



Método para el cálculo de las reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas

Han participado en la elaboración del Método para el cálculo de las reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas:

D. Julián Placido Pecharromán Sacristán

Catedrático de E.U. en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, de la Universidad Politécnica de Madrid

D. Jorge Moreno Mohino

Catedrático de E.U. en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, de la Universidad Politécnica de Madrid

D. Manuel Antonio Fernández Casares

Consultor y Asesor de la Secretaría Técnica del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid

COGITIM.
Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid.
Jordán, 14. 28010 Madrid
Tel. 91 448 24 00
Fax. 91 448 34 58
Email: coitim@coitim.es
<https://www.cogitim.es>

El Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid, como institución relacionada con el proceso constructivo y los agentes de la edificación de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, a través de la representación de los Ingenieros Técnicos Industriales, proyectistas, directores de obra y directores de ejecución de obras, que en virtud de sus competencias realizan los análisis del comportamiento estructural de las construcciones en la edificación frente al viento, ha liderado un Proyecto de investigación sobre la Seguridad Estructural en presencia de Instalaciones Solares (SE-IS)

El Proyecto SE-IS ha sido dividido en seis fases.

SE-IS.1 Método para el cálculo de las reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas.

SE-IS.2 Guía para el cálculo de los contrapesos de paneles fotovoltaicos inclinados sobre cubiertas planas.

SE-IS.3 Ejemplo de aplicación de la Guía para el cálculo de los contrapesos de paneles fotovoltaicos inclinados sobre cubiertas planas.

SE-IS.4 Análisis de seguridad estructural de las cubiertas. Repercusión del método de cálculo de los contrapesos de las instalaciones fotovoltaicas.

SE-IS.5 Resistencia al fuego disponible en las estructuras de edificaciones con instalaciones fotovoltaicas.

SE-IS.6 Resistencia al fuego exigida en las estructuras de la edificación con instalaciones fotovoltaicas.

Los trabajos realizados pretenden contribuir a que las soluciones técnicas aplicadas en el proyecto, en la ejecución de la obra o en el mantenimiento y conservación del edificio con sistemas solares, sigan alcanzando las prestaciones requeridas respecto a la Seguridad Estructural.

José Antonio Galdón Ruiz
Decano

Resumen

El fomento de las energías renovables está propiciando un desarrollo sin precedentes de las instalaciones con paneles solares fotovoltaicos sobre la cubierta de los edificios, siendo frecuente la utilización de paneles inclinados con contrapesos, a los que sus promotores les imponen cada vez más requisitos de seguridad, funcionalidad y economía.

Tales instalaciones formarán parte de la edificación y por su interacción con los flujos de viento, corren el riesgo de no tener un comportamiento seguro para las personas o dañar su funcionalidad, pudiendo provocar un gran impacto estructural en el resto de la edificación.

Actualmente, ni la reglamentación nacional ni la europea, a través de los Eurocódigos, contemplan de forma específica el comportamiento frente a la acción del viento de las instalaciones solares, debiendo realizarse el análisis estructural por asimilación con algunas de las formas normalizadas.

El Método que presentemos para el cálculo de las reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas, consigue integrar los modelos de cálculo nacionales e internacionales, al hacer compatibles y complementarias las especificaciones del Código Técnico de la Edificación, de los Eurocódigos y del Código estructural de American Society of Civil Engineers.

El objetivo es facilitar que se alcancen las prestaciones exigidas, al particularizar los requisitos para las instalaciones con paneles solares inclinados sobre cubiertas planas, en base a los resultados disponibles en los ensayos de túnel de viento, haciendo compatible que se puedan satisfacer los requisitos de seguridad, funcionalidad y economía.

Palabras clave

Seguridad estructural; Instalaciones solares; Paneles fotovoltaicos; Ensayos de túnel de viento

Abstract

The promotion of renewable energies is leading to an unprecedented development of installations with photovoltaic solar panels on the roof of buildings, the use of inclined panels with counterweights being frequent, to which their promoters impose more and more safety requirements, functionality and economy.

Such installations will be part of the building and due to their interaction with wind flows, they run the risk of not having a safe behaviour for people or damaging its functionality, which could cause a great structural impact on the rest of the building.

Currently, neither the national nor the European regulations, through the Eurocodes, specifically contemplate the behaviour of solar installations against the action of the wind, and the structural analysis must be carried out by assimilation with some of the standard forms.

The Method that we present for the calculation of the reactions in the supports of photovoltaic installations with inclined panels on flat roofs manages to integrate the national and international calculation models, by making the specifications of the Technical Code of Building, the Eurocodes and the Structural Code of the American Society of Civil Engineers.

The objective is to facilitate the achievement of the required performance, by specifying the requirements for installations with inclined solar panels on flat roofs, based on the results available in wind tunnel tests, making it compatible that the requirements of safety, functionality and economy can be met.

Keywords

Structural safety; Solar installations; Photovoltaic panels; Wind tunnel tests

Introducción

Las instalaciones con paneles solares fotovoltaicos sobre la cubierta de los edificios, constituyen construcciones que formarán parte de la edificación, a las que aplica el requisito básico de seguridad estructural [1] [2] [3], para que su comportamiento estructural sea adecuado en su construcción y durante la totalidad del período de vida útil previsto.

El análisis de seguridad estructural permite destacar que las instalaciones solares, pueden tener un comportamiento inseguro, poniendo en riesgo a las personas, dañar su funcionalidad y provocar un gran impacto estructural en el resto de la edificación, siendo la presión de viento la principal acción a considerar, en especial cuando los paneles solares están inclinados sobre las cubiertas de los edificios, pues se genera una gran fuerza de succión y presión, cuyo valor puede ser estimado a través del coeficiente aerodinámico.

Actualmente, ni la reglamentación específica nacional [4] ni los Eurocódigos [5], contemplan de forma específica el comportamiento frente a la acción del viento de las instalaciones solares, proporcionando valores del coeficiente de presión sólo para determinadas formas, indicando que para otros casos se deben aplicar los que presenten rasgos más coincidentes con el analizado.

Con la experiencia acumulada en el COGITIM en la revisión de los proyectos de construcción de instalaciones solares, se ha podido comprobar lo que mostraban los estudios que se han ido realizando [6]: que los responsables de analizar el comportamiento estructural de las construcciones frente al viento, al comparar los rasgos de los paneles solares inclinados sobre cubiertas con las formas estudiadas por la norma nacional, consideran como más coincidentes a las marquesinas individuales emplazadas al nivel del suelo y a los edificios con cubiertas planas que sólo exponen al viento el material de su recubrimiento.

Además, en los estudios mencionados [6], al analizar con tales conjeturas el impacto estructural que provocan una colección de paneles solares inclinados con contrapesos en las edificaciones existentes, muestran que al reducir el riesgo de sufrir inestabilidad por las fuerzas de tracción, mediante la utilización de grandes contrapesos en toda la instalación solar, en contra, puede aumentar significativamente el riesgo por la pérdida de resistencia y estabilidad de las cubiertas.

Ya existen resultados de ensayos en túnel de viento [7] que demuestran que el comportamiento dinámico de viento sobre una colección de paneles solares inclinados y adyacentes que están instalados sobre las cubiertas de los edificios, es muy diferente al que experimentan los recubrimientos de las cubiertas de los edificios o al experimentado por las marquesinas individuales, de grandes áreas y situadas sobre el terreno.

Por tanto, se puede concluir que ante la necesidad de cumplir el requisito básico de seguridad estructural, junto con la dificultad actual para adaptar las exigencias de la normativa nacional a los riesgos tan particulares que presentan las instalaciones con paneles solares fotovoltaicos sobre la cubierta de los edificios, surge la oportunidad de aplicar los resultados disponibles de los ensayos de túnel de viento.

Entre los ensayos de túnel de viento disponibles, se han seleccionado los incluidos en el código ASCE [8], por ofrecer soluciones normalizadas y aplicables a la gran mayoría de configuraciones utilizadas en las instalaciones solares, por disponer de una larga experiencia en los resultados de su aplicación y poder hacerse compatibles sus especificaciones con la normativa nacional vigente.

Al realizar las verificaciones en base a los resultados de ensayos en túnel de viento normalizados, será posible determinar con suficiente fiabilidad la fuerza inducida por la acción del viento y las fuerzas de reacción correspondientes, para establecer las prestaciones requeridas a los anclajes o a los contrapesos.

Hacerlo así equivaldría a proporcionar un procedimiento para mejorar el cumplimiento del requisito básico de seguridad estructural, en especial cuando se utilizan contrapesos; en los paneles más solicitados por el viento, se indicarán los pesos mínimos para evitar su desequilibrio, mientras que será posible no excederse en los pesos de los paneles más protegidos frente al viento, para no poner en peligro la integridad de la cubierta, ni en situación normal ni en caso de incendio.

Alcance

El Método para el cálculo de las reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas, tendrá como ámbito de aplicación a las edificaciones con instalaciones solares compuestas de paneles fotovoltaicos inclinados sobre sus cubiertas planas, y en particular, cuando se utilizan contrapesos simplemente apoyados.

Se realizará por medio de un análisis de seguridad estructural que tendrá como alcance la situación normal, es decir, las condiciones normales de uso debido a las acciones permanentes y variables.

Estará limitado a verificar la exigencia básica de estabilidad, contra la pérdida de equilibrio por elevación y deslizamiento, de las subestructuras que soportan los paneles fotovoltaicos.

No se incluye ni el efecto de las fuerzas tangenciales a las superficies de los paneles, ni la evaluación de la respuesta dinámica a las fuerzas del viento por falta de rigidez de las estructuras.

No se podrá aplicar el método a las instalaciones solares situadas sobre las cubiertas de los edificios, con una configuración no respaldada por ensayos de túnel de viento normalizados, por superar alguno de los siguientes límites:

- a) Ángulo de inclinación de la cubierta mayor de 70
- b) Ángulo formado por el panel respecto a la cubierta mayor de 350
- c) Longitud característica de los paneles mayor de 2,04m
- d) Altura del borde superior del panel mayor de 1,22m
- e) Altura del borde inferior del panel mayor de 0,61m

Método para el cálculo de las reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas

- f) Distancia horizontal y ortogonal desde el borde de la colección de paneles al borde de la cubierta, menor que el máximo entre 1,22m y el doble de la diferencia entre la altura del borde superior del panel y la altura media del parapeto de la cubierta
- g) Distancia horizontal entre filas de paneles adyacentes menor de 0,5 veces la altura del borde superior del panel

Bases del Método

1.- Zonas de viento

Los resultados de los ensayos de túnel de viento [7] demuestran que el material de recubrimiento de las cubiertas planas de los edificios en su interacción con los flujos de viento, presenta rasgos muy diferentes respecto a los paneles solares inclinados sobre tales cubiertas:

- a) Destacan extensas zonas de esquina, donde se crean grandes vórtices que provocan elevadas cargas de succión
- b) Zonas con fluctuaciones extremas, con separación del flujo acelerado de viento, zonas transición y otras de reinsertión, provocando la inhibición en la igualación de las presiones internas y externas, induciendo acciones netas superiores
- c) Se pueden identificar zonas de viento profundas en cubiertas que son suficientemente anchas, que no se ven afectadas de forma significativa por los vórtices de las esquinas

En consecuencia, la aplicación del Método SE-IS.1, al basarse en los resultados de los ensayos de túnel de viento, conforme a la normativa internacional [8], permitirá mejorar el cumplimiento de la normativa nacional [4] [5] a través de una adecuada asignación de las zonas de viento.

2.- Coeficientes de presión

También han demostrado los resultados de los ensayos de túnel de viento [7], que las marquesinas aisladas, situadas en el suelo y de grandes superficies, tienen asignados unos coeficientes de presión muy diferentes a los observados para las agrupaciones de paneles solares inclinados sobre las distintas zonas que pueden ser emplazados dentro de las cubiertas planas de los edificios:

- a) La sensibilidad de los paneles inclinados situados en cubierta a los flujos de viento arremolinados por la influencia de los bordes de la cubierta, producen fuerzas aerodinámicas muy diferentes a las producidas en el suelo
- b) El borde de los propios paneles influyen en el comportamiento ante el viento de los paneles próximos, debido al efecto de separación del flujo y reinsertión, provocando zonas más expuestas y otras más protegidas

- c) Las áreas de viento efectivas que se utilizan en la práctica son inferiores a las dimensiones normalizadas. En este sentido hay que destacar que los valores del coeficiente de presión pueden variar mucho con el tamaño de las superficies y con su comportamiento estructural, presentando mayores valores del coeficiente de presión cuando las superficies son pequeñas
- d) Es necesario considerar el efecto de la intensidad de las turbulencias debido a la acción del viento, siendo además más adecuado considerar tal efecto dinámico junto a la influencia de las formas y la ubicación de las instalaciones solares, dentro de un mismo coeficiente (el coeficiente de presión)

En consecuencia, la aplicación del Método SE-IS.1, al basarse en los resultados de los ensayos de túnel de viento, conforme a la normativa internacional [8], permitirá mejorar el cumplimiento de la normativa de ámbito nacional [4] [5] a través de una adecuada asignación de los coeficientes de presión.

Es necesario destacar que no es directamente comparable el coeficiente eólico (c_p) del Documento Básico del CTE o del Eurocódigo, con el coeficiente de presión ($G_{C,rn}$) contemplado en ASCE o SEAOC, pues presentan importantes diferencias, entre ellas:

- i. El coeficiente eólico (c_p) sólo incluye parte de los efectos conjuntos que se contemplan en el coeficiente de presión ($G_{C,rn}$).
- ii. No es posible ofrecer los valores con el formato tabulado habitual, sino a través de ecuaciones que incluyen todas las variables que le influyen.
- iii. Mientras que un único valor del coeficiente eólico (c_p) sólo se puede asignar a superficies extensas, el coeficiente de presión ($G_{C,rn}$) puede asignarse a zonas pequeñas; en caso de utilizar contrapesos, mientras que a muchos contrapesos situados en lugares muy diferentes sólo se le puede asignar un único valor del coeficiente eólico (c_p), con el Método SE-IS.1, a cada contrapeso individual se le podrá asignar el valor preciso del coeficiente de presión ($G_{C,rn}$) que realmente le corresponde.

3.- Ensayos de túnel de viento normalizados

Debido a la dificultad para realizar adecuados ensayos de túnel de viento para las instalaciones solares que son objeto de análisis, es imprescindible que los resultados deban estar basados en los datos aportados por ensayos que ofrezcan las garantías necesarias.

En ese sentido, a falta de otros ensayos más específicos, el Método que presentamos utiliza los contemplados en códigos internacionales con una larga experiencia [8].

Descripción del Método

El cálculo de las reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas, seguirá seis etapas:

Etapas 1. Velocidad básica del viento

Se partirá de la presión de la velocidad básica del viento, para considerar la influencia de las condiciones climatológicas del emplazamiento y sus incertidumbres, asociado a la probabilidad anual de ser superada y de su correspondiente período de retorno, conforme a la normativa nacional [4].

Etapas 2. Velocidad media del viento

Para determinar la velocidad media del viento se incluirá el efecto de la altura del terreno, la rugosidad y la orografía, mediante el factor de rugosidad y el coeficiente topográfico, conforme al Eurocódigo [5].

Etapas 3. Velocidad pico del viento

Para determinar la velocidad pico del viento y su efecto neto sobre las superficies, se incluirá de forma conjunta el efecto de la intensidad de las turbulencias, la influencia de las formas de las superficies y su ubicación, a través del coeficiente $G_{C_{rn}}$, en base a los resultados de los ensayos de túnel de viento en instalaciones solares con paneles inclinados y situados sobre cubiertas planas en los edificios [7].

Etapas 4. Presión neta del viento

A falta de otros datos, la presión neta del viento sobre las superficies estará basada en los valores del coeficiente $G_{C_{rn}}$ conforme a la normativa internacional [8] [7]. Dicho coeficiente será denominado coeficiente de presión.

Etapas 5. Acción del viento

La acción provocada por la presión neta del viento sobre las superficies, será representada por una fuerza estática y normal a la superficie [4], despreciando las fuerzas de rozamiento tangenciales a la superficie de los paneles, así como las componentes resonantes [7].

Etapas 6. Reacciones en cada apoyo

El cálculo de la reacción se deducirá al imponer el cumplimiento de las exigencias estructurales, utilizando el formato de los coeficientes parciales [1] [2] [3].

Resultados obtenidos

Partiendo de una configuración dada para los apoyos de las subestructuras de soporte de los paneles fotovoltaicos, el Método permitirá particularizar cada situación en estudio, al determinar si la resistencia disponible en los anclajes es suficiente, si el peso elegido para los contrapesos previstos son adecuados, cuál debe ser la resistencia a exigir a los anclajes, o bien, cuál debería ser el peso necesario en cada uno de los contrapesos.

Por un lado, los resultados permitirán contemplar los paneles solares más expuestos, para conseguir reducir el riesgo hasta los límites aceptados, respecto a la pérdida de estabilidad en la dirección perpendicular a la cubierta y en sentido ascendente, así como por pérdida de estabilidad en la dirección paralela a la cubierta.

Por otro lado, al contemplarse la protección frente al viento que proporcionan los elementos constructivos cercanos a cada panel, en el caso de utilizar contrapesos, los cálculos únicamente indicarán el peso mínimo necesario para cada contrapeso, lo que tendrá como efecto indirecto la reducción del riesgo de pérdida de resistencia y estabilidad de la cubierta, tanto en situación normal como en caso de incendio.

Al obtener los valores siguiendo las etapas anteriores, se estará aplicando un método para hacer compatibles y complementarias las especificaciones y modelos que provienen de distintas normas y códigos, con la finalidad de garantizar que el proyecto, la ejecución de la obra o en el mantenimiento y conservación del edificio, puedan alcanzar el requisito básico de seguridad estructural, con una fiabilidad adecuada [1] [2] [3].

Referencias

- [1] CEN, *UNE-EN 1990:2019. Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras.*
- [2] Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, «DBSE. Código Técnico de la Edificación de España,» 23 Julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/SeguridadEstructural.html>.
- [3] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «Código Estructural,» Julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.mitma.gob.es/organos-colegiados/comision-permanente-de-estructuras-de-acero/cpa/codigo-estructural>.
- [4] Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, «DBSE-AE. Código Técnico de la Edificación de España,» Abril 2009. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>.
- [5] CEN, *UNE-EN 1991-1-4:2018. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento.*
- [6] M. Arroba Fernández y D. Mencías Carrizosa, «Integración arquitectónica de algunas energías renovables. Impacto estructural,» Madrid, 2008.
- [7] SEAOC Solar Photovoltaic Systems Committee, «PV2-2017. Wind design for solar arrays,» 2017.
- [8] American Society of Civil Engineer, *Minimum design loads and associated criteria for building and other structures. ASCE 7-22. 2022., 2022.*