

05-001

THE STUDY, DESIGN, AND DIMENSIONING OF DIFFERENT ROOF MOUNTING STRUCTURES FOR PHOTOVOLTAIC PANELS

Anoz Varea, Gerardo (1); Ferreiro Cabello, Javier (1); Fraile García, Esteban (1); González González, Carlos (2); Losantos Ortega, Jorge (1)

(1) Universidad de La Rioja, (2) I.E.S. Valle del Cidacos

This study designs and sizes several rooftop mounting systems for photovoltaic panels, taking into account the different wind and snow loads that impact these structures across a range of locations. In order to model these photovoltaic panel support structures, made of aluminum or steel, both geographical location and panel tilt angle were incorporated through the engineering software CYPE. The final step was to evaluate the advantages and disadvantages of the various structures designed with different materials and dimensions. Aluminum mounting systems were found to be more resistant and are also 80% lighter than steel ones; however, their price is 20% higher than those structures made of steel.

Keywords: Mounting systems; photovoltaic panel; analysis; design; calculation

PROYECTO DE ESTUDIO, DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE DIFERENTES SISTEMAS DE FIJACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS A CUBIERTAS

Este trabajo estudia, diseña y dimensiona diferentes sistemas de fijación de paneles fotovoltaicos a cubiertas, definiendo y caracterizando las solicitaciones generadas por viento y nieve que afectan al cálculo de los perfiles que forman los sistemas de sujeción de paneles fotovoltaicos en cada uno de los posibles escenarios. Para el cálculo de las estructuras de sujeción de paneles fotovoltaicos, fabricadas en aluminio o en acero, se han tenido en cuenta tanto las posibles ubicaciones geográficas en las que se va a realizar la instalación como la inclinación a la que se van a colocar los paneles fotovoltaicos con respecto a la horizontal, utilizando para ello el software CYPE ingenieros. Por último, se evalúan las ventajas e inconvenientes de las estructuras diseñadas con los diferentes materiales propuestos, siendo las estructuras de aluminio más resistentes y un 80% más ligeras que las estructuras de acero, pero su precio un 20% mayor que la solución propuesta en acero.

Palabras clave: Sistemas de fijación; panel fotovoltaico; análisis; diseño; cálculo.

Correspondencia: Gerardo Anoz Varea. Correo: ganozvarea@gmail.com

Agradecimientos: En primer lugar quiero agradecer a mis tutores Esteban Fraile y Javier Ferreiro, quienes con sus conocimientos y apoyo me guiaron a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a la empresa INDEX, y más en concreto a su responsable técnico Santiago Reig, por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción. Objetivos propuestos.

Este proyecto es tratado como un caso real que cumple con los requisitos fijados por el Código Técnico de la Edificación de España (Ministry of Housing Spain 2009), calculándose para ello todas las hipótesis de carga relativas a viento y nieve en todas las capitales de provincia españolas, y por tanto, sus cálculos, resultados y conclusiones son válidos para todo el territorio español.

Este proyecto surge en un contexto de auge de la energía solar fotovoltaica, y en general de las energías renovables, a nivel global. Se puede achacar su desarrollo a factores como: la reducción del coste de adquisición e instalación de los paneles fotovoltaicos, el aumento de la concienciación social en la lucha contra el calentamiento global y el cambio climático, el desarrollo de las instalaciones con fines de autoconsumo y el hecho de ser unas inversiones con un gran retorno económico y social. Muestra de ello son los estudios recientes que desarrollan las células fotovoltaicas integradas en edificios requiriendo la instalación de paneles fotovoltaicos en la fachada vertical de edificios residenciales y de oficinas para producir más electricidad y reducir el desajuste estacional (Yu et al. 2015). O los estudios que tratan la generación de energía fotovoltaica para autoconsumo y distribuida, con el diseño de un nuevo módulo fotovoltaico de película delgada integrado en la envolvente del edificio industrial (Horgnies et al. 2017). Si, por otro lado, se centra la atención en el contexto relacionado con la fijación de paneles fotovoltaicos a cubiertas, los tipos de estructuras de fijación de paneles fotovoltaicos se dividen en dos dependiendo de si la instalación se realiza sobre cubiertas inclinadas, comunes en viviendas unifamiliares y donde se realizan pequeñas instalaciones, o sobre cubiertas planas, comunes en naves industriales y dónde se realizan la mayoría de las instalaciones de gran tamaño. Estas instalaciones están formadas dos elementos: las estructuras de suportación sobre las que se centra este proyecto y que deben fijarse al material base de la cubierta, y las placas solares que se fijan sobre estas estructuras de suportación. También hay numerosos estudios sobre los elementos estructurales que sustentan las placas solares como, el análisis estructurales por elementos finitos de cuerpo flotante en aguas continentales para paneles fotovoltaicos (Li et al. 2018). Hay estudios que diseña y analiza un sistema de soporte de paneles solares para agricultura determinando su eficiencia estructural para las altas cargas de viento (Aghilesh et al. 2020). Otros analizan la carga de viento y el modelo de distribución de la carga de viento sobre los paneles solares debido a que es el principal factor de fallo estructural en los soportes (Ma et al. 2017). En otro estudio, se propone la estructura del sistema de energía solar, que puede operar de manera estable en las áreas con terreno débil. Se calcularon diversas distribuciones de carga y deformaciones de la estructura mediante análisis numérico, y se consideraron las características típicas del terreno de las áreas objeto para determinar la estructura que minimiza el asentamiento (Joo et al. 2013). La integración de los sistemas en los edificios debe tener en cuenta diversos factores: la escala, y parámetros de esta integración en diferentes zonas climáticas (Abdalazeem et al. 2022). Un ejemplo de este tipo de estudios lo encontramos en la evaluación del desempeño de diferentes módulos solares y estructuras de montaje en un sistema fotovoltaico conectado a la red en el centro-sur de Chile (Rebolledo et al. 2022).

El proyecto que se presenta a continuación tiene como objeto el estudio, diseño, dimensionamiento y evaluación de costes de diferentes sistemas de fijación de paneles fotovoltaicos a cubiertas, de forma que se ofrezca solución desde los puntos de vista técnico y económico a un problema industrial, comercial, medioambiental y de sostenibilidad, facilitando y potenciando el aprovechamiento del terreno urbano e industrial edificado para la producción de energía solar fotovoltaica mediante la creación de huertos solares en las cubiertas industriales y residenciales. Para alcanzar este objetivo, se ha llevado a cabo un gran trabajo que ha permitido el conocimiento y caracterización de los parámetros que afectan a las solicitaciones de cálculo sobre las estructuras de suportación de paneles fotovoltaicos, viento y nieve principalmente, para posteriormente y tras diseñar los diferentes perfiles que las forman, modelizar y calcular estos sistemas de suportación en los diferentes escenarios

en los que pueden encontrarse. Una vez se han realizado estos cálculos y validado los diseños, se ha realizado un análisis de la influencia tanto en precio como en resistencia mecánica de los perfiles en ambos materiales base. Las principales dificultades sorteadas en este proceso han sido por un lado la discretización de las hipótesis de cálculo, ya que la combinación de cargas de viento, nieve e inclinación de los paneles fotovoltaicos con respecto a la horizontal ofrecía una cantidad de hipótesis casi infinita y por otro, la adaptación de los perfiles a utilizar a las necesidades de producción industriales. Estos diseños hacen mejoras en relación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- energía asequible y no contaminante
- ciudades y comunidades sostenibles.

Metodología.

Tras la introducción y los resúmenes planteados, en este punto se explican con detalle los pasos seguidos para el desarrollo y ejecución de este proyecto.

El primer paso, anterior al diseño de las estructuras de suportación, es el estudio de las características técnicas y dimensionales de los paneles fotovoltaicos que se considerarán válidos para las estructuras de suportación a diseñar. Para ello, se analizan las diferentes placas solares disponibles a nivel comercial junto con sus principales ventajas e inconvenientes.

En este caso, las principales configuraciones de placas solares estudiadas son las de 36, 60 y 72 células fotovoltaicas, descartándose las primeras a efectos de este proyecto por ser de pequeñas dimensiones y potencia y no ser comunes en grandes instalaciones industriales. Por lo expuesto, el diseño a implementar para estructuras para la fijación de placas solares es válido para placas solares de 60 y 72 células fotovoltaicas, aunque a efectos de cálculo se trabaja con la segunda de ellas por suponer una mayor superficie expuesta para cargas de nieve y viento y ser más restrictivas en cuanto a las cargas a soportar. Estas placas solares tienen unas dimensiones de 2x1 metros, pesarán 25 kg y son capaces de generar 380 W de potencia.

Una vez se ha decidido qué tipo de placas solares va a poder fijarse a las estructuras de suportación metálicas, se procede a determinar las cargas características que van a tener que resistir dichas estructuras utilizando el Código Técnico de la Edificación de España. Estas cargas se dividen en dos tipos a efectos de este proyecto: Las debidas a acciones permanentes, como es el peso propio tanto de las estructuras de suportación como de las placas solares, y las debidas a acciones variables, como son las cargas debidas a la nieve o al viento.

El principal punto de conflicto a niveles de modelización y cálculo se centra en las acciones variables, ya que estas generan cargas superiores a las generadas por el peso propio. Las cargas generadas por acciones debidas al viento, también conocidas como presión estática, tienen una dirección perpendicular a la superficie expuesta y surgen de la multiplicación del valor de la presión dinámica del viento, dependiente del emplazamiento geográfico donde se realice la instalación, por el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado y el grado de aspereza del entorno, por el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie con respecto al viento y en el que valores negativos indicarán cargas de succión y valores positivos, cargas de presión, y todo ello por el área de proyección vertical del volumen estudiado, es decir el seno del ángulo de inclinación de la placa solar con respecto a la horizontal multiplicado por la superficie de la placa. La altura considerada para el coeficiente de exposición en este proyecto es de 12 metros, de manera que los cálculos sean válidos para la gran mayoría de cubiertas de naves industriales y pabellones deportivos.

A continuación, se muestra la formula a aplicar:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \cdot \text{Sen } \alpha \cdot \text{Área} \quad (1)$$

Siendo:

q_e la presión estática del viento.

q_b la presión dinámica del viento.

c_e el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, en

c_p el coeficiente eólico o de presión

Si nos centramos en las cargas generadas por acciones debidas a la nieve, tienen una dirección vertical y sentido hacia abajo y surgen de la multiplicación del valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal, por el coeficiente de forma, dependiente de la inclinación, y por el área de proyección horizontal del volumen estudiado, es decir el coseno del ángulo de inclinación de la placa solar con respecto a la horizontal multiplicado por la superficie de la placa.

$$q_n = \mu \cdot S_k \cdot \text{Cos } \alpha \cdot \text{Área} \quad (2)$$

siendo:

q_n carga de nieve

μ coeficiente de forma de la cubierta

S_k el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal

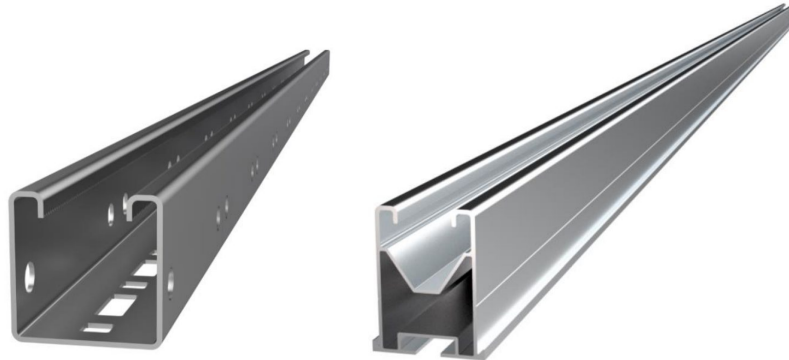
Tras describir y seleccionar las placas solares que son válidas para fijarse en las estructuras de suportación y las cargas generadas sobre ellas por acciones permanentes y variables y que transmiten a la estructura de suportación, el siguiente paso es la descripción de las partes estructurales de estas estructuras en sí mismas. Esta estructura está formada por dos partes: Correas y apoyos angulados.

Las correas son dos barras rectas y paralelas sobre las cuales apoyan las placas solares, situándose una en la parte inferior y otra en la parte superior de la placa. Cada placa se fija sobre estas correas en cuatro puntos de apoyo, fijando dos de ellos los extremos laterales de la placa solar con la correa superior y otros dos los extremos laterales de la placa solar con la correa inferior. Las correas son pues la conexión entre las placas solares y los apoyos angulados, pero también, entre los distintos apoyos angulados, formando así la estructura de suportación.

Los apoyos angulados son las estructuras que fijan las correas al material base y están formados por dos barras que forman un ángulo entre sí. La primera de ellas, de mayor longitud, está situada en un plano paralelo a las placas solares y es la parte de la estructura a la que se fijan las correas. Uno de sus extremos se ancla mediante unos pequeños apoyos metálicos a la cubierta o al suelo, quedando el otro extremo apoyado en la segunda barra. La segunda barra se sitúa de forma que uno de sus extremos se ancle a la cubierta o suelo, con la ayuda de similares apoyos metálicos, y el otro extremo queda anclado a la primera barra del apoyo angulado, sirviendo para regular la inclinación de las placas solares. Si queremos obtener un ángulo de inclinación de las placas solares de 25°, las dos barras que forman el apoyo angulado se deben unir por sus extremos libres con un ángulo de 90°. En el caso de querer obtener un ángulo de 30° para las placas solares, la segunda barra del apoyo angulado se debe unir en vertical a unos 23 cm del extremo de la primera barra. En el caso de querer obtener un ángulo de 35° para las placas solares la segunda barra del apoyo angulado debe ser igualmente vertical, pero su unión se realiza a unos 45cm del extremo de la primera barra.

Las estructuras de sujeción, aunque en todo caso se va a seguir la distribución anteriormente descrita de apoyos angulados y correas, se pueden separar en dos tipos según el material que va a ser utilizado para su fabricación: Aluminio o acero.

Figura 1: Perfiles de estructura de sujeción de acero (izquierda) y aluminio (derecha)



Las principales ventajas de las estructuras fabricadas en aluminio son su ligereza, encontrándose el peso del aluminio entorno a un tercio del peso del acero, sus propiedades como material inoxidable que le otorgan gran resistencia contra la corrosión y la oxidación y su mejor manufacturabilidad dado que es un material fácil de cortar, manipular y moldear. Si nos centramos en las estructuras fabricadas en acero, destaca que este es un material mucho más fuerte y resistente que el aluminio. Sin embargo, el aluminio tiene un precio más elevado que el acero, siendo este su principal punto en contra en un proceso industrial y comercial.

Debido a sus diferentes propiedades, los perfiles utilizados para formar ambas estructuras, la de aluminio y la de acero, tienen diferentes características en cuanto a forma y espesor y, por tanto, diferentes momentos de inercia que resultan en diferentes resistencias para las estructuras como se indica en la tabla 1.

Los perfiles de acero son más sencillos en su diseño debido a su proceso de fabricación, el conformado, y tienen forma de U con dos alas curvas hacia el interior en su parte superior que permiten aumentar la resistencia del perfil sin aumentar su altura. El diseño de los perfiles de acero es igual para las correas y apoyos angulados, variando solamente la longitud de las barras utilizadas. En cuanto a los perfiles diseñados en aluminio, se han seleccionado tres tipos de perfiles diferentes para cada una de la tipología de barras de la estructura según las necesidades, es decir, la barra tipo correa y las dos barras que forman el apoyo angulado tienen diseños diferentes en cuanto a perfil, dimensiones y espesor. Esto es posible ya que, al fabricarse los perfiles de aluminio por un proceso de extrusión, se pueden realizar diseños específicos para cada caso e introducir modificaciones que adapten los mismos a las necesidades de utilización.

Tabla 1. Características técnicas de los perfiles.

Material	Tipo de barra	Momento de Inercia Y (cm ⁴)	Momento de inercia Z (cm ⁴)	Área Sección (cm ²)
Acero	Correa			
	Vertical	6,02	5,05	2,1
	Inclinada			

Aluminio	Correa	16,93	11,29	4,15
	Vertical	4,81	4,81	2,64
	Inclinada	5,2	7,55	3,08

Tras describir los requisitos de diseño, el proceso de selección de las placas solares que van a instalarse, las cargas que aplican sobre las estructuras de suportación y la estructura en sí misma, con los distintos materiales y perfiles que van a utilizarse, se procede al modelizado y cálculo del sistema, con el fin de obtener resultados concluyentes sobre las solicitaciones de las barras que forman cada estructura, a modo de ejemplo podemos ver la figura 2 la configuración estructural de barras, en cada una de las capitales de provincia del territorio nacional, en función de sus respectivas cargas de viento y nieve.

Figura 2. Estructura de suportación



Para llevar a cabo este estudio se ha utilizado el software de cálculo CYPE ingenieros, en particular su módulo para estructuras de metálicas CYPE 3D, en el que se han introducido las estructuras de suportación de dos, tres, cuatro, cinco y seis placas solares, ya que con la combinación de estas estructuras pueden cubrirse todas las necesidades comerciales existentes, con sus respectivas cargas siguiendo las especificaciones indicadas anteriormente y las dimensiones indicadas en los planos de diseño. Para este proyecto, se van a considerar 5 ubicaciones de estudio, por considerarse las más representativas de entre las capitales de provincia, en función de las cargas variables que deben soportar las estructuras. Estas ubicaciones se han seleccionado como referenciales para cubrir todo el rango de cargas y tener referencias en todas las ubicaciones de la península en cuanto a las solicitaciones a las que se verán sometidas las estructuras en cuanto a cargas. Estas ubicaciones son León, Soria, Lugo, Barcelona y Sevilla, y el principal elemento para la selección de los casos de estudio es la carga característica de nieve por dos motivos: En primer lugar la carga característica de nieve tiene una variación mucho mayor entre los valores máximos y mínimos registrados en el CTE, siendo el valor mínimo de $0,2 \text{ kN/m}^2$ y el valor máximo de $1,2 \text{ kN/m}^2$, lo que significa una variación de hasta el 600%, y en segundo lugar, la carga característica de nieve es más restrictiva que la carga característica de viento en gran parte de la geografía española dado que la carga característica debida a la presión dinámica del viento varía entre $0,42 \text{ kN/m}^2$ y $0,52 \text{ kN/m}^2$ y la carga característica debida a la nieve, como ya hemos dicho anteriormente, varía entre $0,2 \text{ kN/m}^2$ y $1,2 \text{ kN/m}^2$, siendo una

carga de nieve encontrada comúnmente en España 0,6 kN/m², caso en el que ya sería superior a la posible carga de viento.

Tras introducir todos los datos disponibles, se procede a realizar el cálculo de las estructuras para comprobar cómo se comportan los distintos perfiles, materiales y configuraciones seleccionadas. Para analizar los resultados se ha de tener en cuenta que, si bien el acero S235 es un material más resistente que el aluminio 6063, los momentos de inercia son muy superiores para los perfiles diseñados en aluminio.

Hay que destacar también que, aunque todas las barras reciben cargas, las barras más solicitadas son las correas.

Resultados y viabilidad de ejecución.

Tras la definición completa del proyecto a través de la descripción de todos los parámetros tenidos en cuenta, como son las cargas que deben soportar las estructuras, los materiales, perfiles e inclinaciones estudiadas y el completo modelizado de las estructuras, se procede al análisis de los resultados obtenidos desde los puntos de vista técnico y económico.

Desde el punto de vista técnico, la estructura diseñada en aluminio, es válida en todas las capitales de provincia de España en terrenos llanos sin obstáculos ni arbolados de importancia realizándose la instalación solar hasta una altura de doce metros sobre el suelo, excepto aquellas en las que se encuentran casos de nieve extremos, es decir, que el valor de la carga característica de nieve sobre un terreno horizontal sea igual o superior a 90 kg/m² según la tabla 3.8 del CTE en su documento básico de seguridad estructural en acciones en la edificación. Para estos casos se debe realizar un estudio detallado de la situación y las cargas aplicables, pudiendo ser una solución óptima desde un punto de vista técnico la incorporación de un apoyo angulado más por estructura, de forma que se reduzca la distancia entre apoyos de las correas. Se muestra en la figura 3 en que capitales de provincia son válidas, en las condiciones expuestas, las estructuras diseñadas en aluminio.

Figura 3: Mapa validez capitales de provincia Aluminio Fuente



Por otro lado, para la estructura diseñada en acero S235, son válidas todas las capitales de provincia del territorio español en terrenos urbanos (figura 4), forestales o industriales realizándose la instalación solar hasta una altura de doce metros sobre el suelo, excepto aquellas en las que se encuentran casos de nieve extremos, es decir que el valor de la carga característica de nieve sobre un terreno horizontal sea igual o superior a 90 kg/m² según la tabla 3.8 del CTE en su documento básico de seguridad estructural en acciones en la

edificación siempre y cuando no se utilicen barras correa con una longitud entre apoyos mayor a 1,5 metros.

Estos resultados no alcanzaban los previstos en el objetivo del proyecto al tener que eliminar todas aquellas estructuras de sujeción en las que la distancia entre puntos de apoyo en las correas es mayor de 1,5 metros. Por este motivo, se estudia y aprueba la introducción de una mejora en las prestaciones mecánicas del acero, ya que se considera la mejor solución por ser la más sencilla y versátil, de manera que su límite elástico aumente hasta el punto necesario para alcanzar los objetivos del proyecto. El aumento es de 235 mpa a 355 mpa, lo que supone un aumento del límite elástico del 51%, y aunque este aumento de las prestaciones mecánicas del acero no se transmite en su totalidad a la mejora de las prestaciones mecánicas de la estructura (aumento del 36%), sí que se consigue una evidente mejora en los resultados, como puede verse en la figura 5, siendo válidos estos resultados para todas las capitales de provincia del territorio español en terrenos urbanos, forestales o industriales realizándose la instalación solar hasta una altura de doce metros sobre el suelo, excepto aquellas en las que se encuentran casos de nieve extremos, es decir que el valor de la carga característica de nieve sobre un terreno horizontal sea igual o superior a 90 kg/m² según la tabla 3.8 del CTE en su documento básico de seguridad estructural en acciones en la edificación.

Figura 4: Mapa validez capitales de provincia Acero S235

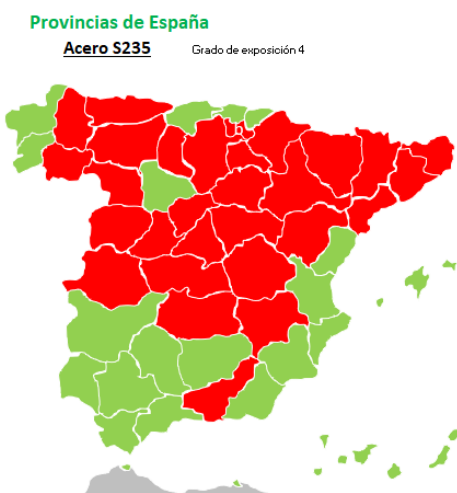
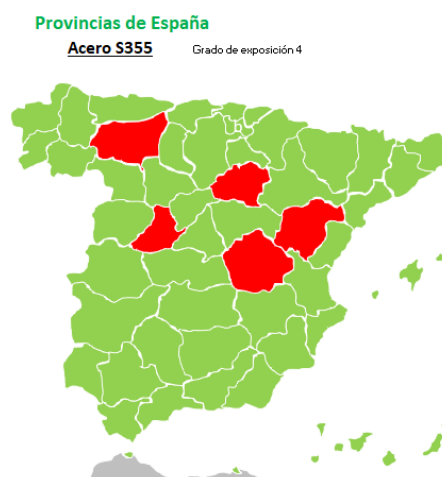


Figura 5: Mapa validez capitales de provincia Acero S355



Al sustituir el acero S355 por el inicialmente previsto S235 se analiza el aumento del precio, y resulta ser muy reducido en comparación con el aumento en la resistencia conseguido.

En cuanto a la evaluación económica de los resultados, y una vez las soluciones aportadas han demostrado ser válidas desde un punto de vista técnico, se comparan los costes por placa solar para las estructuras de sujeción de dos, tres, cuatro, cinco y seis placas solares entre ellas y teniendo en cuenta el material base utilizado para las barras: Acero o aluminio

La diferencia en metros lineales de material utilizado es muy reducida, sin embargo, los perfiles diseñados tienen distintos pesos por metro lineal (tabla 2), lo que afecta al peso total del material que debe emplearse para cada una de las estructuras.

Tabla 2. Peso total del material utilizado en función de la tipología de la estructura

Material	2	3	4	5	6
----------	---	---	---	---	---

Acero (Kg)	15,35	23,23	26,692	34,57	42,03
Aluminio (Kg)	8,3	12,37	14,83	18,89	21,359
Variación (%)	84,92	87,91	79,95	82,98	99,79

El peso global de las estructuras diseñadas en aluminio es muy inferior al de las diseñadas en acero, en torno al 85% de media. Sin embargo, el precio del aluminio como material base es muy superior al precio de acero, lo que se refleja en el precio final, que es aproximadamente un 20% mayor.

Los resultados obtenidos permiten la utilización de modelos estandarizados en la gran mayoría del territorio español, incluyendo una altura de hasta 12 metros respecto al suelo en ambientes industriales, urbanos y forestales, lo que dota de gran versatilidad a la hora de realizar instalaciones para la creación de huertos solares y, sobre todo, para las instalaciones realizadas sobre las cubiertas de naves industriales o pabellones deportivos.

Para casos donde las cargas de nieve se consideran extremas, es necesario realizar un estudio detallado de cada situación.

Comparando los resultados obtenidos entre los distintos materiales base, se puede observar como el aluminio, aún siendo un material de menor resistencia mecánica que el acero, consigue unas mejores prestaciones dado que se han diseñado perfiles con mayores momentos de inercia que potencian su rendimiento y la facilidad de instalación y montaje de las estructuras. Las estructuras de aluminio, además, son más ligeras que las formadas por perfiles de acero, lo que facilita y reduce costes en su transporte e instalación. Sin embargo, el precio del material base resulta definitivo en cuanto a los costes finales de ambas estructuras, siendo el acero sensiblemente más económico que el aluminio.

Conclusiones

Una vez se ha realizado un análisis completo de la situación, se ha decidido implementar todos los casos de estudio, es decir estructuras en ambos materiales base, con las tres inclinaciones de las placas solares indicadas, 25, 30 y 35°, y para la suptación de 2, 3, 4, 5 y 6 placas solares cada una.

Los resultados obtenidos permiten la utilización de modelos estandarizados en la gran mayoría del territorio español incluyendo una altura de hasta 12 metros respecto al suelo en ambientes industriales, urbanos y forestales, lo que dota de gran versatilidad a la hora de realizar instalaciones para la creación de huertos solares y, sobre todo, para las instalaciones realizadas sobre las cubiertas de naves industriales o pabellones deportivos.

Para casos donde las cargas de nieve se consideran extremas, es necesario realizar un estudio detallado de cada situación.

Comparando los resultados obtenidos entre los distintos materiales base, se puede observar como el aluminio, aun siendo un material de menor resistencia mecánica que el acero, consigue unas mejores prestaciones dado que se han diseñado perfiles con mayores momentos de inercia que potencian su rendimiento y la facilidad de instalación y montaje de las estructuras. Las estructuras de aluminio, además, son más ligeras que las formadas por perfiles de acero, lo que facilita y reduce costes en su transporte e instalación. Sin embargo, el precio del material base resulta definitivo en cuanto a los costes finales de ambas estructuras, siendo el acero sensiblemente más económico que el aluminio.

Este estudio ayuda a potenciar los Objetivos de Desarrollo Sostenible comentados en los objetivos propuestos, ya que pueden ser implementados como soluciones de generación de energía solar aprovechando las cubiertas de edificios en ambientes urbanos e industriales con el fin de conseguir ciudades y comunidades sostenibles. Además, la implementación de

proyectos de producción de energías renovables en ambientes ya urbanizados estimula la creación de energía asequible y no contaminante, reduciendo especialmente el impacto paisajístico creado por los grandes huertos solares instalados en regiones rurales mediante el aprovechamiento de las cubiertas de edificios ya existentes que en la actualidad no eran aprovechadas para este fin.

Por ello, se considera que se cumplen las demandas que pudieran existir en el mercado en cuanto a calidad, facilidad de instalación, peso y propiedades mecánicas de las estructuras, además de ofrecer diferentes alternativas desde un punto de vista económico, quedando como futuras líneas de desarrollo el diseño de estas estructuras con nuevos materiales más resistentes, ligeros y económicos.

Referencias

- Abdalazeem, Mohamed E, Hamdy Hassan, Takashi Asawa, and Hatem Mahmoud. 2022. "Review on Integrated Photovoltaic-Green Roof Solutions on Urban and Energy-Efficient Buildings in Hot Climate." *Sustainable Cities and Society* 82 (April): 103919. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103919>.
- Aghilesh, V., P. Manigandan, Suresh Reddy, K. Raja sekar, and N. Shunmugavelu. 2020. "Design and Analysis of an Agriculture Solar Panel Support Structure with Tilting Mechanisms." *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 227–35. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3631-1_21.
- CYPE Ingenieros S.A. 2021. "CYPE Ingenieros S.A. Software for Architecture, Engineering and Construction. Spain, 2021.B."
- Horgnies, Matthieu, Fabienne Legrand, Emmanuel Bonnet, and Isabelle Dubois-Brugger. 2017. "Study of the Interface and Durability of the Adhesion between Photovoltaic Cells and Concrete-Based Façade Panels." In *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 116:171–79. <https://doi.org/10.2495/MC170171>.
- Joo, K.-W., J.Y. Kim, K.T. Park, and K.-S. Kim. 2013. "A Numerical Analysis of the Solar Panel Support Structure on the Weak Ground." In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. Vol. 9. <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-65549>.
- Li, W., L.-L. Zhou, J. Gan, and W.-G. Wu. 2018. "Finite Element Analysis of Photovoltaic Floating Body Based on Design Wave Method." In *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2018-June:775–81.
- Ma, W., G. Sun, X. Liu, K. Xing, and Q. Liu. 2017. "Tests for Wind Load Distribution Model of Solar Panels." *Zhendong Yu Chongji/Journal of Vibration and Shock* 36 (7): 8–13. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2017.07.002>.
- Ministry of Housing Spain. 2009. *Technical Building Code Royal Decree 314/2006 of 17 March*.
- Rebolledo, Felipe, Patricio Mendoza-Araya, Gonzalo Carvajal, and Guillermo Ramírez. 2022. "Performance Evaluation of Different Solar Modules and Mounting Structures on an On-Grid Photovoltaic System in South-Central Chile." *Energy for Sustainable Development* 68: 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.02.003>.

Yu, H., Q. Wang, C. Lu, and C. Wei. 2015. "The Research on a New Type of BIPV Modules Constructed by Thin-Film Photovoltaic Panel (or Module)/PU/Color Organic-Coated Steel Plate." In *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015*. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355824>.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

