del sistema

Por defecto el programa asume un 14%, así que respetaremos este dato.

- Posición del montaje:

La solución que hemos decidido aplicar sobre el tejado de las naves industriales será la de anclar los paneles solares sobre una cubierta de tipo panel sándwich. Se trata de una solución técnicamente viable siempre y cuando se realice un breve estudio de cargas (Panelflix, 2023).

**Tabla 6***Carga hipótesis de presión [kg/m<sup>2</sup>]*

Espesor del panel (mm)	150	200	250	300	350	400
30	235	190	135	95	70	-
40	260	195	150	125	80	50
50	270	220	150	165	90	65
60	285	270	205	155	135	100
80	300	285	210	165	145	110

*Nota.* (Panelflix, 2023)

Como indica la Tabla 6 perteneciente a la ficha técnica, un panel sándwich de espesor 80mm y 150mm de luz para cada vano, podrá soportar 300 kg/m<sup>2</sup>.

Dado que el módulo solar tiene una masa de 35,8 kg y un área de 3,11 m<sup>2</sup>, se trata de un peso de 11,51 kg por metro cuadrado de panel. Por tanto, el panel sándwich elegido es más que suficiente para soportar el peso de las placas solares y de los carriles que se emplearán para sujetarlas, que irán atornillados al panel sándwich y nos fijarán los módulos a este.

**Figura 6***Módulo solar instalado sobre panel sándwich con carriles**Nota.* (Panelflix, 2023)

PVGIS permite elegir entre dos opciones: montaje libre o sobre el tejado. Nuestra solución, como hemos visto, sitúa las placas sobre un panel sándwich, que permitirá una ligera ventilación a los módulos solares. Aun así, si no se va a garantizar una correcta ventilación gracias a un montaje específico, la herramienta recomienda ser conservadores y seleccionar la opción de placas sobre el tejado (European Commission, 2024).

- **Inclinación**

La inclinación es el ángulo de los módulos respecto al plano horizontal en sistemas con montaje fijo, como lo es el nuestro, en que los paneles no se moverán a lo largo del día ni del año.

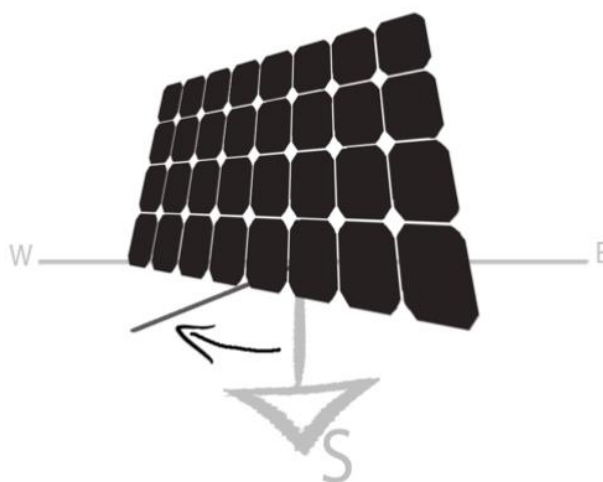
En primera instancia, marcamos la opción de optimizar la inclinación, para averiguar, cuál será el ángulo ideal para nuestra ubicación. PVGIS nos arroja un valor de  $36^\circ$ , una pendiente excesivamente pronunciada para una cubierta de nave industrial. De hecho, a lo largo de este estudio, trabajaremos con una ventana de entre cinco y quince grados.

- **Azimut**

El azimut es el ángulo que forma el plano frontal de los paneles con la dirección Sur. El Este se indica a  $-90^\circ$  y el Oeste  $90^\circ$ .

### **Figura 7**

*Ejes de referencia para ángulo azimut*



Nota. La orientación Sur se representa con  $0^\circ$ , el Este con  $+90^\circ$ , el Oeste con  $-90^\circ$  y el Norte con  $180^\circ$  (European Commission, 2024).

Si marcamos de nuevo la opción de optimizar, encontraremos la orientación con la que sacar el máximo rendimiento a un módulo solar en la ubicación que hemos seleccionado. El software con el que estamos trabajando señala 2° como el valor óptimo de ángulo azimut. Para el caso de referencia, en el que la orientación es Sur, hemos considerado los 0° exactos, para facilitar el cálculo de cargas de viento que realiza Robot. La diferencia de estos dos grados en términos de generación fotovoltaica anual es despreciable.

A lo largo del proyecto, introduciremos diferentes valores de azimut, dependiendo de cómo orientemos la nave, y, por tanto, las placas sobre su cubierta.

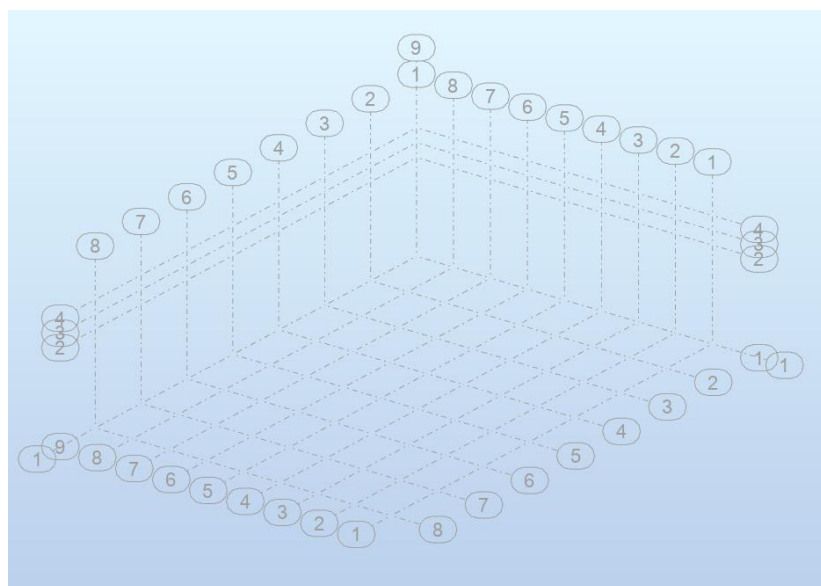
### 2.2.2. Robot Structural Analysis

Para el diseño y cálculo estructural, se utilizará el software del grupo Autodesk, **Robot Structural Analysis**. Se trata de un programa con una interfaz intuitiva y reconocible si se ha trabajado en cualquier otro de la plataforma.

Con las dimensiones, diseñaremos las naves industriales. Robot permite hacerlo importando un mallado de Autocad, el software de dibujo 2D del mismo grupo, pero como nuestras naves serán muy similares unas a otras, optaremos por la opción tradicional, a través de líneas de construcción.

#### **Figura 8**

*Líneas de construcción del modelo estructural de referencia*





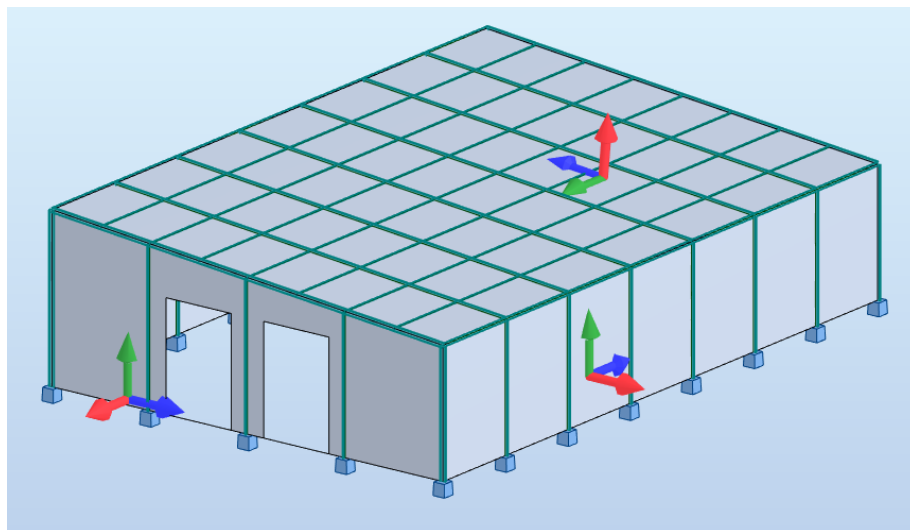
En segundo lugar, crearemos los grupos de barras que hemos identificado. Es importante asignar a todos los grupos, el material escogido, acero S235. Procedemos a construir sobre el mallado las barras, aprovechando los comandos de simetría y copia, para ahorrar tiempo y no cometer errores.

En tercer lugar, colocaremos apoyos empotrados en todos los pilares de la nave sobre el suelo. Su función es simular una zapata en cada pilar o zapata corrida entre todos ellos. El detalle de la cimentación de la nave no atañe a este proyecto, pero tampoco se pretende obviarlo.

A continuación, integramos los cerramientos. Como hemos comentado en la introducción del proyecto, existirán dos huecos en las caras frontal y trasera. Para que la representación de los diagramas más adelante no nos lleve a equívoco, debemos orientar todos los sistemas de ejes de los cerramientos, con el eje Z (en rojo) apuntando hacia el exterior de la nave.

### Figura 9

*Diseño de la nave industrial del caso de referencia*



## 2.3. CARGAS APLICADAS SOBRE LA ESTRUCTURA

Una vez tenemos la primera estructura completamente definida en Robot, es hora de introducir las cargas que deberá soportar. Clasificaremos las cargas en función de su condición de permanente o, por el contrario, variable.

Serán acciones permanentes el peso propio de la estructura y el peso de la cubierta, incluyendo los paneles solares instalados sobre esta.

Por otro lado, serán acciones variables la nieve, el viento y la sobrecarga de uso de la estructura. No tendremos en cuenta cargas de sismo o térmica, dada su nula influencia en el análisis que hemos propuesto.

### 2.3.1. Acción variable de nieve

Para calcular la carga por nieve, acudimos al Documento Básico SE-AE (Seguridad Estructural, Acciones en la edificación, abril 2009).

Esta normativa nos muestra la fórmula a utilizar para calcular la carga de nieve ( $q_n$ ):

$$q_n = \mu \cdot s_k \quad (5)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de forma de la cubierta, que para nuestro caso de estudio será 1, porque atendiendo al punto 3.5.3 del Documento Básico SE-AE, nuestra nave tendrá siempre cubiertas con inclinación menor o igual a 30° y no habrá impedimento para el deslizamiento de la nieve.

Y  $s_k$  es el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal, que, atendiendo a la tabla del Anejo E, podemos definirlo en función de la zona y la altitud topográfica del emplazamiento de la nave, gracias a la Figura 10 y a la Tabla 7 (CTE, 2009).

**Figura 10**

Zonas climáticas de invierno



Nota. Figura E.2, Anexo E. Datos Climáticos (CTE, 2009)

Al estar nuestra nave en el municipio de Villanubla, provincia de Valladolid, se trata de la zona 3. Por otra parte, el terreno escogido tiene una altitud de 843 m.

**Tabla 7**

Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal [kN/m<sup>2</sup>]

Zona de clima invernal (según Figura 10)							
Altitud (m)	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	0,3	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
1000	1,7	1,5	0,7	1,2	0,9	1,2	0,2
1200	2,3	2,0	1,1	1,9	1,3	2,0	0,2
1400	3,2	2,6	1,7	3,0	1,3	3,3	0,2
1600	4,3	3,5	2,6	4,6	2,5	5,5	0,2
1800	-	4,6	4,0	-	-	9,3	0,2
2200	-	8,0	-	-	-	-	-

Nota. Tabla E.2, Anejo E. Datos climáticos (CTE, 2009)

Interpolando entre los valores de 800 y 900 metros de altitud, para la zona 3, obtenemos un valor de sobrecarga de nieve de 0,55 kN/m<sup>2</sup>. Podemos calcular la carga de nieve, según la Ecuación 5.

$$q_n = 1 * 0,55 = 0,55 \text{ kN/m}^2$$

Consideraremos una carga distribuida sobre el área de toda la cubierta, de este valor.

### 2.3.2. Acción variable de viento

Con el viento, nuestro objetivo es alcanzar una alta precisión a la hora de calcular la carga de este sobre nuestra estructura. Robot cuenta con un software que genera las cargas de viento en función de la velocidad del viento y la dirección desde la que sopla. Así que, en primera instancia, acudimos de nuevo al Documento Básico SE-AE. En el apartado 3.3.2. Acción del viento, se define la carga de viento ( $q_e$ ) como:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \quad (6)$$

Siendo  $q_b$  la presión dinámica del viento, a la que por defecto se le puede otorgar en España un valor de 0,5kN/m<sup>2</sup>, aunque el documento nos aconseja acudir al Anejo D si buscamos valores más precisos.  $c_e$  y  $c_p$  los coeficientes de exposición y de presión, respectivamente.

Según el mapa de la Figura 36 (Anexo 1), nuestra construcción se ubica en la zona A, y que por tanto, debemos considerar una velocidad básica del viento de 26 m/s y, por consiguiente, un valor de 0,42 kN/m<sup>2</sup> de presión dinámica.

A través de diferentes tablas calcularíamos los coeficientes de exposición y de presión, dividiendo la nave en múltiples zonas en función de su cubierta. Pero como decimos, esto no nos permitiría explotar el software de simulación de viento de Robot.

Por tanto, se ha tomado la decisión de acudir a los registros de valores climatológicos históricos de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), ya que como se ha enunciado, el municipio al que pertenece la nave cuenta con una estación meteorológica desde 1981. Los valores registrados son los siguientes:

**Tabla 8**

*Rachas máximas históricas de viento [km/h]*

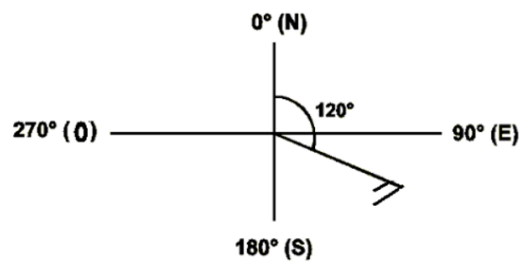
Racha máx. (km/h)	133	121	101	103	95	108	95	97	90	121	121	121	133
Dirección	230	260	230	250	230	180	110	180	140	200	230	230	230
Año	1971	1989	1965	1961	1969	1982	1979	1965	2004	1968	1968	1981	1971

Nota. (AEMET, 2024)

Se observa un claro patrón en la dirección del viento de las mayores rachas históricas. Estas, soplaban principalmente entre los 180 y los 260 grados, siendo 0 grados la dirección Norte, como indica la Figura 11, es decir, desde el suroeste.

**Figura 11**

*Ejes de referencia de la dirección del viento*

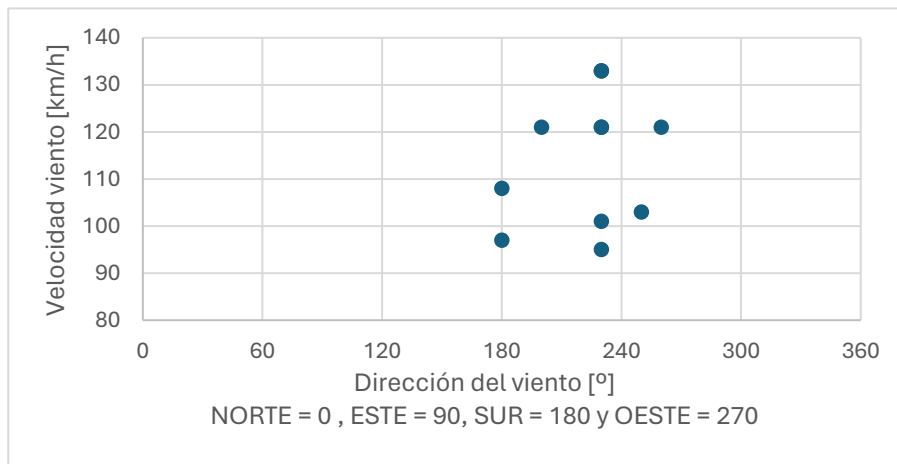


Nota. (AEMET, 2024)

Por tanto, extrayendo los dos valores más alejados, resulta la siguiente gráfica.

**Figura 12**

*Rachas máximas históricas de viento en la estación de Villanubla*

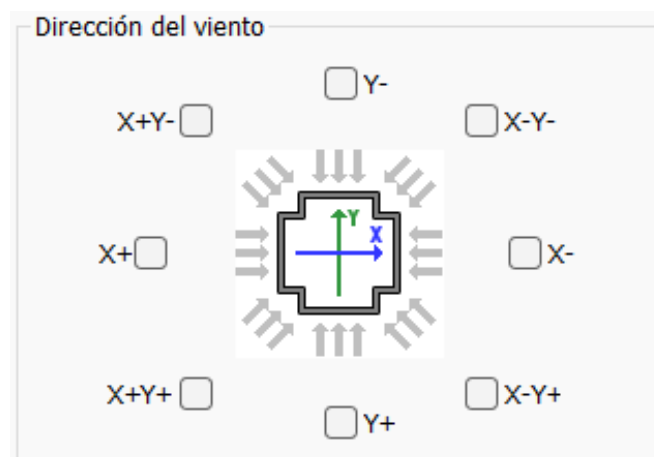


Se obtiene un valor promedio de estas rachas máximas históricas de 114 km/h, o lo que es lo mismo, 31,67 m/s. Este será el valor que introducir en el software de simulación de Robot.

En dicho programa, se escogerán las direcciones del viento en función de la orientación de la nave, teniendo en cuenta el intervalo en que han tenido lugar las rachas máximas históricas. Por ejemplo, para el primer caso de estudio, de cubierta a un agua, la orientación elegida es la de la cubierta mirando al Sur. Queremos simular que el viento sopla desde  $180^\circ$  (Sur),  $225^\circ$  (Suroeste) y  $270^\circ$  (Oeste), por lo que, según nuestro sistema de ejes globales, debemos marcar: X+, X+Y- e Y-, respectivamente.

**Figura 13**

*Desplegable de selección de direcciones del viento*



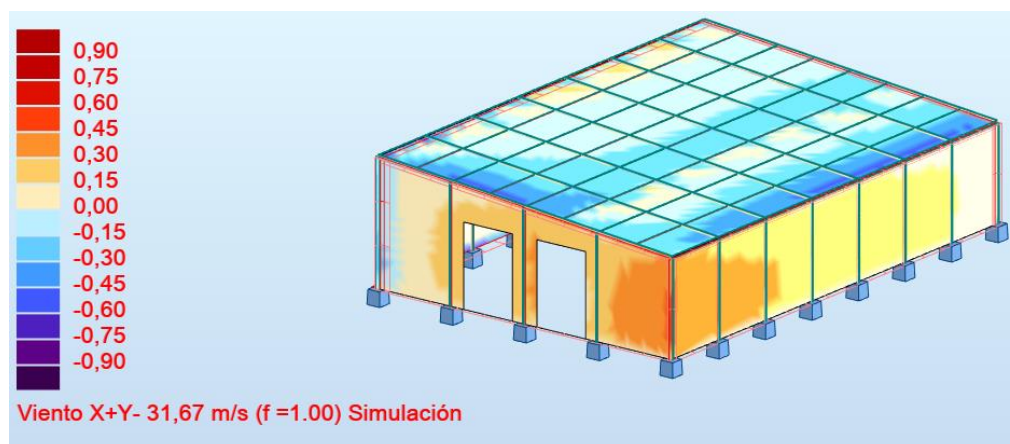
Este software de cálculo de cargas de viento, también nos permite introducir un perfil de viento específico, pero dado que, en los alrededores de la nave, no existen edificaciones que alteren la influencia del viento sobre nuestra estructura, no modificaremos el perfil unitario que por defecto se ofrece.

Procedemos a realizar la simulación, y Robot, además de crear las cargas, muestra un mapa de presión para cada dirección de viento elegida, en la que, gracias a los colores, se identifican fácilmente las zonas más y menos afectadas.

Robot tiene en cuenta los huecos presentes en los cerramientos, por donde se permitirá el paso del viento, generando presiones negativas, de succión.

Figura 14

Mapa de presiones debidas al viento soplando desde el Suroeste [KPa]



### 2.3.3. Acción variable de sobrecarga de uso

Por otra parte, calculamos la posible sobrecarga de uso de la cubierta de la nave industrial, según el Documento Básico SE-AE.

Tabla 9

Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m <sup>2</sup> ]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 <sup>(1)</sup>
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente <sup>(2)</sup>			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación <sup>(3)</sup>	G1 <sup>(7)</sup>	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 <sup>(4)(5)</sup>	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) <sup>(5)</sup>	0,4 <sup>(4)</sup>	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Nota. Tabla 3.1, DB: SE-AE (CTE, 2009)

Nuestra categoría de uso es la G (Cubiertas accesibles únicamente para conservación) y como se trata de una cubierta ligera sobre correa, sin forjado, la carga uniforme será de  $0,4 \text{ kN/m}^2$ .

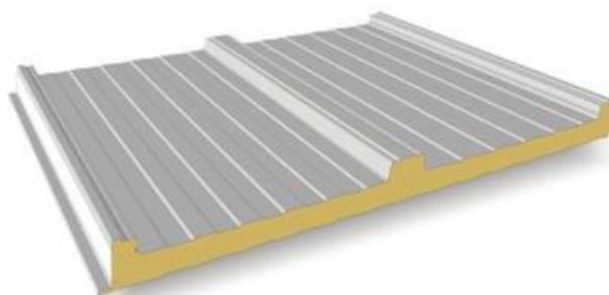
Pero aludiendo al propio documento, la anotación (7) nos dice que la subcategoría de uso G1, que es la nuestra, no se considera concomitante al resto de acciones variables (CTE, 2009). Es lógico, ya que la conservación de la cubierta, nunca se va a realizar en condiciones climatológicas desfavorables, como los casos calculados anteriormente. Además, el valor de carga uniforme de nieve es superior al de sobrecarga de uso. Por consiguiente, no tendremos en cuenta este último en ninguna combinación de cargas.

#### 2.3.4. Acción permanente de peso de la cubierta y las placas solares

Pasamos a las cargas fijas, las que no cambiarán a lo largo del tiempo. Comenzamos calculando el peso de la cubierta. La solución elegida es un panel sándwich de 80mm de espesor, con un peso de  $0,11 \text{ kN/m}^2$ .

#### **Figura 15**

*Panel sándwich comercial*



Nota. (Panelflix, 2023)

Por otra parte, debemos tener en consideración el peso de las placas solares que vamos a instalar sobre la cubierta. Acudiendo a la ficha técnica del comercial que vamos a montar, se indica un valor de  $0,1129 \text{ kN/m}^2$ , que redondearemos a  $0,12 \text{ kN/m}^2$ .



Por tanto, sumando ambos valores, la carga permanente de cubierta y placas será de 0,23 kN/m<sup>2</sup>.

### 2.3.5. Acción permanente de peso propio

Por último, se debe tener siempre en cuenta el peso propio de todas las barras de acero que conforman nuestra estructura. Seleccionando dicha carga en Robot, se calculará automáticamente, en función de los elementos que conformen la nave industrial en cada momento.

## 2.4. COMBINACIONES DE CARGA

Cada caso de estudio requerirá de sus respectivas combinaciones de carga. Todas estarán compuestas por las mismas acciones permanentes: peso propio y de la cubierta con placas, además de las acciones variables de nieve y viento. Pero con esta última, se creará una combinación de cargas por cada dirección desde la que sople el viento, en función de la orientación de la nave.

Para todas ellas, se han aplicado los coeficientes de seguridad que por defecto indica Robot, en función del Eurocódigo 1 (AENOR, 1991), a excepción del viento, porque al haberlo calculado a través de valores máximos registrados en la estación meteorológica más próxima y no a través de la norma, consideramos excesivo el coeficiente de 1,5 que se indica. Estaríamos dimensionando en exceso la acción del viento. Definimos para el viento un coeficiente de 1,2, que nos otorga un margen de seguridad suficiente de cara a la combinación de cargas.

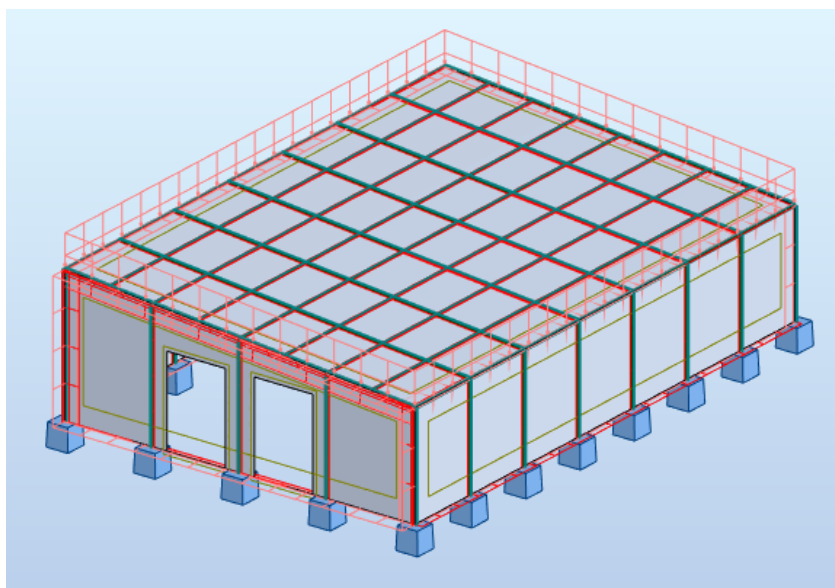
**Tabla 10**

*Casos de carga y sus respectivos coeficientes*

Casos de carga	Coefficiente
Viento	1,2
Nieve	1,5
Peso propio estructural	1,35
Cubierta y paneles solares	1,35

**Figura 16**

*Diagrama de cargas en Robot para el caso de referencia*



# CAPÍTULO 3

## CASO DE REFERENCIA



### 3.1. DATOS DE PARTIDA

A lo largo de este capítulo se desarrollará el primer caso de estudio, el de una nave industrial con cubierta a un agua, orientada al sur y pendiente de la cubierta de cinco grados, que nos servirá de referencia para los futuros casos.

En primer lugar, definimos las dimensiones exactas de la nave, con las ya acotadas en la Tabla 1 y las que se definen según la inclinación de la cubierta.

Con cinco grados de pendiente, el alto máximo de la nave será de 9,092 metros, que redondearemos a 9,1 metros. Por tanto, el área de la cubierta será de 843,15 metros cuadrados, dejando un área efectiva de módulos solares de 800,99 metros cuadrados.

A continuación, se realizarán las combinaciones de cargas. Dado que simularemos que el viento sopla desde tres direcciones diferentes: Sur, Suroeste y Oeste, habrá tres combinaciones de cargas, una para cada dirección del viento. Con las combinaciones listas, es el momento de que Robot calcule los resultados.

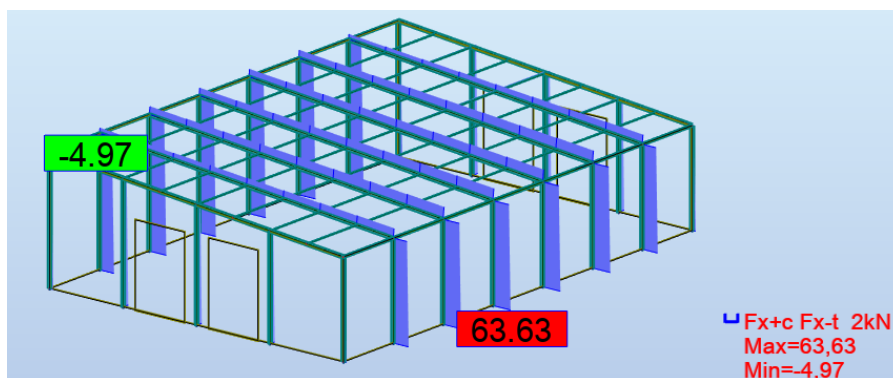
### 3.2. DIAGRAMAS DE ESFUERZOS

El software empleado grafica de manera automática todos los diagramas de esfuerzos, tensiones y reacciones de la estructura diseñada.

Es posible observar, por ejemplo, el diagrama de esfuerzos  $F_x$ , para la combinación lineal que incluye el viento soplando desde el Oeste (además de la acción variable de nieve y las acciones permanentes de peso propio estructural y peso de la cubierta y las placas solares).

**Figura 17**

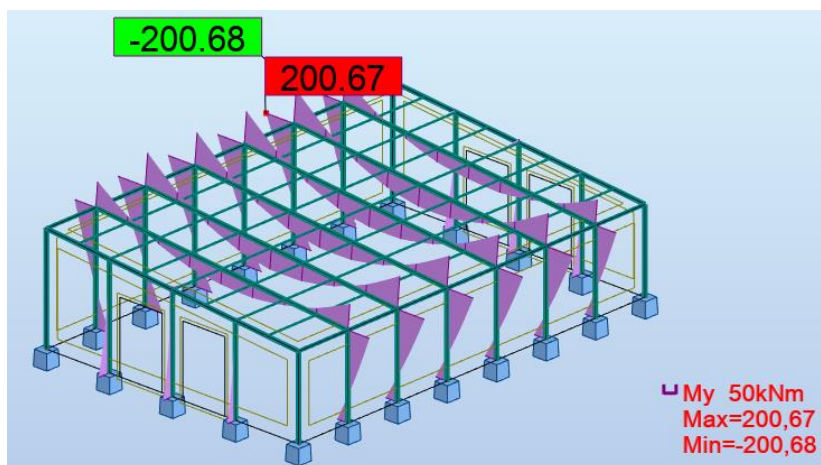
*Diagrama de esfuerzos  $F_x$  con viento soplando desde el Oeste [kN]*



En la Figura 17 se aprecia que las barras más solicitadas para dicho esfuerzo son los pilares de las fachadas laterales. Es en el segundo del lado más bajo donde se alcanza el valor máximo, de 63,63 N.

### Figura 18

Diagrama del momento  $M_y$  con viento soplando desde el Oeste [kNm]



En la Figura 18, se aprecia que los valores máximos, que rondan los 200 Nm coinciden con el máximo esfuerzo sobre el eje Z ( $F_z$ ), en los extremos de los dinteles de la segunda fila.

Por otra parte, es posible estudiar la deformada, que alcanza valores máximos en las correas situadas en el centro de la cubierta, con 43,6 cm. Esto se debe a dos factores principales. En primer lugar, al propio hecho de no tener próximos apoyos en el eje vertical que impidan el desplazamiento de las barras, ya que estas barras deben soportar las cargas verticales de nieve y peso propio de la estructura y la cubierta, y, en segundo lugar, a los esfuerzos de succión ejercidos por el viento a su paso por el interior de la nave.

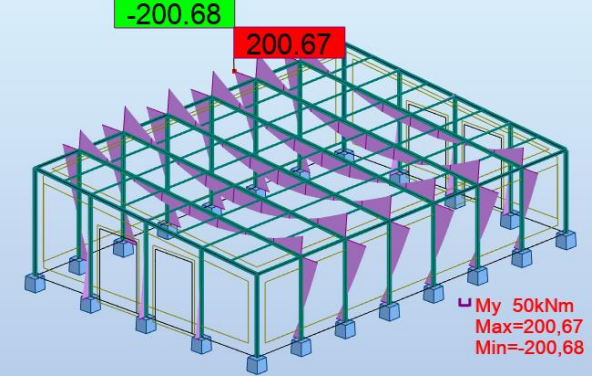
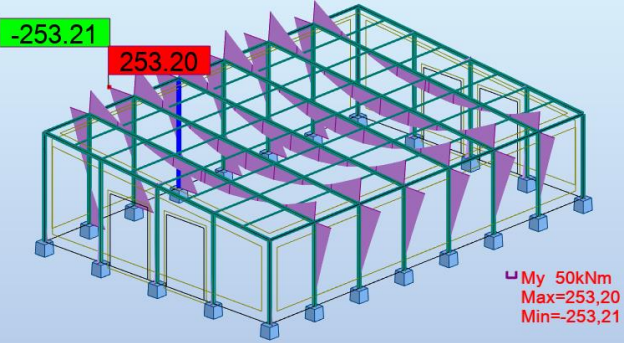
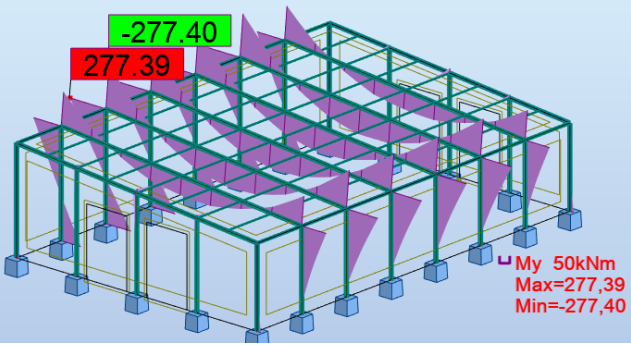
Al comprobar los diagramas de esfuerzos para la combinación de cargas en que el viento sopla desde el Sur, es decir, en el sentido de la cubierta, se aprecian resultados muy similares.

Las barras más solicitadas para el esfuerzo en el eje X son de nuevo los pilares de las fachadas, aunque con valores máximos notablemente más altos, ya que, en este caso, el viento incide directamente sobre estos. Lo mismo sucede con los esfuerzos sobre el eje Z y los momentos sobre el eje Y.

Al realizar una comparativa de los diagramas de barras entre las tres diferentes combinaciones de cargas, se observa que los valores menores tienen lugar para el caso en que el viento sopla desde el Oeste, es decir, contra el pórtico trasero, los valores más altos para el caso en que el viento sopla desde el Sur, o lo que es lo mismo, contra la fachada de menor altura y contra la cubierta, y, de manera lógica, se obtienen unos valores intermedios para el caso en que el viento sopla desde el Suroeste.

**Tabla 11**

*Diagramas de momento  $M_y$  según la dirección en la que sopla el viento [kNm]*

Dirección del viento	Diagrama de momento $M_y$
Oeste	
Suroeste	
Sur	

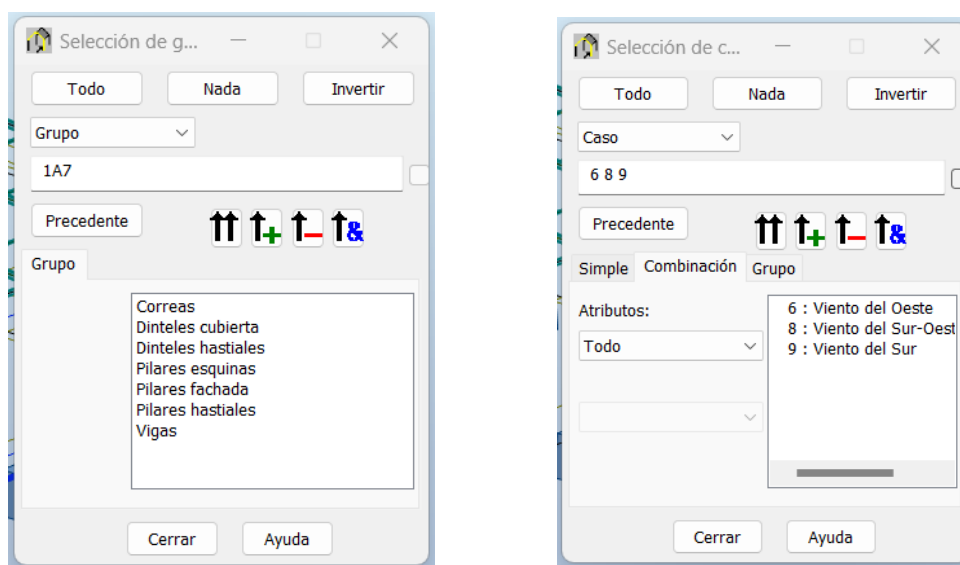
### 3.3. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL

Como se explicó en el segundo capítulo de este documento, el programa de diseño estructural con el que estamos trabajando cuenta con una herramienta de dimensionamiento de las barras que se han introducido en el proyecto.

Por un lado, Robot permite verificar si la estructura cumple con las solicitaciones dadas, ya sea comprobando cada barra individualmente o realizando el análisis por los grupos de barras previamente definidos. Se procede a analizar de esta última manera mencionada. Para ello, se introducen los grupos a analizar (todos los creados) y las combinaciones deseadas (las tres según la dirección del viento).

**Figura 19**

*Selección de grupos de barras y de combinaciones de cargas en Robot*



El programa comprobará, para los casos y/o combinaciones de carga seleccionados, los estados límite últimos de las barras y/o grupos elegidos. Estos estados son las situaciones que, de ser superadas, producen un fallo de la estructura, por rotura o colapso total o parcial, como indica el Código Estructural EN 1990 en el Anejo 18 6.4 (AENOR, 1990).

Para ello, Robot calculará para cada una de las barras de los grupos seleccionados las esbelteces de la barra respecto a los ejes Y y Z de estas, los esfuerzos internos en los puntos característicos de la sección, las tensiones



en dichos puntos, los momentos límites y resistencias últimas y con todos estos datos realizará un control de resistencia de la sección y un control de estabilidad global de la barra.

Para este proyecto, no se ha establecido como objetivo un análisis a pandeo completo de la estructura, ya que no es parte del perímetro de estudio porque no aporta valor a los objetivos perseguidos y dificulta las futuras comparaciones entre soluciones estructurales, pero sí verificará el pandeo para ciertas barras. Por tanto, se ha decidido simplificar las soluciones en cuanto a uniones y demás elementos que afectan al pandeo.

Se despreciarán los efectos del pandeo en las barras que no trabajan principalmente a compresión, como son las vigas de unión entre pilares, los dinteles y las correas de la cubierta.

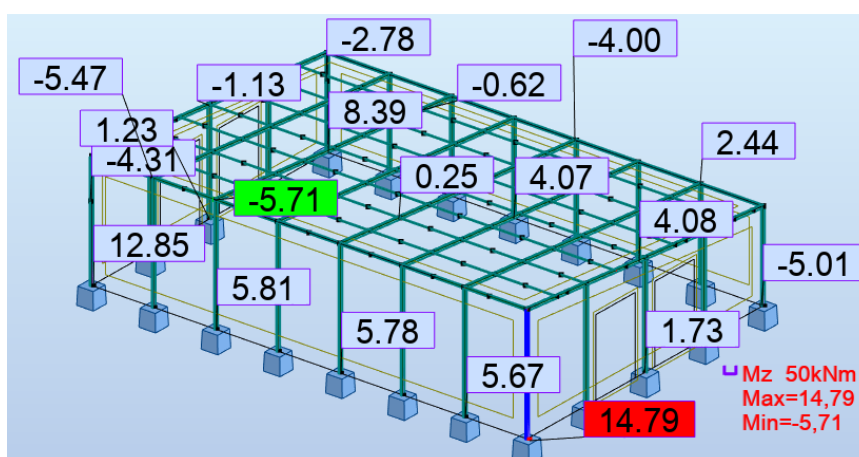
Sí se estudiará el pandeo en los pilares, que tienen grandes esfuerzos de compresión. Pero, con el fin de que los posibles efectos del pandeo no alteren notablemente el dimensionado final de los pilares, se ha optado por emplear arriostramientos cada metro y medio, entre los pilares de la fachada. De esta forma, de cara al programa, la longitud de pandeo de cada pilar será de metro y medio como máximo, y el coeficiente de pandeo de valor 1, porque cada tramo de dicha longitud estará biapoyada entre los arriostramientos.

### 3.3.1. Ejemplificación de cálculos: pilares de esquina

En este apartado, se detallan los métodos de cálculo que el programa realiza para cada barra de la estructura. Para ejemplificarlo usaremos el grupo de pilares situados en las esquinas.

**Figura 20**

*Diagrama del momento flector  $M_z$  para las combinaciones de cargas [kNm]*



En primer lugar, se buscan los puntos más solicitados del conjunto de barras que conforman el grupo. En este caso, en la Figura 20, se observa el máximo valor del momento flector respecto al eje z en la base del pilar número 101.

A continuación, se muestran los valores de los esfuerzos calculados por Robot, para este caso de estudio. Estos se indican con el sufijo “Ed”:

$$N_{Ed} = 11,89 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed} = 7,01 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = -10,33 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Ed,max} = -10,33 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Ed} = 6,48 \text{ kN}$$

$$M_{z,Ed} = 14,79 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 14,79 \text{ kNm}$$

$$T_{t,Ed} = -0,01 \text{ kNm}$$

$N_{Ed}$  es el valor de cálculo del esfuerzo axial de compresión

$V_{Ed}$  es el valor de cálculo del esfuerzo cortante

$M_{y,Ed}$  es el valor de cálculo del momento flector

$T_{t,Ed}$  es el valor de cálculo del momento torsor

El siguiente paso consiste en hallar las resistencias características de la sección, para poder contrastarlas con los esfuerzos calculados y verificar que estos últimos son siempre menores que las resistencias características.

Antes de calcular ningún esfuerzo, detallamos las características dimensionales del perfil elegido de partida para este grupo. Se trata de un **IPN230**.

**Figura 21***Dimensiones del perfil IPN 320*

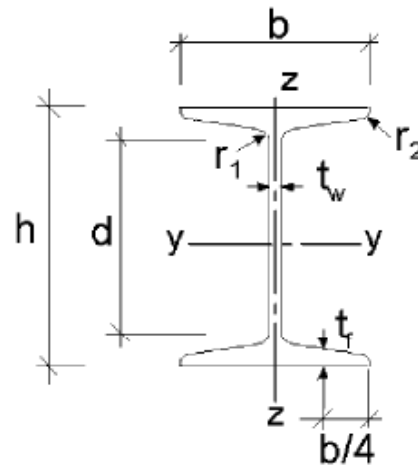
$h = 32,0 \text{ cm}$  es la altura de la sección

$d = 26,2 \text{ cm}$  es la altura del alma

$b = 13,1 \text{ cm}$  es la anchura de sección

$t_w = 1,1 \text{ cm}$  es el espesor del alma

$t_f = 1,7 \text{ cm}$  es el espesor del ala



Estas dimensiones, nos permitirán hallar la clase a la que pertenece la sección elegida. En función de la clase, se determinarán más adelante las resistencias características.

Según el libro de “Estructuras metálicas para edificación” (Monfort Leonart, 2002), para clasificar en las cuatro clases una barra, debemos identificar primero a qué clase pertenecen el alma y el ala comprimidas, comparando la relación de compresión con el límite de esbeltez.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (7)$$

Gracias a que el material empleado en todas las barras es un acero normalizado S235 se deduce el límite elástico de este:  $f_y = 235 \text{ MPa}$ . Por tanto, según la Ecuación 7:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

A continuación, con las dimensiones de la nave, hallaremos a qué clase pertenecen el alma y el ala de la sección, y con ello, la sección en su conjunto. Esta identificación requiere de calcular la relación ancho-alto de las dos partes de la sección.

Por un lado, para el alma:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{26,2}{1,1} = 23,82$$

**Tabla 12**

*Clase del alma para secciones laminadas en caliente*

$\frac{d}{t_w}$	Clase
$\leq 33 \cdot \varepsilon$	1
$\leq 38 \cdot \varepsilon$	2
$\leq 42 \cdot \varepsilon$	3
$> 33 \cdot \varepsilon$	4

Nota. (Monfort Leonart, 2002)

Realizamos la comparación.

$$\frac{d}{t_w} = 23,82 \leq 33 = 33 \cdot \varepsilon$$

Luego el alma de la barra IPN 320 de acero S235 es **clase 1**.

Por el otro lado, para el ala:

$$\frac{\frac{b}{2} - \left(\frac{t_f}{2} + t_f\right)}{t_f} = \frac{13,1}{2} - \left(\frac{1,1}{2} + 1,1\right)}{1,7} = \frac{6,55 - 1,65}{1,7} = \frac{4,9}{1,7} = 2,88$$

**Tabla 13**

*Clase del ala para secciones laminadas en caliente*

$\frac{\frac{b}{2} - \left(\frac{t_f}{2} + t_f\right)}{t_f}$	Clase
$\leq 9 \cdot \varepsilon$	1
$\leq 10 \cdot \varepsilon$	2
$\leq 14 \cdot \varepsilon$	3
$> 14 \cdot \varepsilon$	4

Nota. (Monfort Leonart, 2002)

Realizamos la comparación.

$$\frac{\frac{b}{2} - \left(\frac{t_f}{2} + t_f\right)}{t_f} = 2,88 \leq 9 = 9 \cdot \varepsilon$$

Luego el ala de la barra IPN 320 de acero S235 es también de **clase 1**.

Al tratarse de clase 1 el alma y el ala, la barra en su conjunto será clase 1.

Por otra parte, el programa cuenta con su propio catálogo técnico de perfiles normalizados, y pasa este caso de perfil laminado en caliente, indica los siguientes valores:

#### Eje Y

$$A_y = 47,50 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 12488,30 \text{ cm}^4$$

$$W_{ply} = 912,15 \text{ cm}^3$$

#### Eje Z

$$A_z = 38,32 \text{ cm}^2$$

$$I_z = 554,89 \text{ cm}^4$$

$$W_{plz} = 143,31 \text{ cm}^3$$

#### Eje X

$$A_x = 77,68 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 74,60 \text{ cm}^4$$

Siendo:

$A_x$  el área de la sección

$A_y, A_z$  las áreas eficaces en cortante en las respectivas direcciones Y y Z

$I_x$  el cortante de torsión

$I_y, I_z$  los momentos de inercia respecto a los ejes Y y Z

$W_{ply}, W_{plz}$  los módulos de sección plásticos respecto a los ejes Y y Z

Ahora sí, es el momento de calcular el esfuerzo axial a compresión (para secciones de clase 1):

$$N_{c,Rd} = \frac{f_y \cdot A_x}{\gamma_{M0}} \quad (8)$$

Donde  $\gamma_M$  es un coeficiente parcial de resistencia al acero.

Se le otorga el valor de 1 a  $\gamma_{M0}$  y a  $\gamma_{M1}$  porque se cumplen simultáneamente los requisitos que especifica la norma EAE:

- Tolerancias “más estrictas” según el Artículo 80.
- Garantías adicionales para el acero según el Artículo 84. Se deberá garantizar que el límite elástico del acero empleado en la obra presente una dispersión acorde con el coeficiente parcial reducido, según un análisis basado en la teoría de fiabilidad estructural.
- Control de ejecución intenso según el Artículo 89.

(Ministerio de Fomento, 2012)

Por consiguiente, con los datos de nuestra barra, aplicamos la Ecuación 8.

$$N_{c,Rd} = \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2} \cdot 77,68 cm^2}{1} = 1825,47 kN$$

Y comprobamos que el valor del esfuerzo calculado es menor que este último:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{11,89}{1825,47} = 0,01 < 1,00 \quad \checkmark$$

En segundo lugar, calcularemos el momento flector alrededor de cada eje principal:

$$M_{c,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl}}{\gamma_{M0}} \quad (9)$$

Para el eje Y:

$$M_{y,c,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl,y}}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2} \cdot 912,15 cm^3}{1} = 214,36 kNm$$

Se confirma es mucho mayor que el momento flector calculado:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,c,Rd}} = \frac{10,33}{214,36} = 0,05 < 1,00 \quad \checkmark$$

Y para el eje Z, también aplicando la Ecuación 9.

$$M_{z,c,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl,z}}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2} \cdot 143,31 cm^3}{1} = 33,68 kNm$$

Que es de nuevo superior al momento flector calculado respecto del eje Z:

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,c,Rd}} = \frac{14,79}{33,68} = 0,44 < 1,00 \quad \checkmark$$

Aunque esta vez estamos notablemente más próximos al límite, comparando con el eje Y.

Seguidamente, analizamos el esfuerzo cortante.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (10)$$

Donde  $A_v$  es el área a cortante, que conocemos gracias a las especificaciones técnicas del perfil empleado. Calculamos la resistencia última a cortante respecto a cada eje de la sección y verificamos que cumple.

$$V_{y,c,Rd} = \frac{47,50 \cdot \left( \frac{23,5 kN/cm^2}{\sqrt{3}} \right)}{1} = 644,51 kN$$

$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{y,c,Rd}} = \frac{7,01}{644,51} = 0,01 < 1,00 \quad \checkmark$$

$$V_{z,c,Rd} = \frac{38,32 \cdot \left( \frac{23,5 kN/cm^2}{\sqrt{3}} \right)}{1} = 519,94 kN$$

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,c,Rd}} = \frac{6,48}{519,94} = 0,01 < 1,00 \quad \checkmark$$

El siguiente paso consiste en comprobar la torsión. Para ello, se debe calcular la resistencia de cálculo a torsión de la sección transversal.

El programa aporta los valores de tensiones tangenciales debidas a la torsión de St. Venant  $T_{t,Ed}$ , respecto de cada eje:

$$\tau_{ty,Ed} = 0,26 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tz,Ed} = 0,17 \text{ MPa}$$

Con lo que es posible verificar la acción combinada del esfuerzo cortante y el momento torsor. Para ello, la resistencia plástica de cálculo a cortante, considerando los efectos de torsión, debería reducirse de  $V_{pl,Rd}$  a  $V_{pl,T,Rd}$ .

Para secciones en I o en H:

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)} \cdot \frac{V_{pl,Rd}}{\gamma_{M0}}} \quad (11)$$

Luego despejamos la Ecuación 11:

$$V_{y,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{0,26}{1,25 \cdot \left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right)} \cdot \frac{644,51}{1}} \cdot 644,51 = 644,02 \text{ kN}$$

$$V_{z,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{0,17}{1,25 \cdot \left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right)} \cdot \frac{519,94}{1}} \cdot 519,94 = 519,68 \text{ kN}$$

Y comprobamos de nuevo, que los valores calculados de esfuerzo cortante son menores que dicha acción combinada, aunque al ser tan mínimo el cambio, se aprecia a simple vista que volverán a cumplir.

$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{y,T,Rd}} = \frac{7,01}{644,02} = 0,01 < 1,00 \quad \checkmark$$

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{z,T,Rd}} = \frac{6,48}{519,68} = 0,01 < 1,00 \quad \checkmark$$



Por otro lado, la norma nos indica que cuando exista esfuerzo axial, es recomendable realizar una reducción sobre la resistencia plástica de cálculo a flexión, a no ser que se cumplan las siguientes condiciones:

- Alrededor del eje y-y:

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{pl,Rd} \quad (12)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \cdot d \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (13)$$

Así que comprobamos si estas dos condiciones se cumplen para nuestro caso:

$$11,89 \text{ kN} \leq 0,25 \cdot 1825,47 = 456,37 \text{ kN} \quad \checkmark$$

$$11,89 \text{ kN} \leq \frac{0,5 \cdot 26,2 \cdot 1,1 \cdot 23,5}{1} = 338,64 \text{ kN} \quad \checkmark$$

- Alrededor del eje z-z:

$$N_{Ed} \leq \frac{d \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (14)$$

$$11,89 \text{ kN} \leq \frac{26,2 \cdot 1,1 \cdot 23,5}{1} = 667,27 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Luego en este caso concreto, no será necesario realizar la reducción sobre la resistencia plástica de cálculo a flexión.

A continuación, se analizará la resistencia a pandeo. Como enunciamos al comienzo de este apartado de cálculos, esta comprobación solo se realizará para los pilares de la estructura, dado que son las únicas barras que sufren unos esfuerzos de compresión relevantes.

El primer paso será hallar la resistencia de cálculo a pandeo del elemento comprimido,  $N_{b,Rd}$ , que para secciones de clases 1, 2 y 3 sigue la siguiente fórmula:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (15)$$

Siendo  $\chi$  un factor de reducción del pandeo. Este factor se calcula en función de la esbeltez adimensional  $\bar{\lambda}$  y de las curvas de pandeo, de acuerdo con:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \text{ siempre que } \chi \leq 1 \quad (16)$$

Siendo:

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (17)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad (18)$$

Donde  $\alpha$  es un coeficiente de imperfección y  $N_{cr}$  se trata del esfuerzo axil crítico elástico para el modo de pandeo considerado, también conocido como la carga crítica de Euler:

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{\beta \cdot L}\right)^2 \cdot E \cdot I \quad (19)$$

Recordemos que, para el grupo de pilares de esquina, se había establecido una longitud de pandeo máxima alrededor de ambos ejes de 1,5 metros y un coeficiente de pandeo de 1. Con todo ello, procedemos a hallar la carga crítica de Euler para los ejes Y y Z:

$$N_{cr,y} = \left(\frac{\pi}{1 \cdot 1,5}\right)^2 \cdot 210000 \cdot 12488,30 \cdot \frac{1}{10^5} = 115037,61 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = \left(\frac{\pi}{1 \cdot 1,5}\right)^2 \cdot 210000 \cdot 554,89 \cdot \frac{1}{10^5} = 5111,48 \text{ kN}$$

Ahora, hallaremos los valores de la esbeltez adimensional, gracias a la ecuación 18.

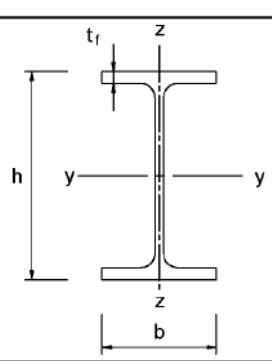
$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{77,68 \cdot 23,5}{115037,61}} = 0,13$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{77,68 \cdot 23,5}{5111,48}} = 0,60$$

El siguiente paso no es otro que descubrir qué curva de pandeo debemos utilizar. Para lograrlo, emplearemos la Tabla 6.2 de la norma EN 1993-1-1.

**Tabla 14**

*Elección de la curva de pandeo para perfiles laminados*

Sección transversal	Límites	Pandeo alrededor del eje	Curva de pandeo		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
	$h/b > 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	a b	a <sub>0</sub> a <sub>0</sub>
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	d d	c c

Nota. Tabla 6.2, Eurocódigo 3, EN 1993-1-1 (UNE, 2013).

En nuestro caso, empleamos un acero S235 y dimensionalmente:

$$\frac{h}{b} = \frac{32}{13,1} = 2,44 > 1,2 \quad \text{y} \quad t_f = 17 \text{ mm} \leq 40 \text{ mm}$$

Luego, para el pandeo alrededor del eje y-y, utilizaremos la curva de pandeo “a” y para el pandeo alrededor del eje z-z, la curva de pandeo “b”.

Ahora, según la Tabla 6.1, hallamos el valor del coeficiente de imperfección para cada caso de pandeo.

**Tabla 15**

*Coeficiente de imperfección según curva de pandeo*

Curva de pandeo	a0	a	b	c	d
Coeficiente de imperfección $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Nota. Tabla 6.1 (UNE, 2013)

Por consiguiente:

$$\alpha_y = 0,21$$

$$\alpha_z = 0,34$$

Proseguimos despejando los valores de  $\Phi$ , según la Ecuación 17.

$$\Phi_y = 0,5 \left[ 1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21(0,13 - 0,2) + 0,13^2] = 0,50$$

$$\Phi_z = 0,5 \left[ 1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 [1 + 0,34(0,60 - 0,2) + 0,60^2] = 0,75$$

Y finalmente, se halla el factor de reducción de pandeo para cada eje, según la Ecuación 17.

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,5 + \sqrt{0,5^2 - 0,13^2}} = 1,017$$

Como  $\chi_y = 1,017 > 1$ , utilizaremos  $\chi_y = 1$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,75 + \sqrt{0,75^2 - 0,60^2}} = 0,84$$

Es ahora, con todos los datos necesarios, cuando se procede a calcular la resistencia de cálculo a pandeo del elemento comprimido, según la Ecuación 15.

$$N_{y,b,Rd} = \frac{\chi_y A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1 \cdot 77,68 \cdot 23,5}{1} = 1825,47 \text{ kN}$$

$$N_{z,b,Rd} = \frac{\chi_z A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,84 \cdot 77,68 \cdot 23,5}{1} = 1530,22 \text{ kN}$$

Comprobamos que el esfuerzo axial calculado no supera el menor de las dos resistencias de cálculo a pandeo halladas:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{z,b,Rd}} = \frac{11,89}{1530,22} = 0,01 < 1,00 \quad \checkmark$$

A continuación, realizamos el control de estabilidad global de la barra. Para ello, confrontaremos los valores hallados de esbeltez para cada eje, con la esbeltez máxima, que por defecto se establece en 210. La esbeltez de la sección transversal para cada eje se halla con la siguiente fórmula.

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (20)$$

Donde:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{f_y}} = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \quad \text{para el acero que empleamos (S235)}$$

Comprobamos:

$$\lambda_y = \bar{\lambda}_y \cdot \lambda_1 = 0,13 \cdot 93,9 = 11,83 < \lambda_{max} = 210,00 \quad \checkmark$$

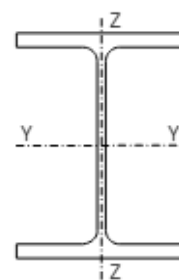
$$\lambda_z = \bar{\lambda}_z \cdot \lambda_1 = 0,60 \cdot 93,9 = 56,12 < \lambda_{max} = 210,00 \quad \checkmark$$

Al cumplir la estabilidad para ambos ejes, podemos afirmar que **el perfil es estable**.

Por último, se realiza un estudio de elementos sometidos a compresión y flexión. Para ello, se comprobarán las siguientes condiciones: Ecuaciones 21 y 22.

$$\text{Eje Y} \quad \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed,max}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed,max}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (21)$$

$$\text{Eje Z} \quad \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed,max}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed,max}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (22)$$



Donde:

Los valores de resistencia característica ("Rk") son ya conocidos, los calculados a lo largo de este apartado.

$\chi_{LT}$  es el coeficiente de reducción por pandeo lateral, que tendrá valor de 1.

Y  $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$  son los coeficientes de interacción entre la flexión en los dos ejes, que Robot calcula a través del Anexo A de la norma EN-1993-1-1. Existen dos métodos según la norma mencionada, ambos válidos. El programa emplea el primer método. En los Anexos de este documento se adjuntan las tablas del Anexo 1 de la norma, para hallar estos valores.

Su valor es el siguiente:

$$k_{yy} = 1$$

$$k_{yz} = 0,68$$

$$k_{zy} = 0,53$$

$$k_{zz} = 1$$

Con todo ello, es finalmente posible comprobar numéricamente las dos últimas condiciones, según las Ecuaciones 21 y 22.

$$\frac{11,89}{1 \cdot \frac{1825,47}{1}} + 1 \cdot \frac{10,33}{1 \cdot \frac{214,36}{1}} + 0,68 \cdot \frac{14,79}{\frac{33,68}{1}} = 0,35 < 1 \quad \checkmark$$

$$\frac{11,89}{0,85 \cdot \frac{1825,47}{1}} + 0,53 \cdot \frac{10,33}{1 \cdot \frac{214,36}{1}} + 1 \cdot \frac{14,79}{\frac{33,68}{1}} = 0,47 < 1 \quad \checkmark$$

Vemos que se satisfacen ambas condiciones.




El valor de ratio de sollicitación de Robot devuelve, será el mayor de todas las comprobaciones realizadas. En este caso, se trata de 0,47, la comprobación del elemento más sollicitado sometido a compresión y flexión.

### 3.3.2. Verificación y dimensionado de barras

Realizando el análisis completo de verificación para todos los grupos, Robot devuelve los siguientes valores.

**Figura 22**

*Resultados de la verificación de grupos de barras en Robot*

Barra	Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
<b>Grupo : 1 Pilares esquinas</b>						
101 Pilares esqu	 IPN 320	ACERO	11.83	56.12	0.47	6 Viento del Oeste
<b>Grupo : 2 Pilares hastiales</b>						
6 Pilares hastiale	 IPN 320	ACERO	47.34	56.12	0.46	6 Viento del Oeste
<b>Grupo : 3 Pilares fachada</b>						
75 Pilares fachad	 IPN 320	ACERO	86.12	56.12	1.68	9 Viento del Sur
<b>Grupo : 4 Dinteles hastiales</b>						
103 Dinteles has	 IPE 270	ACERO	53.65	49.62	0.21	9 Viento del Sur
<b>Grupo : 5 Dinteles cubierta</b>						
77 Dinteles cubie	 IPE 270	ACERO	128.77	49.62	5.96	9 Viento del Sur
<b>Grupo : 6 Vigas</b>						
8 Vigas_8	 IPN 200	ACERO	62.55	267.83	0.29	9 Viento del Sur
<b>Grupo : 7 Correas</b>						
96 Correas_96	 IPE 100	ACERO	122.85	402.65	10.12	9 Viento del Sur

Se observa que hay grupos de barras que hemos dimensionado en defecto, como son todas las que tienen ratio de solicitud superior a uno, y, por tanto, el perfil marcado como incorrecto: pilares de fachada, dinteles de cubierta y correas. Por el contrario, hay grupos de barras que hemos dimensionado en exceso, ya que su ratio de solicitud es verdaderamente pequeño: pilares esquinas, pilares hastiales, dinteles hastiales y vigas.

Para lograr unos resultados coherentes y poder más adelante comparar unas soluciones con otras, se decide establecer una ventana de solicitud para las barras de la estructura. El límite inferior de dicha ventana será 0,5. Los grupos en los que su barra más solicitada se encuentre por debajo de este valor, los consideraremos sobredimensionados y deberemos, siempre que sea posible, buscar un perfil de menor sección que cumpla con los requerimientos. Por arriba, el límite superior que estableceremos será de 0,85, que nos permitirá tener un margen de seguridad hasta la unidad, donde la sección no cumpliría.

Para facilitar el análisis de los datos, exportaremos todos los resultados a una hoja de cálculo de Excel, donde clasificaremos las barras y grupos en las divisiones de solicitud mencionadas. Se empleará un formato condicional para el valor de ratio, por colores en función del valor, para, de forma muy visual, ubicar las barras en el espectro de solicitud.

Así se visualiza esta primera verificación sobre la nave con cubierta a un agua y cinco grados de pendiente, con las secciones inicialmente descritas:

**Tabla 16**

*1ª verificación para el caso de referencia*

Grupo	Barra	Perfil	Solicitud	Caso de carga
Pilares esquinas	101	IPN 320	0.47	Viento del Oeste
Pilares hastiales	6	IPN 320	0.46	Viento del Oeste
Pilares fachada	75	IPN 320	1.68	Viento del Sur
Dinteles hastiales	103	IPE 270	0.21	Viento del Sur
Dinteles cubierta	77	IPE 270	5.96	Viento del Sur
Vigas	8	IPN 200	0.29	Viento del Sur
Correas	96	IPE 100	10.12	Viento del Sur

Se intentará lograr una solicitud dentro de la ventana establecida para todos los grupos de barras. Para ello, se requiere de sucesivas iteraciones a través del comando de dimensionamiento por grupos de Robot.

La primera vez que se selecciona dicho comando, se nos muestra el siguiente cuadro de diálogo

**Figura 23**

*Resultados del dimensionamiento de grupos de barras en Robot*

Barra	Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
<b>Grupo : 1 Pilares esquinas</b>						
101 Pilares esquinas_101	 IPN 220	ACERO	17.06	74.04	1.22	6 Viento del Oeste
	 IPN 240		15.65	68.62	0.97	
	 IPN 260		14.47	64.59	0.79	
<b>Grupo : 2 Pilares hastiales</b>						
6 Pilares hastiales_6	 IPN 240	ACERO	62.61	68.62	1.01	6 Viento del Oeste
	 IPN 260		57.90	64.59	0.81	
	 IPN 280		53.88	61.46	0.66	
<b>Grupo : 3 Pilares fachada</b>						
75 Pilares fachada_75	 IPN 340	ACERO	81.22	53.83	1.17	9 Viento del Sur
	 IPN 360		76.85	51.64	0.99	
	 IPN 380		72.93	49.70	0.85	
<b>Grupo : 4 Dinteles hastiales</b>						
4 Dinteles hastiales_4	 IPE 140	ACERO	104.93	90.71	1.00	9 Viento del Sur
	 IPE 160		91.56	81.35	0.73	
	 IPE 180		81.22	73.09	0.54	
<b>Grupo : 5 Dinteles cubierta</b>						
77 Dinteles cubierta_77	 IPE 360	ACERO	96.66	39.60	1.24	9 Viento del Sur
	 IPE 400		87.35	37.98	0.96	
	 IPE 450		78.23	36.42	0.73	
<b>Grupo : 6 Vigas</b>						
8 Vigas_8	 IPN 120	ACERO	104.11	406.74	1.06	9 Viento del Sur
	 IPN 140		89.27	359.98	0.72	
	 IPN 160		78.14	323.00	0.51	
<b>Grupo : 7 Correas</b>						
96 Correas_96	 IPE 160	ACERO	76.01	271.15	1.07	9 Viento del Sur
	 IPE 180		67.42	243.65	0.75	
	 IPE 200		60.54	223.65	0.56	

Como era de esperar, Robot sugiere modificar la sección todos los grupos de barras, a secciones inferiores las que tenían ratios de sollicitación muy bajos, y a secciones superiores las que, por el contrario, superaban la unidad.

Se procede a iterar, cambiando los perfiles de los grupos de barras como el programa nos indica, no sin antes, verificar todas las barras de la estructura y exportar los resultados de nuevo a Excel, para analizar en profundidad la evolución de estas a lo largo de las modificaciones realizadas.

Sobre la tabla completa exportada, se crea una tabla dinámica, que nos facilitará el estudio de los datos. En este caso, podemos ver qué tan precisa era la configuración inicial, de acuerdo con la leyenda mostrada en la Tabla 17.



**Tabla 17**

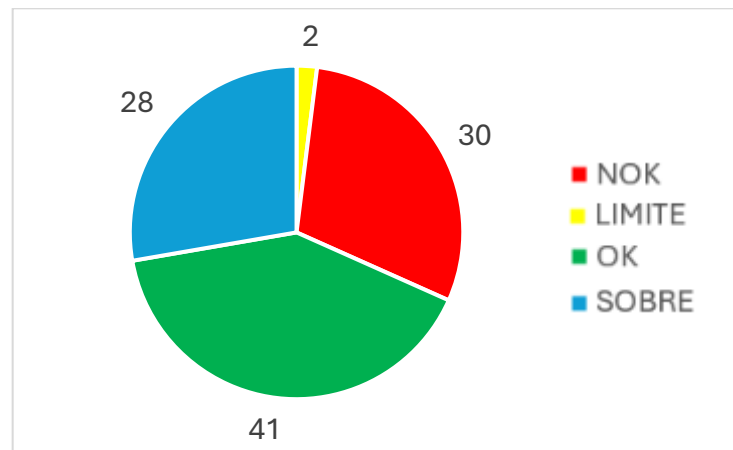
Leyenda del estado de solicitación de barras

Estado de solicitación	Valores	Criterio de clasificación
<b>NOK</b>	$X > 1$	Perfil incorrecto, no cumple estructuralmente
<b>LIMITE</b>	$0,85 < X < 1$	Perfil próximo al límite estructural
<b>OK</b>	$0,5 < X < 0,85$	Perfil correcto, dentro de la ventana de seguridad
<b>SOBRE</b>	$X < 0,5$	Perfil sobredimensionado

Y así resulta la primera verificación de barras.

**Figura 24**

Estado de solicitación de las barras del caso de referencia tras la primera verificación



Se aprecia en la Figura 24 que 41 de las barras están dentro de la ventana de seguridad deseada, en la configuración de partida, algo que no está nada mal para haber realizado dicha configuración “a ciegas”. Por otro lado, son prácticamente las mismas barras las que no cumplen con los requerimientos estructurales (30) como las que se exceden en dimensionamiento (28). Esto último parece indicarnos que se requerirá de sucesivas modificaciones para lograr el mayor número de barras dentro de la ventana de seguridad.

Realizamos dos iteraciones consecutivas, moviéndonos hacia las secciones que Robot nos recomienda.

**Tabla 18**

Valores de solicitud de los grupos de barras para el caso de referencia

Cubierta a 1 agua	Iteración 0			Iteración 1			Iteración 2		
Pilares esquinas	IPN 320	0.47	Oeste	IPN 260	0.68	Oeste	IPN 240	0.79	Oeste
Pilares hastiales	IPN 320	0.46	Oeste	IPN 260	0.65	Oeste	IPN 240	0.77	Oeste
Pilares fachada	IPN 320	1.68	Sur	IPN 380	0.87	Sur	IPN 400	0.81	Suroeste
Dinteles hastiales	IPE 270	0.21	Sur	IPE 160	0.47	Sur	IPE 140	0.6	Sur
Dinteles cubierta	IPE 270	5.96	Sur	IPE 450	0.74	Sur	IPE 450	0.8	Sur
Vigas	IPN 200	0.29	Sur	IPN 140	0.67	Suroeste	IPN 140	0.71	Suroeste
Correas	IPE 100	10.12	Sur	IPE 180	1.46	Oeste	IPE 220	0.89	Oeste
	Media	2.741		Media	0.791		Media	0.767	

En la Tabla 18 se muestran los resultados de solicitud para las dos primeras iteraciones realizadas, con un formato condicional de colores, que va del menor valor, en verde, al más alto, en rojo, además de la configuración inicial. También se indica qué combinación lineal, y, por tanto, qué dirección del viento, es la que está llevando a la barra más solicitada de cada grupo a ese estado (Sur, Suroeste u Oeste).

Se observa que debemos disminuir la sección de todos los pilares, a excepción de los situados en las fachadas laterales de la nave. Esto se debe a que, como vimos en los diagramas de esfuerzos, la combinación más desfavorable era aquella en la que el viento soplaba directamente desde el Sur, incidiendo directamente sobre estos pilares.

También es reseñable el cambio de sección que el programa pide para el grupo de los dinteles hastiales, los situados sobre los pórticos delantero y trasero de la nave. Pasamos de un IPE 270 a un IPE 450.

Por último, llama la atención que se requiera un aumento en la sección de las correas. Pasamos de IPE 100 a IPE 220 tras la segunda iteración, y aun así seguimos fuera de la zona de seguridad (ratio de 0,89 con IPE 220). Así que se decide ahondar en el estudio de este grupo.

En las tablas exportadas a Excel se observa que mientras que una gran parte de las correas estaba dentro de la ventana de seguridad con la configuración inicial, al aumentar la sección, esta mayoría pasa a estar sobredimensionada, y una pequeña parte sigue sin cumplir las solicitudes estructurales. A

medida que aumentamos la sección de estas, como Robot nos recomienda, esta diferencia se acentúa.

Identificamos las correas con mayor ratio de solicitación, filtrando por las iteraciones primera y segunda, por solicitación mayor a la unidad, e incluso mayor al 0,5, ya que la gran mayoría tienen una solicitación realmente baja (0,1 aproximadamente).

**Tabla 19**

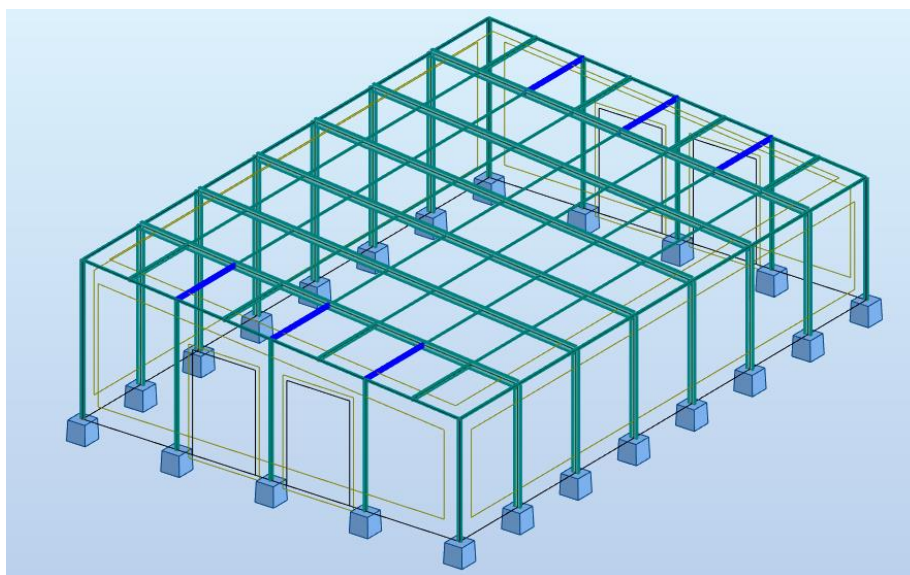
*Correas con mayor valor de solicitación tras la primera y segunda iteración*

Iteración	Barra	Estado	Perfil	Solicitación	Caso de carga
1	Correa 14	LIMITE	IPE 180	0.94	Suroeste
1	Correa 18	NOK	IPE 180	1.46	Oeste
1	Correa 20	LIMITE	IPE 180	0.95	Oeste
1	Correa 93	OK	IPE 180	0.7	Sur
1	Correa 96	NOK	IPE 180	1.16	Sur
1	Correa 98	OK	IPE 180	0.63	Sur
2	Correa 14	OK	IPE 220	0.62	Oeste
2	Correa 18	LIMITE	IPE 220	0.89	Oeste
2	Correa 20	OK	IPE 220	0.62	Oeste
2	Correa 96	OK	IPE 220	0.68	Sur

Se trata para ambas iteraciones de las correas número 14, 18, 20, 93, 96 y 98. Por tanto, se procede a buscar en el 3D de la estructura dichas correas.

**Figura 25**

*Correas con mayor solicitación tras dos iteraciones*



Observamos que las seis correas se encuentran junto a los pórticos hastiales frontal y trasero de la nave, así que se decide crear un grupo de correas independiente del resto, para todas las correas que unen los pórticos hastiales con los dinteles más próximos. Lo llamaremos “**correas hastiales**”. Esto nos permitirá dimensionar correctamente a los dos grupos, de tal forma que tendremos el mínimo número de correas fuera de la ventana de seguridad.

Con todo ello, el programa requiere de un par de iteraciones más para lograr los resultados deseados, mostrados en la Tabla 20.

**Tabla 20**

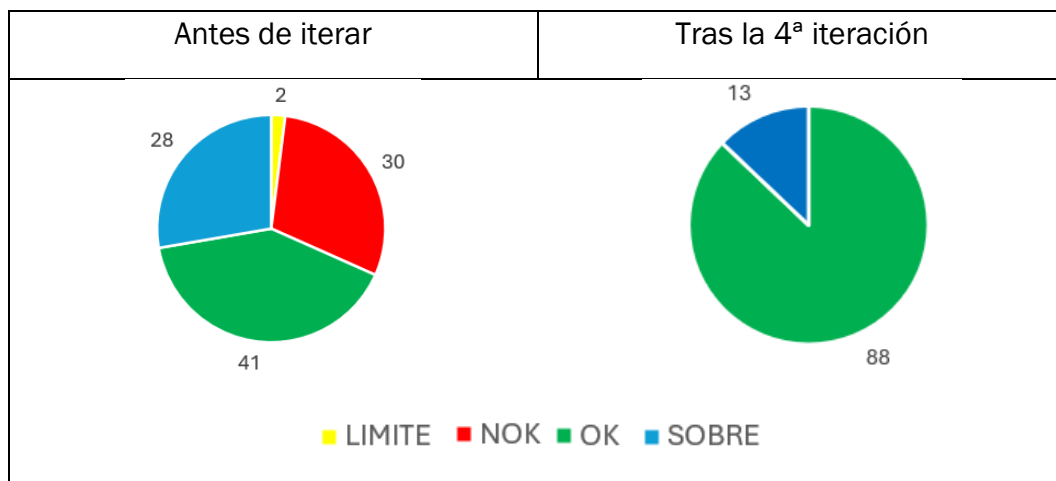
*Valores de solicitud de los grupos de barras para el caso de referencia*

Grupo	Perfil	Solicitud	Combinación de cargas
1 Pilares esquinas	IPN 240	0.79	Oeste
2 Pilares hastiales	IPN 240	0.82	Oeste
3 Pilares fachada	IPN 400	0.75	Suroeste
4 Dinteles hastiales	IPE 120	0.78	Sur
5 Dinteles cubierta	IPE 450	0.74	Sur
6 Vigas	IPN 140	0.73	Suroeste
7 Correas	IPE 100	0.69	Sur
8 Correas hastiales	IPE 240	0.75	Oeste
	Media	0.76	

Todos los grupos están dentro de la ventana de solicitud deseada, con una solicitud media de 0,76. Del total de barras de la estructura (101), solo 13 tienen un valor de solicitud inferior a 0,5.

**Figura 26**

*Estado de solicitud de las barras para el caso de referencia*

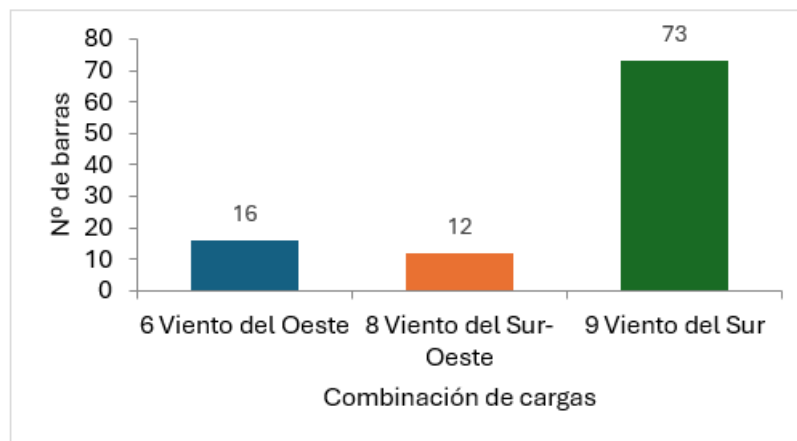


Explorando los datos, vemos que estas trece barras son dos pilares de esquina, un pilar hastial y el resto son correas del grupo recientemente creado, hastiales. Inevitablemente, las barras pertenecientes a este grupo, que no aparecían señaladas en la Tabla 19, tendrán menor ratio que las que sí estaban al límite. Esta situación es preferible a la anterior, dado que el volumen de correas sobredimensionadas es claramente inferior. Si se dimensionase cada barra individualmente, se lograría eliminar cualquier atisbo de sobredimensionado, pero no sería una solución práctica, ni para el diseño, la compra de materiales o la construcción.

Si se desea analizar cuál es la combinación de cargas más desfavorable, se aprecia en la Figura 27, que es con diferencia la que incluye el viento soplando desde el Sur.

**Figura 27**

*Combinación de cargas más desfavorable para las barras del caso de referencia*



### 3.4. INTRODUCCIÓN DE DATOS EN PVGIS

Con la solución estructural completamente definida para el caso de cubierta a un agua, cinco grados de pendiente en la cubierta y orientación Sur, solo falta introducir los datos exactos de este caso de estudio en la plataforma PVGIS, para obtener los resultados de producción fotovoltaica.

Además de todos los puntos ya definidos en el apartado 2.2.1 de este trabajo, se necesita calcular el área de módulos solares y con ella, potencia fotovoltaica pico instalada.

Según la Ecuación 2.

$$\text{lado inclinado cubierta (m)} = \frac{24}{\cos(5^\circ)} = 24,09 \text{ m}$$

Y según la Ecuación 4, se halla el área sobre la que se medirá la irradiación solar para calcular la generación eléctrica gracias a las placas solares instaladas.

$$\text{área efectiva solar (m}^2\text{)} = 0,95 \cdot 24,09 \cdot 35 = 800,99 \text{ m}^2$$

Por último, se obtiene la potencia fotovoltaica pico instalada, según la primera ecuación.

$$\text{potencia FV pico instalada} = \frac{1 \text{ kW}}{\text{m}^2} * 800,99 * \frac{20,92}{100} = 167,57 \text{ kWp}$$

Ya podemos introducir todos estos datos en el portal digital PVGIS y obtener la producción de energía eléctrica anual.

La herramienta digital alerta de un valor de irradiación anual de 1790,31 kWh por metro cuadrado, lo que se traduce en una producción fotovoltaica de 226,76 MWh cada año.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD





## 4.1. VARIABLES DE INFLUENCIA

En este cuarto capítulo del proyecto, se va a realizar un análisis de sensibilidad para cada caso de cubierta. Este análisis, consiste en estudiar la influencia de cada una de las variables, aislándolas y otorgándoles diferentes valores.

Recordemos que las variables de influencia (inputs) son las siguientes:

- La **orientación** de la nave en el espacio.

Para el primer caso de estudio, el de una nave industrial con cubierta a un agua, solo se ha considerado una única orientación, la cubierta mirando al Sur geográfico. Esto es así porque la diferencia de energía eléctrica generada con las placas solares adosadas sobre la cubierta es muy alta comparada con cualquier otra orientación.

Por el contrario, para el segundo caso de estudio, en que la nave industrial contará con una cubierta a dos aguas, se han tenido en cuenta hasta tres orientaciones diferentes. Dado que este diseño de nave industrial es simétrico en los ejes X e Y, nos bastaría con cubrir uno de los cuatro cuadrantes del plano, para poder extrapolar los resultados, tanto estructurales como de generación fotovoltaica. En este caso, se situará la nave de las siguientes maneras:

- Pórtico hastial orientado al Sur (0°)
- Pórtico hastial orientado al Suroeste (45°)
- Pórtico hastial orientado al Oeste (90°)

Como vimos en el segundo capítulo, estas tres opciones conforman el espectro radial de direcciones por donde más habitualmente soplaban las rachas máximas de viento.

- La **pendiente** de la cubierta.

Para esta segunda variable se tendrán en cuenta las mismas tres posibilidades para ambos casos de estudio. Se comienza con cubiertas inclinadas tan solo cinco grados, una pendiente pequeña pero suficiente, dado que no nos encontramos en una zona de grandes nevadas que requiera de grandes pendientes para que la nieve no se acumule en exceso sobre el tejado. Seguidamente, se ampliará la inclinación hasta los diez grados y, por último, hasta los quince grados. Los tres valores, están dentro de un abanico de inclinación razonable para construcciones industriales de estas características.

Con las variables de influencia descritas, abordemos qué variables vamos a registrar para analizar los resultados (outputs):

- **La producción anual fotovoltaica.**

Con todos los datos necesarios introducidos en el PVGIS, podemos calcular los resultados, y el que más nos interesa es sin duda la cantidad de energía eléctrica producida por las placas solares de la nave industrial a lo largo de un año. La plataforma de cálculo nos lo entrega en kWh, aunque se traducirá a GWh para facilitar su interpretación. Es el valor que aglutina toda la información de generación eléctrica y nos dirá cómo de bien está orientada la nave para tal fin.

- El **peso** total de la estructura de acero de la nave industrial.

Este otro output es el resumen de la solución estructural finalmente adoptada para cada caso. Al emplear todas las opciones de diseño de nave industrial, el mismo número de barras, cada grupo de estas el mismo perfil y todas ellas el mismo acero, si para cada tipo de nave, sumamos la masa de todas sus barras, podremos perfectamente comparar unas con otras. Lo mediremos en toneladas de acero S235.

Para poder analizar estos datos, además de compararlos entre sí, en valores netos y en porcentaje, y de graficarlos, se han planteado los siguientes conceptos, que utilizaremos para verificar la calidad de nuestro análisis y para discernir entre situaciones a primera vista similares.

- **Eficiencia**

Se ha planteado este concepto como la división entre la energía que logramos producir en un año y el peso de la estructura de acero.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Eficiencia} \\
 & = \frac{\textit{Producción anual FV}}{\textit{Peso}} \left[ \frac{\textit{kWh}}{\textit{ka}} \right] \quad (23)
 \end{aligned}$$

El objetivo de obtener este dato es analizar qué configuración de nave es más rentable, y nos permite comparar datos de distinta naturaleza en las posibles configuraciones.

- **Grado constructivo**

Imaginemos dos soluciones estructurales. Para la primera se ha logrado un peso bajo, pero su está más solicitada que la segunda (mayor coeficiente) y para la segunda sucede lo contrario, es algo más pesada pero la estructura sufre menores esfuerzos. ¿Cómo distinguir cuál es mejor?

Para ello hemos ideado este otro concepto, que nos ayudará a calificar cómo de solicitada está una solución estructural en relación con su peso. Su valor resultará de una relación lineal con el resultado de multiplicar la masa total de acero empleada por el promedio de solicitaciones de los grupos de barras que componen la estructura.

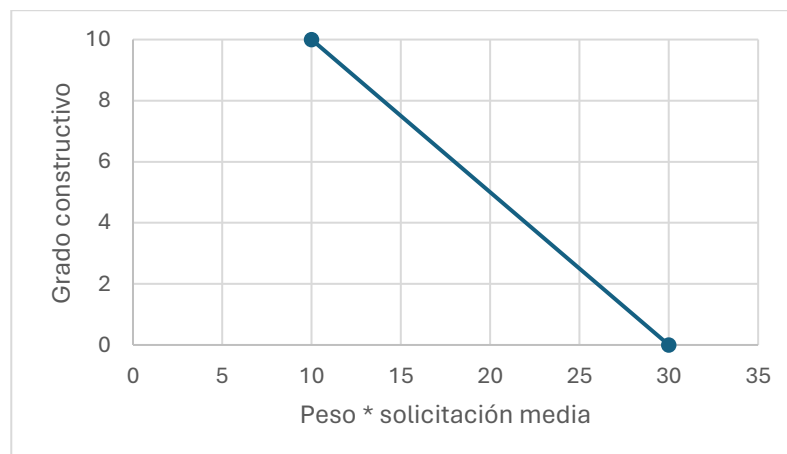
Gracias a los valores obtenidos a lo largo de este apartado, se han logrado definir los valores extremos y podemos traducir dicho producto a una calificación del 0 al 10. El valor mínimo (0) lo otorgará el resultado de una estructura de acero muy pesada, para la que hemos elegido 35 toneladas; y un coeficiente de sollicitación media de 0,85, que es el máximo dentro de la ventana establecida. Por el contrario, la máxima calificación (10) resulta de una nave lo más ligera posible, para lo que hemos establecido 20 toneladas, y un coeficiente de sollicitación media de 0,5, el mínimo dentro de la ventana de seguridad.

Con ello, nos resulta la siguiente relación lineal:

$$\text{Grado constructivo} = -0,5 \cdot (\text{peso estructura} * \text{solicitud media}) + 15 \quad (24)$$

### Figura 28

Representación gráfica del concepto de grado constructivo



## 4.2. CUBIERTA A UN AGUA

En primer lugar, analizaremos los datos obtenidos para el caso de cubierta a un agua. En este caso, como hemos comentado anteriormente, solo analizamos una posible orientación, la **cubierta mirando al Sur**, ya que es con diferencia la mejor orientación posible para situar las placas solares.

**Tabla 21**

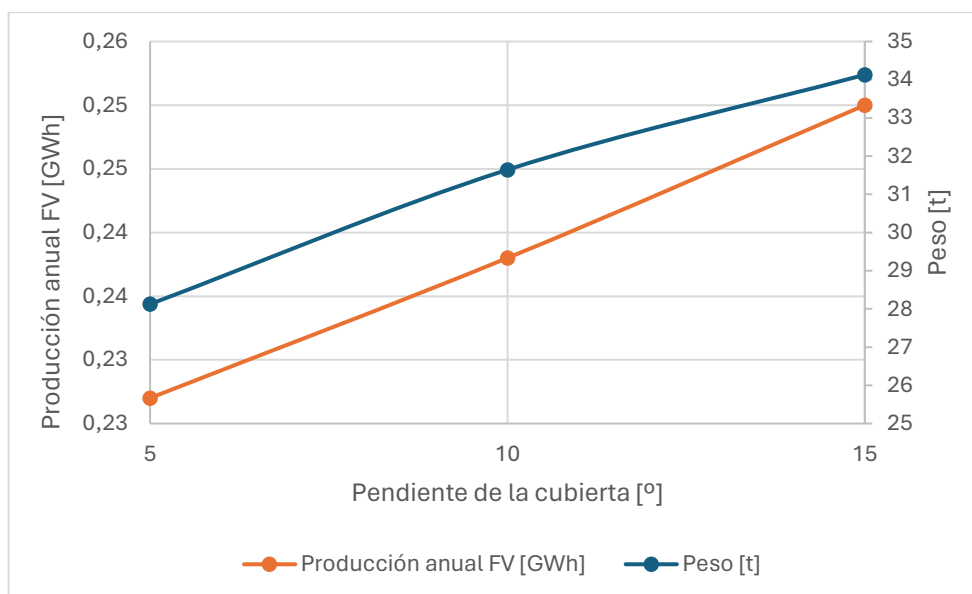
*Resultados para el caso de nave con cubierta a un agua*

Pendiente cubierta [°]	Cubierta orientada al SUR		
	5	10	15
Producción anual FV [GWh]	0,23	0,24	0,25
Peso [t]	28,13	31,64	34,13

A continuación, se muestran gráficamente los resultados obtenidos.

**Figura 29**

*Gráfica de resultados para el caso de nave con cubierta a un agua*



En el eje de abscisas situamos la inclinación de la cubierta y en los ejes de ordenadas, a la izquierda, la producción anual fotovoltaica, medida en Giga Watios hora; mientras que, a la derecha, el peso total de la estructura en toneladas. Es importante tener en cuenta la escala seleccionada para cada variable. Se unen con líneas continuas los valores para que resulte más cómoda su visualización, y se aprecia la tendencia de los valores.

La Figura 29 nos confirma lo que por sentido común esperamos de este primer análisis.

La **producción de electricidad** gracias a las placas solares **aumenta a medida que lo hace la inclinación de la cubierta**. El PVGIS nos mostraba un valor de inclinación óptima de 36°, por tanto, hasta que alcanzásemos ese valor, la producción FV seguiría aumentando. Nos hemos limitado a estas tres pendientes, siendo la de 15° la mayor ya que no es habitual ver tejados con mayor inclinación en naves industriales con esta luz en los pórticos.

Se observa que crece de forma similar, casi un 5% para cada cinco grados de aumento (4,86% al pasar de 5 ° a 10° y 4,97% al pasar de 10° a 15°).

El **peso del total** de las barras empleadas en el diseño de la estructura **también aumenta cuanto más apuntada es la pendiente de la cubierta**, porque como de partida hemos fijado una altura mínima en la nave de siete metros, al aumentar el ángulo de la cubierta, lo hace la altura máxima, es decir, los pilares del lado Norte.

En este caso, se aprecia que la diferencia es mayor (12,51%) en el primer salto, que en el segundo (7,86%).

Analicemos ahora los conceptos que hemos añadido.

### **Tabla 22**

*Resultados para el caso de nave con cubierta a un agua*

Pendiente cubierta [°]	Cubierta orientada al SUR		
	5	10	15
Eficiencia	8,06	7,51	7,31
Solicitud media	0,76	0,74	0,76
Grado constructivo	4,35	3,35	2,05

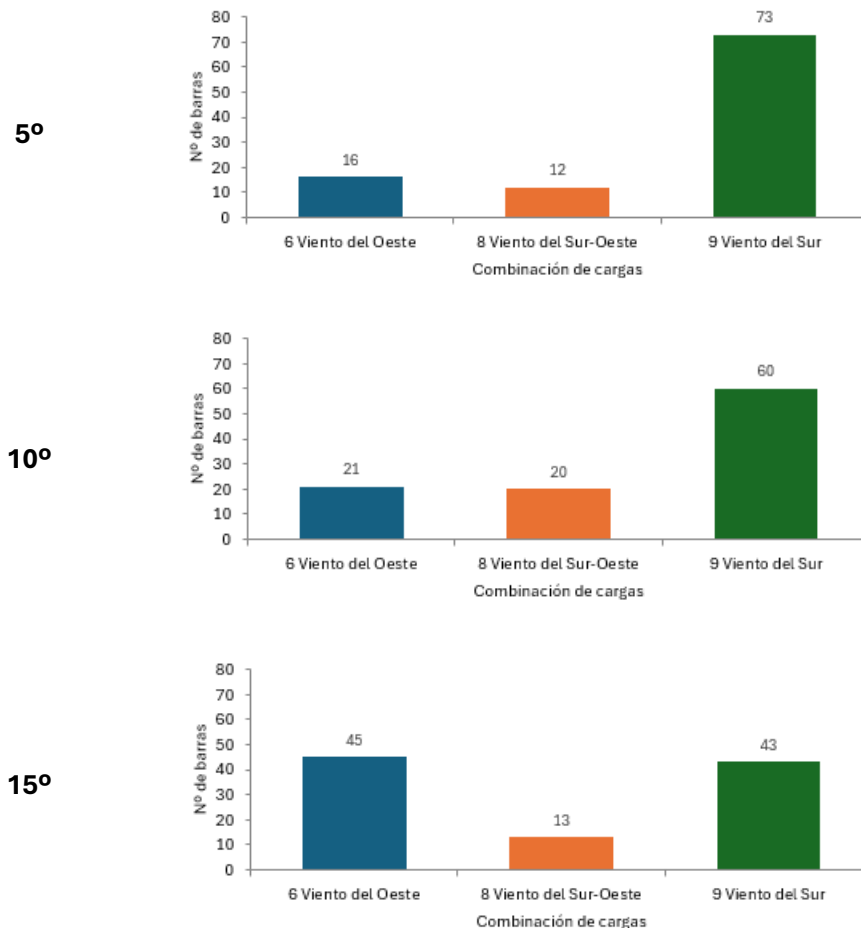
Como se aprecia, los valores promedio de solicitud para cada caso son muy similares, lo cual nos va a permitir comparar los resultados sin acudir al valor del grado constructivo, ya que la diferencia radica sin duda en el peso de cada estructura.

Seguidamente, analizando la eficacia de cada nave, la nave con menor pendiente, de tan solo cinco grados, resulta ser la que solución que más energía eléctrica produce por tonelada de acero empleada en su construcción (8,06 kWh/kg), descendiendo este valor a medida que aumenta la pendiente.

Por otra parte, podemos analizar qué combinación de cargas es la más demandante estructuralmente hablando, es decir, qué dirección del viento es la más desfavorable para cada una de las barras de la nave.

**Figura 30**

*Evolución de las combinaciones de carga más desfavorables en cubierta a un agua*



Se aprecia que para una cubierta de 5 y 10°, se trata del viento del Sur, que sin duda es el que más esfuerzo genera sobre todas las correas (es el grupo de barras más numeroso (35)). También se observa que a medida que aumenta la pendiente, es el viento del Oeste el que coge protagonismo, siendo el predominante cuando la pendiente es de 15°. Esto se debe a que aumenta la superficie de la cara frontal de la nave, y la estructura sufre más al distribuir los esfuerzos por todas sus barras.

### 4.3. CUBIERTA A DOS AGUAS

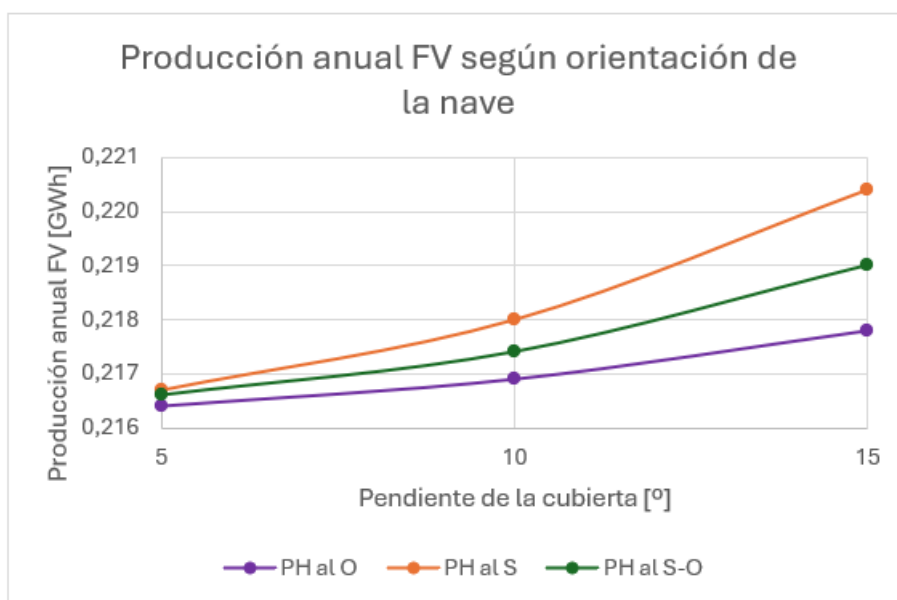
En este segundo caso, como se enunció al comienzo de este cuarto capítulo, sí resulta interesante realizar los cálculos con **diferentes orientaciones**.

Esta variabilidad en la orientación espacial permitirá analizar como varía la irradiación solar sobre la cubierta y cómo influye la orientación en el diseño estructural, pudiendo extrapolar los resultados al resto de orientaciones, ya que la nave con cubierta a 2 aguas es simétrica en ambos ejes, X e Y.

Se observa en la siguiente gráfica que el aumento en producción anual fotovoltaica es minúsculo (un salto de 1,08% en el mejor de los casos).

**Figura 31**

*Producción anual fotovoltaica según la orientación de la nave*

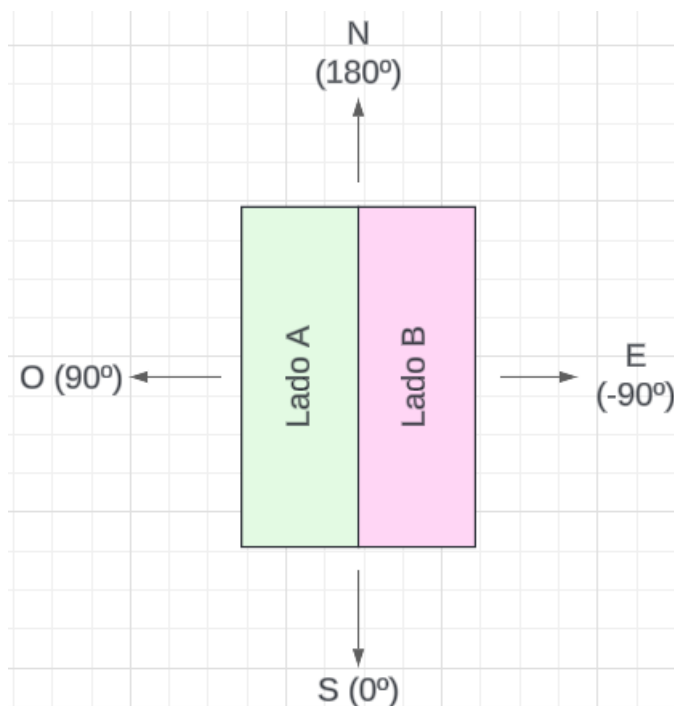


También se aprecia que la **orientación que más favorece la generación eléctrica** de las placas solares instaladas en la cubierta es la orientación del **pórtico hastial al Sur**.

Esto se debe a que con el pórtico hastial mirando al Sur, tenemos una irradiación bastante uniforme en las dos faldas de la cubierta, mientras la falda Este (Lado B) recibe más irradiación solar por las mañanas, la Oeste (Lado A) lo hace por la tarde, obteniendo ambas, valores muy similares.

**Figura 32**

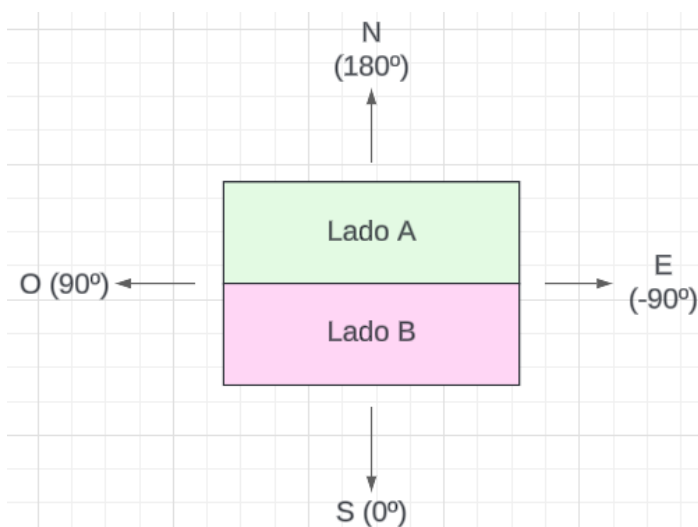
Nave a dos aguas con el pórtico hastial orientado hacia el Sur



En cambio, si orientamos el pórtico hastial al Oeste, el Lado B generará mucha electricidad, ya que dicha cubierta está en la orientación ideal. Pero mientras tanto, el Lado A generará mucha menos, ya que el ángulo de inclinación de esta cubierta será negativo.

**Figura 33**

Nave a dos aguas con el pórtico hastial orientado hacia el Sur





**Tabla 23**

Resultados para la nave con cubierta a dos aguas y PH orientado al Oeste

Pendiente cubierta	PH al O		
	5	10	15
Producción anual FV lado A [GWh]	0,103	0,098	0,093
Producción anual FV lado B [GWh]	0,113	0,119	0,125

La Tabla 23 muestra la diferencia de valores mencionada entre una falda de la cubierta y el otro.

Como es lógico, el tercer caso, en el que el pórtico hastial de la nave mira al Suroeste, se produce una situación intermedia entre las otras dos orientaciones. De nuevo el lado B genera más electricidad, pero esta diferencia es menos acentuada que en el caso de cubierta orientada al Oeste.

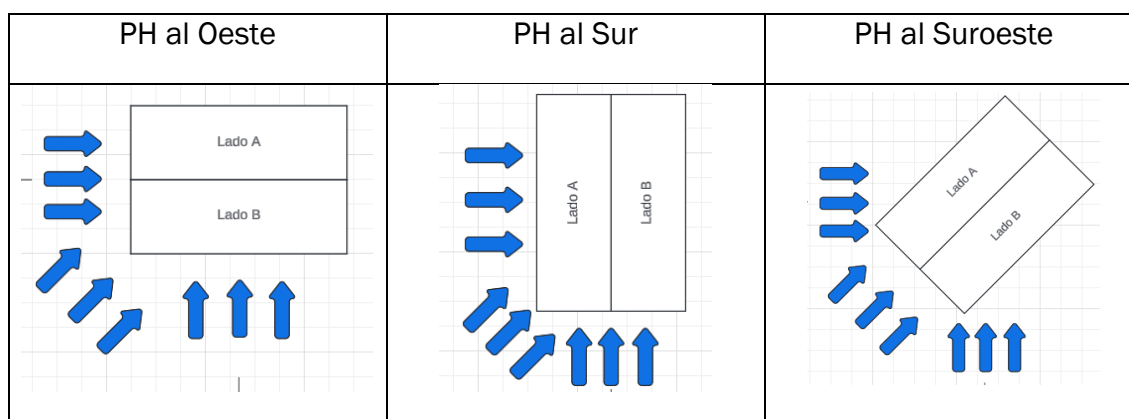
En la Figura 31 también se aprecia que la distancia en generación de las diferentes orientaciones crece a medida que aumenta la pendiente de la cubierta, es decir, a mayor cubierta, mayor es la diferencia en kWh producidos por los módulos solares de la cubierta. En porcentaje, el salto es casi el doble entre 15 y 10 que entre 10 y 5, pero seguimos moviéndonos en un orden de magnitud pequeño, inferior al 1%.

Veamos a continuación, qué sucede a nivel estructural.

A la hora de introducir las combinaciones de cargas, han sido tenidas en cuenta las mismas cargas que en el caso anterior y así es como simulamos que soplarán las rachas máximas de viento según la orientación de la nave.

**Figura 34**

Orientaciones de la nave a dos aguas y direcciones del viento



En los dos primeros casos, se considera que las máximas rachas de viento soplarán en las mismas direcciones: hacia el pórtico hastial, hacia la fachada y hacia la esquina, lo que nos facilitará los cálculos, ya que esto se traduce en tener las mismas 3 combinaciones de cargas, en cada una sopla el viento en una dirección.

En cambio, para el caso en que orientamos el pórtico hastial hacia el Suroeste, estas máximas rachas históricas se producen contra las 2 esquinas y el pórtico hastial. Dado que la nave es simétrica en los dos ejes (X, Y), bastará con considerar viento sobre el pórtico hastial y una de las esquinas.

Tras iterar con el dimensionamiento de acero en ROBOT, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 24**

*Peso de la estructura [t] para los casos de nave con cubierta a dos aguas*

Pendiente cubierta (°)	Peso de la estructura [t]		
	5	10	15
PH al O y PH al S	22,13	22,11	22,60
PH al S-O	21,21	22,02	21,86

En esta ocasión, no se respetan las tendencias de aumento como lo hacían en el caso de cubierta a un agua. Las diferencias en la masa del total de la estructura de acero son todas ellas inferiores al 4%, por lo que podemos afirmar que, en el caso de cubierta a 2 aguas, el aumento de la pendiente no acentúa tanto el dimensionado de la estructura como sí lo hacía en el caso de cubierta a 1 agua.

Esto se debe a que la estructura de pórtico hastial para una cubierta a 2 aguas realiza una mejor distribución de esfuerzos que el pórtico de una cubierta a 1 agua. Además, para la misma pendiente de cubierta y mismo ancho de la nave, los pilares más altos de la nave con cubierta a 1 agua sufrirán un aumento en altura del doble que en el caso de cubierta a 2 aguas.

Observamos que, a la hora de elegir las secciones de los perfiles en ROBOT, apenas necesitamos aumentar estas cuando aumentamos la inclinación de la cubierta (secciones que varían en negrita):

**Tabla 25**

Ratio de solicitación de los grupos de barras para la nave a dos aguas con el PH orientado al Sur o al Oeste

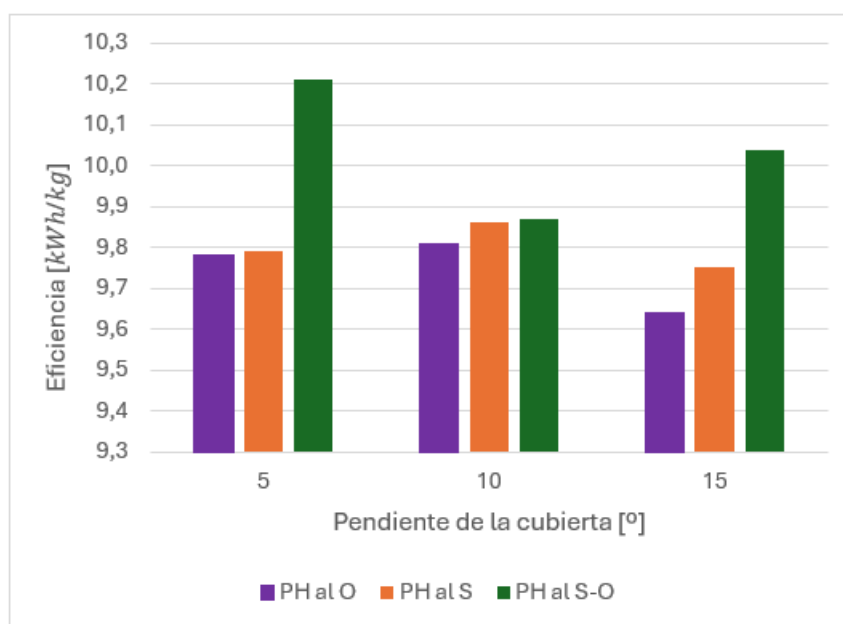
PH al S y PH al O	5°		10°		15°	
	Barra	Ratio	Barra	Ratio	Barra	Ratio
Grupo 1: Pilares fachada	IPN 340	0,77	IPN 320	0,83	IPN 320	0,78
Grupo 2: Pilares hastiales	IPN 260	0,82	IPN 280	0,75	IPN 280	0,8
Grupo 3: Dinteles cubierta	IPE 360	0,82	IPE 360	0,74	IPE 360	0,7
Grupo 4: Vigas	IPN 140	0,71	IPN 140	0,71	IPN 140	0,7
Grupo 6: Correas	IPN 100	0,54	IPN 100	0,58	IPN 100	0,72
Grupo 7: Pilares esquinas	IPN 200	0,82	IPN 200	0,84	IPN 220	0,72
Grupo 8: Dinteles hastiales	IPE 120	0,59	IPE 120	0,57	IPE 120	0,64
Grupo 9: Correas hastiales	IPN 240	0,77	IPN 240	0,78	IPN 240	0,81
	Media	0,73	Media	0,73	Media	0,73

También se aprecia en la gráfica poca variación de peso entre las dos posibles orientaciones, siendo casi idéntica en el caso de pendiente de 10° (22,11 toneladas para orientaciones Sur y Oeste y 22,02 toneladas para orientación Suroeste).

Veamos ahora los valores del concepto eficiencia que hemos definido anteriormente, gracias a la Ecuación 23.

**Figura 35**

Eficiencia según la pendiente de la cubierta y la orientación de la nave a dos aguas



Es posible apreciar unos valores de eficiencia muy parejos para los casos en que el pórtico hastial mira hacia el Oeste y hacia el Sur (una ventana de 0,2), lo que nos permite afirmar, que, si elegimos una de estas dos orientaciones, es verdaderamente interesante optar por la solución con mayor pendiente en la cubierta.

Como vimos en la gráfica de la producción fotovoltaica, la nave que **más electricidad** produce es la **orientada al Sur con 15° en la cubierta**.

Para la orientación Suroeste, también será interesante optar por una cubierta de 15°, pero **será aún más eficiente hacerlo por una de 5°** (máxima producción anual FV por unidad de masa en la estructura: 10,21 kWh/kg). Profundizando en estos resultados, vemos que este dato se debe a que tras las sucesivas iteraciones que el software de dimensionamiento estructural de ROBOT nos pide, para este caso, el valor final promedio de solicitación estructural es ligeramente más alto que el resto (0,77 frente al resto de casos que están todos entre 0,72 y 0,74). Por lo que, aunque estamos dentro de la ventana de seguridad elegida (entre 0,5 y 0,85), se trata de una solución más cercana al fallo estructural que las demás.

### Tabla 26

*Resultados para la nave con cubierta a dos aguas*

Cubierta a 2 aguas	PH al O y PH al S			PH al S-O		
	5	10	15	5	10	15
Pendiente cubierta [°]	5	10	15	5	10	15
Solicitación media	0,73	0,73	0,73	<b>0,77</b>	0,72	0,74
Grado constructivo	6,90	7,00	6,70	6,85	7,05	6,95

En cuanto al grado constructivo, se aprecian valores muy similares, siendo el más alto el de 7,05, para el caso en que el pórtico hastial está orientado al Suroeste y la cubierta tiene una pendiente de diez grados. Este valor se debe a que como hemos visto, se ha logrado, para un peso ligeramente superior al de las otras dos opciones de cubierta con esta orientación, una solicitación media inferior. Algo muy similar sucede para la misma pendiente en los casos en que el pórtico hastial mira hacia el Oeste y hacia el Sur.

Por el contrario, la solución que peor calificación obtiene en grado constructivo es aquella en la que la nave está orientada a uno de los cuatro puntos cardinales y la cubierta alcanza los quince grados de inclinación, ya que alcanzamos el máximo peso de la estructura y el promedio de solicitación de sus grupos de barras es de 0,73.

#### 4.4. COMPARACIÓN DE LAS DOS CUBIERTAS

Por último, es posible comparar los dos casos de estudio, afirmando que, si lo que se busca es la **máxima producción de energía eléctrica**, la nave con cubierta a un agua es capaz de producir mucha más energía eléctrica (un 13% más), pero lo hace con una menor eficiencia, es decir, necesita de un mayor dimensionamiento estructural que la nave con cubierta a 2 aguas (un 51% más de kilos de acero empleados en dicha nave).

**Tabla 27**

*Comparación de resultados entre uno y dos aguas al buscar la máxima producción fotovoltaica*

	1 agua	2 aguas
Orientación	C al S	PH al S
Pendiente cubierta [°]	15	15
Producción anual FV [GWh]	<b>0,25</b>	0,22
Peso [t]	34,13	22,60
Eficiencia	7,31	9,75
Solicitud media	0,76	0,73
Grado constructivo	2,05	6,7

La diferencia en grado constructivo es notable, debido a que, aunque las solicitudes son similares, mientras la solución de nave a dos aguas logra emplear menos de 23 toneladas de acero para el total de sus barras, la de cubierta a un agua necesita de algo más de 34 toneladas.

Si, por el contrario, se desea obtener la **máxima electricidad con la estructura más ligera posible**, la mejor opción de nave con la cubierta a 1 agua producirá un 4,7 % más de energía eléctrica gracias a los paneles solares, pero será un 32,6 % más pesada. En ambos casos diseñaremos la nave con la menor pendiente posible en la cubierta.

**Tabla 28**

*Comparación de resultados entre uno y dos aguas al buscar la máxima eficiencia*

	<b>1 agua</b>	<b>2 aguas</b>
Orientación	<b>C al S</b>	<b>PH al SO</b>
Pendiente cubierta [°]	5	5
Producción anual FV [GWh]	0,23	0,22
Peso [t]	28,13	21,21
Eficiencia	8,06	<b>10,21</b>
Solicitud media	0,76	0,77
Grado constructivo	4,35	6,85

Las calificaciones en grado constructivo confirman lo anterior, la opción con cubierta a dos aguas requiere de mucho menos acero empleado en su construcción para una solicitud media prácticamente idéntica.

# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**





### 5.1. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se ha analizado la influencia de dos variables que a menudo se pasan por alto a la hora de diseñar y construir una nave industrial: la orientación espacial y la pendiente de su cubierta, en términos de producción eléctrica con módulos solares anclados sobre esta y de diseño estructural.

Para lograrlo, se han establecido unas premisas comunes para la nave industrial a diseñar, como las dimensiones. Todas las posibles construcciones contarán con 35 metros de longitud y 24 metros de luz sobre planta entre pilares. Al menos siete metros de alto y una distancia entre pilares en los laterales de 5 metros y de 6 metros en los pórticos frontal y trasero. La cubierta la conformarán los dinteles de los pórticos, unidos cada uno por siete correas, más las vigas en los extremos.

Para simplificar el ejercicio, se ha utilizado en todas sus barras, acero normalizado S235, y estas se han agrupado en siete grupos inicialmente: pilares de esquina, pilares de fachada, pilares hastiales y vigas, que usarán perfiles IPN; y los dinteles centrales de la cubierta, los de los pórticos extremos y las correas, que emplearán perfiles IPE. A lo largo del desarrollo de los cálculos, se ha visto necesario la creación de un grupo más, el de correas hastiales, siendo estas las correas situadas sobre los pórticos frontal y lateral de cada nave. Esto permitirá otorgarle una sección mayor a estas últimas, dado que soportan mayores cargas que el resto de las correas, en las que se ahorrará material.

Se ha ubicado la nave en una zona despejada del municipio de Villanubla, dado que este cuenta con estación meteorológica de AEMET, lo que nos facilitará mucha información a la hora de realizar el cálculo de cargas. En este aspecto, también se ha tratado de ser lo más uniformes posibles, mismos casos de carga para todas las soluciones posibles. Se han tenido en cuenta las acciones permanentes como son el peso propio estructural y el de la cubierta, incluyendo los paneles; así como acciones variables, como son la nieve y el viento.

Este último, ha sido estudiado en detalle, analizando valores máximos históricos que se han tenido en cuenta a la hora de orientar la nave en el espacio. Gracias a este estudio, se ha visto que las mayores rachas históricas de viento registradas por dicha estación provienen en su gran mayoría del Suroeste geográfico, alcanzando valores de hasta 130 kilómetros por hora.

Para realizar los cálculos estructurales, se ha empleado el programa Robot Structural Analysis, que nos ha ayudado a dimensionar correctamente los

grupos de barras de cada caso de nave industrial, a medida que otorgábamos distintos valores a la pendiente y el ángulo de orientación. En cada caso, hemos simulado que el viento soplaba en hasta tres direcciones posibles, cubriendo el abanico de rachas máximas que indicaban los datos históricos.

Con ello, se ha logrado que todas las opciones sean fácilmente comparables, bien analizando la sección elegida, grupo a grupo, o en términos generales, con el peso total de la estructura y los promedios del ratio de solicitación. Para comprender cómo logra el programa hallar este último, se ha desarrollado el cálculo completo de uno de los grupos de barras, a estado límite último. Cada posible solución estructural se ha moldeado con sucesivas iteraciones, alcanzando en todas ellas, que la solicitación de la barra que más sufre de cada grupo y que, por tanto, va a marcar el dimensionamiento de estos, se encuentre dentro de una ventana establecida, entre 0,5 y 0,85; que nos permite tener un margen de seguridad hasta el colapso de la estructura y al mismo tiempo, nos ayuda a no dimensionar en exceso las barras.

Lo mismo ha sucedido para averiguar la cantidad de electricidad generada con las placas solares de la cubierta. Se ha empleado el mismo modelo de panel para todos los casos, módulos de silicio monocristalino de 132 células; y se ha utilizado la herramienta web de la Comisión Europea, PVGIS, para obtener los resultados. Esta herramienta nos ha devuelto el valor anual de producción de energía fotovoltaica según cómo situemos en el espacio las placas solares, es decir, según la orientación e inclinación de la cubierta de la nave, analizando la irradiación solar que recibe el área total de módulos implicados.

Por tanto, si contrastamos los objetivos, planteados al comienzo del documento, con los resultados obtenidos a lo largo de este, es posible concluir que, si se busca la manera de, en las condiciones descritas, producir la máxima energía fotovoltaica posible, la mejor opción de hacerlo es construyendo una nave con cubierta a un agua, que dicha cubierta esté orientada al sur, con la pendiente lo más apuntada posible, hasta los 36 grados. Eso sí, en este estudio se han alcanzado como máximo los 15 grados de inclinación, logrando producir 0,25 GWh al año, dado que, en las cubiertas a un agua, aumentar la pendiente de esta tiene grandes desventajas estructurales. A mayor pendiente mayores secciones requieren las barras de la estructura, alcanzando en este caso las 34 toneladas.

Este peso tan elevado puede hacer que el usuario interesado se decante por una nave industrial con cubierta a dos aguas. En este caso, la mejor opción será orientar el pórtico hastial al Sur, manteniendo los quince grados de pendiente para la cubierta. De esta manera, los paneles solares situados en

la cubierta producirán la máxima electricidad anual, 0,22 GWh al año de manera muy eficiente, 9,75 kWh por kilogramo de acero empleado.

Por el contrario, si se desea generar electricidad ahorrando en materiales, se afirma que lo ideal será situar el pórtico hastial de una nave con cubierta a dos aguas hacia el Suroeste, de cinco grados de pendiente, el mínimo valor contemplado. Con ello, se logrará producir 0,22 GWh anuales de energía eléctrica utilizando poco más de 21 toneladas de acero S235 en su construcción, resultando esto en una generación de 10,21 kWh por kilogramo de acero instalado.

El resto de las opciones de cubierta a dos aguas logran resultados similares, ya que la eficiencia nunca baja de 9,6 kwh/kg, así que, si existieran otros factores determinantes para la orientación, como la ubicación de la carretera más próxima, creemos se deberían tener también en cuenta.

Si para este objetivo, el usuario prefiere decantarse por una nave con cubierta a un agua, lo deberá hacer para una con una inclinación de la cubierta también de cinco grados, con la que, al estar todas las placas mirando hacia el sur geográfico, logrará producir casi un 5% más de electricidad cada año, pero con una nave un 32,6% más pesada.

## 5.2. LÍNEAS FUTURAS

Concluido este proyecto, es el momento de plantearse posibles vías de avance en el futuro, que beban de este estudio como partida o como una fuente más de información. Algunas de ellas son ideas que han surgido a lo largo del trabajo, pero se terminaron descartando por exceder el perímetro técnico de este y otras son sugerencias a futuros interesados.

En primer lugar, la primera respuesta obvia que surge es emplear este estudio para un caso real, bien de un nuevo proyecto de nave industrial o bien a partir de una nave existente a la que ahora se le desean colocar paneles solares sobre su cubierta. El procedimiento a seguir sería el descrito a lo largo de este documento, pero con los datos particulares del caso en cuestión. Resulta verdaderamente interesante para el proyectista, analizar las consecuencias estructurales de la instalación de placas solares y las ventajas y desventajas de cada posible orientación.

Al hilo de la propuesta anterior, también podría explorarse la posibilidad de instalar placas solares sobre una plataforma que permita su giro respecto a uno o varios ejes, modificando el azimut y/o la inclinación a lo largo del día e incluso de la época del año, maximizando la generación eléctrica. Sería de gran utilidad analizar las consecuencias estructurales de dicha plataforma con el viento y una manera de profundizar en este asunto, sería estudiar el diseño de los soportes móviles más ligeros posibles que resistan las sollicitaciones pertinentes, como las acciones de viento y nieve y el peso de las placas. A la hora de estudiar el efecto del viento sobre dicha estructura portadora de paneles solares, el grupo Autodesk cuenta con un programa de simulación computacional de fluidos, donde es posible detallar las cargas generadas por el viento.

Si, por otra parte, se decide avanzar en la rama de las ciencias económicas, una vía más que relevante de avance sería la de hacer un estudio en profundidad del coste de amortización de la instalación de paneles solares. En este proyecto se expone cómo conocer de manera precisa la producción fotovoltaica, por lo que estudiando su impacto económico se podría llegar a definir el tiempo necesario en que se amortizarían los módulos solares, e incluso, a estudiar si merece la pena modificar el diseño de la estructura, en términos económicos. Para ello, además de conocer los costes fijos de construcción de la nave, haría falta determinar si la energía producida se va a consumir y tan solo verter a la red el excedente o si se va asumir el rol de generador eléctrico.

# CAPÍTULO 6

## ESTUDIO ECONÓMICO



## 6.1. CLASIFICACIÓN DE COSTES

A lo largo de este apartado, se determinará cuál ha sido el coste económico estimado para llevar a cabo este proyecto en su totalidad.

El proyecto engloba desde el planteamiento del estudio, hasta la redacción de las conclusiones obtenidas, y todas las herramientas empleadas hasta lograrlas. Dada la naturaleza del proyecto, el principal coste son las horas de trabajo empleadas, es decir, la mano de obra del ingeniero. Estas horas se clasificarán según el apartado del proyecto al que se han dedicado.

El total de los costes es la suma de los costes directos, aquellos que indudablemente pueden imputarse al precio final del producto o servicio ofrecido; y los costes indirectos, que, por el contrario, son aquellos que, aun siendo partícipes del impacto económico del proyecto, no pueden asignarse directamente a este.

### 6.1.1. Costes directos

Son costes directos la mano de obra y las herramientas empleadas directamente para la realización de este proyecto. La clasificación de las horas de trabajo empleadas en su consecución es la siguiente:

- En primer lugar, se realizó todo lo que engloba el planteamiento del proyecto, desde las primeras ideas para analizar hasta que todas las premisas necesarias estuvieron correctamente definidas. Se incluyen las consultas bibliográficas realizadas en búsqueda de trabajos del ámbito, la fijación de los objetivos que se desean perseguir y la estructuración del proyecto en sus respectivas fases. En total, se han empleado 28 horas para realizar todas las tareas mencionadas.
- En segundo lugar, una parte indispensable del proyecto ha sido el uso de la herramienta digital PVGIS, que ofrece la Comisión Europea. Para poder sacar el máximo beneficio de esta, ha sido necesario familiarizarse con ella, comprender al máximo su funcionamiento y cómo no, aprovecharla introduciendo los datos de cada uno de los casos estudiados. Para todo ello, se han empleado 27 horas.
- Por otra parte, para poder realizar el análisis estructural de la nave industrial, era condición indispensable calcular las acciones sobre la edificación que afectaban a nuestro caso de estudio. Para ello, ha

sido necesario consultar diversa normativa existente, así como ejemplos y explicaciones. Para el caso particular de la acción del viento, se hizo un estudio estadístico con la información recopilada en AEMET. Este apartado arroja 42 horas de mano de obra.

- La otra herramienta que más valor le ha aportado al proyecto es sin duda el programa de cálculo estructural, Robot. Ha sido necesario familiarizarse con él, diseñar la estructura del primer caso de estudio, con sus respectivos subgrupos de barras y posteriores modificaciones, introducir las cargas, generar las combinaciones, y, por último, realizar el dimensionado y verificación de las barras para cada una de las estructuras estudiadas. En total, se han empleado 105 horas, sin duda el grueso del proyecto.
- No menos importante ha sido la recopilación de toda la información y su correcta utilización, a través de la creación de tablas dinámicas en Excel que han facilitado la explotación de los datos y el análisis de sensibilidad. Con ello, se han logrado obtener las conclusiones del proyecto, y ha supuesto 70 horas de trabajo.
- Por último, la redacción de este documento que recopila toda la información necesaria del proyecto, su planteamiento, desarrollo y conclusiones, y en el que se recogen todas las tablas y ecuaciones empleadas y se ilustran los resultados. Se han necesitado 90 horas de trabajo para lograrlo.

Por consiguiente, realizando el sumatorio de las horas empleadas, han sido en total 362 horas de mano de obra de un ingeniero las necesarias para la realización de este proyecto.

### **Tabla 29**

*Horas empleadas en la realización del proyecto*

<b>Apartado de trabajo</b>	<b>Horas</b>
Planteamiento	28
PVGIS	27
Acciones sobre la edificación	42
Robot	105
Análisis de resultados	70
Redacción	90
<b>Total</b>	<b>362</b>



Tomando como sueldo base anual de un ingeniero, incluyendo las prestaciones a la seguridad social y otros conceptos, una cifra de 45 mil euros. Considerando el Convenio de Ingenierías y Oficinas Técnicas vigente actualmente en nuestro país, la jornada laboral es de 1.792 horas anuales. Por tanto, realizando la división, el precio de la hora de trabajo es de 25,11€. Lo que significa que el coste directo de la mano de obra de este proyecto ha sido de 9.089,82€.

Por otra parte, a la hora de medir el coste directo de las herramientas, realizamos un breve estudio del coste amortizable en este proyecto. Las herramientas empleadas que requieren de una licencia han sido las de Microsoft Office (Excel, Word) y el software de Robot. Para poder utilizar ambas, es indispensable un ordenador con sistema operativo que ejecute estos programas.

Tras consultar el precio anual de estas licencias y estimar una vida útil de 5 años para el ordenador portátil utilizado, que costó 800€, se realiza el cálculo de coste amortizable. Se indican las horas empleadas con cada herramienta.

**Tabla 30**

*Coste amortizable directo de las herramientas empleadas*

Herramientas de coste directo	Coste anual [€]	Coste/hora [€/h]	Horas [h]	Coste amortizable [€]
Licencia de Microsoft Office	69	0,04	200	7,70
Licencia de Robot	4.102	2,29	160	366,25
Portátil + licencia de Windows	160	0,09	362	32,32
			Total	<b>406,27</b>

Por tanto, la suma de todos los costes directos es de 9.496,09€.

### 6.1.2. Costes indirectos

Serán costes indirectos de este proyecto, los que, siendo parte de él, no se pueden atribuir directamente a ninguna actividad concreta del trabajo. Se deben considerar, por ejemplo, el lugar de trabajo, la electricidad gastada para cargar el ordenador, el acceso a internet para realizar búsquedas, descargar el software, etc. Como no es necesario tener un dato preciso de estos costes, se estiman un total de 500€ en costes indirectos.

### 6.1.3. Costes totales

Finalmente, procedemos a sumar costes directos e indirectos y a aplicar al total el 21% del Impuesto del valor añadido (IVA) correspondiente, para obtener el coste último de este proyecto.

**Tabla 31**

*Costes totales*

Costes directos	9.496,09€
Costes indirectos	500,00€
Costes totales	9.996,09€
Costes totales + IVA	<b>12.095,27€</b>

Los costes totales del proyecto, aplicando el IVA al 21%, ascienden a *doce mil noventa y cinco euros con veintisiete céntimos*.

# CAPÍTULO 7

## BIBLIOGRAFÍA



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET. (2024). *Datos climatológicos*. Recuperado el 20 de Enero de 2024, de AEMET: <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos>
- AENOR. (1990). Código Estructural: Anejo 18 6.4. *Código Estructural*. España.
- AENOR. (1991). Eurocódigo 1. *Eurocódigo 1 UNE-EN*. España.
- APPA Renovables. (2023). *2023 Informe anual del autoconsumo fotovoltaico*. Obtenido de [www.appa.es](http://www.appa.es)
- Buñuel, S. R. (11 de Diciembre de 2023). *Historia del panel solar: ¿cómo nació y cuál ha sido su evolución?* Recuperado el 1 de Mayo de 2024, de SOLFY: [https://solfy.net/placas-solares/historia-del-panel-solar-como-nacio-y-cual-ha-sido-su-evolucion/#1873\\_Descubrimiento\\_de\\_la\\_fotoconductividad\\_del\\_selenio](https://solfy.net/placas-solares/historia-del-panel-solar-como-nacio-y-cual-ha-sido-su-evolucion/#1873_Descubrimiento_de_la_fotoconductividad_del_selenio)
- CTE. (Abril de 2009). Documento Básico: Seguridad Estructural - Acciones en la edificación. [DB: SE-AE]. España.
- Dirección General del Catastro. (2024). *Buscador de inmuebles y visor cartográfico*. Recuperado el 15 de Enero de 2024, de Sede electrónica del catastro: <https://www.sedecatastro.gob.es/>
- European Commission. (2024). *Photovoltaic Geographical Information System*. Recuperado el 17 de Marzo de 2024, de Herramientas interactivas: PVGIS: EU Science Hub: European Commission: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/)
- METINVEST. (2023). *Características de aceri de la marca S235*. Recuperado el 8 de Marzo de 2024, de Metinvest: <https://metinvestholding.com/es/products/steel-grades/s235>
- Ministerio de Fomento. (2012). Instrucción de Acero Estructural EAE. *Instrucción de Acero Estructural EAE*. España.
- Ministerio de Vivienda. (2009). *Documento Básico: Seguridad Estructural: Acciones en la edificación*.
- Monfort Lleonart, J. (2002). *Estructuras metálicas para edificación*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Muñoz, A. (2024). *Radiografía del autoconsumo en 2023 y previsiones de crecimiento 2024*. Recuperado el 7 de Mayo de 2024, de Edp Energía: <https://www.edpenergia.es/es/blog/energia-fotovoltaica/radiografia-autoconsumo-2023-crecimiento->



# CAPÍTULO 8

## ANEXOS

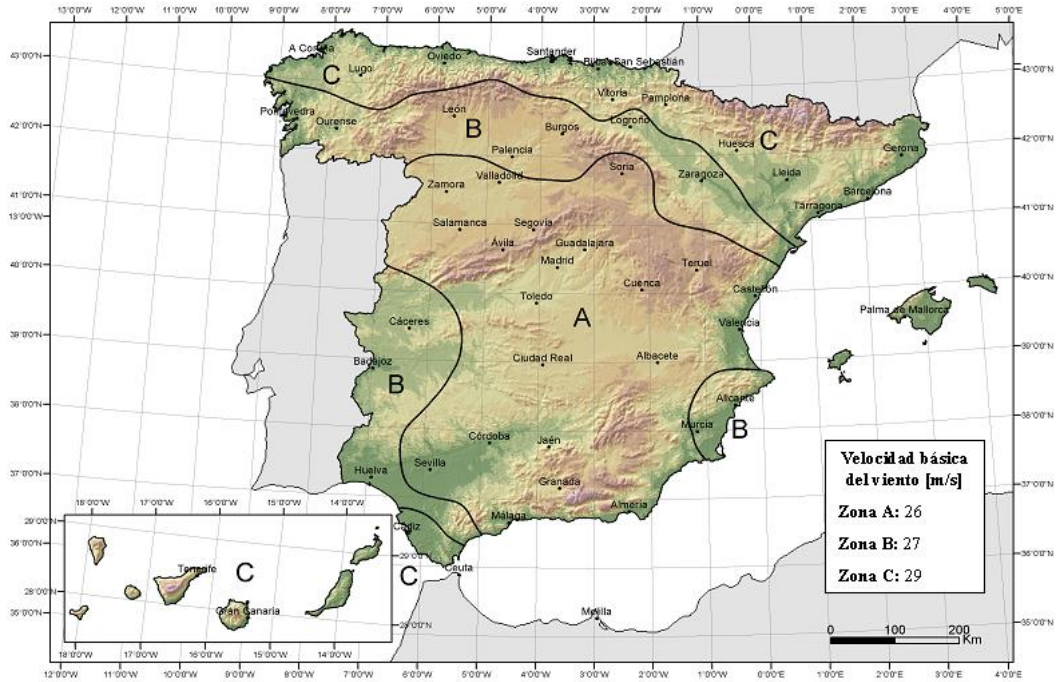




## ANEXO 1: FIGURAS

Figura 36

Valor básico de la velocidad del viento



Nota. Figura D.1, Anejo D: Acción del viento, apartado D.1. Presión dinámica, del Documento Básico de Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación (CTE, 2009).

ANEXO 2: TABLAS

Tabla 32

Coefficientes de interacción  $k_{ij}$

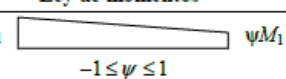
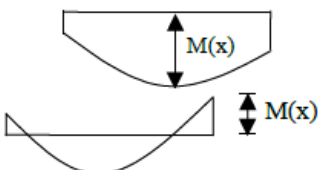
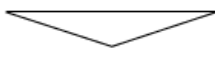

Coeficientes de interacción	Hipótesis de cálculo	
	Características elásticas de las secciones Secciones Clases 3 y 4	Características plásticas de las secciones Secciones Clases 1 y 2
$k_{yy}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}$
$k_{yz}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}}$
$k_{zy}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}}$
$k_{zz}$	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}}$
Parámetros auxiliares:		
$\nu = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$ $\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$ $w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1,5$ $w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1,5$ $n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}}$ $C_{my}$ véase la tabla A.2 $a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} \geq 0$	$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[ \left( 2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x.} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x.}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ con $b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{\chi_{LT}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}$ $C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[ \left( 2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x.}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ con $c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \lambda_z} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$ $C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[ \left( 2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x.}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ con $d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \lambda_z} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}}$ $C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[ \left( 2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x.} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{m\acute{a}x.}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ con $e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \lambda_z} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$	

$\bar{\lambda}_{\text{máx.}} = \text{máx.} \begin{cases} \bar{\lambda}_y \\ \bar{\lambda}_z \end{cases}$	
$\bar{\lambda}_0$ = esbeltez adimensional de pandeo lateral en el caso de ley de momentos flectores constante, es decir, $\Psi_y = 1,0$ en la tabla A.2.	
$\bar{\lambda}_{LT}$ = esbeltez adimensional de pandeo lateral.	
<p>Si <math>\bar{\lambda}_0 \leq 0,2\sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}\right)}</math> :</p>	$C_{my} = C_{my,0}$ $C_{mz} = C_{mz,0}$ $C_{mLT} = 1,0$
<p>Si <math>\bar{\lambda}_0 &gt; 0,2\sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}\right)}</math> :</p>	$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}$ $C_{mz} = C_{mz,0}$ $C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} \geq 1$
$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}}$ para secciones Clases 1, 2 y 3	
$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{eff}}{W_{eff,y}}$ para secciones Clase 4	
$N_{cr,y}$ = esfuerzo axil crítico elástico de pandeo por flexión con respecto al eje y-y. $N_{cr,z}$ = esfuerzo axil crítico elástico de pandeo por flexión con respecto al eje z-z. $N_{cr,T}$ = esfuerzo axil crítico elástico de pandeo por torsión. $I_t$ = inercia de torsión St. Venant. $I_y$ = inercia de flexión con respecto al eje y-y.	

Nota. Tabla A.1, Anexo A, Método 1: Coeficientes de interacción  $k_{ij}$  de la fórmula de la interacción del punto (4) del apartado 6.3.3 (UNE, 2013).

**Tabla 33**

Factores de momento uniforme equivalente  $C_{mi,0}$

Ley de momentos	$C_{mi,0}$
	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_1 + 0,36(\psi_1 - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + \left( \frac{\pi^2 EI_i  \delta_x }{L^2  M_{i,Ed}(x) } - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ $M_{i,Ed}(x)$ es el momento flector máximo $M_{y,Ed}$ o $M_{z,Ed}$ $ \delta_x $ es la flecha máxima del elemento
	$C_{mi,0} = 1 - 0,18 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Nota. Tabla A.2, Anexo A, Método 1: Coeficientes de interacción  $k_{ij}$  de la fórmula de la interacción del punto (4) del apartado 6.3.3 (UNE, 2013).