

Guía para el cálculo de los contrapesos de paneles fotovoltaicos inclinados sobre cubiertas planas

SE-IS.2
Julio 2023

Han participado en la elaboración de la Guía para el cálculo de los contrapesos de paneles fotovoltaicos inclinados sobre cubiertas planas, SE-IS.2:

D. Julián Placido Pecharromás Sacristán

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

D. Jorge Moreno Mohíno

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

D. Manuel Antonio Fernández Casares

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

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.

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>

Prólogo

El fomento de las energías renovables está propiciando un desarrollo sin precedentes de las instalaciones con paneles solares sobre la cubierta de los edificios, siendo frecuente la utilización de paneles inclinados con contrapesos para la estabilización de las estructuras.

Tales construcciones constituyen estructuras de la edificación a las que aplican los requisitos de seguridad estructural, para que su comportamiento sea adecuado en su construcción y durante la totalidad del período de vida útil previsto.

El análisis estructural permite destacar que la principal acción a considerar debe ser la presión del viento, en especial cuando las instalaciones solares están inclinadas sobre cubiertas planas, pues se genera una gran fuerza de succión cuyo valor puede ser estimado a través del coeficiente de presión. En este sentido, actualmente la reglamentación nacional no contempla de forma específica el comportamiento estructural de las instalaciones solares, proporcionando valores del coeficiente de presión sólo para la verificación del material de recubrimiento de las cubiertas de los edificios, así como para las marquesinas sobre el terreno.

Por otra parte, ya existen resultados de ensayos en túnel de viento que demuestran que el comportamiento dinámico de viento sobre tales construcciones es muy diferente al que existe sobre el recubrimiento de las cubiertas de los edificios o sobre las marquesinas sobre el terreno, lo que ha propiciado que otros códigos internacionales ya están basando las verificaciones estructurales en los nuevos conocimientos disponibles.

Considerando el contexto actual, la Guía de cálculo que presentamos (en adelante SE-IS.2), toma de referencia las exigencias de la reglamentación nacional, complementándolo en todo lo no incluido en ella, con la información disponible en los códigos internacionales que están basados en los resultados de los ensayos en túnel de viento.

De esta forma se consigue realizar el análisis estructural de los contrapesos utilizados, considerando el comportamiento dinámico que tiene el viento en su interacción con las instalaciones solares inclinadas sobre cubiertas planas.

Contenido

1. Objeto y alcance.....	5
2. Terminología y consideraciones previas	7
2.1. Símbolos.....	7
2.2. Definiciones utilizadas para la instalación solar	9
2.3. Análisis de la aplicabilidad de los resultados de los ensayos de túnel de viento disponibles	11
2.4. Método de análisis para la verificación contra la pérdida de equilibrio	11
2.5. Velocidad básica y media del viento.....	12
2.6. Zona de viento	13
2.7. Área de viento efectiva	15
2.8. Coeficiente de presión neta nominal.....	16
2.9. Factor de borde.....	18
2.10. Factores γ_p y γ_c	21
2.11. Área tributaria	22
2.12. Coeficiente de reacción debido al viento.....	22
2.13. Coeficiente de reacción debido al peso propio.....	24
2.14. Área de referencia.....	26
3. Datos a procesar.....	27
3.1. Edificación y entorno	27
3.2. Instalación solar	27
3.3. Interacción con las ráfagas de viento para la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación.....	28
3.4. Interacción con las ráfagas de viento para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento	28
4. Resultados	29
4.1. Análisis de aplicabilidad	29
4.2. Caracterización de la instalación solar	30
4.3. Verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación	33
4.4. Verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento.....	33
5. Referencias.....	34

1. Objeto y alcance

Este documento tiene el objetivo de facilitar el cumplimiento del requisito básico “Seguridad estructural” de la normativa nacional (1- 4) mediante la aplicación del “Método para el cálculo de reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas” (5), cuando se utilizan contrapesos.

Las estructuras analizadas consisten en instalaciones con paneles solares fotovoltaicos sobre una cubierta plana de un edificio.

Los paneles solares que pueden ser analizados deben estar inclinados respecto a la cubierta, por medio de una estructura auxiliar, que dispone de una configuración dada de contrapesos simplemente apoyados sobre la cubierta.

Es aplicable a la situación persistente por las acciones permanentes debidas al peso, en combinación con la situación transitoria y desestabilizadora debido a la acción variable del viento.

Las prestaciones ofrecidas por SE-IS.2, incluye:

- i. Verificar que está controlado el riesgo de pérdida de equilibrio por elevación o deslizamiento, dados unos contrapesos ya definidos
- ii. Determinar los contrapesos mínimos necesarios para controlar el riesgo de pérdida de equilibrio por elevación o deslizamiento
- iii. Limitar el riesgo de sobrepasar los estados límites últimos de la estructura de la cubierta existente, al minimizar las acciones transmitidas por las instalaciones solares a causa de los contrapesos
- iv. Limitar el riesgo de pérdida de capacidad portante de las estructuras expuestas al fuego, al minimizar las acciones transmitidas por las instalaciones solares a causa de los contrapesos

Los resultados estarán basados en los datos aportados por ensayos de túnel de viento, llevados a cabo con procedimientos que garanticen su aplicación a la situación real objeto de análisis estructural.

A falta de otros ensayos más específicos, los resultados se basarán en los datos disponibles de los ensayos de túnel de viento incluidos en ASCE 7-22. 2022 (6) y el informe SEAOC PV2-2017 (7).

No se incluyen:

- i. Las comprobaciones de los estados límites últimos de la estructura de cubierta
- ii. Las comprobaciones de los estados límites últimos de la estructura auxiliar de los paneles
- iii. El efecto de las fuerzas tangenciales a las superficies de los paneles
- iv. La evaluación de la respuesta dinámica a las fuerzas del viento por falta de rigidez de las estructuras
- v. Situaciones extraordinarias, por las acciones accidentales por sismo, incendio, impacto o explosión

El análisis estructural de SE-IS.2 no puede extenderse:

- i. A las instalaciones solares en cubierta y con una configuración coplanar de sus paneles respecto a la cubierta

- ii. A las instalaciones solares con paneles situados sobre el terreno
- iii. 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:
 - Ángulo de inclinación de la cubierta mayor de 7°
 - Ángulo formado por el panel respecto a la cubierta mayor de 35°
 - Longitud característica de los paneles mayor de 2,04m
 - Altura del borde superior del panel mayor de 1,22m
 - Altura del borde inferior del panel mayor de 0,61m
 - 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
 - Distancia horizontal entre filas de paneles adyacentes menor de 0,5 veces la altura del borde superior del panel

2. Terminología y consideraciones previas

2.1. Símbolos

A_{ref_fc}	Área de referencia correspondiente a la unidad interconectada de interés
A_{tB_ij}	Área tributaria correspondiente al contrapeso de interés
A_{v_ij}	Área de viento efectiva correspondiente al contrapeso de interés
A_{vD_fc}	Área de viento efectiva correspondiente a la unidad interconectada de interés
B_{ij}	Contrapeso de interés de la colección de paneles objeto de análisis
CA_{tB_ij}	Coefficiente de reacción debido al viento correspondiente al contrapeso de interés
c_o	Coefficiente topográfico
c_r	Factor de rugosidad
CW_{tB_ij}	Coefficiente de reacción debido al peso propio correspondiente al contrapeso de interés
d_{fmin}	Mínima distancia horizontal entre filas de paneles
d_{min}	Mínima distancia horizontal y ortogonal desde el borde de la colección de paneles al borde de la cubierta
F_{vDn_fc}	Acción normal a la cubierta debida al viento, correspondiente a la unidad interconectada de interés
F_{vDt_fc}	Acción tangencial a la cubierta debida al viento, correspondiente a la unidad interconectada de interés
F_{wDn_fc}	Acción normal a la cubierta debida al peso propio, correspondiente a la unidad interconectada de interés
$(GC_{rn})_{nom_ij}$	Coefficiente de presión neta nominal, correspondiente al contrapeso de interés
$(GC_{rnD})_{nom_fc}$	Coefficiente de presión neta nominal, correspondiente a la unidad interconectada de interés
GC_{rn_ij}	Coefficiente de presión neta, correspondiente al contrapeso de interés
GC_{rnD_fc}	Coefficiente de presión neta, correspondiente a la unidad interconectada de interés
h	Altura media de la cubierta
h_1	Altura del borde inferior de los paneles
h_2	Altura del borde superior de los paneles
h_{pt}	Altura media del parapeto de la cubierta
L_p	Longitud característica de los paneles
n	Número de módulos solares que componen un panel solar
$p_{_ij}$	Presión neta del viento sobre la superficie del panel que contiene al contrapeso de interés
p_{D_fc}	Presión neta del viento sobre la superficie de cada unidad interconectada de interés
q_b	Presión de la velocidad básica del viento
R_{v_ij}	Reacción vertical debido a la acción del viento, correspondiente al contrapeso de interés
R_{w_ij}	Reacción vertical debido al peso propio, correspondiente al contrapeso de interés
S_M	Superficie de un módulo solar
$U_{_fc}$	Unidad interconectada de interés
v_b	Valor básico de la velocidad del viento
$W_{B_ij r}$	Peso mínimo necesario del contrapeso de interés, en una de las direcciones estudiadas de la ráfaga de viento

W_{Bd_ij}	Peso de uno cualquiera de los contrapesos disponibles
W_{Bmin_ij}	Peso mínimo necesario del contrapeso de interés, considerando todas las direcciones estudiadas de la ráfaga de viento
$W_{DB_fc r}$	Peso mínimo necesario de los contrapesos asociados a la unidad interconectada de interés, en una de las direcciones estudiadas de la ráfaga de viento
W_{DBd_fc}	Peso de los contrapesos disponibles para una cualquiera de las unidades interconectadas
W_{DBmin_fc}	Peso mínimo necesario de los contrapesos asociados a la unidad interconectada de interés, considerando todas las direcciones estudiadas de la ráfaga de viento
W_L	Dimensión del lado mayor del edificio
W_M	Peso propio correspondiente a cada módulo y del sistema estructural asociado, excluyendo los contrapesos
W_s	Dimensión del lado menor del edificio
W_{U_fc}	Peso propio de la unidad interconectada de interés (excluyendo los contrapesos)
Z_{ij}	Zona de viento, correspondiente a cada contrapeso
Z_{D_fc}	Zona de viento, correspondiente a cada unidad interconectada
γ_c	Factor que permite transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio, al considerar la influencia de la longitud característica de los paneles
γ_{E_ij}	Factor de borde correspondiente al contrapeso de interés
γ_{ED_fc}	Factor de borde correspondiente a la unidad interconectada de interés
γ_G	Coefficiente parcial de seguridad para acciones permanentes estabilizadoras
γ_{GB_ij}	Coefficiente de seguridad disponible, correspondiente al contrapeso previsto de interés
γ_{GDB_fc}	Coefficiente de seguridad disponible, correspondiente al conjunto de contrapesos previstos para la unidad interconectada de interés
γ_p	Factor que permite transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio, al considerar la influencia de los parapetos
γ_Q	Coefficiente parcial de seguridad para acciones variables
μ	Coefficiente de rozamiento entre los contrapesos y la superficie de la cubierta
θ	Ángulo de inclinación de la cubierta
ρ	Densidad del aire
ω	Ángulo de los paneles respecto a la cubierta

2.2. Definiciones utilizadas para la instalación solar

Un módulo solar es la unidad fotovoltaica con continuidad material, que compone un panel solar (se utilizará como unidad de medida para las áreas).

El panel solar se refiere al plano con continuidad estructural, que puede constar de uno o varios módulos solares unidos entre sí.

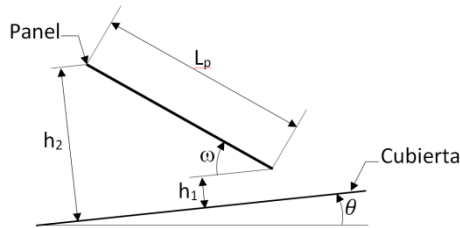


Figura 1. Perfil de un panel solar inclinado sobre una cubierta.

La instalación solar es un conjunto de paneles solares que pertenecen a una misma colección de paneles solares.

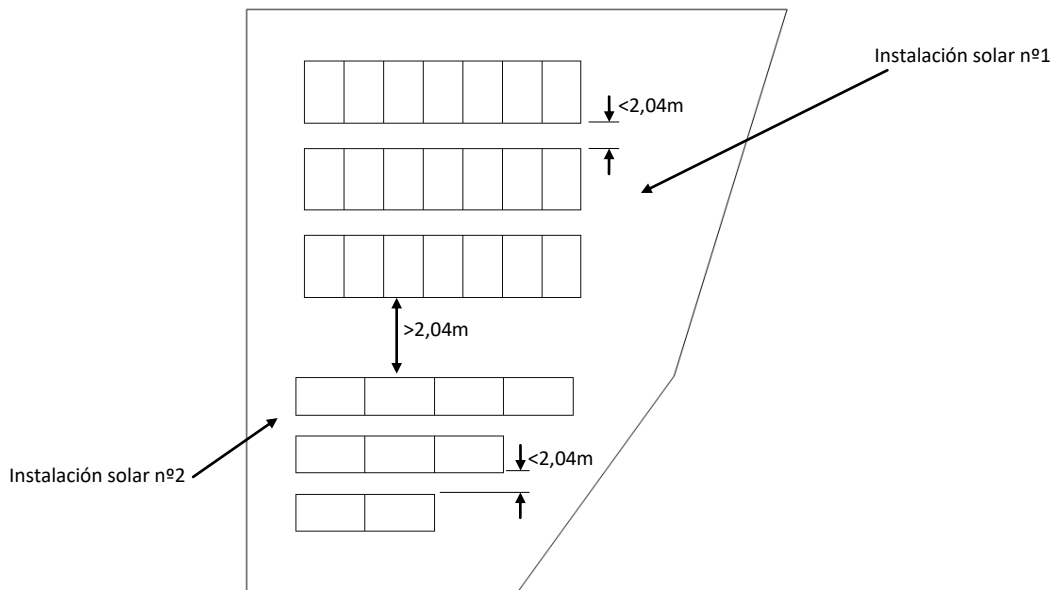


Figura 2. Cubierta con dos instalaciones solares; según ASCE 7-22; un conjunto de paneles solares adyacentes pertenecen a la misma colección si la distancia entre sus bordes no es mayor de 2,04m.

Respecto a la ráfaga de viento en estudio, los paneles solares de borde de una colección de paneles, son los primeros que están expuestos al viento. El resto son paneles de interior de la colección de paneles.

La instalación solar tendrá definida una configuración dada para los contrapesos, debiendo identificarse cada uno de ellos.

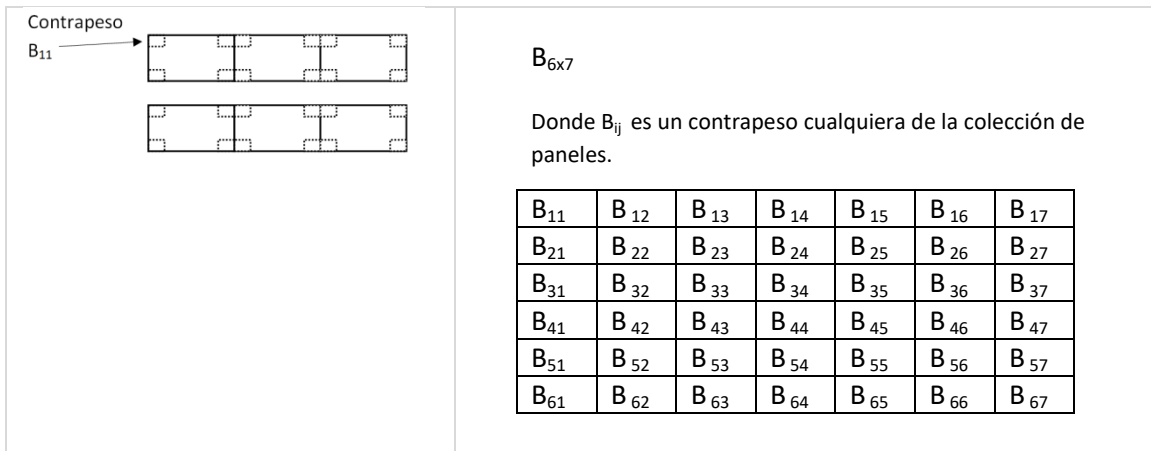


Figura 3. Ejemplo de definición de una configuración dada de contrapesos y de la identificación de cada contrapeso.

Además, la instalación solar tendrá definida una configuración respecto a los subconjuntos de paneles que se comportan como una unidad frente al deslizamiento, por estar adecuadamente interconectados, debiendo identificarse cada unidad.

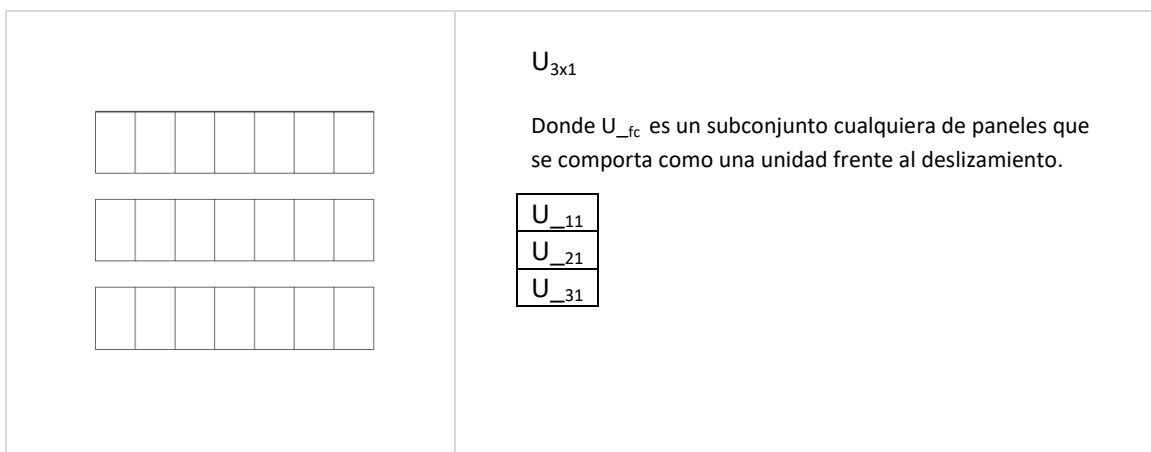


Figura 4. Ejemplo de definición de una configuración y de la identificación de cada subconjunto de paneles: en este ejemplo cada fila, por comportarse cada una de ellas como una unidad frente al deslizamiento.

2.3. Análisis de la aplicabilidad de los resultados de los ensayos de túnel de viento disponibles

El análisis estructural realizado por SE-IS.2, estará respaldado por los datos disponibles en los ensayos de túnel de viento de ASCE 7-22 (6) y SEAOC PV2-2017 (7), si la instalación solar en estudio cumple los siguientes valores límites:

- | | | |
|----|--|---|
| 1. | Ángulo de inclinación de la cubierta | $\theta \leq 7^\circ$ |
| 2. | Ángulo formado por el panel respecto a la cubierta | $\omega \leq 35^\circ$ |
| 3. | Longitud característica de los paneles | $L_p \leq 2,04\text{m}$ |
| 4. | Altura del borde superior del panel | $h_2 \leq 1,22\text{m}$ |
| 5. | Altura del borde inferior del panel | $h_1 \leq 0,61\text{m}$ |
| 6. | Distancia horizontal y ortogonal desde el borde de la colección de paneles al borde de la cubierta | $d_{\min} \geq \max(2(h_2-h_{pt}), 1,22\text{m})$ |
| 7. | Distancia horizontal entre filas de paneles adyacentes | $d_{f\min} \geq 0,5h_2$ |

2.4. Método de análisis para la verificación contra la pérdida de equilibrio

El objetivo será verificar que está controlado el riesgo de pérdida de equilibrio por elevación o deslizamiento.

A partir de una configuración dada de contrapesos, se podrán determinar las reacciones correspondientes en cada uno de ellos, considerando el sistema en equilibrio estático y que la estructura auxiliar de los paneles dispone contrapesos simplemente apoyados en la cubierta.

Se considerará que los sistemas estructurales presentarán una respuesta lineal, aplicando el principio de superposición, contemplando por separado los efectos de la acción del viento y del propio peso.

El análisis se aplicará a la situación persistente por las acciones permanentes debidas al propio peso, en combinación con la situación transitoria y desestabilizadora debido a la acción variable debido al viento.

El cumplimiento de las exigencias estructurales se comprobará utilizando el formato de los coeficientes parciales.

El DB-SE del CTE proporciona los valores para el coeficiente parcial de seguridad para las acciones variables en la verificación de estabilidad y situación desfavorable (γ_Q), así como para las acciones permanentes por peso propio, en la verificación de estabilidad y situación favorable (γ_G).

2.5. Velocidad básica y media del viento

Debido a la naturaleza aleatoria y variable en el tiempo del viento, su incertidumbre será controlada tomando una probabilidad anual de referencia de ser superada.

El DB-SE-AE del CTE proporciona la velocidad básica de viento, correspondiente a la probabilidad anual de ser superada igual a 0,02.

El valor de la componente media de la velocidad del viento será estimado a partir de su velocidad básica y la influencia de las condiciones climatológicas del emplazamiento geográfico.

El efecto sobre la componente media de la velocidad del viento, debido a la altura del terreno, la rugosidad y la orografía, se podrá cuantificar mediante el factor de rugosidad y el coeficiente topográfico.

El factor de rugosidad (c_r) podrá ser determinado para cada categoría del terreno, aplicando la norma UNE EN 1991-1-4:2018 (8).

El coeficiente topográfico (c_o) podrá ser determinado aplicando la norma UNE EN 1991-1-4:2018 (8), que indica un valor recomendado igual a 1 y las situaciones especiales donde asociar otros valores.

2.6. Zona de viento

La influencia del viento en las instalaciones solares depende de la posición ocupada respecto a los bordes de la cubierta.

A falta de otros datos, se pueden tomar de referencia los criterios definidos por ASCE 7-22 (6) y SEAOC PV2-2017 (7).

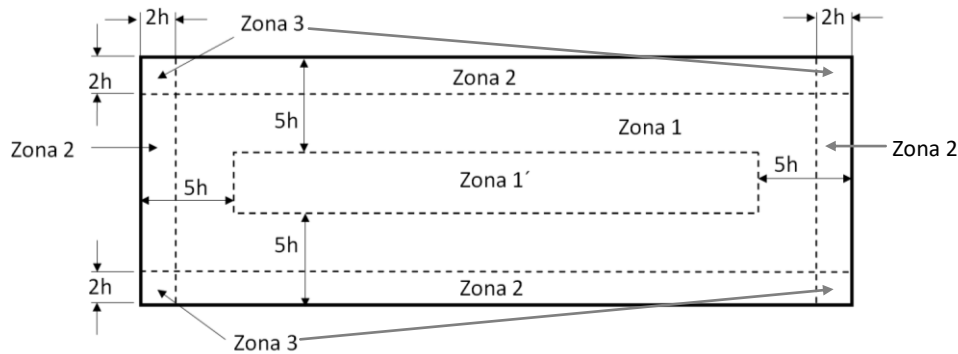


Figura 5. Definición de las zonas de viento en una cubierta para verificar los paneles solares, en función de la altura de la cubierta, h , según ASCE 7-22 y SEAOC PV2-2017.

En las cubiertas se podrían llegar a distinguir las zonas de viento 3, 2, 1 y 1', siendo la zona 3 la más desfavorable por proporcionar valores absolutos mayores del coeficiente de presión neta nominal y la 1' la más favorable frente al viento.

Es importante destacar que ASCE 7-22 y SEAOC PV2-2017 definen los criterios para asociar las zonas de viento utilizando gráficos, considerando la situación en la que el viento incide al mismo tiempo en todas las direcciones principales de la cubierta. Por tanto, si el análisis se realiza considerando de forma independiente cada dirección principal de la ráfaga de viento en estudio, es necesario interpretar el gráfico para establecer las zonas a la situación en estudio.

Para la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación, se asociará la zona de viento que le corresponde a cada contrapeso debido a su emplazamiento sobre la cubierta, respecto a la ráfaga de viento en estudio.

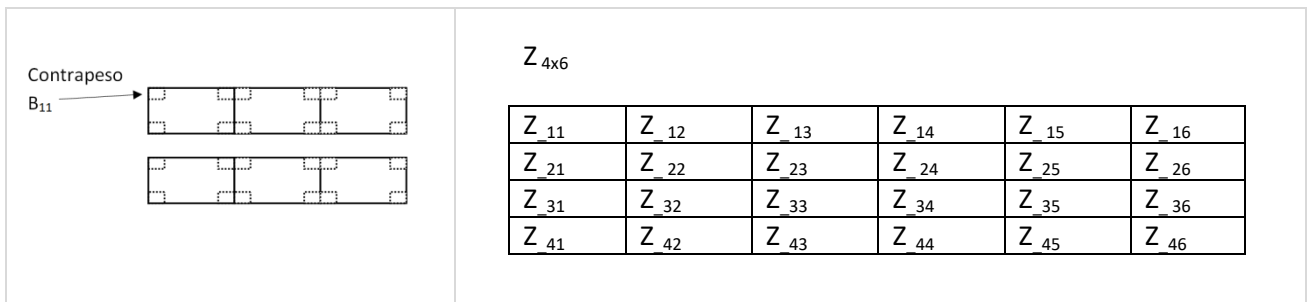


Figura 6. Ejemplo de cómo describir las zonas de viento correspondientes a cada contrapeso de una colección de paneles.

Para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, se asociará una zona de viento para cada unidad interconectada respecto a la ráfaga de viento en estudio.

A falta de otros datos, se le hará corresponder a cada unidad interconectada la zona predominante cuando la unidad se extienda por más de una zona de viento.

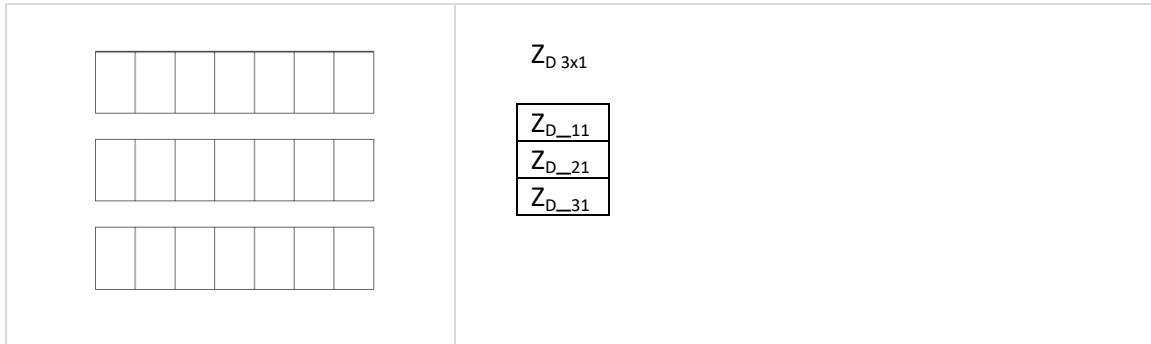


Figura 7. Ejemplo de cómo describir las zonas de viento correspondientes a cada subconjunto de paneles (cada fila) por comportarse como una unidad frente al deslizamiento.

2.7. Área de viento efectiva

El área de viento efectiva es la superficie de la estructura que permite determinar la presión ejercida por el viento, a partir de los datos de los ensayos de túnel de viento.

En una estructura que presente un comportamiento lineal, a menor superficie mayor coeficiente de presión.

A falta de otros datos, se pueden tomar de referencia los criterios definidos por ASCE 7-22 (6) y SEAOC PV2-2017 (7):

- (1) El área de viento efectiva debería establecerse mediante pruebas y análisis del sistema de soporte de los paneles.
- (2) Se acepta que el área de viento efectiva, tome de referencia al área tributaria (ver apartado 2.11), salvo que el ancho del área efectiva de viento no necesita ser menor a un tercio de su longitud.

Para la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación, se asociará el área de viento efectiva que le corresponde a cada contrapeso, respecto a la ráfaga de viento en estudio.

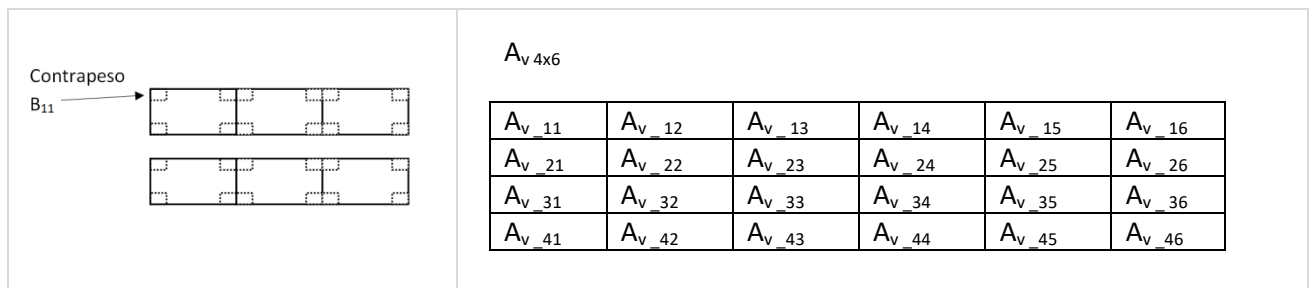


Figura 8. Ejemplo de cómo describir las áreas de viento efectivas correspondientes a cada contrapeso de una colección de paneles.

Para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, se asociará el área de viento efectiva que le corresponde a cada unidad interconectada, respecto a la ráfaga de viento en estudio.

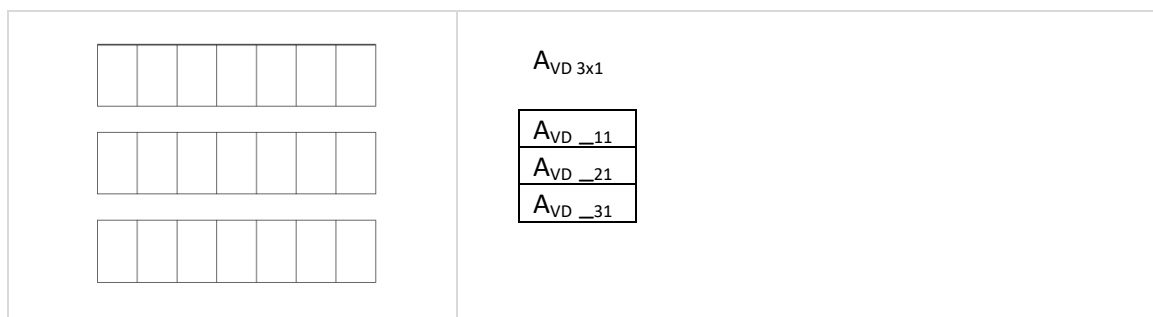


Figura 9. Ejemplo de cómo describir las áreas de viento efectivas correspondientes a cada subconjunto de paneles (en este caso, a cada fila) por comportarse como una unidad frente al deslizamiento.

2.8. Coeficiente de presión neta nominal

A falta de otros datos, para considerar de forma conjunta el efecto de la intensidad de las turbulencias, la influencia de las formas y la ubicación de las instalaciones solares, se utilizarán los resultados disponibles en ASCE 7-22 (6) y SEAOC PV2-2017 (7).

1. Coeficiente de presión neta nominal, para la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación, $(GC_{rn})_{nom}$

$(GC_{rn})_{nom} = -0,6669 \log_{10}(A_{vnorm}) + 2,300$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnorm} \leq 500$ y $Z=3$	(2.8.1-1)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,5743 \log_{10}(A_{vnorm}) + 2,000$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnorm} \leq 500$ y $Z=2$	(2.8.1-2)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,4261 \log_{10}(A_{vnorm}) + 1,500$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnorm} \leq 500$ y $Z=1$	(2.8.1-3)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,3500 \log_{10}(A_{vnorm}) + 1,445$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnorm} > 500$ y $Z=3$	(2.8.1-4)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,3000 \log_{10}(A_{vnorm}) + 1,260$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnorm} > 500$ y $Z=2$	(2.8.1-5)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,2500 \log_{10}(A_{vnorm}) + 1,025$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnorm} > 500$ y $Z=1$	(2.8.1-6)
$(GC_{rn})_{nom} = -1,0004 \log_{10}(A_{vnorm}) + 3,500$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnorm} \leq 500$ y $Z=3$	(2.8.1-7)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,8337 \log_{10}(A_{vnorm}) + 2,900$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnorm} \leq 500$ y $Z=2$	(2.8.1-8)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,5372 \log_{10}(A_{vnorm}) + 2,000$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnorm} \leq 500$ y $Z=1$	(2.8.1-9)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,3000 \log_{10}(A_{vnorm}) + 1,610$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnorm} > 500$ y $Z=3$	(2.8.1-10)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,2500 \log_{10}(A_{vnorm}) + 1,325$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnorm} > 500$ y $Z=2$	(2.8.1-11)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,2500 \log_{10}(A_{vnorm}) + 1,225$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnorm} > 500$ y $Z=1$	(2.8.1-12)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,1892 \log_{10}(A_v S_M / 0,0929) + 0,800$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_v S_M \leq 465$ y $Z=1'$	(2.8.1-13)
$(GC_{rn})_{nom} = 0,1$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_v S_M > 465$ y $Z=1'$	(2.8.1-14)
$(GC_{rn})_{nom} = -0,2298 \log_{10}(A_v S_M / 0,0929) + 1,100$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_v S_M \leq 465$ y $Z=1'$	(2.8.1-15)
$(GC_{rn})_{nom} = 0,25$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_v S_M > 465$ y $Z=1'$	(2.8.1-16)

Donde:

$$A_{vnorm} = A_v S_M \left(\frac{10764}{(\max(L_{ed}, 15))^2} \right) \quad (2.8.1-17)$$

$$L_{ed} = \min(14,1(h \cdot W_L)^{0,5}, 3,3h, 3,3W_s) \quad (2.8.1-18)$$

Se permite interpolación lineal para $5^{\circ} < \omega < 15^{\circ}$

2. Coeficiente de presión neta nominal, para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, $(GC_{rD})_{nom}$

$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,6669 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 2,300$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} \leq 500$ y $Z_{D_fc r} = 3$	(2.8.2-1)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,5743 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 2,000$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} \leq 500$ y $Z_{D_fc r} = 2$	(2.8.2-2)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,4261 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 1,500$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} \leq 500$ y $Z_{D_fc r} = 1$	(2.8.2-3)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,3500 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 1,445$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} > 500$ y $Z_{D_fc r} = 3$	(2.8.2-4)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,3000 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 1,260$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} > 500$ y $Z_{D_fc r} = 2$	(2.8.2-5)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,2500 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 1,025$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} > 500$ y $Z_{D_fc r} = 1$	(2.8.2-6)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -1,0004 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 3,500$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} \leq 500$ y $Z_{D_fc r} = 3$	(2.8.2-7)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,8337 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 2,900$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} \leq 500$ y $Z_{D_fc r} = 2$	(2.8.2-8)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,5372 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 2,000$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} \leq 500$ y $Z_{D_fc r} = 1$	(2.8.2-9)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,3000 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 1,610$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} > 500$ y $Z_{D_fc r} = 3$	(2.8.2-10)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,2500 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 1,325$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} > 500$ y $Z_{D_fc r} = 2$	(2.8.2-11)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,2500 \log_{10}(A_{vnormD_fc r}) + 1,225$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vnormD_fc r} > 500$ y $Z_{D_fc r} = 1$	(2.8.2-12)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,1892 \log_{10}(A_{vD_fc r} S_M / 0,0929) + 0,800$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vD_fc r} S_M \leq 465$ y $Z_{D_fc r} = 1'$	(2.8.2-13)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = 0,1$	Si $0^{\circ} \leq \omega \leq 5^{\circ}$, $A_{vD_fc r} S_M > 465$ y $Z_{D_fc r} = 1'$	(2.8.2-14)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = -0,2298 \log_{10}(A_{vD_fc r} S_M / 0,0929) + 1,100$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vD_fc r} S_M \leq 465$ y $Z_{D_fc r} = 1'$	(2.8.2-15)
$(GC_{rD})_{nom_fc r} = 0,25$	Si $15^{\circ} \leq \omega \leq 35^{\circ}$, $A_{vD_fc r} S_M > 465$ y $Z_{D_fc r} = 1'$	(2.8.2-16)

Donde:

$$A_{vnormD_fc|r} = A_{vD_fc|r} S_M \left(\frac{10764}{(\max(L_{ed}, 15))^2} \right) \quad (2.8.2-17)$$

$$L_{ed} = \min(14, 1(h \cdot W_L)^{0.5}, 3, 3h, 3, 3W_s) \quad (2.8.2-18)$$

Se permite interpolación lineal para $5^{\circ} < \omega < 15^{\circ}$

2.9. Factor de borde

Según los ensayos de túnel de viento, si los paneles se sitúan en las zonas de transición, desde el lugar donde la capa de aire deja de acelerarse hacia arriba, hasta que desciende, se produce un efecto de borde protector.

Tales efectos pueden ser definidos a través del factor de borde asociado a cada panel, para la ráfaga de viento en estudio, que medirá el grado de desprotección del panel en estudio, respecto al existente en los paneles utilizados en los ensayos de túnel de viento.

A falta de otros datos, SE-IS.2 tomará de referencia los criterios definidos por ASCE 7-22 (6) y SEAOC PV2-2017 (7), para determinar el factor de borde en cada panel, siguiendo los siguientes criterios:

1. Asignación del factor de borde a los paneles que, respecto a la ráfaga de viento en estudio, están situados en el borde de la colección de paneles
 - a) Debido a la influencia de los bordes de la cubierta

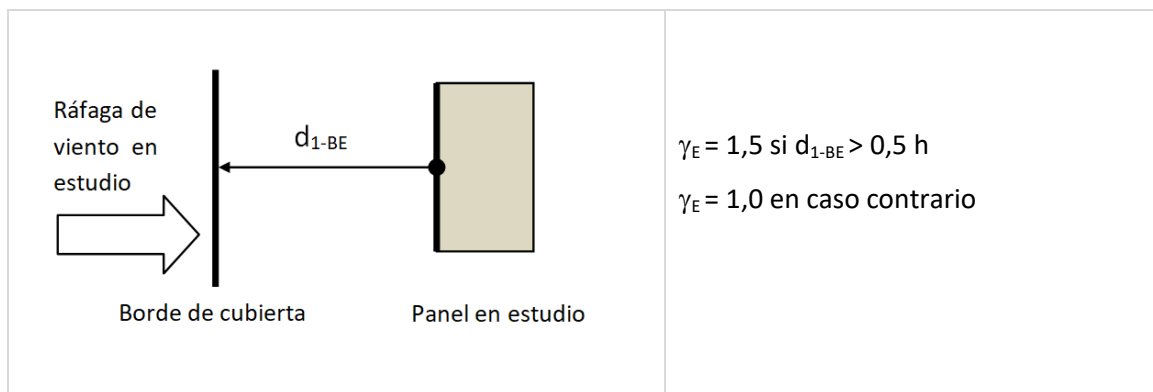


Figura 10. Factor para panel de borde de la colección de paneles, debido al efecto de la cubierta, según ASCE 7-22.

- b) Debido a la influencia de un panel de borde de otra colección de paneles

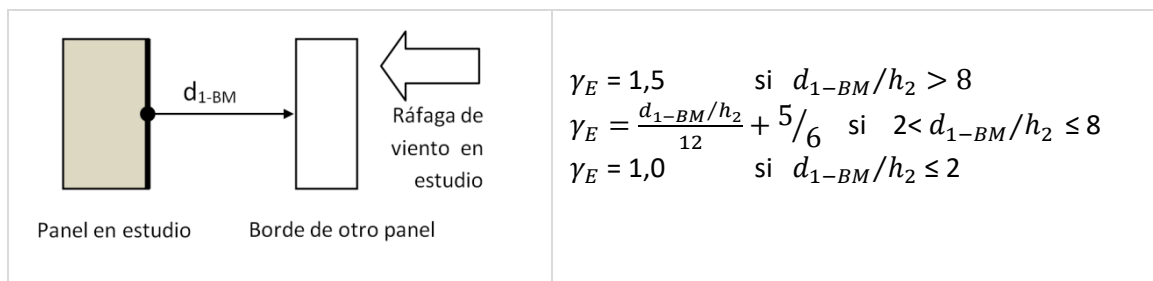


Figura 11. Factor para un panel de borde de una colección de paneles, debido al efecto de otro panel de borde adyacente, perteneciente a otra colección de paneles, según SEAOC PV2-2017.

2. Asignación del factor de borde a los paneles que, respecto a la ráfaga de viento en estudio, están situados en el interior de la colección de paneles

- a) Debido a la influencia de otro panel borde de la colección de paneles, situado en su misma fila

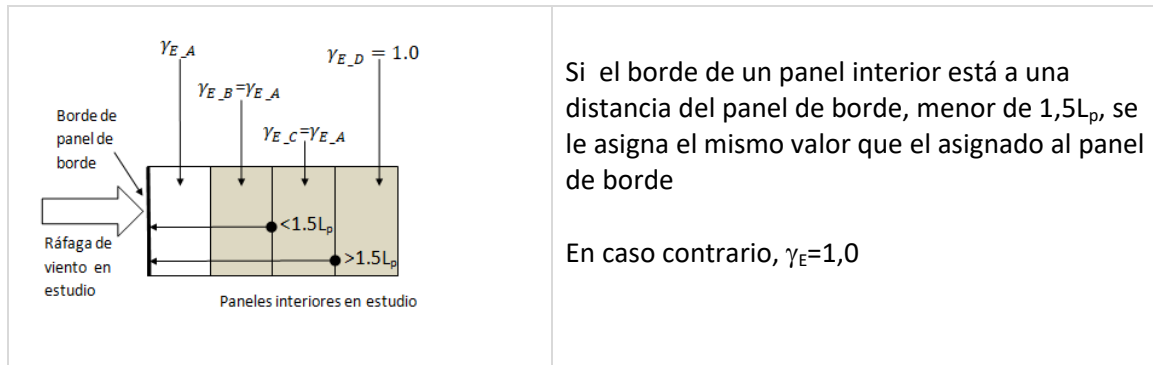


Figura 12. Factor de borde para panel de interior, debido al efecto de un panel de borde situado en la misma fila, según ASCE 7-22.

- b) Debido a la influencia de otros paneles adyacentes de la misma colección de paneles.

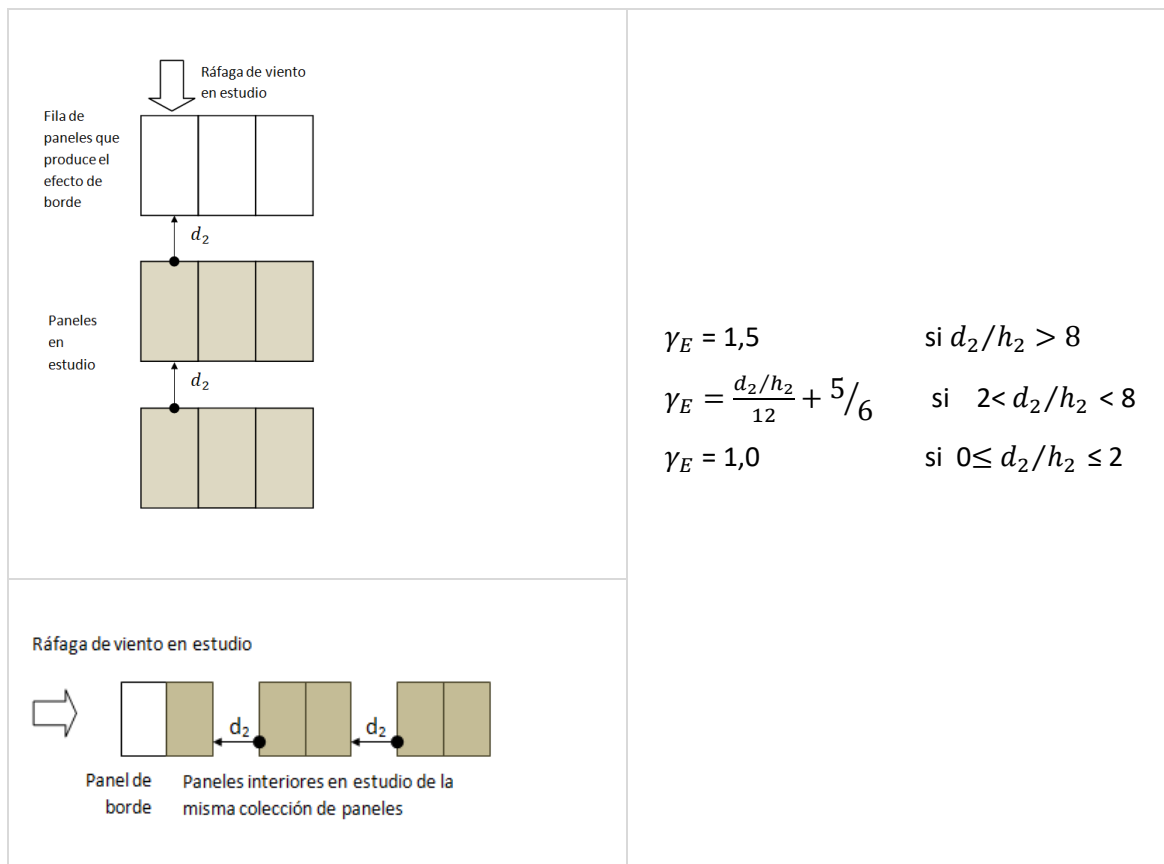


Figura 13. Factor de borde para panel de interior, según SEAOC PV2-2017.

3. Asignación del factor de borde de influencia en cada contrapeso, para la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación

Una vez determinado el factor de borde de los paneles, se especificará el factor de borde que le corresponde a cada contrapeso.

Para cada contrapeso, dada el área de viento efectiva asociada y el porcentaje que participan en ella los paneles solares, se le asigna un factor de borde que será la suma de los factores de borde asociado a tales paneles, ponderados en la proporción en la que participan.

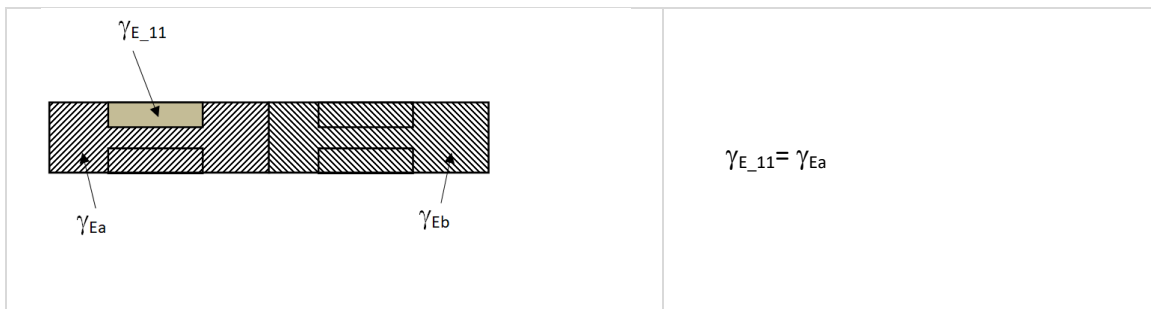


Figura 14. Factor de borde correspondiente a contrapeso B₁₁.

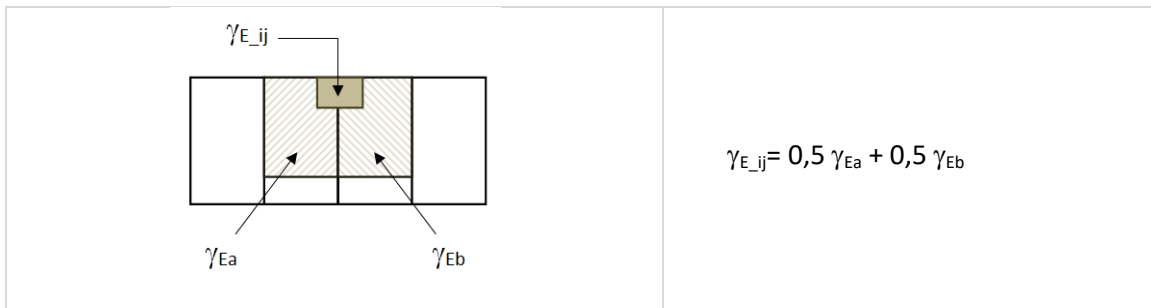


Figura 15. Factor de borde correspondiente a contrapeso B_{ij}.

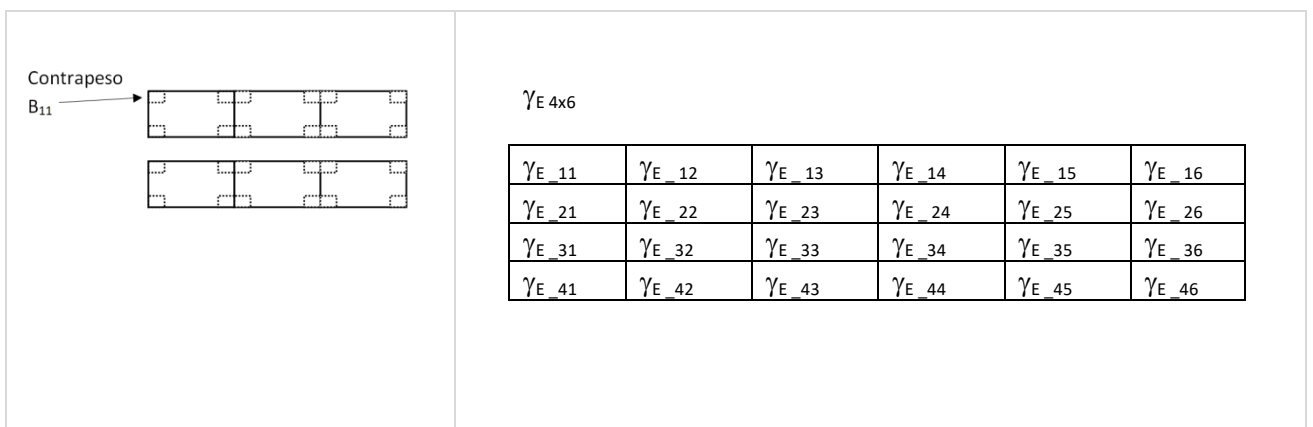


Figura 16. Ejemplo de cómo describir los factores de borde correspondientes a cada contrapeso de una colección de paneles.

4. Asignación del factor de borde de influencia en cada unidad interconectada, para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento.

Una vez determinado el factor de borde de los paneles, se especificará el factor de borde que le corresponde a cada unidad interconectada.

A falta de otros datos, se podrá tomar como factor de borde en cada unidad interconectada el predominante entre los asociados a sus paneles.

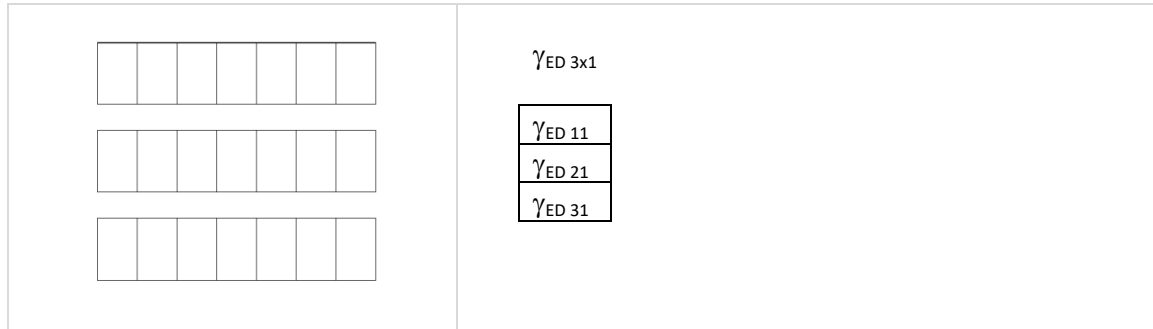


Figura 17. Ejemplo de cómo describir los factores de borde correspondientes a cada unidad interconectada.

2.10. Factores γ_p y γ_c

Se utilizan para transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio.

A falta de otros datos, se utilizarán los disponibles en ASCE 7-22 (6):

- Factor γ_p que permite considerar la influencia de los parapetos

$$\gamma_p = \min(1,2 , 0,9 + \frac{h_{pt}}{h}) \tag{2.10-1}$$

- Factor γ_c que permite considerar la influencia de la longitud característica de los paneles

$$\gamma_c = \max(0,6 + 0,1968 * L_p , 0,8) \tag{2.10-2}$$

2.11. Área tributaria

El área tributaria ($A_{tB_{ij}}$), correspondiente a cada contrapeso (i,j) de un panel solar, es la relación entre la reacción vertical en dicho contrapeso ($R_{v_{ij}}$) y la presión neta ejercida por el viento (p) en el panel solar que lo contiene.

$$A_{tB_{ij}} = \frac{R_{v_{ij}}}{p} \quad (2.11-1)$$

Será utilizada para realizar la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación.

2.12. Coeficiente de reacción debido al viento

El coeficiente de reacción debido al viento correspondiente a cada contrapeso ($CA_{tB_{ij}}$), es la relación entre el área tributaria para dicho contrapeso ($A_{tB_{ij}}$) y la superficie de un módulo solar (S_M).

$$CA_{tB_{ij}} = \frac{A_{tB_{ij}}}{S_M} \quad (2.12-1)$$

Será utilizada para realizar la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación.

Se muestra a continuación un ejemplo de cómo determinar el coeficiente de reacción debido al viento en un contrapeso.

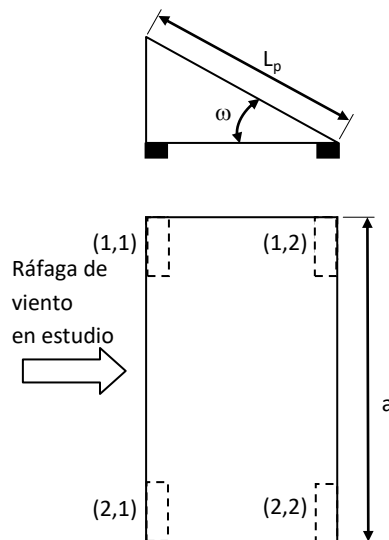


Figura 18. Panel inclinado de dimensiones $L_p \cdot a$, formado por n módulos solares, que debe ser verificado contra la pérdida de equilibrio por elevación, para la ráfaga de viento en estudio, siendo despreciable el efecto de la inclinación de la cubierta.

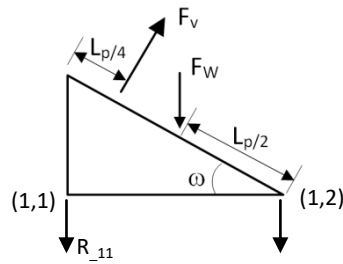


Figura 19. Diagrama de cuerpo libre para el cálculo del coeficiente de reacción debido al viento, siendo despreciable el efecto de la inclinación de la cubierta.

- (1) Acción del viento correspondiente a la presión neta, que tributa sobre el cuerpo libre, dada la simetría espacial de la estructura, F_v

$$F_v = p L_p \frac{a}{2}$$

- (2) Acción vertical debido al peso propio (sin incluir los contrapesos), que tributa sobre el cuerpo libre, dada la simetría espacial de la estructura, F_w

- (3) Reacción total y vertical, en el contrapeso en estudio (1,1), R_{11}

$$\sum M_{12} = 0 ; R_{11} = p \frac{3}{8} \frac{1}{\cos \omega} L_p a - \frac{1}{2} F_w$$

- (4) Reacción vertical debido al viento, en el contrapeso (1,1), $R_{V_{11}}$

$$R_{V_{11}} = p \frac{3}{8} \frac{1}{\cos \omega} L_p a$$

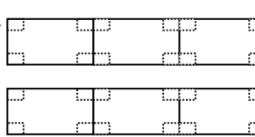
- (5) Área tributaria para el contrapeso (1,1), $A_{tB_{11}}$

$$A_{tB_{11}} = \frac{R_{V_{ij}}}{p} = \frac{3}{8} \frac{1}{\cos \omega} n S_M$$

- (6) Coeficiente de reacción debida al viento en el contrapeso (1,1), $CA_{tB_{11}}$

$$CA_{tB_{11}} = \frac{A_{tB_{ij}}}{S_M} = \frac{3}{8} \frac{1}{\cos \omega} n$$

Contrapeso B₁₁ →



$CA_{tB_{4x6}}$

$CA_{tB_{11}}$	$CA_{tB_{12}}$	$CA_{tB_{13}}$	$CA_{tB_{14}}$	$CA_{tB_{15}}$	$CA_{tB_{16}}$
$CA_{tB_{21}}$	$CA_{tB_{22}}$	$CA_{tB_{23}}$	$CA_{tB_{24}}$	$CA_{tB_{25}}$	$CA_{tB_{26}}$
$CA_{tB_{31}}$	$CA_{tB_{32}}$	$CA_{tB_{33}}$	$CA_{tB_{34}}$	$CA_{tB_{35}}$	$CA_{tB_{36}}$
$CA_{tB_{41}}$	$CA_{tB_{42}}$	$CA_{tB_{43}}$	$CA_{tB_{44}}$	$CA_{tB_{45}}$	$CA_{tB_{46}}$

Figura 20. Ejemplo sobre cómo describir los coeficientes de reacción vertical en cada contrapeso, debida al viento, para una colección de paneles.

2.13. Coeficiente de reacción debido al peso propio

El coeficiente de reacción debido al peso propio ($CW_{tB_{ij}}$), correspondiente a cada contrapeso (i,j), es la relación entre el peso propio que tributa en dicho contrapeso ($R_{W_{ij}}$) y el peso propio de un módulo solar (W_M).

$$CW_{tB_{ij}} = \frac{R_{W_{ij}}}{W_M} \quad (2.13-1)$$

Será utilizada para realizar la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación.

Se muestra a continuación un ejemplo de cómo determinar el coeficiente de reacción debido al peso propio en un contrapeso.

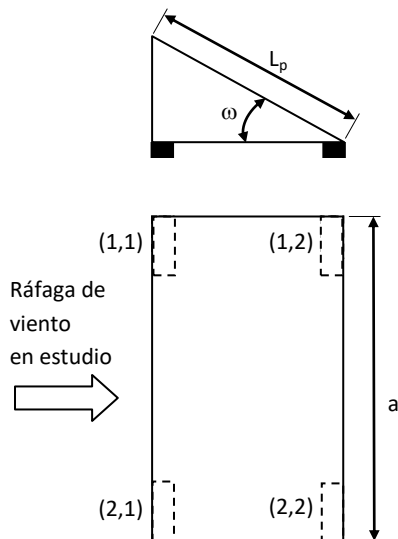


Figura 21. Panel inclinado de dimensiones $L_p \cdot a$, formado por n módulos solares, que debe ser verificado contra la pérdida de equilibrio por elevación, para la ráfaga de viento en estudio, siendo despreciable el efecto de la inclinación de la cubierta.

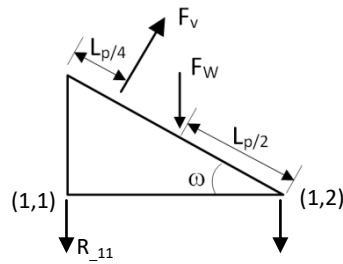


Figura 22. Diagrama de cuerpo libre para el cálculo del coeficiente de reacción debido al peso propio, siendo despreciable el efecto de la inclinación de la cubierta.

- (1) Acción del viento correspondiente a la presión neta, que tributa sobre el cuerpo libre, dada la simetría espacial de la estructura, F_v

$$F_v = p L_p \frac{a}{2}$$

- (2) Acción vertical debido al peso propio (sin incluir los contrapesos), que tributa sobre el cuerpo libre, dada la simetría espacial de la estructura, F_w

$$F_w = \frac{1}{2} n W_M$$

- (3) Reacción total y vertical, en el contrapeso en estudio (1,1), R_{11}

$$\sum M_{12} = 0 ; R_{11} = p \frac{3}{8} \frac{1}{\cos \omega} L_p a - \frac{1}{2} F_w$$

- (4) Reacción vertical debido al peso propio que tributa en el contrapeso (1,1), $R_{w_{11}}$

$$R_{w_{11}} = -\frac{1}{4} n W_M$$

- (5) Coeficiente de reacción debida al peso propio en el contrapeso (1,1), $CW_{tB_{11}}$

$$CW_{tB_{11}} = \frac{R_{w_{11}}}{W_M} = -\frac{1}{4} n$$


<p>Contrapeso B₁₁ →</p> 	$CW_{tB_{4x6}}$					
	$CW_{tB_{11}}$	$CW_{tB_{12}}$	$CW_{tB_{13}}$	$CW_{tB_{14}}$	$CW_{tB_{15}}$	$CW_{tB_{16}}$
	$CW_{tB_{21}}$	$CW_{tB_{22}}$	$CW_{tB_{23}}$	$CW_{tB_{24}}$	$CW_{tB_{25}}$	$CW_{tB_{26}}$
	$CW_{tB_{31}}$	$CW_{tB_{32}}$	$CW_{tB_{33}}$	$CW_{tB_{34}}$	$CW_{tB_{35}}$	$CW_{tB_{36}}$
	$CW_{tB_{41}}$	$CW_{tB_{42}}$	$CW_{tB_{43}}$	$CW_{tB_{44}}$	$CW_{tB_{45}}$	$CW_{tB_{46}}$

Figura 23. Ejemplo sobre cómo describir el coeficiente de reacción vertical en cada contrapeso, debido al peso propio de una colección de paneles.

2.14. Área de referencia

El área de referencia (A_{ref_fc}) es el área correspondiente a cada unidad interconectada, medida como una fracción de la superficie de un módulo solar, que permite determinar la fuerza total que es ejercida en cada unidad interconectada (F_{D_fc}), para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, debido a la presión del viento correspondiente a dicha unidad interconectada (p_{D_fc})

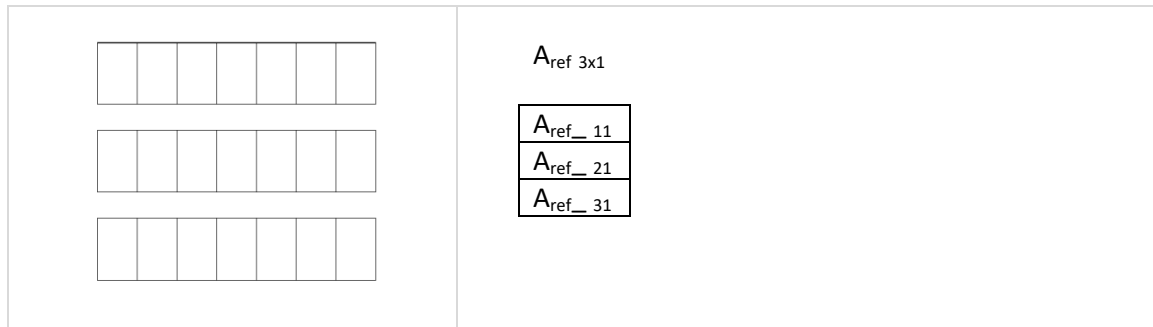


Figura 24. Ejemplo de cómo describir las áreas de referencia correspondientes a cada subconjunto de paneles (cada fila) por comportarse como una unidad frente al deslizamiento.

3. Datos a procesar

3.1. Edificación y entorno

1. Dirección del emplazamiento
2. Valor básico de la velocidad del viento, v_b (m/s)
3. Densidad del aire, ρ (kg/m³)
4. Factor de rugosidad correspondiente a la categoría del terreno, c_r
5. Coeficiente topográfico, c_o
6. Coeficiente parcial de seguridad para acciones variables y verificación de la estabilidad, γ_Q
7. Coeficiente parcial de seguridad para acciones permanentes estabilizadoras y verificación de la estabilidad, γ_G
8. Altura media de la cubierta, h (m)
9. Dimensión del lado mayor del edificio, W_L (m)
10. Dimensión del lado menor del edificio, W_s (m)
11. Ángulo de inclinación de la cubierta, θ (°)
12. Altura media del parapeto de la cubierta, h_{pt} (m)

3.2. Instalación solar

1. Superficie de un módulo solar, S_M (m²)
2. Ángulo de los paneles respecto a la cubierta, ω (°)
3. Longitud característica de los paneles, L_p (m)
4. Altura del borde superior de los paneles, h_2 (m)
5. Altura del borde inferior de los paneles, h_1 (m)
6. Mínima distancia horizontal y ortogonal desde el borde de la colección de paneles al borde de la cubierta, d_{min} (m)
7. Mínima distancia horizontal entre filas de paneles, d_{fmin} (m)
8. Coeficiente de rozamiento entre los contrapesos y la superficie de la cubierta, μ
9. Peso propio, correspondiente a cada módulo y del sistema estructural asociado, excluyendo los contrapesos, W_M (kN)
10. Peso de cada uno de los contrapesos disponibles, W_{Bd_ij} (kN)
11. Peso propio de cada unidad interconectada, excluyendo los contrapesos, W_{U_fc} (kN)
12. Peso de los contrapesos disponibles para cada unidad interconectada, W_{DBd_fc} (kN)

3.3. Interacción con las ráfagas de viento para la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación

1. Zona de viento asociada a cada contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), $Z_{ij|r}$
2. Área de viento efectiva correspondiente a cada contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en fracción de la superficie de un módulo solar, $A_{v_{ij|r}}$
3. Factor de borde asociado a cada contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), $\gamma_{E_{ij|r}}$
4. Coeficiente de reacción debida al viento en cada contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), $CA_{tB_{ij|r}}$
5. Coeficiente de reacción debida al peso propio en cada contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), $CW_{tB_{ij|r}}$

3.4. Interacción con las ráfagas de viento para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento

1. Zona de viento asociada a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), $Z_{D_{fc|r}}$
2. Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en fracción de la superficie de un módulo solar, $A_{VD_{fc|r}}$
3. Factor de borde asociada a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), $\gamma_{ED_{fc|r}}$
4. Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en fracción de la superficie de un módulo solar, $A_{ref_{fc|r}}$

4. Resultados

4.1. Análisis de aplicabilidad

Se comprobará que el análisis estructural está respaldado por los datos disponibles en los ensayos de túnel de viento utilizados, al verificar que la instalación solar en estudio cumple con todos los valores límites pertinentes:

1. Ángulo de inclinación de la cubierta
2. Ángulo formado por el panel respecto a la cubierta
3. Longitud característica de los paneles
4. Altura del borde superior del panel
5. Altura del borde inferior del panel
6. Distancia horizontal y ortogonal desde el borde de la colección de paneles al borde de la cubierta
7. Distancia horizontal entre filas de paneles adyacentes

4.2. Caracterización de la instalación solar

1. Presión de la velocidad básica del viento, q_b (kN/m^2)

$$q_b = 0,5 \rho v_b^2 10^{-3} \quad (4.2.1-1)$$

2. Coeficiente de presión neta, correspondiente a cada contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación, $GC_{rn_ij|r}$

$$GC_{rn_ij|r} = (GC_{rn})_{nom_ij|r} \gamma_p \gamma_c \gamma_{E_ij|r} \quad (4.2.2-1)$$

Donde:

$(GC_{rn})_{nom_ij r}$	Coeficiente de presión neta nominal, correspondiente a cada contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), para considerar de forma conjunta el efecto de la intensidad de las turbulencias, la influencia de las formas y la ubicación de las instalaciones solares, en base a los resultados de ensayos de túnel de viento
γ_p	Factor que permite transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio, al considerar la influencia de los parapetos
γ_c	Factor que permite transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio, al considerar la influencia de la longitud característica de los paneles
$\gamma_{E_ij r}$	Factor que permite transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio, al considerar la influencia de los efectos de borde, correspondiente a cada contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r).

3. Presión neta del viento sobre las superficies de los paneles, correspondiente al contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación, $p_{_ij|r}$ (kN/m^2)

$$p_{_ij|r} = q_b C_r C_o GC_{rn_ij|r} \quad (4.2.3-1)$$

4. Reacción vertical debido a la acción del viento, correspondiente al contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación, $R_{v_{ij}|r}$ (kN)

$$R_{v_{ij}|r} = p_{ij|r} CA_{TB_{ij}|r} S_M \quad (4.2.4-1)$$

Observación: si el sentido de la reacción es hacia abajo, tomará un valor positivo.

5. Reacción vertical debido al peso propio, correspondiente al contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación, $R_{w_{ij}|r}$ (kN)

$$R_{w_{ij}|r} = CW_{TB_{ij}|r} W_M \quad (4.2.5-1)$$

Observación: por ser el sentido de la reacción hacia arriba, tomará un valor negativo.

6. Peso mínimo necesario, correspondiente al contrapeso (i,j), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación, $W_{B_{ij}|r}$ (kN)

$$W_{B_{ij}|r} = (\gamma_Q R_{v_{ij}|r} + \gamma_G R_{w_{ij}|r}) \quad (4.2.6-1)$$

Observación: el signo de los valores de las reacciones dependerá del sentido de su aplicación.

7. Coeficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, $GC_{rD_{fc}|r}$

$$GC_{rD_{fc}|r} = (GC_{rD})_{nom_{fc}|r} \gamma_p \gamma_c \gamma_{ED_{fc}|r} \quad (4.2.7-1)$$

Donde:

$(GC_{rD})_{nom_{fc} r}$	Coeficiente de presión neta nominal, correspondiente a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), para considerar de forma conjunta el efecto de la intensidad de las turbulencias, la influencia de las formas y la ubicación de las instalaciones solares, en base a los resultados de ensayos de túnel de viento
γ_p	Factor que permite transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio, al considerar la influencia de los parapetos
γ_c	Factor que permite transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio, al considerar la influencia de la longitud característica de los paneles
$\gamma_{ED_{fc} r}$	Factor que permite transformar las condiciones del ensayo de túnel de viento a las existentes en la situación en estudio, al considerar la influencia de los efectos de borde,

correspondiente a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r)

8. Presión neta del viento sobre la superficie, asociada a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, $p_{D_fc|r}$ (kN/m²)

$$p_{D_fc|r} = q_b C_r C_o G C_{rnD_fc|r} \quad (4.2.8-1)$$

9. Acción tangencial a la cubierta debida al viento, asociada a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, $F_{vDt_fc|r}$ (kN)

$$F_{vDt_fc|r} = p_{D_fc|r} A_{ref_fc|r} S_M \sin\omega \quad (4.2.9-1)$$

10. Acción normal a la cubierta debida al viento, asociada a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, $F_{vDn_fc|r}$ (kN)

$$F_{vDn_fc|r} = p_{D_fc|r} A_{ref_fc|r} S_M \cos\omega \quad (4.2.10-1)$$

11. Acción normal a la cubierta debido al peso propio (excluyendo contrapesos), asociada a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, $F_{wDn_fc|r}$ (kN)

$$F_{wDn_fc|r} = W_{U_fc} \cos\theta \quad (4.2.11-1)$$

12. Peso mínimo necesario de los contrapesos asociados a cada unidad interconectada (f,c), para la dirección y sentido del viento en estudio (r), en la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento, $W_{DB_fc|r}$ (kN)

$$W_{DB_fc|r} = \frac{\frac{F_{vDt_fc|r}}{\mu} \gamma_Q + F_{vDn_fc|r} \gamma_Q - F_{wDn_fc} \gamma_G}{\cos\theta} \quad (4.2.12-1)$$

4.3. Verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación

1. Peso mínimo necesario de cada contrapeso, W_{Bmin_ij} (kN)

$$W_{Bmin_ij} = \max(W_{B_ij|r=1}, W_{B_ij|r=2}, \dots, W_{B_ij|r}, \dots, W_{B_ij|r=R}) \quad (4.3.1-1)$$

Donde $W_{B_ij|r}$ es el peso mínimo necesario para cada contrapeso en cada una de las direcciones estudiadas de la ráfaga de viento.

2. Coeficiente de seguridad disponible correspondiente a cada contrapeso, γ_{GB_ij}

$$\gamma_{GB_ij} = W_{Bd_ij} / W_{Bmin_ij} \quad (4.3.2-1)$$

4.4. Verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento

1. Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada, W_{DBmin_fc} (kN)

$$W_{DBmin_fc} = \max(W_{DB_fc|r=1}, W_{DB_fc|r=2}, \dots, W_{DB_fc|r}, \dots, W_{DB_fc|r=R}) \quad (4.4.1-1)$$

Donde $W_{DB_fc|r}$ es el peso mínimo necesario para cada unidad interconectada en cada una de las direcciones estudiadas de la ráfaga de viento.

2. Coeficiente de seguridad disponible correspondiente al conjunto de contrapesos de cada unidad interconectada, γ_{GDB_fc}

$$\gamma_{GDB_fc} = W_{DBd_fc} / W_{DBmin_fc} \quad (4.4.2-1)$$

5. Referencias

- (1) Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. “CTE. Parte I”. 14 de junio de 2022.
- (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) Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, «DBSE-AE. Código Técnico de la Edificación de España,» Abril 2009. [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf.
- (4) 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>.
- (5) COGITIM. “SE-IS.1. Método para el cálculo de reacciones en los apoyos de las instalaciones fotovoltaicas con paneles inclinados sobre cubiertas planas”. Julio 2023.
- (6) American Society of Civil Engineer, *Minimum design loads and associated criteria for building and other structures. ASCE 7-22. 2022.*, 2022.
- (7) SEAOC Solar Photovoltaic Systems Committee, «PV2-2017. Wind design for solar arrays,» 2017.
- (8) CEN, UNE EN 1991-1-4:2018. Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte 1-4. Acciones generales. Acciones del viento.