

Resistencia al fuego disponible en las estructuras de edificaciones con instalaciones fotovoltaicas

Fire resistance available in building structures with photovoltaic installations

Manuel Fernández Casares¹ y Julián Plácido Pecharromán Sacristán²

Resumen

Los edificios con instalaciones fotovoltaicas, a pesar de los nuevos riesgos que introduce la actividad de generación de energía eléctrica, deben seguir cumpliendo el requisito de seguridad estructural en caso de incendio.

Para controlar el riesgo en caso de incendio, su estructura y los elementos constructivos de sectorización deben disponer de una resistencia al fuego suficiente. Por tanto, es necesario contar con un método que caracterice la influencia de la instalación fotovoltaica y permita calcular la resistencia disponible en las estructuras de la edificación que pueden estar expuestas al fuego.

En el presente estudio se describe cómo caracterizar la resistencia al fuego disponible y se analiza cómo interacciona el control de los riesgos eléctricos y de los riesgos de seguridad estructural en situación normal con el control del riesgo estructural en caso de incendio.

Palabras clave

Estructuras expuestas al fuego, resistencia al fuego disponible, instalación fotovoltaica; seguridad en caso de incendio, tiempo equivalente de exposición al fuego, ensayos de túnel del viento.

Abstract

Buildings with photovoltaic installations, despite the new risks introduced by the activity of electricity generation, must continue to meet the requirement of structural safety in case of fire.

In order to control the risk in case of fire, their structure and the constructive elements of sectorisation must have sufficient fire resistance. Therefore, it is necessary to have a method to characterise the influence of the photovoltaic installation and to calculate the available resistance in the structures of the building that may be exposed to fire.

This study describes how to characterise the available fire resistance and analyses how the control of electrical risks and structural safety risks in a normal situation interact with the control of the structural risk in case of fire.

Keywords

Structures exposed to fire, fire resistance available, photovoltaic installation, security in case of fire, equivalent time of exposure to fire, wind tunnel tests.

Recibido/received: 13/09/2023 Aceptado/accepted: 10/01/2024

¹ Ingeniero Mecánico. Consultor y Asesor Técnico y Legal del Colegio Oficial de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid (COGITIM). Profesor del Máster de Ingeniería de Protección Contra Incendios, de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), de España.

² Catedrático de E.U. en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Doctor Ingeniero Industrial. Ingeniero Industrial e Ingeniero Técnico Industrial, especialidad en Mecánica.

Autor para correspondencia: Manuel Fernández Casares; e-mail: manuel.fernandez@coitim.es



Foto: Shutterstock.

1. Introducción

Las cubiertas planas de los edificios se han convertido en uno de los lugares preferidos para instalar paneles fotovoltaicos inclinados con contrapesos, con la finalidad de generar energía eléctrica.

La edificación, tras la construcción de la instalación fotovoltaica, debe seguir cumpliendo la normativa vigente, garantizando que cumple los requisitos básicos de seguridad, en especial el requisito de seguridad eléctrica, así como los requisitos de seguridad estructural en situación normal y en caso de incendio.

Respecto a los riesgos eléctricos relacionados con los incendios, la ingeniería eléctrica se ha encargado de analizar las causas potenciales de incendio en los sistemas fotovoltaicos, así como las medidas de seguridad que pueden mitigarlo (Amador Guerra, et al., 2014).

En ese sentido, los estudios experimentales han evidenciado (Jens Stee-

mann, et al., 2018) (Jens Steemann, et al., 2021) (Jens Steemann, 2022) que los incendios que se inician entre los paneles fotovoltaicos situados en las cubiertas tienen una dinámica muy especial que provoca fenómenos como la rerradiación y pueden generar grandes aumentos de temperatura en los elementos que forman el sistema constructivo de la cubierta.

Respecto al control de los riesgos estructurales en situación normal, ha sido y es una práctica habitual que el diseño de los contrapesos necesarios en las instalaciones fotovoltaicas y situadas en las cubiertas planas de los edificios se realice utilizando los coeficientes de presión del viento tabulados y correspondientes a alguna de las configuraciones normalizadas disponibles, seleccionando habitualmente las marquesinas y los recubrimientos de las cubiertas de los edificios, por ser las que presentan rasgos más coincidentes con el escenario analizado (Arroba Fernández & Mencías Carri-

zosa, 2008).

Actualmente, hay resultados de ensayos en túnel del viento que demuestran que el comportamiento dinámico del viento sobre una colección de paneles fotovoltaicos inclinados que están instalados sobre las cubiertas planas de los edificios es muy diferente del 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 (SEAOC, 2017).

A nivel internacional, se dispone de métodos normalizados que, basados en los ensayos del túnel del viento, permiten calcular los contrapesos necesarios y suficientes en cada panel de forma individualizada (American Society of Civil Engineer, 2022).

Se ha mostrado (COGITIM, 2023) que es posible integrar los modelos internacionales basados en los ensayos de túnel del viento, dentro de los modelos aceptados por la normativa vigente a nivel nacional, para garantizar

el cumplimiento del requisito básico de seguridad estructural, en condiciones normales de utilización.

En cuanto al control de los riesgos estructurales en caso de incendio, ya se dispone de un método capaz de calcular la resistencia al fuego disponible en la edificación sin la presencia de una instalación fotovoltaica (Vassart, et al., 2014), aunque tal método no se ha particularizado para la situación especial que supone la presencia de una instalación fotovoltaica.

Este trabajo tiene el objetivo de analizar los cambios que deben introducirse en el procedimiento habitual de cálculo de la resistencia al fuego disponible en las estructuras de la edificación, cuando se incorpora una instalación fotovoltaica.

Se analizará la relación entre el nivel de seguridad estructural disponible frente a las acciones en situación normal y el nivel de seguridad estructural en caso de incendio, mostrando cómo influye el inadecuado diseño de los contrapesos de las instalaciones fotovoltaicas en el aumento del riesgo de pérdida de capacidad portante de las estructuras, así como la pérdida de capacidad de sectorización en caso de incendio.

También se analizará cómo puede influir en la resistencia al fuego disponible un fallo en la instalación eléctrica del sistema solar fotovoltaico, que provoca el inicio de un incendio desde la instalación fotovoltaica y acaba por desarrollarse totalmente dentro de la edificación.

Para conseguirlo se describirá un método de cálculo general simplificado, específico para escenarios de fuego en presencia de instalaciones fotovoltaicas.

Con el propósito de hacer más comprensible el método general, se aplicará a un caso particular, en concreto a una edificación de uso comercial que dispone de una instalación fotovoltaica inclinada y con contrapesos sobre su cubierta plana, calculando la resistencia al fuego disponible en una de sus vigas de acero con material de protección contra incendio y comparando los resultados cuando se diseñan los contrapesos con los datos tabulados no basados en los ensayos específicos de túnel de viento, frente a los calculados a partir de los ensayos norma-

lizados de túnel del viento.

2. Método

El cálculo de la resistencia al fuego disponible se realizará empleando un procedimiento de cálculo normalizado para estructuras en situación de incendio (CEN, 2019), basado en la resistencia al fuego frente a la curva normalizada de tiempo y temperatura.

Se trata de un modelo de cálculo simplificado que hará posible el estudio de la resistencia al fuego a través de la que dispone cada elemento individual, sin considerar las acciones indirectas como consecuencia de las deformaciones y las tensiones. Considera como efecto de la acción del incendio únicamente el derivado del efecto de la temperatura en la resistencia del elemento estructural.

Por tanto, se aplicará el método que habitualmente se utiliza cuando no existe la instalación fotovoltaica, extendiéndose a las particularidades que confiere al escenario de fuego en presencia de los sistemas fotovoltaicos.

Se destacan a continuación las particularidades del método en relación con el utilizado cuando no hay instalación fotovoltaica:

1. Coeficiente de sobredimensionado con fotovoltaica:

Esta parte se corresponde con el análisis habitual del efecto de las acciones mecánicas sobre el elemento estructural de interés en relación con la resistencia mecánica de dicho elemento a temperatura normal. Se considera ahora la influencia de la presencia de la instalación fotovoltaica:

$$\bar{\mu}_0 = \frac{\bar{E}_{fi,d}}{\bar{R}_{fi,d,0}}$$

Siendo:

$\bar{\mu}_0$ Coeficiente de sobredimensionado del elemento estructural de interés, considerando la influencia de la instalación fotovoltaica, para elementos con sección transversal de clase 1, 2 o 3.

$\bar{E}_{fi,d}$ Máximo efecto de la combinación de acciones mecánicas en situa-

ción de incendio sobre el elemento estructural de interés, considerando la influencia de la instalación fotovoltaica.

$\bar{R}_{fi,d,0}$ Resistencia mecánica del elemento estructural de interés, en situación de incendio, al inicio de la fase de fuego totalmente desarrollado, considerando la influencia de la instalación fotovoltaica.

Añadir la instalación fotovoltaica y analizarla en situación de incendio supondrá reconsiderar:

- Las nuevas cargas permanentes debidas al peso de los paneles y de los contrapesos realmente utilizados contra el efecto de succión del viento sobre los paneles, tomando como valor de cálculo sus valores característicos.
- La carga variable debida al viento, considerando la mejor estimación posible del verdadero efecto dinámico de la presión del viento sobre los paneles, como posible efecto variable principal y tomando como valor de cálculo su valor frecuente.
- La influencia en la resistencia mecánica del elemento estructural, debida a la temperatura del elemento estructural en el instante cuando comienza la fase de combustión súbita generalizada en el sector correspondiente, a consecuencia de los incendios iniciados en la instalación fotovoltaica.

2. Esta parte se corresponde con la evaluación habitual de la temperatura del elemento estructural de interés, debida a la acción de la curva normalizada tiempo-temperatura (CEN, 2019), para expresar la resistencia al fuego disponible en términos del tiempo. Se considera la influencia de la instalación fotovoltaica en dos aspectos:

- Debido a la especial dinámica del fuego entre los paneles y los sistemas constructivos, el valor que puede haber alcanzado la temperatura en el elemento estructural en el instante cuando comienza la fase de combustión súbita generalizada en el sector correspondiente, a consecuencia de los incendios iniciados en la

instalación fotovoltaica.

- El valor que le corresponde al coeficiente de sobredimensionado debido a la influencia de la instalación fotovoltaica.

Cuando el elemento estructural es de hormigón armado, la resistencia al fuego disponible siempre se podrá establecer en términos del tiempo, por cualquiera de los métodos habituales que ofrece la normativa vigente (CEN, 2011), puesto que a causa de la baja capacidad de captación térmica del hormigón, la temperatura inicial no puede verse afectada significativamente por un incendio iniciado en la instalación fotovoltaica.

En caso de que el elemento estructural sea de acero protegido o sin protección, la resistencia al fuego disponible se expresa en términos del tiempo que puede estar sometido a la acción de la curva normalizada tiempo-temperatura, sin superar su temperatura crítica, conforme a la normativa vigente (CEN, 2016), por dos medios:

- Evaluando los incrementos de temperatura a intervalos de 3 segundos, tomando como temperatura inicial el valor que podría haber alcanzado el elemento estructural al inicio de la fase de combustión súbita generalizada.
- Utilizando los datos tabulados en la normativa vigente, cuando la temperatura inicial del elemento estructural no puede verse afectada significativamente por un incendio iniciado en la instalación fotovoltaica (p. ej., cuando el espacio bajo la cubierta constituye un sector de incendio respecto al área situada sobre la cubierta que sostiene la instalación fotovoltaica).

El gráfico de la figura siguiente ilustra cómo influye la temperatura inicial (temperatura de precalentamiento) en la evolución posterior de la temperatura en los elementos estructurales de acero sin proteger los que están expuestos al fuego.

Se compara la evolución de la temperatura del elemento estructural durante el incendio totalmente desarrollado, cuando parte con la temperatura ambiente normal, frente al supuesto de una

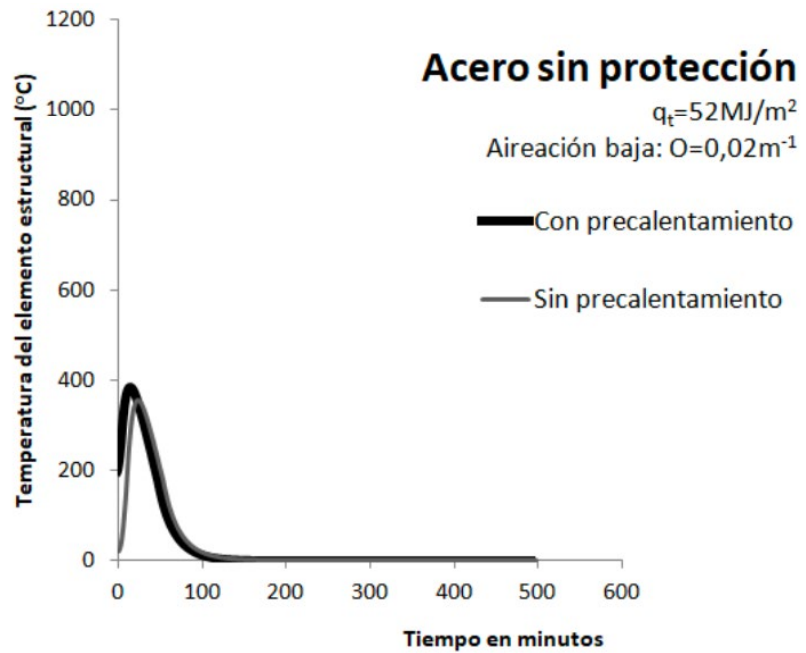


Figura 1. Evolución de la temperatura de un perfil IPE360, de acero al carbono sin protección, sometido a un fuego totalmente desarrollado en el interior de un espacio con una carga de fuego de 52 MJ/m^2 y con un coeficiente de abertura de $0,02 \text{ m}^{-1}$.

temperatura inicial que se ha visto influida por un incendio iniciado en la instalación fotovoltaica (precalentamiento supuesto de $200 \text{ }^\circ\text{C}$).

El precalentamiento supuesto tiende a retrasar la curva. La elevada capacidad de captación térmica tiende a que el retraso de la curva sea grande. La baja agresividad del posible incendio tiende a que el retraso sea pequeño. En conjunto, la temperatura de precalentamiento acaba empeorando su comportamiento ante el fuego.

3. Resultados

Como aplicación particular del método propuesto para el cálculo de la resistencia al fuego disponible, se utilizará un ejemplo que parte del análisis de seguridad estructural en situación normal y basado en los resultados de los ensayos de túnel de viento, que ya se realizó en un estudio previo (COGITIM, 2023).

Los datos de partida son:

- Edificación con cubierta plana.
- Dispone de una instalación fotovoltaica inclinada, situada sobre su cubierta.
 - Inclinación de los paneles fotovoltaicos, $\alpha = 20^\circ$.
 - Longitud característica de los paneles, $L_p = 0,99 \text{ m}$.
 - Ancho del panel: $a = 1,676 \text{ m}$.
 - Separación entre filas de paneles, $1,3 \text{ m}$.
 - La instalación fotovoltaica equilibra la

acción del viento con contrapesos, disponiendo cada panel de un contrapeso situado en cada vértice (cada panel dispone de cuatro contrapesos).

- Cada contrapeso tiene definida su posición respecto a la matriz que forman dentro de la instalación fotovoltaica por su número de fila y su número de columna.
- La cubierta se compone de una losa de hormigón (fig. 2).
 - Se considera que la losa sectoriza la zona sobre la cubierta del espacio situado bajo ella.
 - Diseñada como losa continua, cada tramo de dimensión $L \times L$ es soportado (cada tramo $6,7 \text{ m} \times 6,7 \text{ m}$) por tres vigas de acero que dejan dos vanos de dimensiones iguales (cada vano $l = 3,35 \text{ m}$).
 - La losa que es soportada por el elemento estructural de interés se sitúa en el centro de la cubierta y soporta 48 contrapesos.
- El elemento estructural de interés es un viga:
 - La viga de interés está en el borde del tramo de losa (v. fig. 2).
 - Perfil de acero, IPE360, S275, módulo resistente de plástico de 1.019 cm^3 , área de cortante de 3.514 mm^2 , densidad de 7.850 kg/m^3 , calor específico 600 J/kg K , factor de sección 163 m^{-1} .
 - Se trata de una viga biapoyada, de longitud $L = 6,7 \text{ m}$.
 - Se pueden formar rótulas plásticas sin afectar a la resistencia y no hay peligro de

inestabilidad.

- Tiene una protección contra los incendios, espesor de 15mm, densidad de 350 kg/m³, calor específico de 1.200 J/kg K y conductividad térmica de 0,12 W/mK.
- Condiciones de carga del elemento estructural de interés:
 - Carga debido al peso de la losa, 2,12 kN/m².
 - Carga debido a la acción de la nieve, 0,3 kN/m² (altitud < 1.000 m).
 - Sobrecarga de uso, 1 kN/m² (accesible solo para mantenimiento).
 - Carga que transmite cada contrapeso a la cubierta, debido al peso propio
 - de la instalación fotovoltaica y calculado a partir de los ensayos de túnel del viento (tabla 1).

Se mostrará la influencia en el resultado de la resistencia al fuego disponible, cuando los contrapesos se calculan utilizando el método basado en los ensayos de túnel del viento (alternativa 1) frente a los contrapesos que se calculan utilizando los coeficientes de presión del viento tabulados (alternativa 2).

1. Coeficiente de sobredimensionado con fotovoltaica:

Cargas sobre la losa de la cubierta que tributa sobre la viga de interés:

- Carga permanente debido al peso de la losa:

$$g_{sl,k} = 2,12 \text{ kN/m}^2$$

- Carga variable debido a la acción del viento en presión:

$$\bar{q}_{w,k} = \bar{g}_{FV,k} = 0,31 \text{ kN/m}^2$$

- Carga variable debido a la acción de la nieve:

$$q_{n,k} = 0,3 \text{ kN/m}^2$$

- Carga variable debido a la sobrecarga de uso:

$$q_{v,k} = 1 \text{ kN/m}^2$$

- Carga permanente debido al peso de la fotovoltaica:

Alternativa 1:

Tomando los valores de la tabla 1:

$$\bar{g}_{FV,k} = \frac{32 \cdot 10^{-2} \text{ kN} \cdot 24 \text{ ud} + 26 \cdot 10^{-2} \text{ kN} \cdot 24 \text{ ud}}{6,7 \text{ m} \cdot 6,7 \text{ m}} = 0,31 \text{ kN/m}^2$$

Alternativa 2:

Aplicando el método habitual para contrarrestar la succión del viento, consistente en utilizar los datos tabulados correspondientes a las marquesinas a un agua y eligiendo los valores simplificados propuestos en

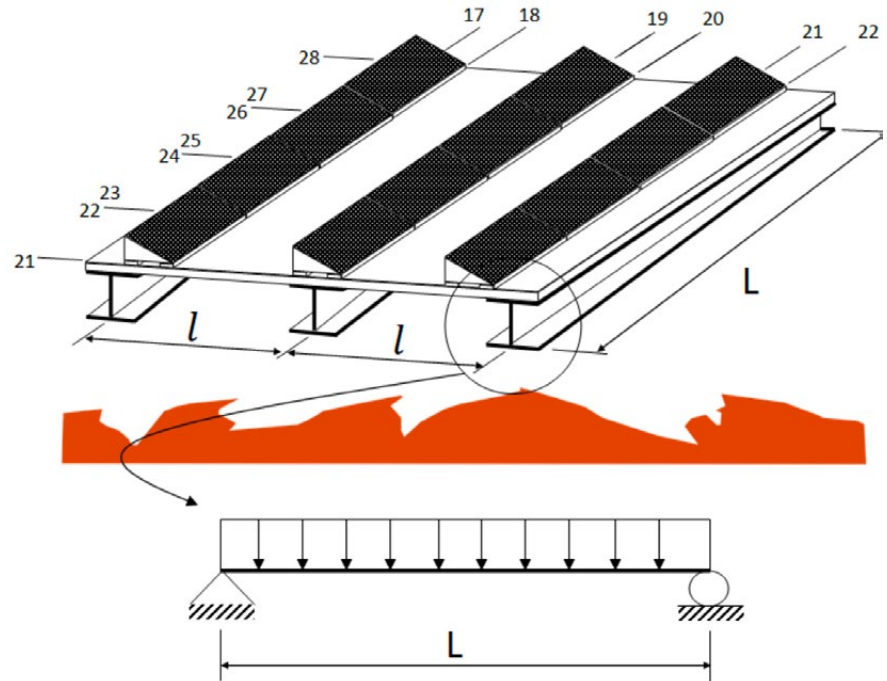


Figura 2. Carga lineal del elemento estructural de interés en situación de incendio.

| | | Nº de columna donde se sitúa el contrapeso | | | | | | | |
|---|----|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| Nº de fila donde se sitúa el contrapeso | 17 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| | 18 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| | 19 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| | 20 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| | 21 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| | 22 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |

Tabla 1. Carga [kN] que transmite cada contrapeso a la cubierta, debido al peso propio de la instalación fotovoltaica.

la norma y los más desfavorables entre los de posible elección:

$$q_e = q_b c_e c_p = 0,5 \cdot 2,0 \cdot 2,2 = 2,2 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{FV,k} = \frac{q_e \frac{3}{8} \frac{1}{\cos \alpha} L_p a \cdot 48 \text{ ud}}{6,7 \text{ m} \cdot 6,7 \text{ m}} = 1,56 \text{ kN/m}^2$$

Combinación de cargas sobre la losa de la cubierta que tributa en la viga de interés, en situación de incendio:

Alternativa 1:

$$\bar{q}_{fi,s} = \bar{g}_{FV,k} + g_{sl,k} + 0,5 \cdot q_{w,k} + 0 \cdot q_{n,k} + 0 \cdot q_{v,k} = 2,58 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{fi,s} = g_{FV,k} + g_{sl,k} + 0,5 \cdot q_{w,k} + 0 \cdot q_{n,k} + 0 \cdot q_{v,k} = 3,83 \text{ kN/m}^2$$

Carga lineal que tributa la losa en la viga de interés, en situación de incendio (deducida del análisis estático debido a que se trata de una viga de borde que soporta una losa continua con dos vanos):

Alternativa 1:

$$\bar{q}_{fi,L} = 0,375 \cdot 2 \cdot \bar{q}_{fi,s} \cdot l = 6,49 \text{ kN/m}$$

Alternativa 2:

$$q_{fi,L} = 0,375 \cdot 2 \cdot q_{fi,s} \cdot l = 9,63 \text{ kN/m}$$

Carga lineal sobre la viga de interés, debido al peso propio:

$$g_{b,k} = 0,56 \text{ kN/m}$$

Combinación de cargas lineales sobre la viga de interés, en situación de incendio:

Alternativa 1:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{fi,d,t} &= g_{b,k} + \bar{q}_{fi,L} \\ &= 7,055 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Alternativa 2:

$$\begin{aligned} q_{fi,d,t} &= g_{b,k} + q_{fi,L} \\ &= 10,19 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Efecto (máximo) de la combinación de cargas sobre la viga de interés en la situación de incendio:

Alternativa 1:

$$\bar{E}_{fi,d}(\bar{M}_{fi,d,t}; \bar{V}_{fi,d,t})$$

$$\bar{M}_{fi,d,t} = \frac{\bar{q}_{fi,d,t} \cdot L^2}{8}$$

$$= 39,59 \text{ kNm}$$

$$\bar{V}_{fi,d,t} = \frac{\bar{q}_{fi,d,t} \cdot L}{2}$$

$$= 23,63 \text{ kN}$$

Alternativa 2:

$$E_{fi,d} = (M_{fi,d,t}; V_{fi,d,t})$$

$$M_{fi,d,t} = \frac{q_{fi,d,t} \cdot L^2}{8}$$

$$= 57,17 \text{ kNm}$$

$$V_{fi,d,t} = \frac{q_{fi,d,t} \cdot L}{2}$$

$$= 34,13 \text{ kN}$$

Resistencia mecánica de la viga de interés en la situación de incendio (CEN, 2016):

$$\bar{R}_{fi,d,0} = (\bar{M}_{fi,Rd,0}; \bar{V}_{fi,Rd,0})$$

$$\bar{M}_{fi,Rd,0} = \bar{M}_{Rd,0} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi} \kappa_1 \cdot \kappa_2}$$

$$= M_{Rd,0} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi} \kappa_1 \cdot \kappa_2}$$

$$= \frac{W_{plas} \cdot f_y \gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi} \kappa_1 \cdot \kappa_2} \frac{1}{1}$$

$$= 1019 \cdot 275 \frac{1}{0,85 \cdot 1} 10^{-3}$$

$$= 329,676 \text{ kNm}$$

$$\bar{V}_{fi,Rd,0} = \bar{V}_{Rd,0} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$= V_{Rd,0} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}}$$

$$= \frac{A_v \cdot f_y / \sqrt{3} \gamma_{M0}}{\gamma_{M0} \gamma_{M,fi}}$$

$$= (3514 \cdot 275 / \sqrt{3}) 10^{-3}$$

$$= 557,922 \text{ kN}$$

Donde:

$\bar{M}_{Rd,0} = M_{Rd,0}$, dado que la temperatura inicial no puede verse influida por el inicio de un incendio en la instalación fotovoltaica, debido a que la losa sectoriza la zona sobre la cubierta del espacio situado bajo ella.

$\bar{V}_{Rd,0} = V_{Rd,0}$, dado que la temperatura inicial no puede verse influida por el inicio de un incendio en la instalación fotovoltaica, debido a que la losa sectoriza la zona sobre la cubierta del espacio situado bajo ella.

$\gamma_{M,fi} = 1$, conforme al Eurocódigo 3, por ser un elemento sujeto a flexión simple.

$\kappa_1 = 0,85$, para el factor de adaptación para una distribución no uniforme de la temperatura en la sección transversal, conforme al Eurocódigo 3, por ser una viga protegida expuesta en tres de sus caras, con una losa de hormigón en su cuarta cara.

$\kappa_2 = 1$, para el factor de adaptación para una distribución no uniforme de la temperatura, a lo largo de la viga, conforme al eurocódigo 3, por no ser una viga hiperestática.

Coefficiente de sobredimensionado (CEN, 2016)

Alternativa 1:

$$\bar{\mu}_0 = \frac{\bar{E}_{fi,d}}{\bar{R}_{fi,d,0}}$$

$$= \max \left(\frac{\bar{M}_{fi,d,t}}{\bar{M}_{fi,Rd,0}}; \frac{\bar{V}_{fi,d,t}}{\bar{V}_{fi,Rd,0}} \right)$$

$$= 0,12$$

Alternativa 2:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

$$= \max \left(\frac{M_{fi,d,t}}{\bar{M}_{fi,Rd,0}}; \frac{V_{fi,d,t}}{\bar{V}_{fi,Rd,0}} \right)$$

$$= 0,17$$

2. Resistencia al fuego disponible:

Temperatura crítica, para el instante $t = 0$, al considerar que no hay peligro de inestabilidad y que se pueden formar rótulas plásticas sin afectar a la resistencia, conforme al eurocódigo (CEN, 2016):

Alternativa 1:

$$\bar{\theta}_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \bar{\mu}_0^{3,833}} - 1 \right]$$

$$+ 482 = 802 \text{ °C}$$

Alternativa 2:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right]$$

$$+ 482 = 746 \text{ °C}$$

Incrementos de temperatura a intervalos de 3 segundos, para una temperatura uniforme de la sección del perfil de acero protegido, conforme al eurocódigo (CEN, 2016):

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p/d_p}{c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + (c_p \rho_p d_p A_p / V) / 3} \right)$$

$$(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - \left(\frac{c_p \rho_p d_p A_p / V}{e^{c_a \rho_a d_p A_p / V} / 10} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t}$$

Siendo:

$\theta_{a,t=0} = 20 \text{ °C}$, dado que la temperatura inicial no puede verse influida por el inicio de un incendio en la instalación fotovoltaica, debido a que la losa sectoriza la zona sobre la cubierta del espacio situado bajo ella.

Tiempo de exposición a la curva normalizada, tiempo y temperatura hasta alcanzar la temperatura crítica:

Alternativa 1: $\bar{t}_{fi,d} = 118$ minutos (fig. 3)

Alternativa 2: $t_{fi,d} = 100$ minutos.

4. Conclusiones

El estudio proporciona un método general para analizar por cálculo la resistencia al fuego disponible en las estructuras de la edificación, extensible a los elementos constructivos compartimentadores, cuando se dispone de una instalación fotovoltaica, lo que mues-

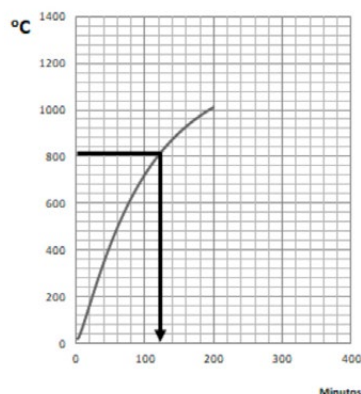


Figura 3. La curva tiempo temperatura correspondiente a la viga de acero protegido al someterla a la curva normalizada del gas del espacio, indica que la temperatura crítica de 802 °C, se alcanzará a los 118 minutos.

tra que el problema puede ser resuelto a partir del procedimiento general de cálculo habitualmente utilizado cuando no se dispone de instalación fotovoltaica.

La influencia de la instalación fotovoltaica se puede cuantificar al reconsiderar el efecto derivado de la acción del viento en los paneles, así como el efecto de un incendio iniciado en la instalación fotovoltaica sobre la temperatura con la que pueden partir los elementos estructurales cuando se inicia la fase de fuego totalmente desarrollado.

Al caracterizar el efecto que tiene el peso propio de la instalación fotovoltaica, cuando esta intenta equilibrar la acción succión del viento con contrapesos, se comprueba que el método utilizado para garantizar la estabilidad estructural en situación normal influye en el grado de seguridad estructural disponible en caso de incendio. Se ha mostrado que el cálculo de los contrapesos por el método basado en los ensayos de túnel del viento puede dar como resultado una resistencia al fuego disponible superior a la que podría obtenerse al utilizar los valores tabulados normalizados y no basados en los ensayos de túnel de viento.

En el resultado se ha mostrado que si la zona donde se emplaza la instalación fotovoltaica no forma parte del sector de incendio en el que se encuentra el espacio de interés, al poder garantizarse que la temperatura inicial de los elementos constructivos es la temperatura ambiente normal, la resistencia al fuego disponible puede calcularse sin dificultad.

Por tanto, para conseguir caracterizar la resistencia al fuego disponible en todos los escenarios de fuego, sigue siendo necesario proporcionar algún método que logre estimar con precisión la temperatura alcanzada justo al inicio de la fase de incendio totalmente desarrollado, por ejemplo, cuando los elementos estructurales son de acero y el espacio bajo cubierta y el área sobre ella forman parte de un mismo sector.

Para verificar que la resistencia al fuego disponible es suficiente con la fiabilidad adecuada, también será necesario proporcionar algún método que permita caracterizar la resistencia al fuego exigida cuando hay instalación fotovoltaica. En este sentido, la normativa vigente aún no permite calcular la resistencia al fuego requerida, dado que los datos tabulados para el cálculo de la carga de fuego todavía no consideran la influencia de la instalación fotovoltaica en las actividades características de los edificios.

5. Agradecimientos

A Gracia Pérez Ojeda por organizar y gestionar los recursos necesarios.

A Jorge Moreno Mohíno y Ana Larrañaga Pastor, por hacer posible la participación en el estudio de los mejores expertos.

A Julio Amador Guerra por compartir sus conocimientos sobre los riesgos eléctricos en las instalaciones fotovoltaicas.

El trabajo cuenta con la financiación del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia establecido por el Reglamento (UE) 2021/241, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de febrero de 2021, en el Programa CE OFICINAS Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

6. Referencias

- Amador Guerra, J., Chenlo Romero, F., Alonso Abella, M. & Zeiter Zeiter, H., 2014. Prevención y actuación frente a incendio en edificios con instalaciones fotovoltaicas. *Seguridad y Medio Ambiente*, issue 133, pp. 48-60.
- American Society of Civil Engineer, 2022. Minimum design loads and associated criteria for building and other structures. ASCE 7-22. 2022.. s.l.: s.n.

Arroba Fernández, M. & Mencías Carriozosa, D., 2008. Integración arquitectónica de algunas energías renovables. Impacto estructural. Madrid, Fondo documental de CONAMA 9.

ASCE, 2022. Minimum design loads and associated criteria for building and other structures. ASCE 7-22. 2022., s.l.: s.n.

CEN, 2011. UNE-EN 1992-1-2:2011. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego. s.l.:s.n.

CEN, 2016. UNE-EN 1993-1-2:2016. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego. s.l.: s.n.

CEN, 2019. UNE-EN 1991-1-2:2019. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego. s.l.: s.n. 17

COGITIM, 2023. Ejemplo de aplicación de la Guía para el cálculo de los contrapesos de paneles fotovoltaicos inclinados sobre cubiertas planas [internet]. Disponible en: <https://www.cogitim.es/>

COGITIM, 2023. Guía para el Análisis de Seguridad Estructural de Instalaciones Solares en la Edificación, SE-IS [internet]. Disponible en: <https://www.cogitim.es/>

COGITIM, 2023. Método para el cálculo de los contrapesos de paneles fotovoltaicos inclinados sobre cubiertas planas [internet]. Disponible en: <https://www.cogitim.es/>

Jens Steemann, K., 2022. Fire risk associated with photovoltaic installations on flat roof constructions - Experimental analysis of fire spread in semi-enclosures. *The University of Edinburgh*.

Jens Steemann, K., Bart, . M. & Grunde, J., 2018. Fire-induced reradiation underneath photovoltaic arrays on flat roofs. *Fire and Materials*, issue 42, pp. 316-323.

Jens Steemann, K., Farah Binte Mohd, F. & Grunde, J., 2021. Experimental study of flame spread underneath photovoltaic (PV) modules. *Fire Safety Journal*, volumen 120.

SEAOC , 2017. Wind design for solar arrays, s.l.: s.n.

Vassart, O. et al, 2014. Eurocodes: Background and applications. *STRUCTURAL FIRE DESIGN. Worked examples*. Publications Office of the European Union.