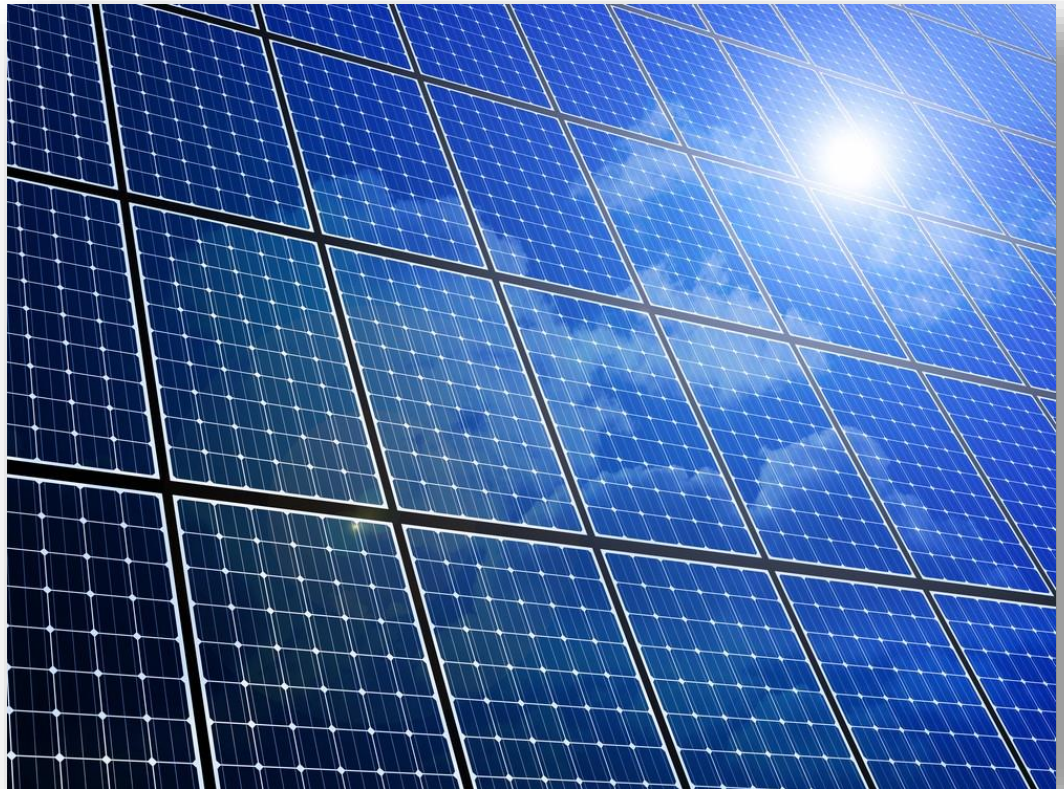


# ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA –CURSO 2024

## DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

**Ing. Diego Oroño**  
**Ing. Gonzalo Hermida**



UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA  
URUGUAY



# Temario de este capítulo

- Topología del inversor
- Configuración de estructura
- Diseño de cableado
- Diseño de protecciones
  - Sobrecorrientes
  - Sobretensiones
  - Diferencial
  - Puesta a tierra

# Topología del inversor

## ¿Tipo Central o Tipo String?

### Considerar:

- Característica de las superficies disponibles para montar los paneles FV.
- Para evitar que los paneles FV trabajen lejos del MPP se conectan los paneles de una misma serie en similares condiciones de temperatura e irradiancia.
- Mantenimiento.



# Configuración estructura

¿Seguimiento en un eje o estructura fija?  
¿Inclinación? ¿Dimensiones de las mesas?

## Analizar:

- Inversión inicial
- OyM
- Producción
- Análisis económico
- Espacio disponible
- Largo de strings
- Condiciones de entorno (sombras)



# Inclinación Óptima (Max. Anual)

- Según “Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red – IDEA” España ( $\phi = 36^\circ - 43^\circ$ ).

$$\beta_{opt} = 3.7^\circ + 0.69 \times |\phi|$$

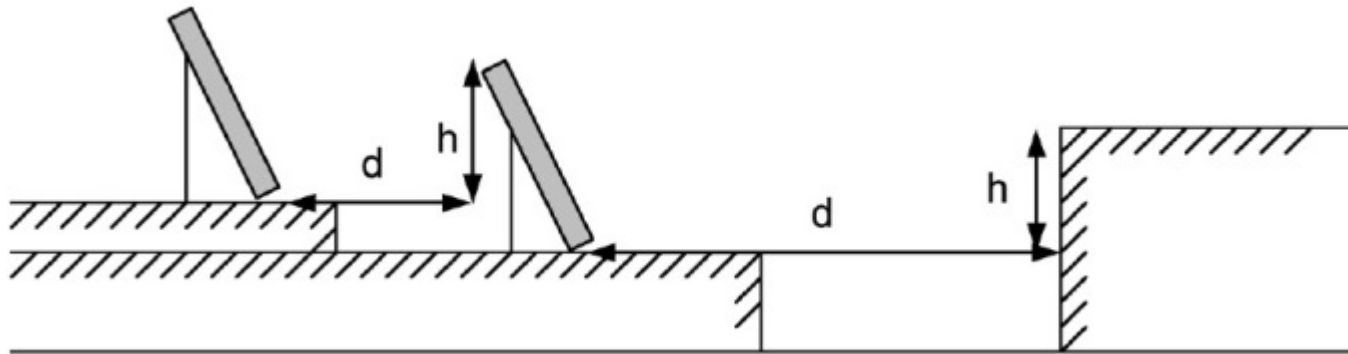
- Utilizando la fórmula para el territorio Uruguayo:
  - Montevideo  $\rightarrow \phi = -34.9^\circ \Rightarrow \beta_{opt} = 27.8^\circ$
  - Salto  $\rightarrow \phi = -31.4^\circ \Rightarrow \beta_{opt} = 25.4^\circ$
- Pequeñas variaciones en inclinación no varía significativamente la producción.
- ¡¡¡Se puede realizar simulación!!!

# Distancia entre los paneles

Cómo mínimo usar siguiente criterio:

- Con la siguiente ecuación se garantiza un mínimo de 4 horas de sol en torno al mediodía del solsticio de invierno:

$$d_{min} = \frac{h}{\operatorname{tg}(61^\circ - |\phi|)}$$



Fuente: Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red - IDAE

# Cableado



Dentro de la instalación fotovoltaica se distinguen dos grupos de cableados para el circuito de potencia, el **cableado en continua (CC)** y el **cableado en alterna (CA)**.

Sin empalmes: En todos los casos, los cables se instalarán sin empalmes.

Respetar radio de curvatura: El radio de curvatura de los cables debe ser lo mayor posible y nunca inferior al mínimo proporcionado por el fabricante.

# Cableado



En **CC**: Conexiones entre paneles e inversores se realizarán utilizando **cable solar**.

Aislamiento: Mayor o igual a 1000 V o 1500 V.

Protección externa: Radiación solar y condiciones ambientales de elevada temperatura ambiente.

Además, se utiliza la estructura de los paneles, bandejas portacables y tubos corrugados anti-UV para la distribución del cableado y la protección frente a los rayos solares.



# Conectores MC4

Para la conexión entre paneles se utilizan conectores MC4.

- Estos conectores son de fácil instalación, enchufables.
- Garantizan un efectivo contacto eléctrico, son duraderos y seguros.
- Evitan el ingreso de agua, son resistentes a UV y temperatura.

A tener en cuenta:

- verificación del terminal
- sección del cable
- marca compatibles



# Conectores M4

Para l

A ten



# Conectores MC4

Para la conexión

- Estos
- Garantizar
- Evitar

A tener en cuenta

- verificar
- sección
- marca



# Cableado

## Buenas prácticas:

Para armar las series de paneles fotovoltaicos se utilizan las cajas de conexión de los paneles de forma de minimizar el cableado, pérdidas óhmicas y puntos calientes.

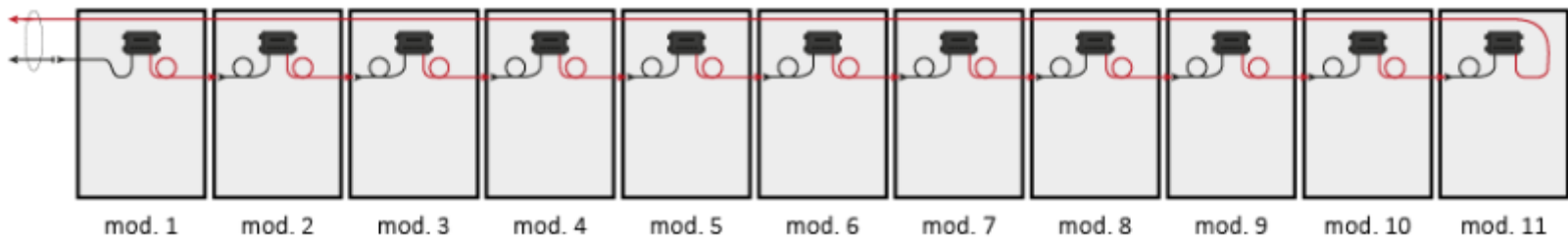
Siempre que sea posible los conductores positivo y negativo de cada panel se conectan en serie hasta llegar al final de la serie.

Los cables de las series deberán estar etiquetados en ambos extremos para poder identificarlos rápidamente a la hora de realizar la conexión y mantenimiento.

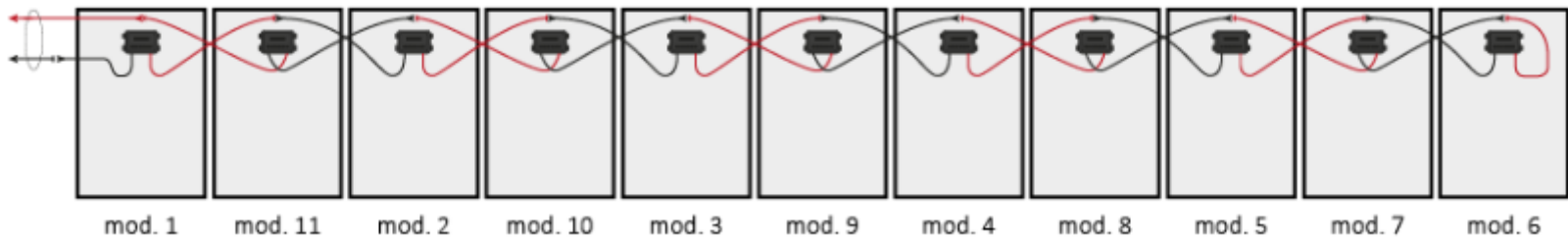


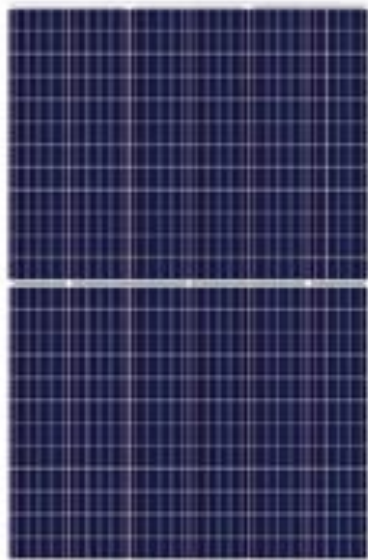
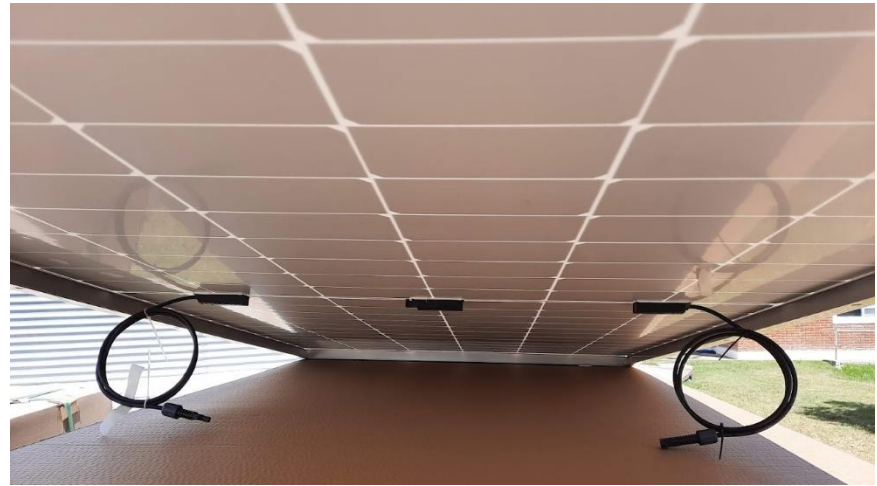
# Cableado

## Daisy chain

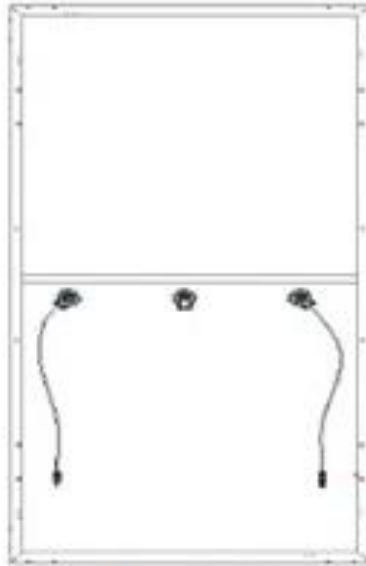


## Salto de rana

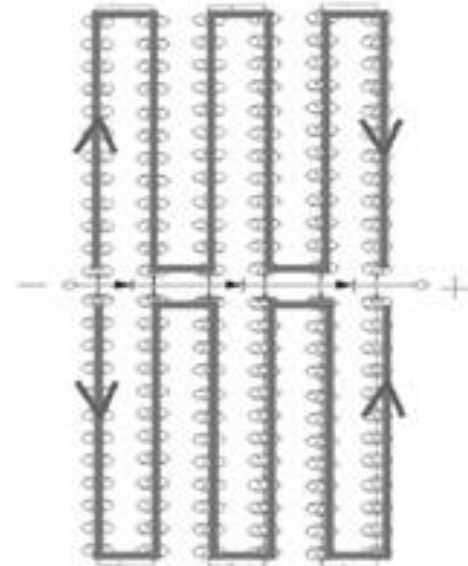




**Front View**



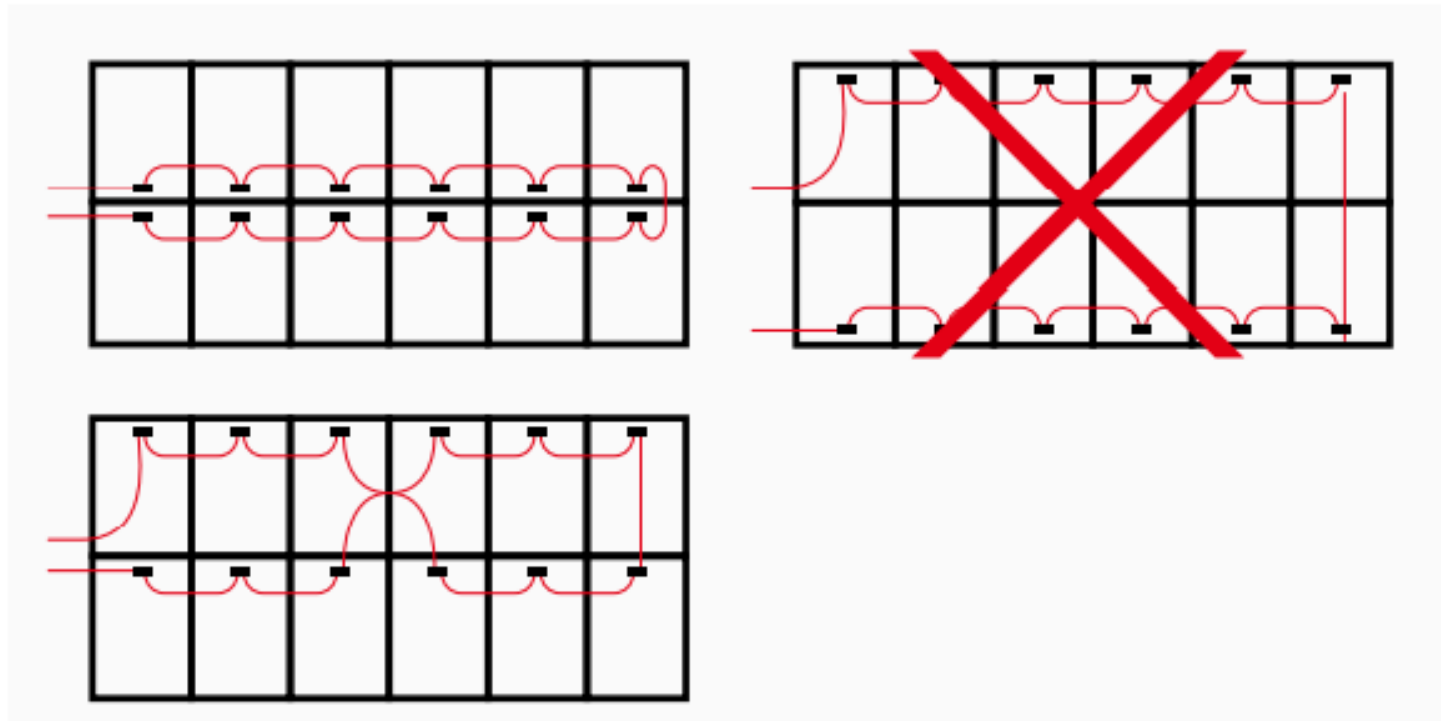
**Back View**



**Circuit**

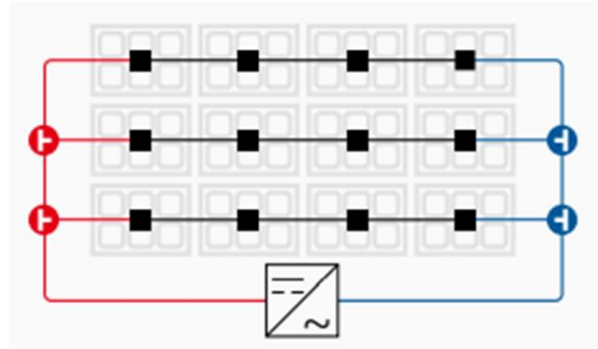
# Interconexión y tensiones inducidas

Para evitar los voltajes inducidos en la instalación debido a descargas atmosféricas se recomienda minimizar los bucles de cable.

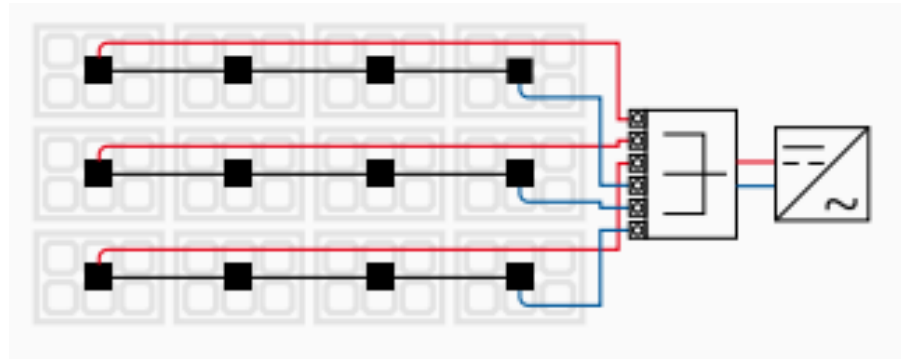


# Interconexión de strings

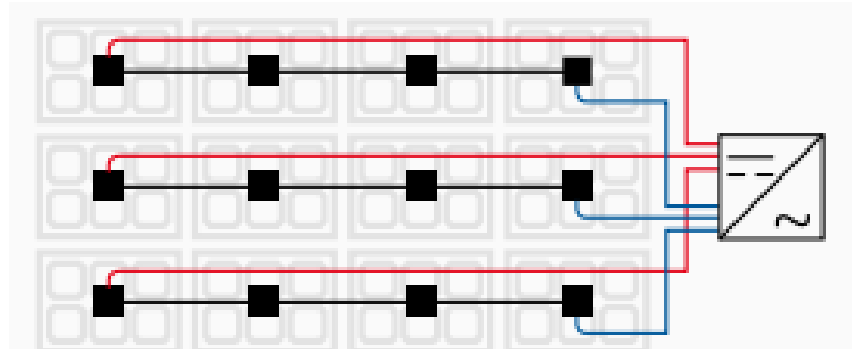
String de nodos



Caja de strings



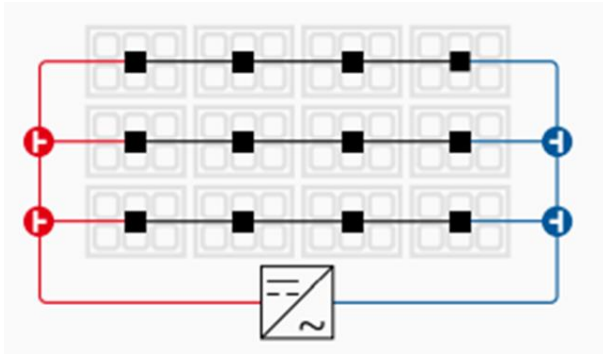
Conexión directa





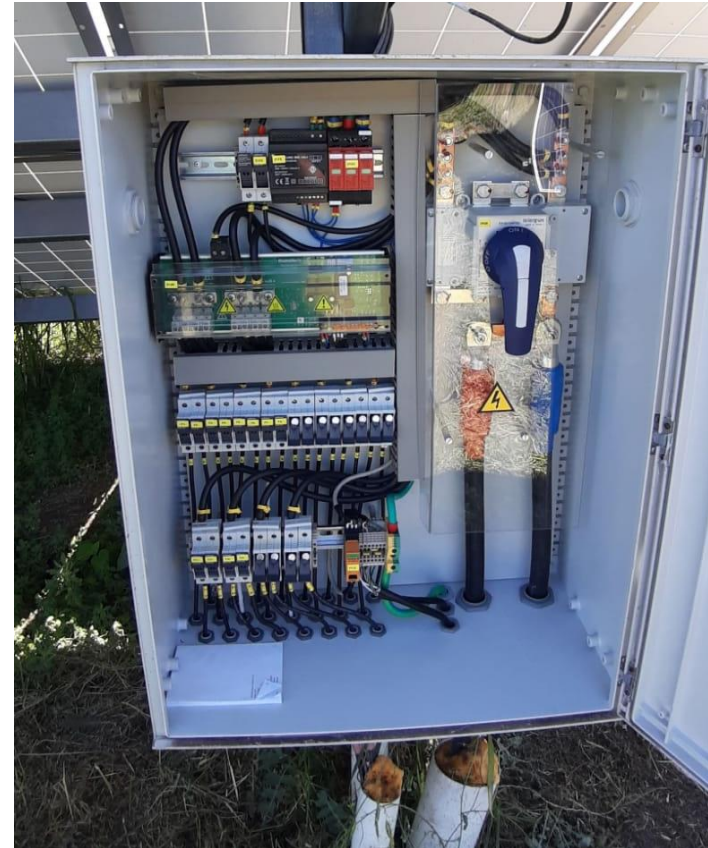
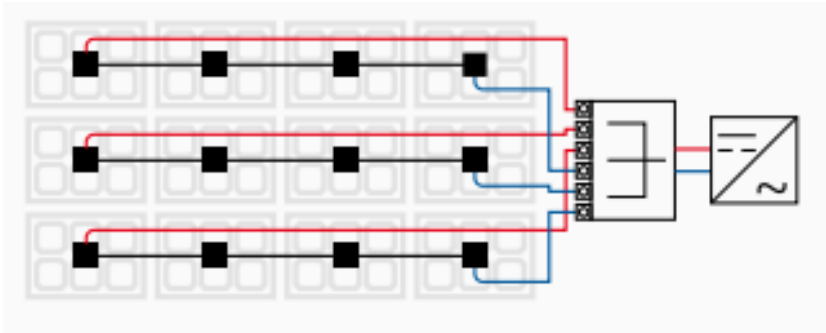
# Interconexión de strings

Para string de nodos:  
Terminales tipo Y o MC4 paralelo



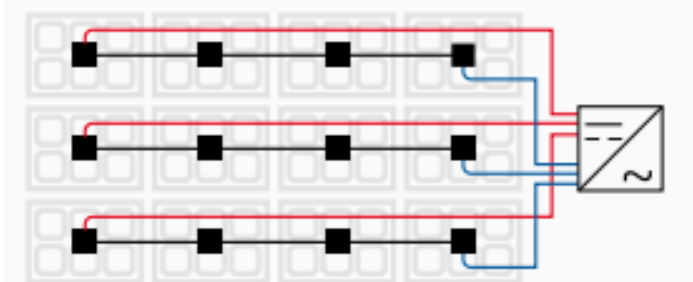
# Interconexión de strings

Cajas string:



# Interconexión de strings

Conexión directa al inversor:



# Cableado

- Los cables se dimensionan de acuerdo a:
  - IEC 60364-5-52: “Instalaciones eléctricas de baja tensión”
  - IEC 60364-7-712: “Requisitos para fotovoltaica”
- Se deben tener en cuenta los siguientes criterios de dimensionamiento:
  - Aislación
  - Criterio de máxima corriente admisible
  - Criterio de máxima caída de tensión
  - Corriente de cortocircuito



# Cableado

## Aislación en CC:

Debe soportar el voltaje máximo al que va a estar sometido el conductor.

Se elige de acuerdo a  $V_{OC\ MAX\ string}$  depende de  $N_S$ .

Para calcularlo debemos conocer:

- Temperatura más baja de acuerdo a la ubicación FV.
- Voltaje circuito abierto en STC.
- Coeficiente de temperatura.
- Cantidad de paneles en la serie.

$$V_{Cable} \geq V_{OC\ MAX\ string} = N_S \times V_{OC\ MAX\ panel}$$

**Aislación en CA:** Aislación superior a la tensión nominal.

# Cableado

## Capacidad corriente del cable

La máxima corriente admisible ( $I_z$  (A)) por un cable depende:

- sección del conductor
- temperatura ambiente
- método de instalación
- conductor (Cu o Al)
- aislación (PVC o XLPE)



Instalación de referencia		Tabla y columna				
		Intensidad admisible para los circuitos simples				
		Aislamiento PVC		Aislamiento XLPE-EPR		
		Número de conductores				
		2	3	2	3	
	Conductores aislados en un conducto en una pared térmicamente aislante	A1	columna 4	columna 3	columna 7	columna 6
	Cable multiconductor en un conducto en una pared térmicamente aislante	A2	columna 3	columna 2	columna 6	columna 5
	Conductores aislados en un conducto sobre una pared de madera/ mamp.	B1	columna 6	columna 5	columna 10	columna 8
	Cable multiconductor en un conducto sobre una pared de madera/map.	B2	columna 5	columna 4	columna 8	columna 7
	Cables unipolares; o multipolares sobre una pared de madera/map.	C	columna 8	columna 6	columna 11	columna 9
	Cable multiconductor en conductos enterrados	D	columna 3	columna 4	columna 5	columna 6
	Cable multiconductor al aire libre. Distancia al muro $\geq 0,3$ veces $\phi$ del cable	E	columna 9	columna 7	columna 12	columna 10
	Cables unipolares en contacto al aire libre. Distancia al muro $\geq \phi$ del cable	F	columna 10	columna 8	columna 13	columna 11
	Cables unipolares espaciados al aire libre. Distancia entre ellos $\geq \phi$ del cable	G	—	Ver UNE 20460-5-523	—	Ver UNE 20460-5-523

XLPE: Polietileno reticulado (90 °) • EPR: Etileno-propileno (90 °) • PVC: Policloruro de vinilo (70 °)

Método de instalación	Número de conductores cargados y tipo de aislamiento												
	PVC3	PVC2	PVC3	PVC2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2	XLPE3
A1													
A2													
B1													
B2													
C													
E													
F													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
S (mm <sup>2</sup> )													
Cobre													
1.5	11	11.5	13	13.5	15	16	16.5	19	20	21	24	-	
2.5	15	16	17.5	18.5	21	22	23	26	26.5	29	33	-	
4	20	21	23	24	27	30	31	34	36	38	45	-	
6	25	27	30	32	36	37	40	44	46	49	57	-	
10	34	37	40	44	50	52	54	60	65	68	76	-	
16	45	49	54	59	66	70	73	81	87	91	105	-	
25	59	64	70	77	84	88	95	103	110	116	123	140	
35	-	77	86	96	104	110	119	127	137	144	154	174	
50	-	94	103	117	125	133	145	155	167	175	188	210	
70	-	-	-	149	160	171	185	199	214	224	244	269	
95	-	-	-	180	194	207	224	241	259	271	296	327	
120	-	-	-	208	225	240	260	280	301	314	348	380	
150	-	-	-	236	260	278	299	322	343	363	404	438	
185	-	-	-	268	297	317	341	368	391	415	464	500	
240	-	-	-	315	350	374	401	435	468	490	552	590	
Aluminio													
2.5	11.5	12	13.5	14	16	17	18	20	20	22	25		
4	15	16	18.5	19	22	24	24	26.5	27.5	29	35		
6	20	21	24	25	28	30	31	33	36	38	45	-	
10	27	28	32	34	38	42	42	46	50	53	61	-	
16	36	38	42	46	51	56	57	63	66	70	83	-	
25	46	50	54	61	64	71	72	78	84	88	94	105	
35	-	61	67	75	78	88	89	97	104	109	117	130	
50	-	73	80	90	96	106	108	118	127	133	145	160	
70	-	-	-	116	122	136	139	151	162	170	187	206	
95	-	-	-	140	148	167	169	183	197	207	230	251	
120	-	-	-	162	171	193	196.5	213	228	239	269	293	
150	-	-	-	187	197	223	227	246	264	277	312	338	
185	-	-	-	212	225	236	259	281	301	316	359	388	
240	-	-	-	248	265	300	306	332	355	372	429	461	
Cu: $p_{20r} = 1/56$	Al: $p_{20r} = 1/35$		$p_{70r} = 1,2 \cdot p_{20r}$				$p_{90r} = 1,28 \cdot p_{20r}$						
B: 5 I <sub>n</sub>	C: 10 I <sub>n</sub>	D: 20 I <sub>n</sub>	K = I <sub>n</sub> /VS	Cu: 115 / 103	Al: 76 / 68	Cu: 143	Al: 94						

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

### DIMENSIONES, PESOS Y RESISTENCIAS (aproximados)

Sección nominal mm <sup>2</sup>	Diámetro del conductor mm	Diámetro exterior del cable (valor mín.) mm	Diámetro exterior del cable (valor máx.) mm	Peso kg/km	Resistencia del conductor a 20 °C Ω/km	Intensidad admisible al aire (1) A	Caída de tensión (continua o alterna cos φ = 1) V/A km
1x1,5	1,6	4,4	4,8	29	13,7	25	26,5
1x2,5	1,9	4,7	5,1	43	8,21	34	15,92
1x4	2,4	5,2	5,6	58	5,09	46	9,96
1x6	2,9	5,7	6,1	76	3,39	59	6,74
1x10	4,0	6,8	7,2	120	1,95	82	4
1x16	5,5	8,3	9,0	178	1,24	110	2,51
1x25	6,4	10,0	10,7	273	0,795	140	1,59
1x35	7,5	11,1	11,8	364	0,565	174	1,15
1x50	9	12,6	13,3	500	0,393	210	0,85
1x70	10,8	14,4	15,2	686	0,277	269	0,59
1x95	12,6	16,2	17	899	0,21	327	0,42
1x120	14,3	17,7	18,7	1131	0,164	380	0,34
1x150	15,9	19,7	20,7	1382	0,132	438	0,27
1x185	17,5	21,3	22,3	1669	0,108	500	0,22
1x240	20,5	24,2	25,5	2208	0,0817	590	0,17

(1) Instalación monofásica (corriente continua o alterna) en bandeja al aire (40°C). Con exposición directa al sol, multiplicar por 0,9.





# Cableado CC

## Capacidad corriente del cable

### Strings:

Para los cables de string se debe de cumplir:

$$I_z \geq I_{SC\ MAX\ string}$$

La corriente de la serie es igual a la corriente de un modulo:

$$I_{SC\ MAX\ string} = I_{SC\ MAX\ panel}$$

Aproximación:

$$I_z \geq I_{SC\ MAX\ string} = 1.25 \times I_{SC\ STC\ string}$$



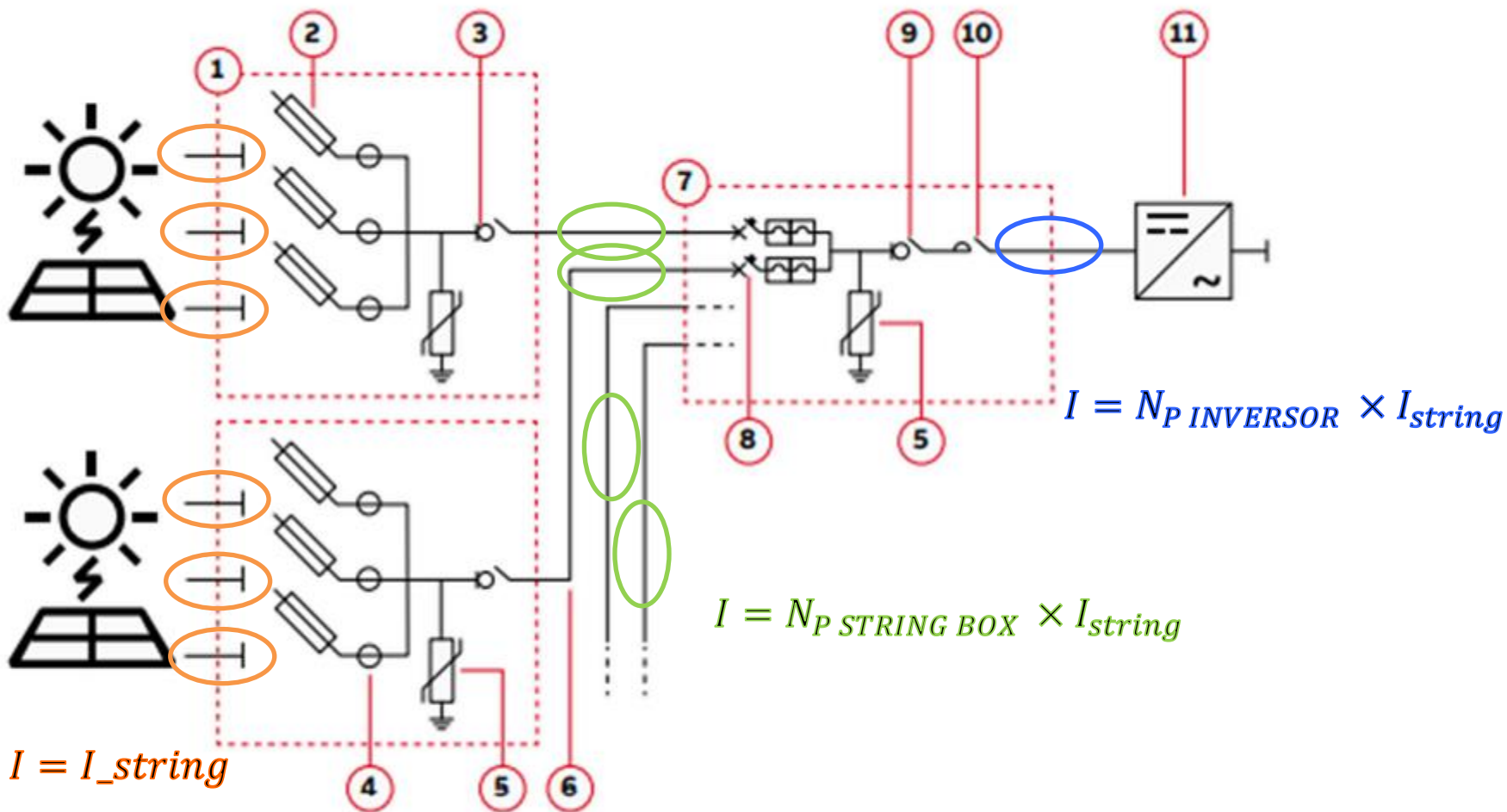
# Cableado CC

## Capacidad corriente del cable

### Cables en conjunto de strings:

Para conexión en paralelo el voltaje es el mismo en todos los strings del paralelo y las corrientes se suman.

$$I_Z \geq I_{SC\ MAX\ arreglo} = N_P \times I_{SC\ MAX\ string}$$



# Cableado

## Caída de tensión en el conductor:

Se mide como porcentaje respecto a la tensión nominal o STC. Depende de la resistencia del conductor y afecta directamente a la producción de la instalación (PR).

Depende de:

- Distancias de los conductores
- Sección de los conductores
- Resistividad de los conductores
- Corriente que circula por el conductor

# Cableado CC

## Caída de tensión (norma IEC 60364-5-52)

Sección del conductor en CC tal que la caída de voltaje global en STC sea menor a 3%.  
Se recomienda que no supere el 1.5%.

Calculo de la sección mínima en la sección de continua:

$$S_{m,rama} = \frac{2 \cdot L_{rama} \cdot I_{MOD,M,STC}}{\Delta V_{rama} \cdot N_{ms} \cdot V_{MOD,M,STC} \cdot \sigma}$$

CONDICIONES EN MPP

$\sigma$ (conductividad)= 56 m·Ω<sup>-1</sup>·mm<sup>-2</sup> (cobre).

En caso de haber agrupaciones de series se debe de considerar todo el recorrido hasta el inversor.



# Cableado CA

## Capacidad corriente del cable

### Cables conexión inversor:

Para el cableado de conexión al inversor se utiliza el mismo criterio que en CC de 125 % del valor nominal.

$$I_Z \geq 1.25 \times I_{NOM\_INV}$$

### Cables luego de los tableros:

Para dimensionar cables “aguas arriba” de los tableros hay que realizar la suma de las corrientes nominales de los equipos que se encuentra “aguas abajo”

$$I_Z \geq 1.25 \times (I_{NOM\_INV1} + I_{NOM\_INV2} + I_{NOM\_INV2} + \dots)$$

# Cableado CA

## Caída de tensión:

Al igual que en CC se recomienda que la caída de tensión en la parte alterna no exceda 1.5% a tensión nominal.

Calculo de la sección mínima en la sección de alterna:

$$S_{m,AC} = \frac{2 \cdot L_{AC} \cdot I_{INV,AC} \cdot \cos \varphi}{\Delta V_{AC} \cdot V_{INV,AC} \cdot \sigma} \quad (\text{inversor monofásico})$$

$$S_{m,AC} = \frac{\sqrt{3} \cdot L_{AC} \cdot I_{INV,AC} \cdot \cos \varphi}{\Delta V_{AC} \cdot V_{INV,AC} \cdot \sigma} \quad (\text{inversor trifásico})$$



# Criterio cortocircuito

Este criterio no es determinante en instalaciones de baja tensión ya que por una parte las protecciones de sobreintensidad limitan la duración del cortocircuito a tiempos muy breves, y además las impedancias de los cables hasta el punto de cortocircuito limitan la intensidad de cortocircuito.



# Protecciones

Objetivo de las protecciones:

- Limitar el daño a las personas y a los equipos
- Maximizar la continuidad de producción

Características:

- Dependencia: debe funcionar cuando se lo necesario
- Seguridad y selectividad : sólo debe funcionar cuando sea necesario
- Velocidad: debe de actuar en el tiempo correspondiente
- Simplicidad y economía: debe ser lo más simple y económico posible

Compromiso técnico y económico contra fallas acorde a la importancia de la planta eléctricos limitando consecuencias.

# Seccionamiento

Es importante contar con sistemas de seccionamiento dentro de la instalación para poder aislar circuitos del sistema.

Los conductores no puestos a tierra, polos positivos y negativos en CC, y fases en CA deben de poder ser desconectados. Usualmente se usan interruptores o seccionadores manuales.

Para dimensionar estos seccionadores hay que considerar la corriente que circula por el circuito y el nivel de tensión.

# Protección Sobrecorrientes CC

Los valores de las protecciones sobrecorriente se deben de escoger para que no circule una corriente mayor a la corriente máxima soportado por los equipos de la instalación. Además, se dimensiona el valor mínimo que asegura que no ocurran interrupciones innecesarias bajo condiciones normales de operación.

Usualmente se utilizan fusibles para protección de las series y termomagnéticas para agrupación.

- **Serie:**

$$I_{protección} \geq 1.25 \times I_{MAX\_panel}$$

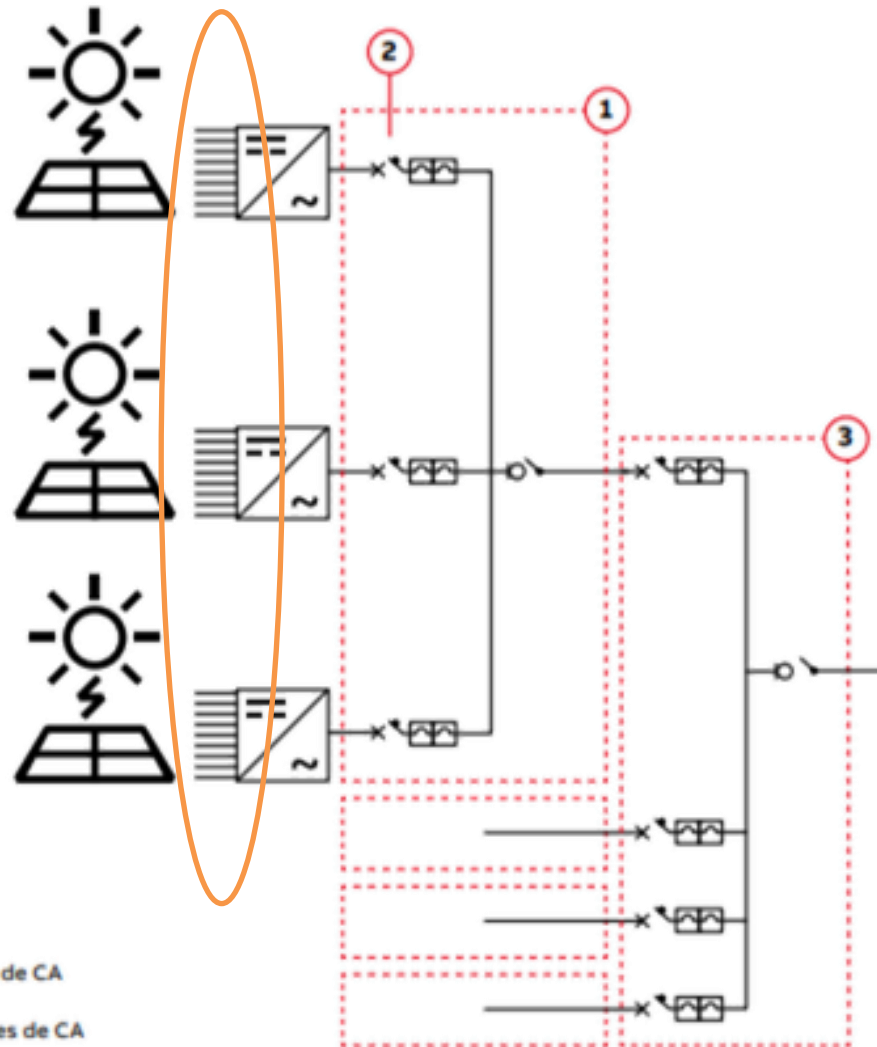
- **Agrupación de series:**

$$I_{protección} \geq 1.25 \times N_P \times I_{MAX\_panel}$$

- **Tensión nominal protección:**

$$V_{nom} \geq 1.1 \times N_S \times V_{MAX\_panel}$$

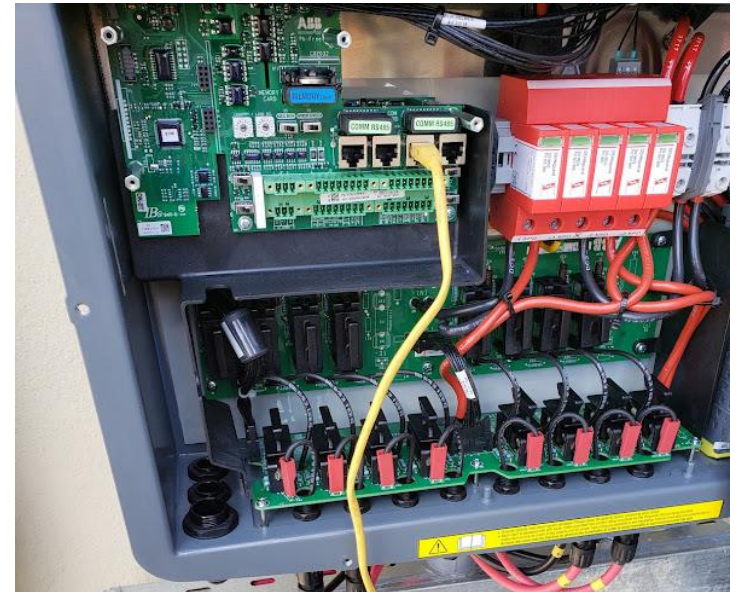
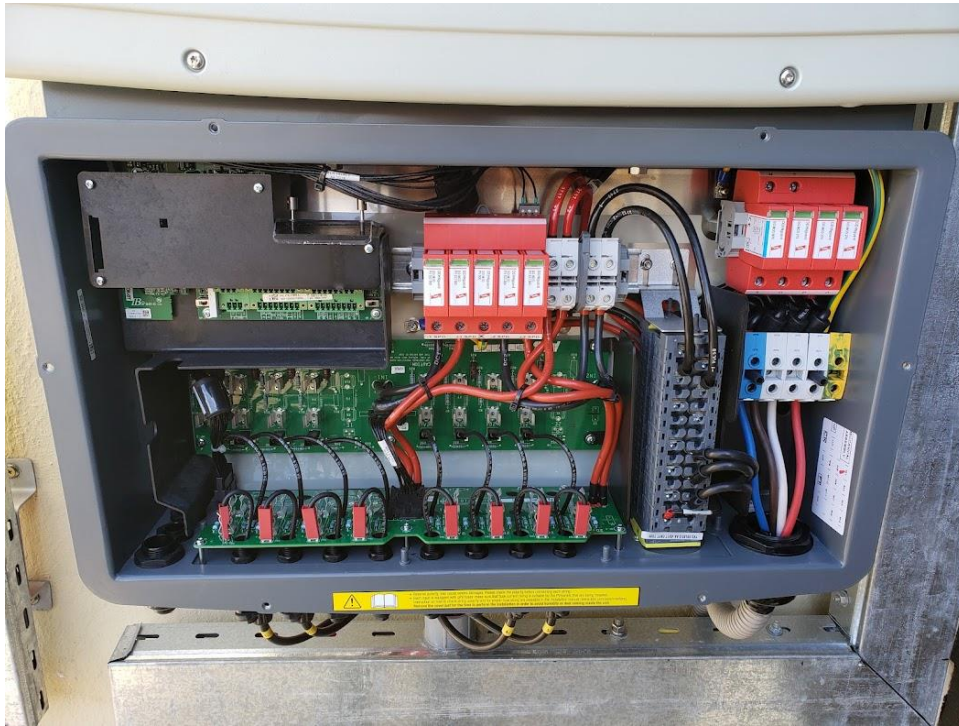
# Caso inversores string



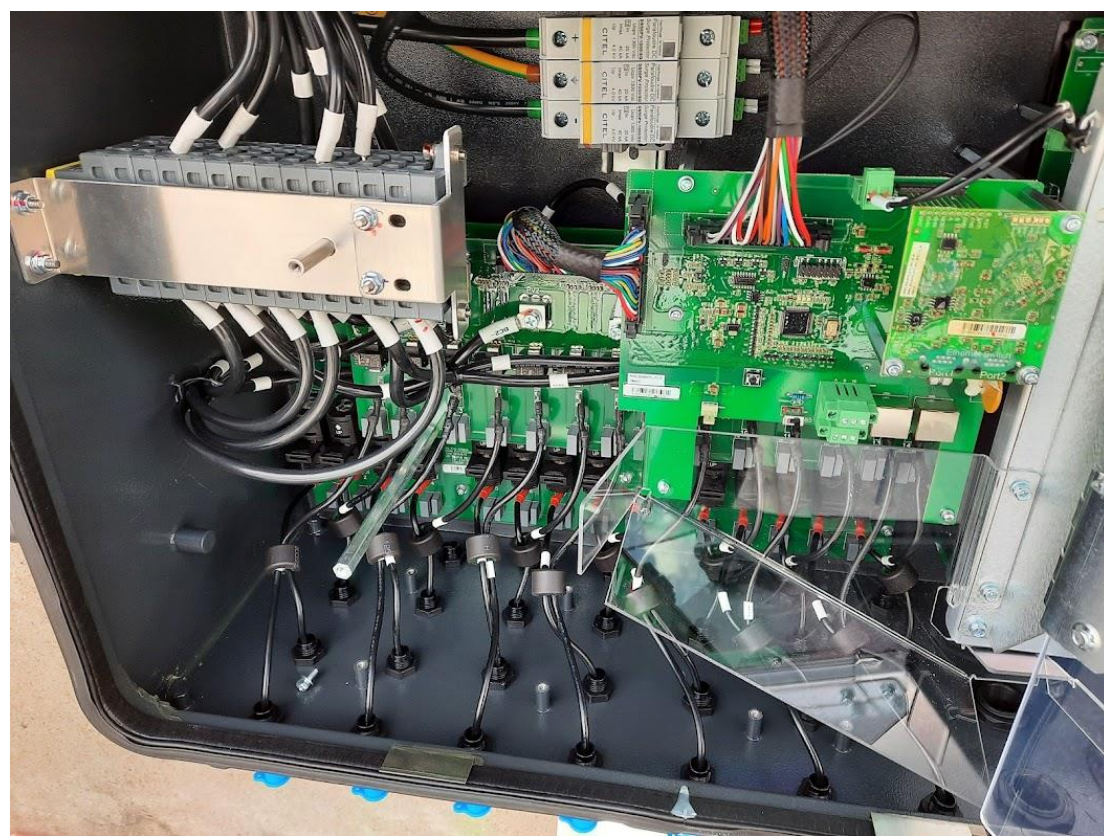
- 1 Caja de combinadores de CA
- 2 Mini interruptor
- 3 Caja de recombinaidores de CA



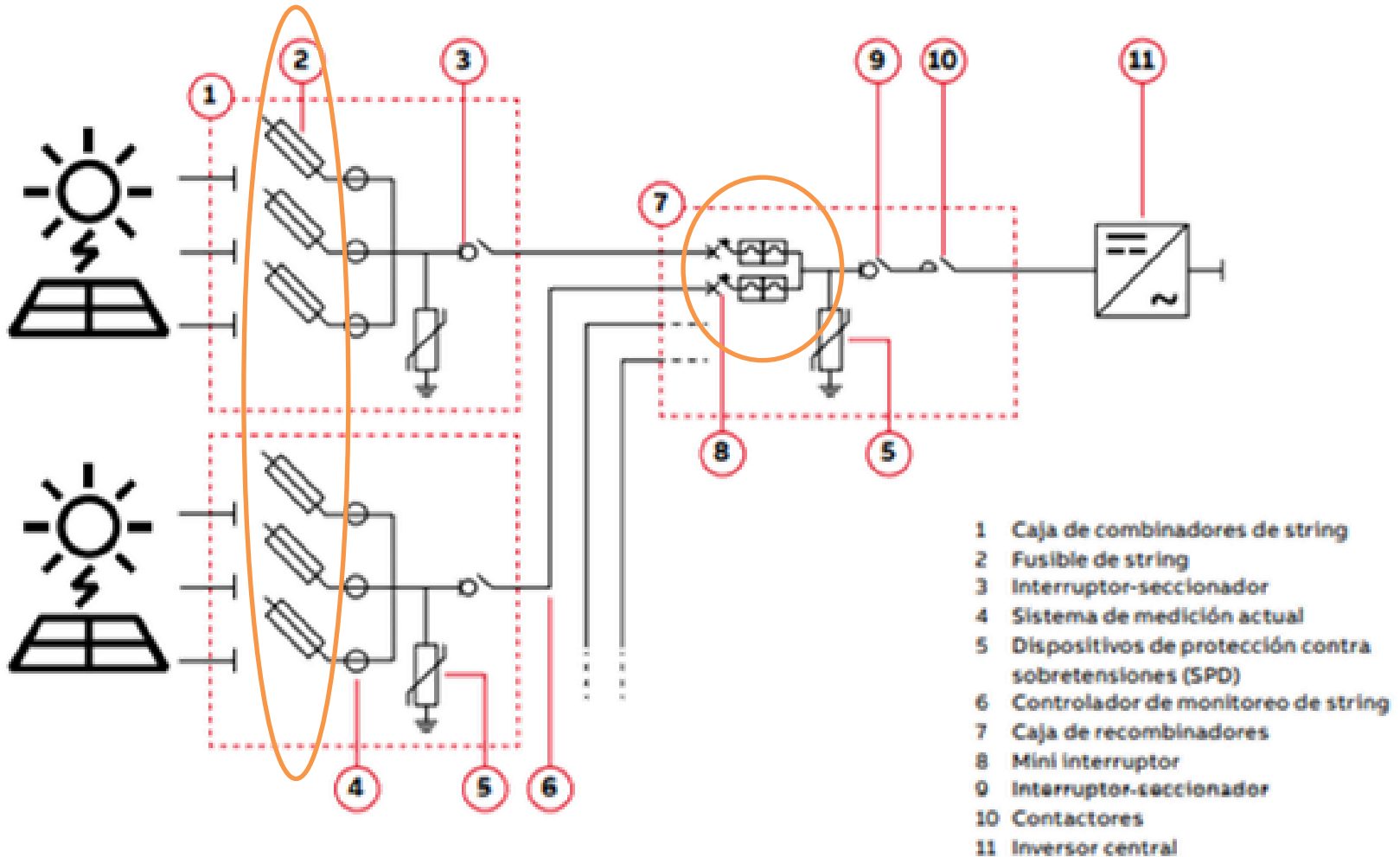
# Caso inversores string



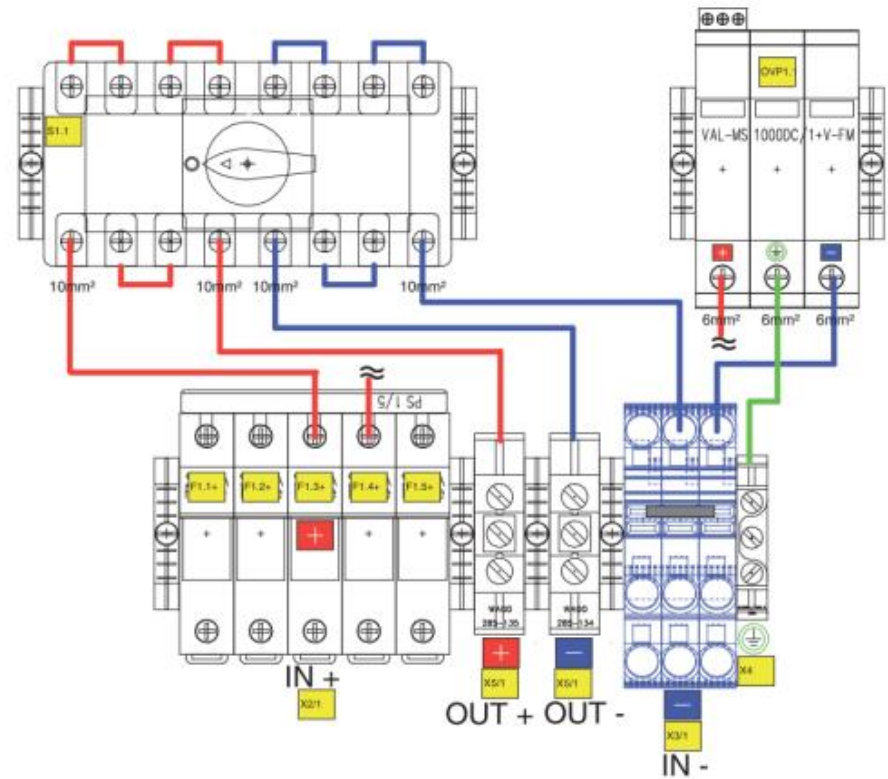
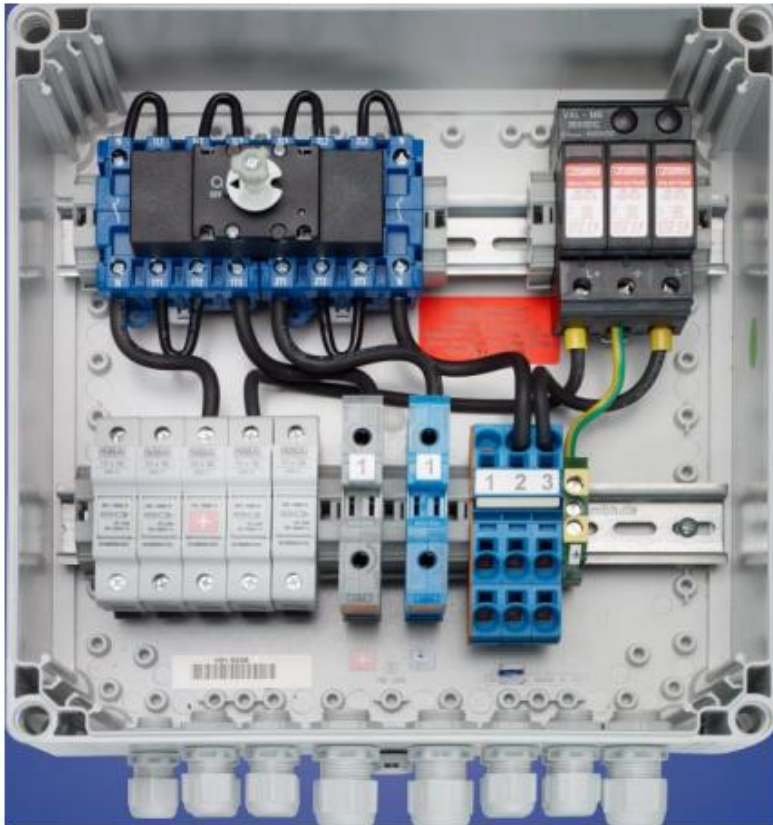
# Caso inversores string



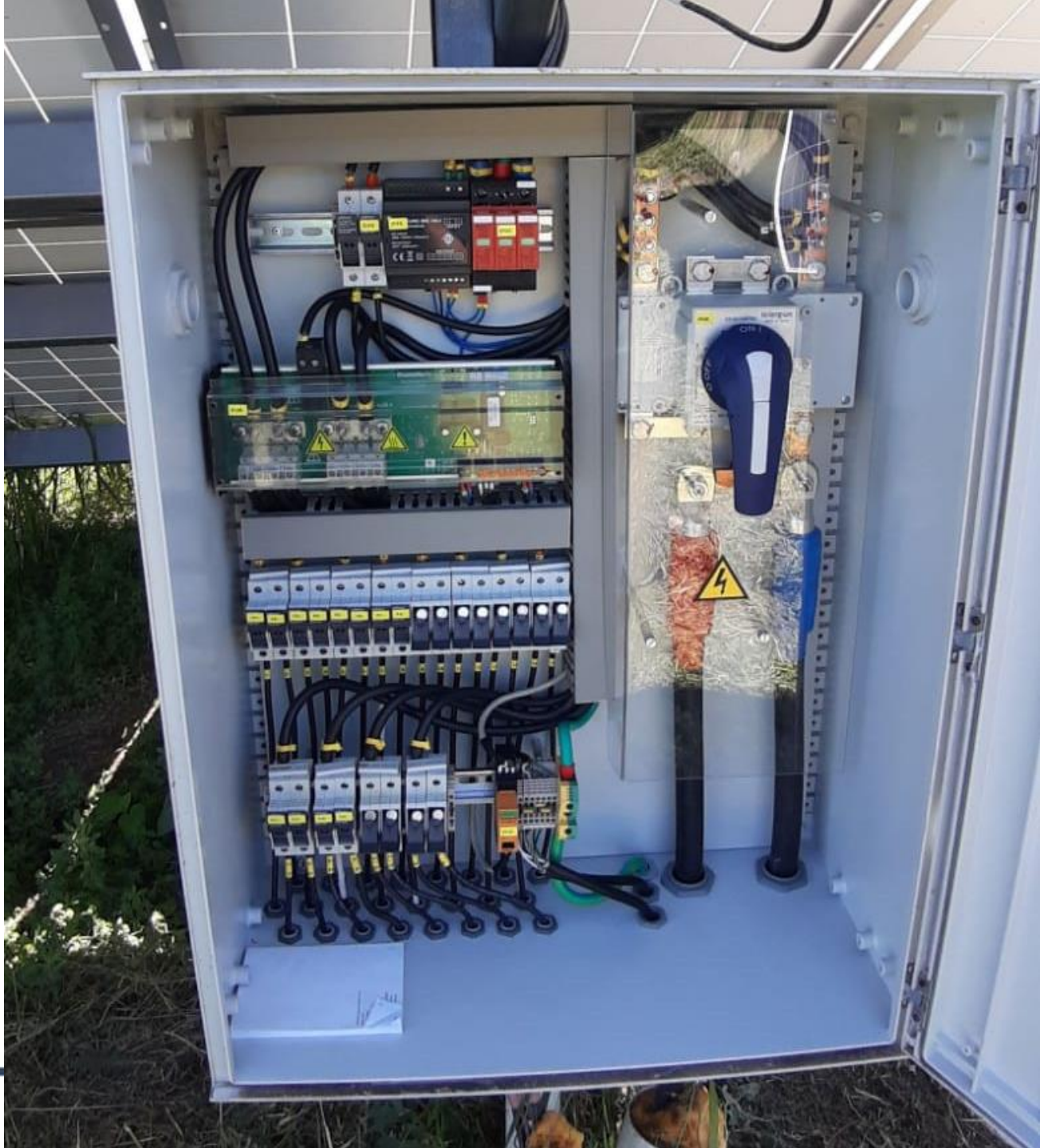
# Caso inversores centrales



# Caso inversores centrales







# Protección Sobrecorrientes CC

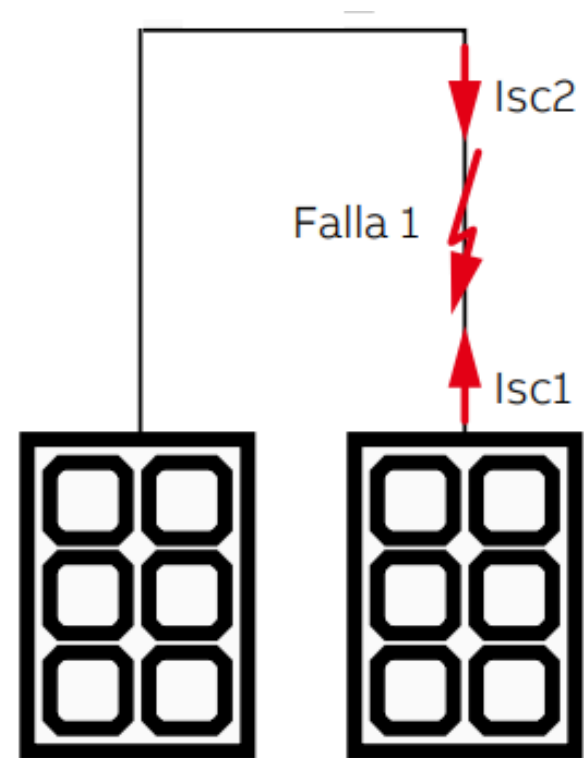
## Particularidad sub-sistemas chicos:

No es necesario proteger los cables de conexión de FV contra sobrecargas si se los selecciona con una corriente admisible igual o mayor que 1.25 veces  $I_{sc}$ .

En caso de inversores con sub-sistemas de 2 series generalmente no se cuenta con protección sobrecorriente.

Si existe una falla la corriente de falla es:

$$I_{falla} = (2 - 1) \times I_{MAX\_panel} = I_{MAX\_panel}$$

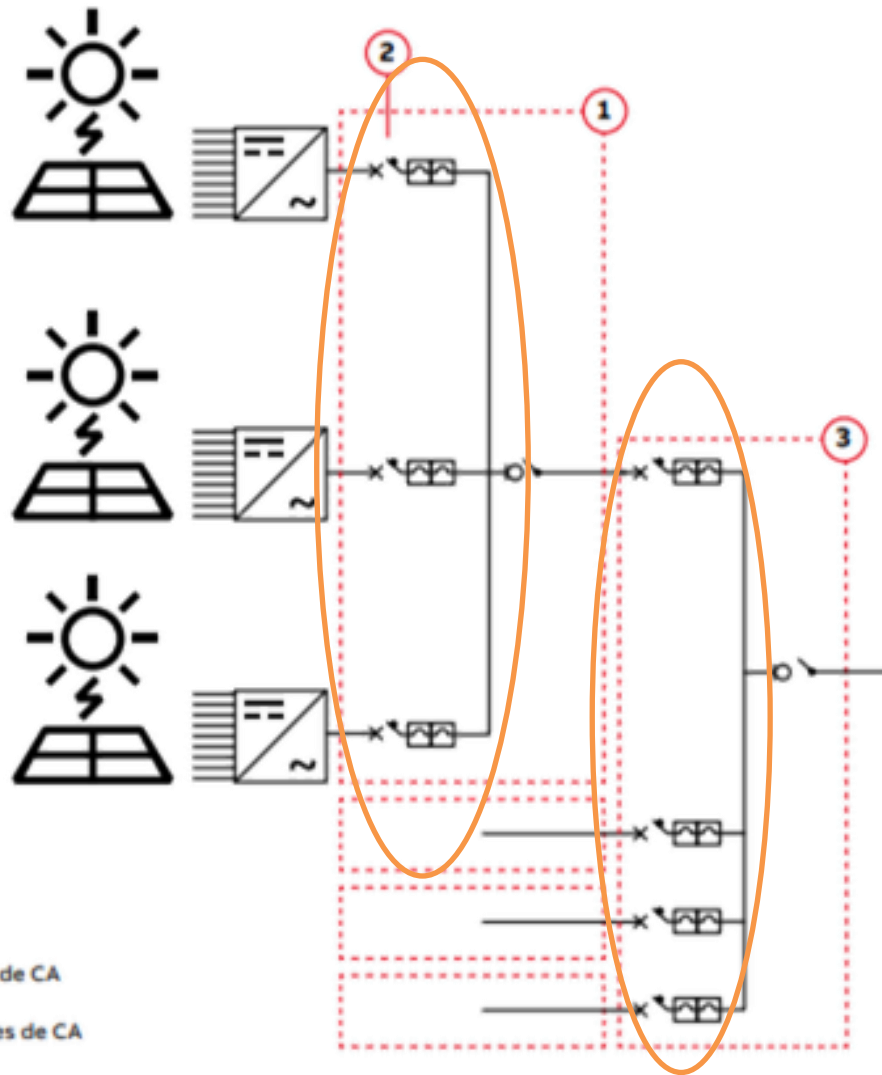


# Protección Sobrecorrientes CA

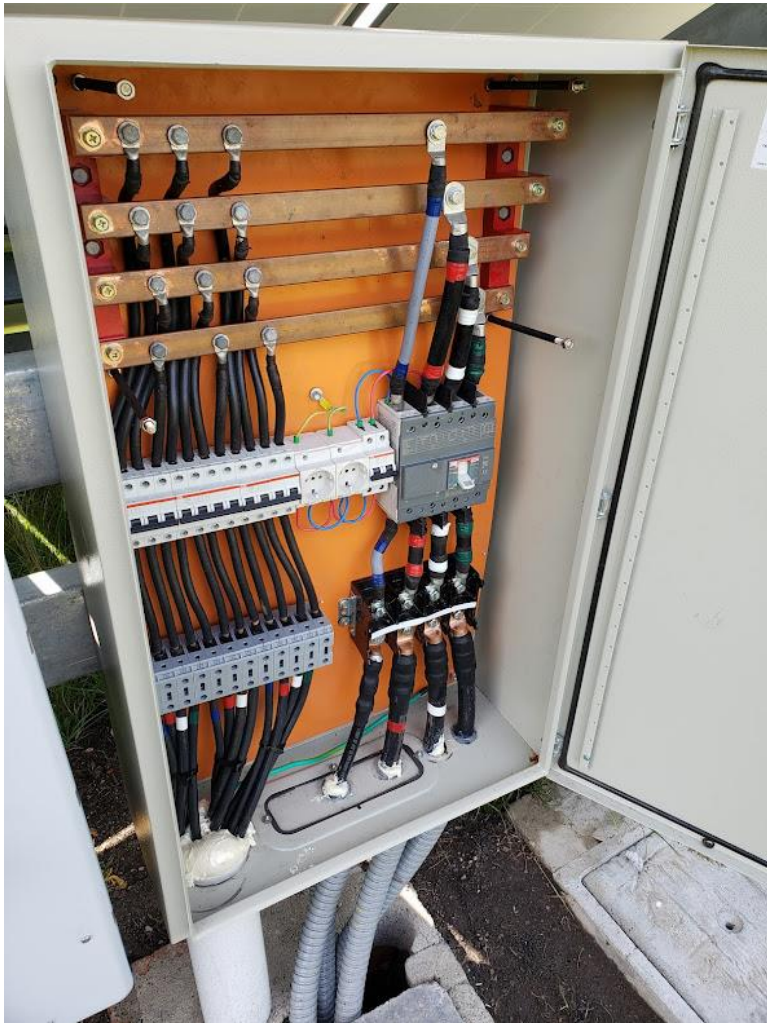
**Valor mínimo:** 125 % de la corriente máxima del circuito para asegurar la operación continua sin interrupciones innecesarias.

$$I_{protección} \geq 1.25 \times I_{Inversor}$$

Tensión nominal de la instalación. (Ojo!!!, inversores de 800 V)



- 1 Caja de combinadores de CA
- 2 Mini interruptor
- 3 Caja de recombinaidores de CA



# Protección Sobretensiones

Las descargas atmosféricas producen sobretensiones y no existen dispositivo para evitar la formación de rayos.

Una instalación fotovoltaica no aumentan el riesgo de impacto de rayos.

Es necesario la instalación de protección contra sobretensiones transitorias en CA y CC (IEC 60364-4-44).

Puede ser que dependiendo de las distancias de la instalación no se exija alguna protección contra sobretensiones pero se debe realizar una estimación del riesgo (IEC 62305-2).

En el caso de un sistema FV pequeño, la estimación del riesgo puede realizarse:

- para el lado de CA (IEC 60364-4-44, cláusula 443)
- para el lado de CC (IEC 60364-7-712, cláusula 712.443.5.101) ( $L \geq L_{crit}$ )

# Protección Sobretensiones

Conforme con la IEC 61643-32, se deben instalar dispositivos de protección contra sobretensiones.

## **Lado de CC** (Descargadores clase II conforme a IEC 61643-31)

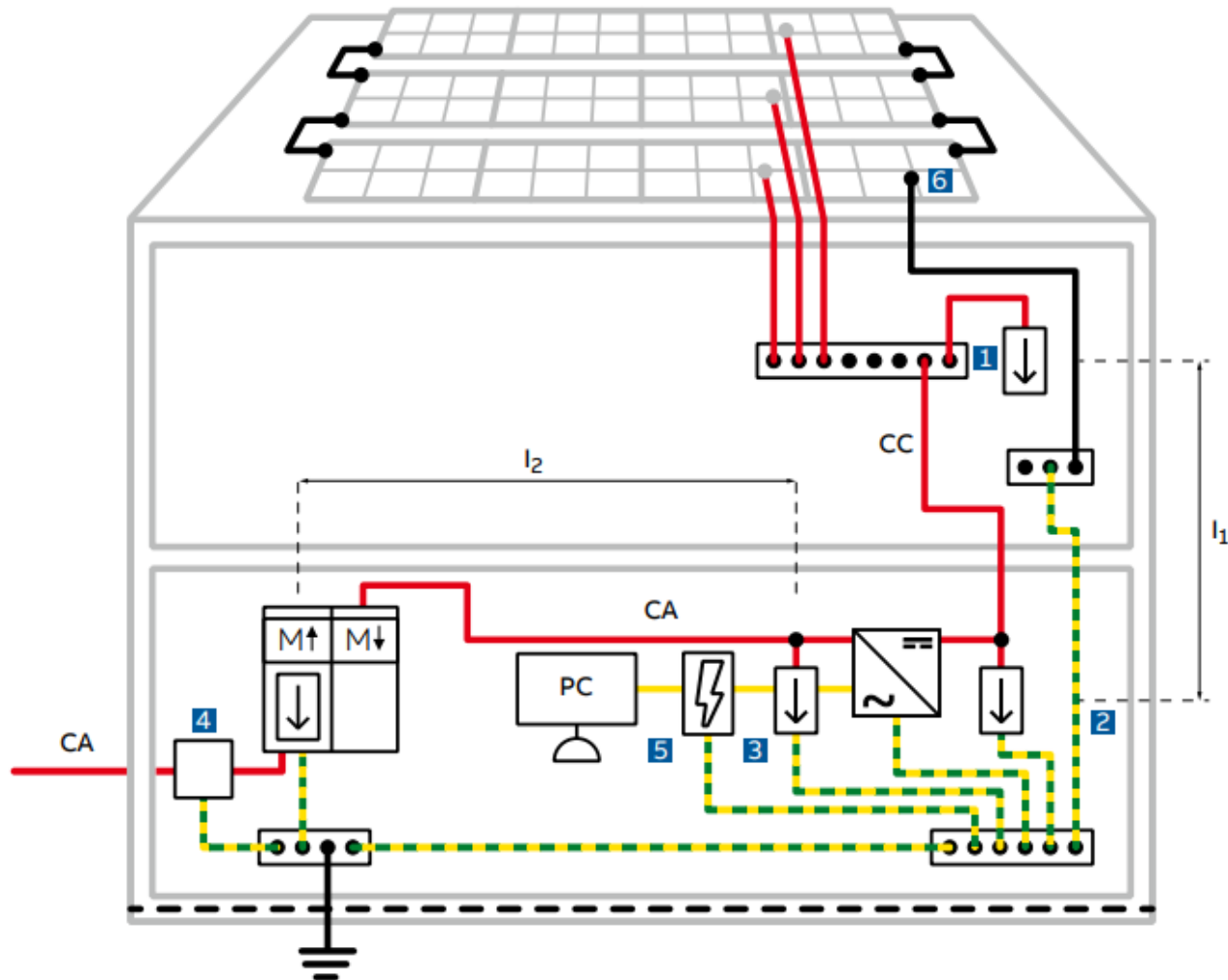
- String box
- Llegada al inversor.

## **Lado CA** (Descargadores clase I o clase II IEC 61643-11)

- Punto de conexión
- Inversor

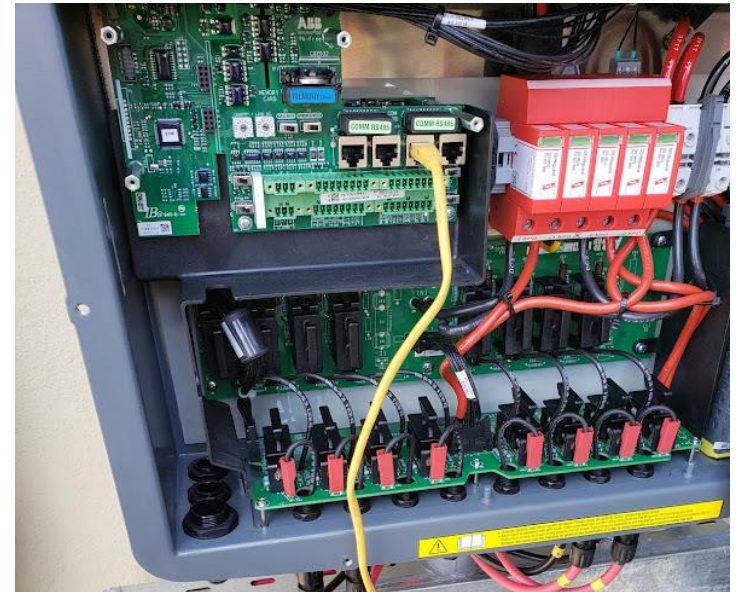
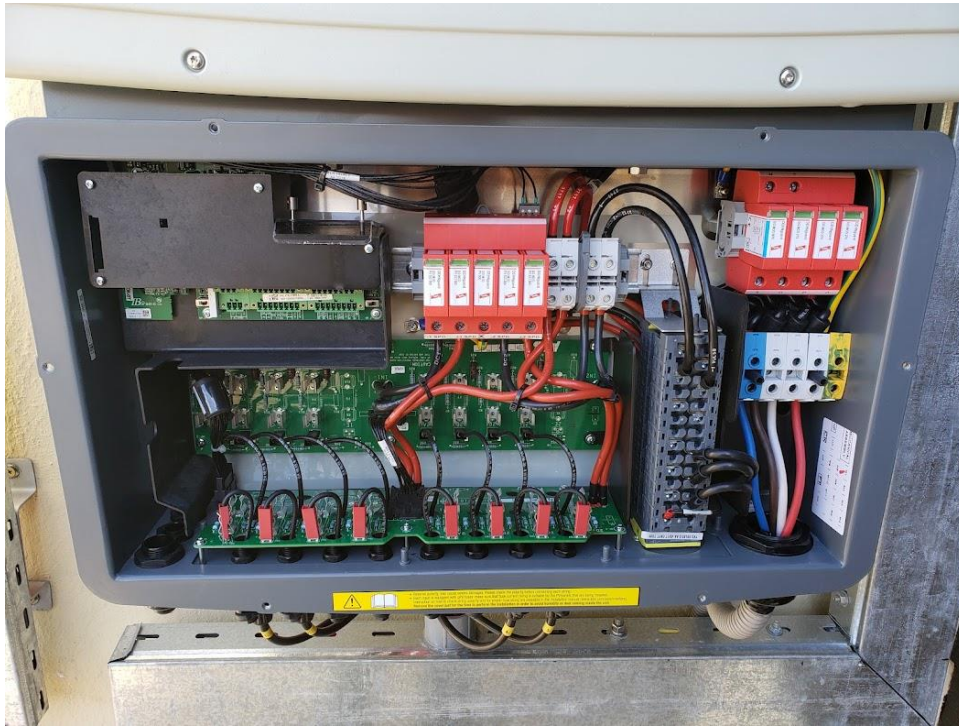
Si distancia < 10 m se puede no instalar uno de los dos.

# Protección Sobretensiones



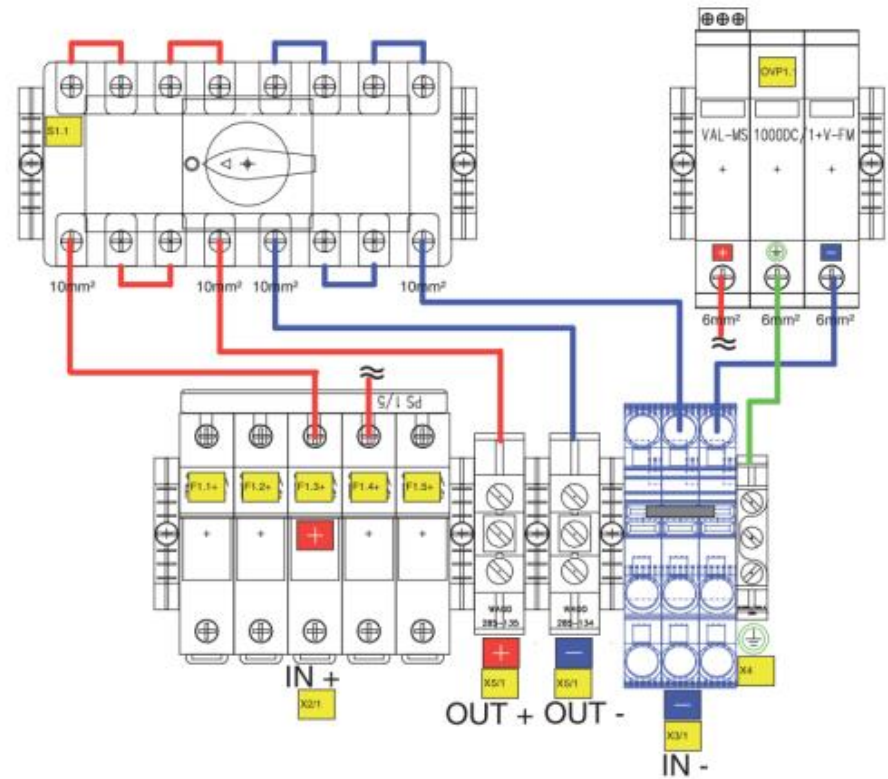
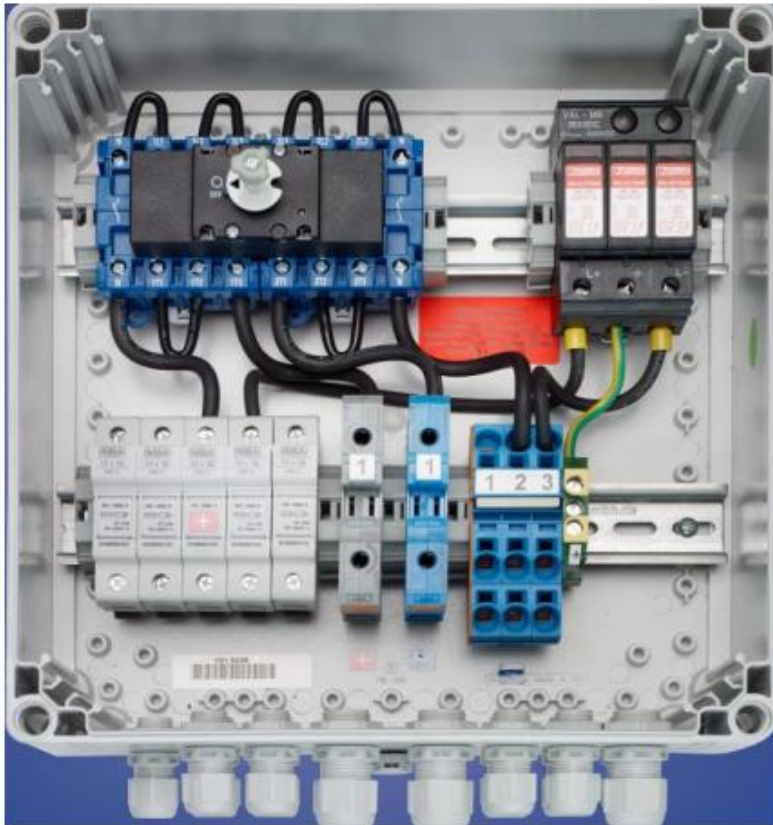


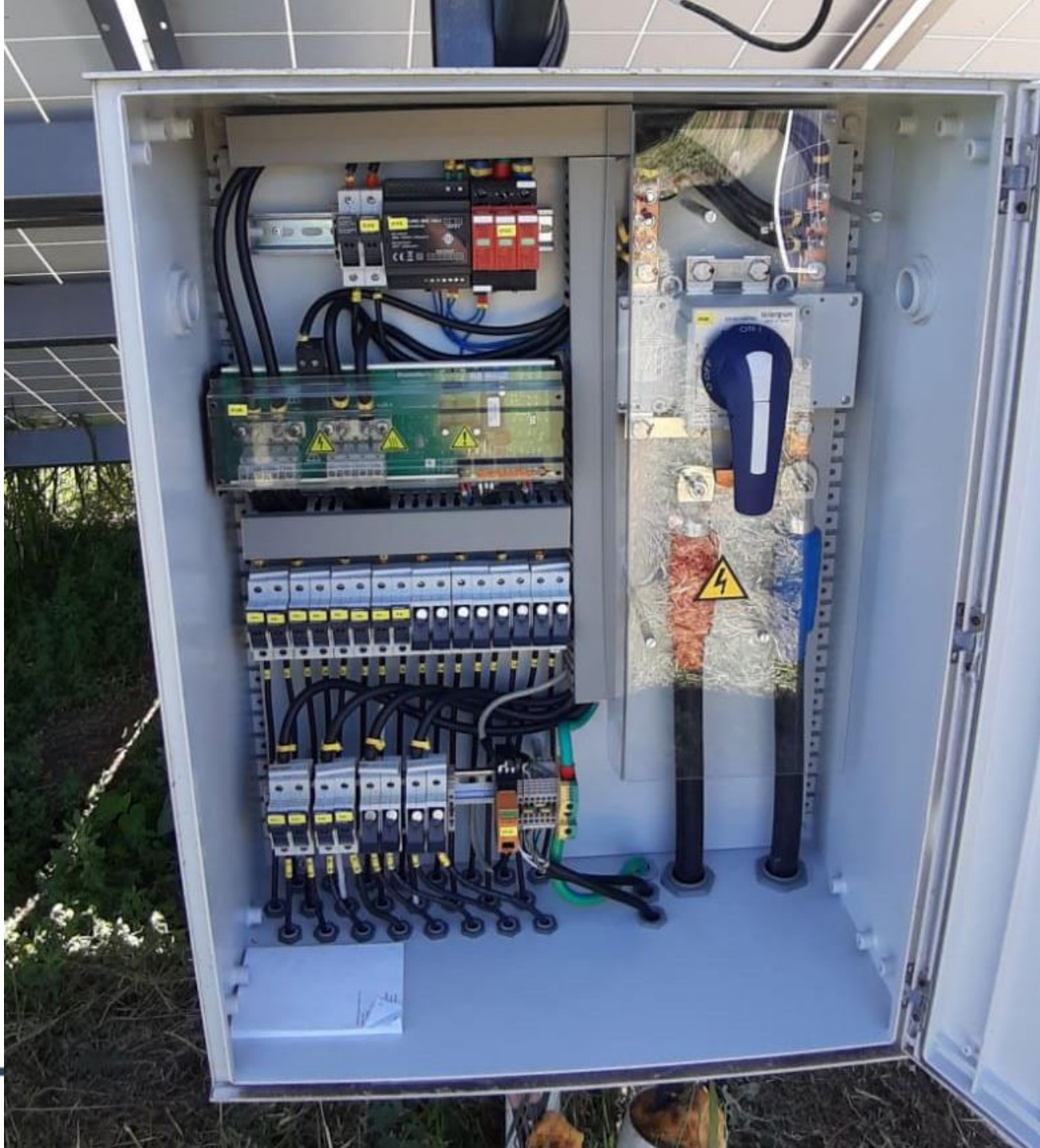
# Caso inversores string





# Caso inversores centrales





# Protección diferencial

Para dimensionar la diferencial:

- **Tensión nominal:** la del sistema
- **Corriente nominal:** la del sistema
- **Respuesta diferencial:** preferentemente 30 mA, usualmente debe ser mayor debido a inyección de corriente continua de inversores.

Además:

Para brindar seguridad personal en los inversores la corriente diferencial se mide con una unidad de monitoreo en el inversor y si se produce una corriente mayor a 30 mA se prende una alarma. Se realiza una verificación de la aislación del sistema.

# Puesta a tierra

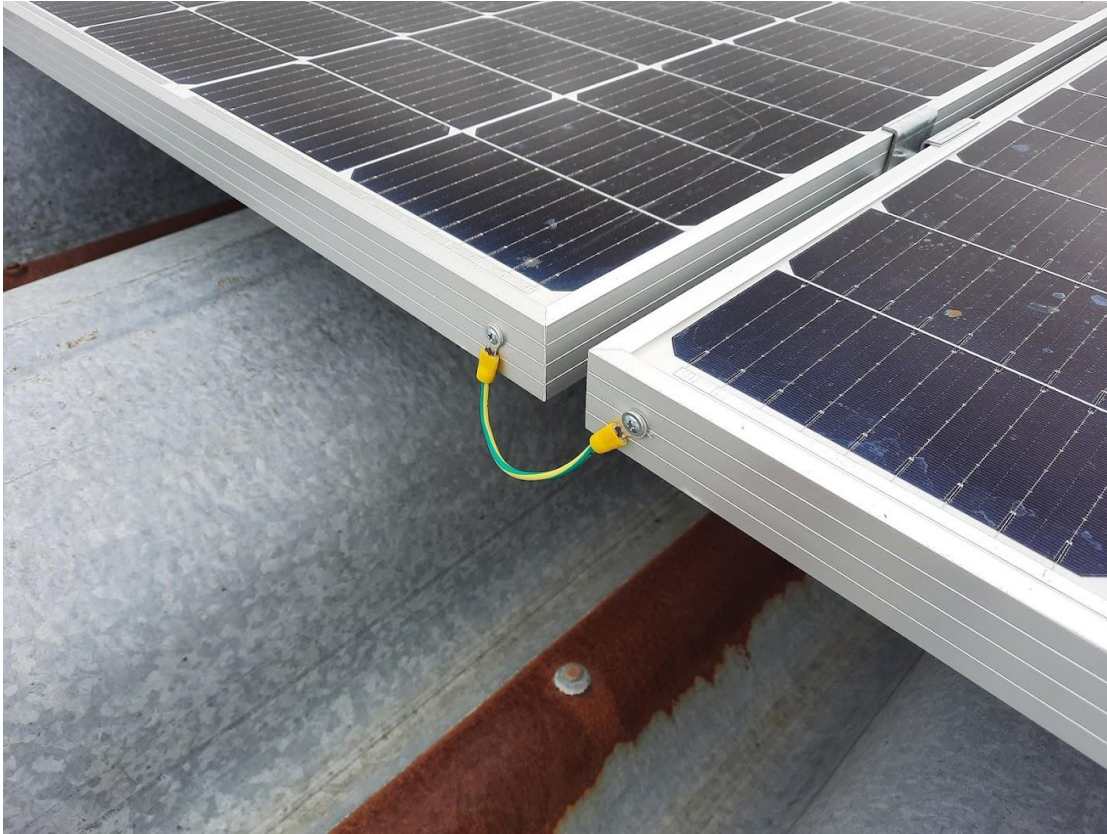
En el sistema fotovoltaico todas las partes metálicas y las carcasas de los dispositivos deben estar conectados a tierra.

- estructuras metálicas
- paneles fotovoltaicos
- tableros de protección
- inversor y la carcasa del inversor.

La conexión equipotencial se realiza mínimo con cobre de 6 mm<sup>2</sup> y la puesta a tierra con un mínimo de 16 mm<sup>2</sup>.



# Puesta a tierra



# Puesta a tierra

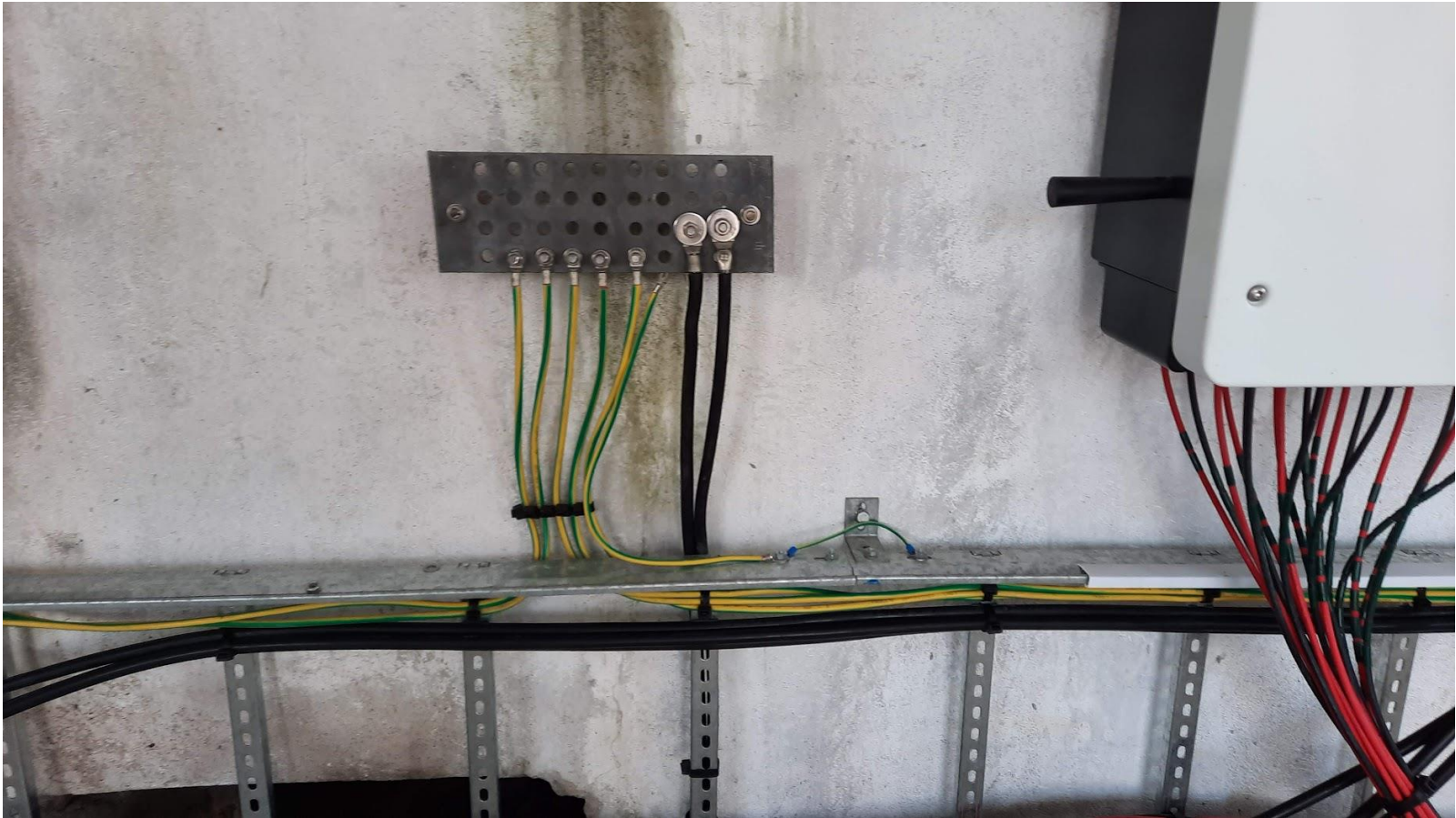




# Puesta a tierra



# Puesta a tierra



# ¿Preguntas?

