

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

**SE-IS.3**

## Contenido

<b>1. Objeto y alcance</b> .....	6
<b>2. Datos procesados</b> .....	7
<b>2.1. Edificación y entorno</b> .....	7
<b>2.2. Instalación solar</b> .....	8
<b>2.3. Interacción con las ráfagas de viento en estudio para la verificación por elevación</b> .....	12
<b>2.3.1. Primera dirección y sentido del viento en estudio</b> .....	12
<b>2.3.1.1. Zona de viento asociada a cada contrapeso</b> .....	12
<b>2.3.1.2. Área de viento efectiva correspondiente a cada contrapeso</b> .....	13
<b>2.3.1.3. Factor de borde correspondiente a cada contrapeso</b> .....	14
<b>2.3.1.4. Coeficiente de reacción debido al viento, correspondiente a cada contrapeso</b> .....	15
<b>2.3.1.5. Coeficiente de reacción debido al peso propio, en cada contrapeso</b> .....	16
<b>2.3.2. Segunda dirección y sentido del viento en estudio</b> .....	17
<b>2.3.2.1. Zona de viento asociada a cada contrapeso</b> .....	17
<b>2.3.2.2. Área de viento efectiva correspondiente a cada contrapeso</b> .....	18
<b>2.3.2.3. Factor de borde correspondiente a cada contrapeso</b> .....	19
<b>2.3.2.4. Coeficiente de reacción debido al viento, correspondiente a cada contrapeso</b> .....	20
<b>2.3.2.5. Coeficiente de reacción debido al peso propio, en cada contrapeso</b> .....	21
<b>2.3.3. Tercera dirección y sentido del viento en estudio</b> .....	22
<b>2.3.3.1. Zona de viento asociada a cada contrapeso</b> .....	22
<b>2.3.3.2. Área de viento efectiva correspondiente a cada contrapeso</b> .....	23
<b>2.3.3.3. Factor de borde correspondiente a cada contrapeso</b> .....	24
<b>2.3.3.4. Coeficiente de reacción debido al viento, correspondiente a cada contrapeso</b> .....	25

2.3.3.5.	Coefficiente de reacción debido al peso propio, en cada contrapeso .....	26
2.3.4.	Cuarta dirección y sentido del viento en estudio .....	27
2.3.4.1.	Zona de viento asociada a cada contrapeso .....	27
2.3.4.2.	Área de viento efectiva correspondiente a cada contrapeso.....	28
2.3.4.3.	Factor de borde correspondiente a cada contrapeso.....	29
2.3.4.4.	Coefficiente de reacción debido al viento, correspondiente a cada contrapeso.....	30
2.3.4.5.	Coefficiente de reacción debido al peso propio, en cada contrapeso .....	31
2.4.	Interacción con las ráfagas de viento en estudio para la verificación por deslizamiento.....	32
2.4.1.	Primera dirección y sentido del viento en estudio .....	32
2.4.1.1.	Zona de viento asociada a cada unidad interconectada .....	32
2.4.1.2.	Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada.....	33
2.4.1.3.	Factor de borde correspondiente a cada unidad interconectada.....	34
2.4.1.4.	Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada .....	35
2.4.2.	Segunda dirección y sentido del viento en estudio .....	36
2.4.2.1.	Zona de viento asociada a cada unidad interconectada .....	36
2.4.2.2.	Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada.....	37
2.4.2.3.	Factor de borde correspondiente a cada unidad interconectada.....	38
2.4.2.4.	Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada .....	39
2.4.3.	Tercera dirección y sentido del viento en estudio.....	40
2.4.3.1.	Zona de viento asociada a cada unidad interconectada .....	40
2.4.3.2.	Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada.....	41
2.4.3.3.	Factor de borde correspondiente a cada unidad interconectada.....	42
2.4.3.4.	Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada .....	43

<b>2.4.4.</b>	<b>Cuarta dirección y sentido del viento en estudio .....</b>	<b>44</b>
<b>2.4.4.1.</b>	<b>Zona de viento asociada a cada unidad interconectada .....</b>	<b>44</b>
<b>2.4.4.2.</b>	<b>Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada .....</b>	<b>45</b>
<b>2.4.4.3.</b>	<b>Factor de borde correspondiente a cada unidad interconectada .....</b>	<b>46</b>
<b>2.4.4.4.</b>	<b>Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada .....</b>	<b>47</b>
<b>3.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1.</b>	<b>Análisis de aplicabilidad .....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.</b>	<b>Caracterización de la instalación para la verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Primera dirección y sentido del viento en estudio .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.1.1.</b>	<b>Coefficiente de presión neta, asociado a cada contrapeso .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2.1.2.</b>	<b>Peso mínimo necesario de cada contrapeso .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>Segunda dirección y sentido del viento en estudio .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.2.1.</b>	<b>Coefficiente de presión neta, asociado a cada contrapeso .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.2.2.</b>	<b>Peso mínimo necesario de cada contrapeso .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.3.</b>	<b>Tercera dirección y sentido del viento en estudio .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.3.1.</b>	<b>Coefficiente de presión neta, asociado a cada contrapeso .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.3.2.</b>	<b>Peso mínimo necesario de cada contrapeso .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.4.</b>	<b>Cuarta dirección y sentido del viento en estudio .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.4.1.</b>	<b>Coefficiente de presión neta, asociado a cada contrapeso .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.4.2.</b>	<b>Peso mínimo necesario de cada contrapeso .....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.</b>	<b>Caracterización de la instalación para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento .....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>Primera dirección y sentido del viento en estudio .....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.1.1.</b>	<b>Coefficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada .....</b>	<b>57</b>

3.3.1.2.	Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada .....	58
3.3.2.	Segunda dirección y sentido del viento en estudio .....	59
3.3.2.1.	Coeficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada .....	59
3.3.2.2.	Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada .....	60
3.3.3.	Tercera dirección y sentido del viento en estudio .....	61
3.3.3.1.	Coeficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada .....	61
3.3.3.2.	Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada .....	62
3.3.4.	Cuarta dirección y sentido del viento en estudio .....	63
3.3.4.1.	Coeficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada .....	63
3.3.4.2.	Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada .....	64
3.4.	Verificación contra la pérdida de equilibrio por elevación .....	65
3.4.1.	Peso mínimo necesario de cada contrapeso .....	65
3.4.2.	Coeficiente de seguridad disponible correspondiente a cada contrapeso .....	66
3.5.	Verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento .....	67
3.5.1.	Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada .....	67
3.5.2.	Coeficiente de seguridad disponible correspondiente al conjunto de contrapesos de cada unidad interconectada .....	68
4.	Conclusiones .....	69
5.	Representación gráfica de la instalación de paneles solares analizados .....	70
6.	Información adicional .....	72
7.	Bibliografía .....	74

## 1. Objeto y alcance

Se realiza un análisis de seguridad estructural, conforme a la Guía del Método SE-IS.2 (1), con la finalidad de cumplir la normativa vigente (2-5) respecto al requisito de seguridad, así como para controlar el riesgo de pérdida de funcionalidad.

La estructura analizada consiste en una instalación con paneles solares fotovoltaicos sobre una cubierta plana de un edificio.

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

El resultado verificará la posible pérdida de equilibrio por elevación y por deslizamiento.

Es aplicable 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.

Se utilizarán los resultados de los ensayos de túnel de viento y los criterios de ASCE 7-22 (6) y SEAOC PV2-2017 (7).

También se utilizará el Eurocódigo 1 (8) para determinar la velocidad media del viento.

No se incluyen:

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

El análisis se ha ejecutado con la aplicación informática SE-IS, versión 10022023.1, del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid.

## 2. Datos procesados

### 2.1. Edificación y entorno

1. Dirección del emplazamiento	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
2. Valor básico de la velocidad del viento	$v_b$	26	m/s
3. Densidad del aire	$\rho$	1,25	kg/m <sup>3</sup>
4. Categoría del terreno		II	
5. Coeficiente topográfico	$c_o$	1	
6. Coeficiente parcial de seguridad para acciones variables y verificación de estabilidad	$\gamma_Q$	1,5	
7. Coeficiente parcial de seguridad para acciones permanentes estabilizadoras y verificación de estabilidad	$\gamma_G$	0,9	
8. Altura media de la cubierta	$h$	5	m
9. Dimensión del lado mayor del edificio	$W_L$	83	m
10. Dimensión del lado menor del edificio	$W_s$	63	m
11. Ángulo de inclinación de la cubierta	$\theta$	5	°
12. Altura media del parapeto de la cubierta	$h_{pt}$	0,6	m

## 2.2. Instalación solar

1. Superficie de un módulo solar
2. Ángulo de los paneles respecto a la cubierta
3. Longitud característica de los paneles
4. Altura del borde superior de los paneles
5. Altura del borde inferior de los paneles
6. Mínima distancia horizontal y ortogonal desde el borde de la colección de paneles al borde de la cubierta
7. Mínima distancia horizontal entre filas de paneles
8. Coeficiente de rozamiento entre los contrapesos y la superficie de la cubierta
9. Peso propio, correspondiente a cada módulo y del sistema estructural asociado, excluyendo los contrapesos

$S_M$	1,66	$m^2$
$\omega$	20	$^\circ$
$L_p$	0,99	m
$h_2$	0,59	m
$h_1$	0,25	m
$d_{min}$	1,5	m
$d_{fmin}$	1,3	m
$\mu$	0,4	
$W_M$	$27 \cdot 10^{-2}$	kN





11. Peso propio, correspondiente a cada unidad interconectada

$$W_{U_{fc}} \cdot 10^{-2} \text{ (kN)}$$

	1
1	540
2	540
3	540
4	540
5	540
6	540
7	540
8	540
9	540
10	540
11	540
12	540
13	540
14	540
15	540
16	540
17	540
18	540
19	540
20	540
21	702
22	702

12. Peso de los contrapesos disponibles para cada unidad interconectada

$$W_{DBd\_fc} \cdot 10^{-2} \text{ (kN)}$$

	1
1	4960
2	4960
3	4960
4	4960
5	4960
6	4960
7	4960
8	4960
9	4960
10	4960
11	4960
12	4960
13	4960
14	4960
15	4960
16	4960
17	4960
18	4960
19	4960
20	4960
21	6448
22	6448













































## 2.4. Interacción con las ráfagas de viento en estudio para la verificación por deslizamiento

### 2.4.1. Primera dirección y sentido del viento en estudio

#### 2.4.1.1. Zona de viento asociada a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	0	°
--	----------	---	---

	$Z_{D\_fc}$
	1
1	3
2	3
3	3
4	3
5	2
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2
11	2
12	2
13	2
14	2
15	2
16	2
17	2
18	2
19	2
20	2
21	2
22	2



**2.4.1.2. Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada**

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	0	°
--	----------	---	---

**$A_{VD\_fc}$  (en unidades de módulo solar)**

1

1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	26
22	26

### 2.4.1.3. Factor de borde correspondiente a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	0	$^{\circ}$
--	----------	---	------------

	$\gamma_{ED\_fc}$
1	1,5
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1
13	1
14	1
15	1
16	1
17	1
18	1
19	1
20	1
21	1
22	1

**2.4.1.4. Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada**

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	0	$^{\circ}$
--	----------	---	------------

**$A_{ref\_fc}$  (en unidades de módulo solar)**

	1
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	26
22	26

## 2.4.2. Segunda dirección y sentido del viento en estudio

### 2.4.2.1. Zona de viento asociada a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	90	°
--	----------	----	---

	$Z_{D\_fc}$
	1
1	3
2	3
3	3
4	3
5	2
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2
11	2
12	2
13	2
14	2
15	2
16	2
17	2
18	2
19	2
20	2
21	2
22	2

**2.4.2.2. Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada**

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	90	°
--	----------	----	---

**$A_{VD\_fc}$  (en unidades de módulo solar)**

	1
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	26
22	26

### 2.4.2.3. Factor de borde correspondiente a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	90	°
--	----------	----	---

$\gamma_{ED\_fc}$	
1	
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1
13	1
14	1
15	1
16	1
17	1
18	1
19	1
20	1
21	1
22	1

**2.4.2.4. Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada**

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	90	°
--	----------	----	---

**A<sub>ref\_fc</sub> (en unidades de módulo solar)**

	1
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	26
22	26

### 2.4.3. Tercera dirección y sentido del viento en estudio

#### 2.4.3.1. Zona de viento asociada a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	180	°
--	----------	-----	---

$Z_{D\_fc}$	1
1	2
2	2
3	2
4	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2
11	2
12	2
13	2
14	2
15	2
16	2
17	2
18	2
19	2
20	2
21	2
22	2



### 2.4.3.2. Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	180	°
--	----------	-----	---

$A_{VD\_fc}$  (en unidades de módulo solar)

1	
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	26
22	26

### 2.4.3.3. Factor de borde correspondiente a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	180	°
--	----------	-----	---

$\gamma_{ED\_fc}$

1

1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1
13	1
14	1
15	1
16	1
17	1
18	1
19	1
20	1
21	1
22	1,25

**2.4.3.4. Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada**

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	180	°
--	----------	-----	---

**A<sub>ref\_fc</sub> (en unidades de módulo solar)**

	1
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	26
22	26

## 2.4.4. Cuarta dirección y sentido del viento en estudio

### 2.4.4.1. Zona de viento asociada a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	270	°
--	----------	-----	---

$Z_{D\_fc}$

	1
1	3
2	3
3	3
4	3
5	2
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2
11	2
12	2
13	2
14	2
15	2
16	2
17	2
18	2
19	2
20	2
21	2
22	2

**2.4.4.2. Área de viento efectiva correspondiente a cada unidad interconectada**

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	270	°
--	----------	-----	---

**$A_{VD\_fc}$  (en unidades de módulo solar)**

	1
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	26
22	26

### 2.4.4.3. Factor de borde correspondiente a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	270	°
--	----------	-----	---

$\gamma_{ED\_fc}$

1

1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1
13	1
14	1
15	1
16	1
17	1
18	1
19	1
20	1
21	1
22	1

**2.4.4.4. Área de referencia correspondiente a cada unidad interconectada**

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	270	°
--	----------	-----	---

**$A_{ref\_fc}$  (en unidades de módulo solar)**

	1
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20
18	20
19	20
20	20
21	26
22	26

### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis de aplicabilidad

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





















### 3.3. Caracterización de la instalación para la verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento

#### 3.3.1. Primera dirección y sentido del viento en estudio

##### 3.3.1.1. Coeficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	0	°
--	----------	---	---

$GC_{rnD\_fc}$	
1	
1	0,8
2	0,6
3	0,6
4	0,6
5	0,4
6	0,4
7	0,4
8	0,4
9	0,4
10	0,4
11	0,4
12	0,4
13	0,4
14	0,4
15	0,4
16	0,4
17	0,4
18	0,4
19	0,4
20	0,4
21	0,4
22	0,4

### 3.3.1.2. Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	0	°
--	----------	---	---

$W_{DB\_fc} \cdot 10^{-2}$  (kN)

	1
1	2253
2	1340
3	1340
4	1340
5	990
6	990
7	990
8	990
9	990
10	990
11	990
12	990
13	990
14	990
15	990
16	990
17	990
18	990
19	990
20	990
21	1187
22	1187

### 3.3.2. Segunda dirección y sentido del viento en estudio

#### 3.3.2.1. Coeficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	90	°
--	----------	----	---

$GC_{rnD\_fc}$	
1	
1	0,6
2	0,6
3	0,6
4	0,6
5	0,4
6	0,4
7	0,4
8	0,4
9	0,4
10	0,4
11	0,4
12	0,4
13	0,4
14	0,4
15	0,4
16	0,4
17	0,4
18	0,4
19	0,4
20	0,4
21	0,4
22	0,4

### 3.3.2.2. Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	90	°
--	----------	----	---

$W_{DB\_fc} \cdot 10^{-2}$  (kN)

	1
1	1340
2	1340
3	1340
4	1340
5	990
6	990
7	990
8	990
9	990
10	990
11	990
12	990
13	990
14	990
15	990
16	990
17	990
18	990
19	990
20	990
21	1187
22	1187

### 3.3.3. Tercera dirección y sentido del viento en estudio

#### 3.3.3.1. Coeficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	180	$^{\circ}$
--	----------	-----	------------

**GC<sub>rnD\_fc</sub>**

1

1	0,4
2	0,4
3	0,4
4	0,4
5	0,4
6	0,4
7	0,4
8	0,4
9	0,4
10	0,4
11	0,4
12	0,4
13	0,4
14	0,4
15	0,4
16	0,4
17	0,4
18	0,4
19	0,4
20	0,4
21	0,4
22	0,5

### 3.3.3.2. Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	180	°
--	----------	-----	---

$W_{DB\_fc} \cdot 10^{-2}$  (kN)

	1
1	990
2	990
3	990
4	990
5	990
6	990
7	990
8	990
9	990
10	990
11	990
12	990
13	990
14	990
15	990
16	990
17	990
18	990
19	990
20	990
21	1187
22	1642

### 3.3.4. Cuarta dirección y sentido del viento en estudio

#### 3.3.4.1. Coeficiente de presión neta, asociado a cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	270	°
--	----------	-----	---

$GC_{rnD\_fc}$	
1	
1	0,6
2	0,6
3	0,6
4	0,6
5	0,4
6	0,4
7	0,4
8	0,4
9	0,4
10	0,4
11	0,4
12	0,4
13	0,4
14	0,4
15	0,4
16	0,4
17	0,4
18	0,4
19	0,4
20	0,4
21	0,4
22	0,4

### 3.3.4.2. Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada

Ángulo respecto al norte desde donde se origina la ráfaga de viento en estudio	$\alpha$	270	°
--	----------	-----	---

$W_{DB\_fc} \cdot 10^{-2}$  (kN)

1

1	1340
2	1340
3	1340
4	1340
5	990
6	990
7	990
8	990
9	990
10	990
11	990
12	990
13	990
14	990
15	990
16	990
17	990
18	990
19	990
20	990
21	1187
22	1187







### 3.5. Verificación contra la pérdida de equilibrio por deslizamiento

#### 3.5.1. Peso mínimo global necesario de los contrapesos para cada unidad interconectada

$W_{DBmin\_fc} \cdot 10^{-2} \text{ (kN)}$

	1
1	2253
2	1340
3	1340
4	1340
5	990
6	990
7	990
8	990
9	990
10	990
11	990
12	990
13	990
14	990
15	990
16	990
17	990
18	990
19	990
20	990
21	1187
22	1642

### 3.5.2. Coeficiente de seguridad disponible correspondiente al conjunto de contrapesos de cada unidad interconectada

$\gamma_{GDB\_fc}$

1

1	2,20
2	3,70
3	3,70
4	3,70
5	5,01
6	5,01
7	5,01
8	5,01
9	5,01
10	5,01
11	5,01
12	5,01
13	5,01
14	5,01
15	5,01
16	5,01
17	5,01
18	5,01
19	5,01
20	5,01
21	5,43
22	3,93

#### 4. Conclusiones

La instalación solar objeto del análisis ha podido ser evaluada en base a los datos estandarizados de ensayos de túnel de viento, lo que permite garantizar que los resultados obtenidos estiman su verdadero comportamiento estructural frente a la acción del viento.

La instalación no tiene riesgo de desplazamiento, lo que implica que las fuerzas puedan transmitirse a la cubierta por las zonas previstas.

Respecto a la posible pérdida de equilibrio por elevación, destacar que hay paneles en los bordes que están muy expuestos a la acción del viento, disponiendo de coeficientes de seguridad insuficientes debido a que sus contrapesos están infradimensionados (destacados con color rojo en la tabla del apartado 3.4.2).

Sin embargo, hay muchos paneles interiores con contrapesos sobredimensionados (destacados con color naranja en la tabla del apartado 3.4.2).

Sobredimensionar los contrapesos supone un aumento del riesgo de pérdida de resistencia y estabilidad de la cubierta.

## 5. Representación gráfica de la instalación de paneles solares analizados

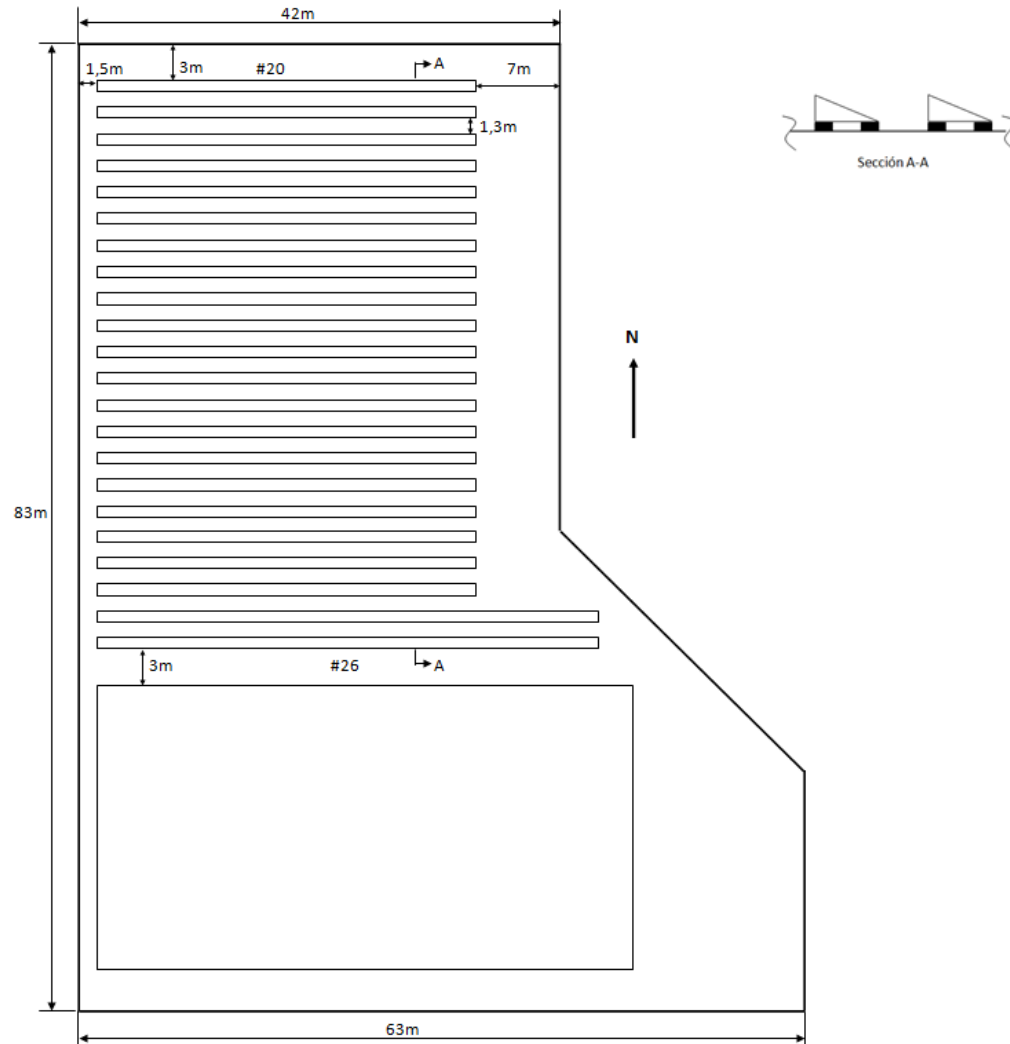


Figura 1: Cubierta del edificio y colección de paneles analizados.

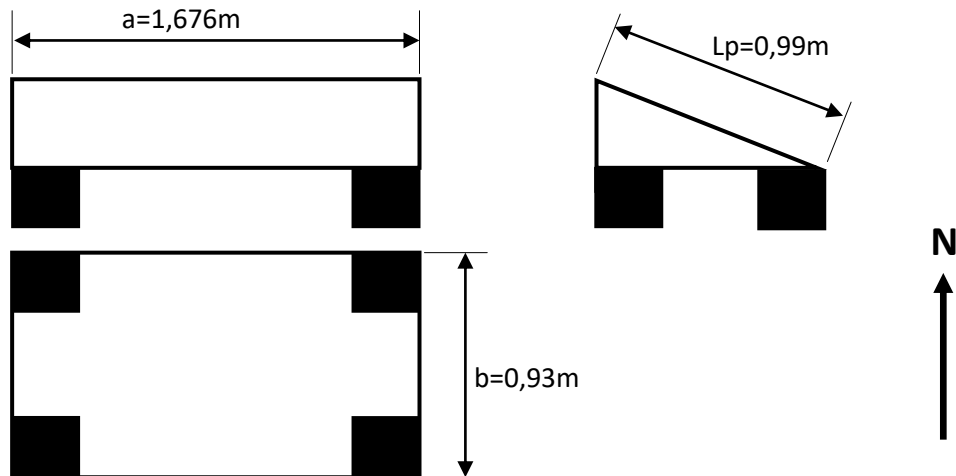
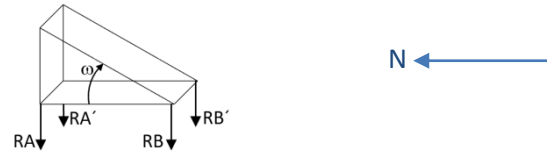
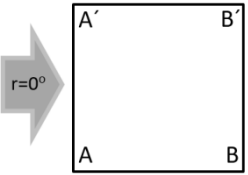
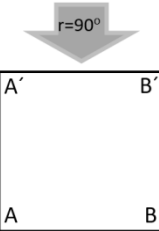


Figura 2: Panel solar, estructura auxiliar y sus contrapesos.

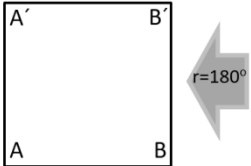
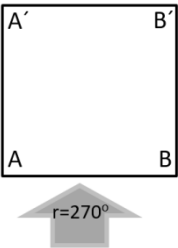
## 6. Información adicional

Reacciones debido a la presión del viento ( $qe$ ) en un panel solar de superficie  $n \cdot S_M$   
(en el ejemplo en estudio,  $n=1$ )



Ráfaga de viento	Coefficientes de reacción debido al viento
	$R_{A 0} = R_{A' 0} = \frac{3}{8 \cos \omega} n S_M qe$ $\Rightarrow C_{A_{tA} 0} = C_{A_{tA'} 0} = \frac{3}{8 \cos \omega} n$ $R_{B 0} = R_{B' 0} = \left( \frac{\cos \omega}{2} - \frac{3}{8 \cos \omega} \right) n S_M qe$ $\Rightarrow C_{A_{tB} 0} = C_{A_{tB'} 0} = \left( \frac{\cos \omega}{2} - \frac{3}{8 \cos \omega} \right) n$
	$R_{A 90} = \frac{1}{8 \cos \omega} n S_M qe$ $\Rightarrow C_{A_{tA} 90} = \frac{1}{8 \cos \omega} n$ $R_{A' 90} = \frac{3}{8 \cos \omega} n S_M qe$ $\Rightarrow C_{A_{tA'} 90} = \frac{3}{8 \cos \omega} n$ $R_{B 90} = \left( \frac{\cos \omega}{4} - \frac{1}{8 \cos \omega} \right) n S_M qe$ $\Rightarrow C_{A_{tB} 90} = \left( \frac{\cos \omega}{4} - \frac{1}{8 \cos \omega} \right) n$ $R_{B' 90} = \left( \frac{3 \cos \omega}{4} - \frac{3}{8 \cos \omega} \right) n S_M qe$ $\Rightarrow C_{A_{tB'} 90} = \left( \frac{3 \cos \omega}{4} - \frac{3}{8 \cos \omega} \right) n$



Ráfaga de viento	Coeficientes de reacción debido al viento
	$R_{A 180} = R_{A' 180} = \frac{1}{8\cos\omega} n S_M qe$ $\Rightarrow CA_{tA 180} = CA_{tA' 180} = \frac{1}{8\cos\omega} n$ $R_{B 180} = R_{B' 180} = \frac{3}{8\cos\omega} n S_M qe$ $\Rightarrow CA_{tB 180} = CA_{tB' 180} = \left(\frac{\cos\omega}{2} - \frac{1}{8\cos\omega}\right)n$
	$R_{A 270} = \frac{3}{8\cos\omega} n S_M qe$ $\Rightarrow CA_{tA 270} = \frac{3}{8\cos\omega} n$ $R_{A' 270} = \frac{1}{8\cos\omega} n S_M qe$ $\Rightarrow CA_{tA' 270} = \frac{1}{8\cos\omega} n$ $R_{B 270} = \left(\frac{3\cos\omega}{4} - \frac{3}{8\cos\omega}\right) n S_M qe$ $\Rightarrow CA_{tB 270} = \left(\frac{3\cos\omega}{4} - \frac{3}{8\cos\omega}\right) n$ $R_{B' 270} = \left(\frac{\cos\omega}{4} - \frac{1}{8\cos\omega}\right) n S_M qe$ $\Rightarrow CA_{tB' 270} = \left(\frac{\cos\omega}{4} - \frac{1}{8\cos\omega}\right) n$

## 7. Bibliografía

- (1) Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid. COGITIM. “Guía para el cálculo de los contrapesos de paneles fotovoltaicos inclinados sobre cubiertas planas. SE-IS.2. Julio 2023.
- (2) Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. “CTE. Parte I”. 14 de junio de 2022.
- (3) Ministerio de Fomento Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda Secretaría General de Vivienda Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo. “Documento Básico SE. Seguridad Estructural”. 20 de diciembre de 2019.
- (4) Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. “Documento Básico SE-AE. Seguridad Estructural. Acciones en la edificación”. Abril 2009.
- (5) Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. “Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural”. 10 de agosto de 2021.
- (6) American Society of Civil Engineers. “Minimum design loads and associated criteria for building and other structures.” ASCE 7-22. 2022.
- (7) Structural Engineers Association of California. “Wind design for solar arrays”. SEAOC PV2-2017.
- (8) CEN. “Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Parte 1-4. Acciones generales. Acciones del viento. UNE EN 1991-1-4. Junio 2018.