

# SFCR: Seguridad Eléctrica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

- ① Definiciones
- ② Protección de las personas
- ③ Protección de los equipos
- ④ Resumen de protecciones
- ⑤ Puesta a tierra

## Contacto Directo e Indirecto

**Partes Activas:** Conductores y piezas conductoras bajo tensión en servicio normal.  
Incluyen el conductor neutro y las partes conectadas a él.

**Contacto Directo:** contacto de personas o animales con partes activas de los materiales y equipos

**Contacto Indirecto:** contacto de personas o animales con partes que se han puesto bajo tensión como resultado de un fallo de aislamiento.

# Masa y Tierra

**Masa:** Conjunto de las partes metálicas de un aparato que, en condiciones normales, están aisladas de las partes activas.

**Tierra:** Masa conductora de la tierra en la que el potencial eléctrico en cada punto se toma, convencionalmente, igual a cero.

**Toma de tierra:** Electrodo, o conjunto de electrodos, en contacto con el suelo y que asegura la conexión eléctrica con el mismo.

# Tensión de contacto y defecto

## Tensión de contacto

- ▶ Tensión que aparece entre **partes accesibles simultáneamente** al ocurrir un fallo de aislamiento.
- ▶ Término empleado en protección contra contactos indirectos.

## Tensión de defecto

- ▶ Tensión que aparece a causa de un defecto de aislamiento, entre dos masas, entre una masa y un elemento conductor, o entre una masa y una toma de tierra de referencia.

# Clases de materiales

- ▶ Material de clase 0
  - ▶ La protección se basa en el aislamiento principal
- ▶ Material de clase I
  - ▶ La protección se basa en el aislamiento principal **y** en conexión de las partes conductoras accesibles a un conductor de protección puesto a tierra
  - ▶ Las partes conductoras accesibles no pueden presentar tensiones peligrosas.
- ▶ Material de clase II
  - ▶ La protección incluye doble aislamiento o aislamiento reforzado.
  - ▶ No requieren la utilización de puesta a tierra para la protección
  - ▶ No dependen de las condiciones de la instalación.
- ▶ Material de clase III
  - ▶ La protección se basa en la alimentación a muy baja tensión (tensiones inferiores a 50 V en c.a. ó a 75V en c.c.)

# Esquemas de conexión a tierra

Primera letra: conexión de alimentación y tierra

T= conexión directa de un punto de alimentación a tierra

I= aislamiento de todas las partes activas respecto a tierra

Segunda letra: conexión de masas con tierra

T= masas conectadas directamente a tierra

N= masas conectadas directamente a punto de alimentación puesto a tierra (en alterna, normalmente el neutro)

## Esquemas de conexión a tierra

**TN:** en alterna, neutro puesto a tierra, y masas conectadas al neutro (directamente o a través de un conductor de protección).

**TT:** en alterna, neutro puesto a tierra y masas a tierra, pero de forma independiente.

*Instalaciones receptoras en una red de distribución pública de BT*

**IT:** todos los conductores activos aislados de tierra, y masas conectadas a tierra.  
*Esquema habitual en zona del generador FV en SFCR europeos*



# Esquemas de conexión a tierra

En un sistema fotovoltaico es de uso común que el esquema de tierra sea:

- ▶ **IT en la zona del generador fotovoltaico**
- ▶ **TT a partir de la salida del inversor.**

- ① Definiciones
- ② Protección de las personas
- ③ Protección de los equipos
- ④ Resumen de protecciones
- ⑤ Puesta a tierra

## ② Protección de las personas

Efectos de la corriente eléctrica

Contacto Directo

Contacto Indirecto

Niveles de Protección en Sistema IT

## Intensidad y tiempo de contacto

- ▶ Hasta 10 mA no genera efectos peligrosos (calambres).
- ▶ Por encima de 500 mA puede producir fibrilación muscular.
- ▶ La **intensidad** que circula **depende de la tensión de contacto y la resistencia expuesta**.
  - ▶ Reducir tensión.
  - ▶ Aumentar resistencia (guantes, calzado, aislamiento del suelo)

# Frecuencia eléctrica

- ▶ Continua:
  - ▶ Umbral de percepción: 2 mA
  - ▶ Umbral control muscular: 75 mA
  - ▶ Menos peligrosa que alterna convencional. Puede producir electrolisis de la sangre.
- ▶ Alterna 50 Hz:
  - ▶ Umbral de percepción: 0.5 mA
  - ▶ Umbral de control muscular: 15 mA
- ▶ Alterna 10 kHz:
  - ▶ Umbral de percepción: 5 mA
  - ▶ Umbral de control muscular: 75 mA
  - ▶ Debido al efecto pelicular, los efectos son menores que la alterna convencional (la corriente circula por la piel, sin atravesar órganos internos).

## ② Protección de las personas

Efectos de la corriente eléctrica

Contacto Directo

Contacto Indirecto

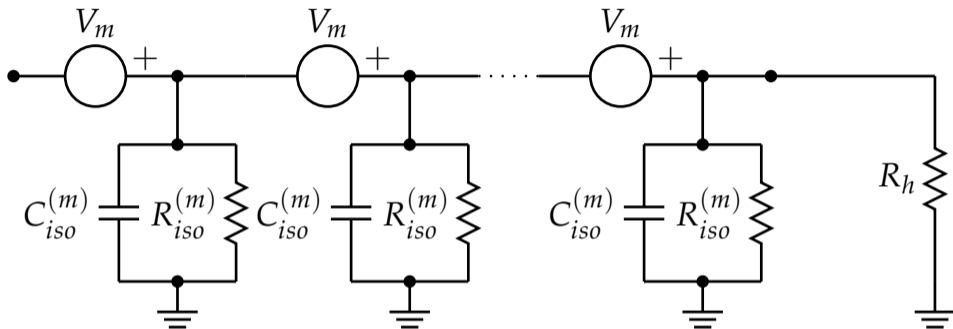
Niveles de Protección en Sistema IT

## REBT: Contactos Directos

Según la ITC-BT-24 las protecciones a utilizar para proteger frente a contactos directos deben estar **basadas en evitar que una persona pueda entrar en contacto con las partes activas** de la instalación.

- ▶ Protección por **aislamiento de las partes activas**
- ▶ Protección por medio de **barreras o envolventes**
- ▶ Protección por medio de **obstáculos**
- ▶ Protección por puesta **fuera de alcance** por alejamiento
- ▶ Protección complementaria por **dispositivos de corriente diferencial-residual**

## Contacto Directo IT



$$I_f \leq 100 \text{ mA} \implies R_{iso} \geq 10 \cdot V_{ocG} - R_H$$

Se necesitan tensiones de generador superiores a los 1000 V para producir dolor, y tensiones superiores a los 3000 V para que exista riesgo por fibrilación.



## ② Protección de las personas

Efectos de la corriente eléctrica

Contacto Directo

**Contacto Indirecto**

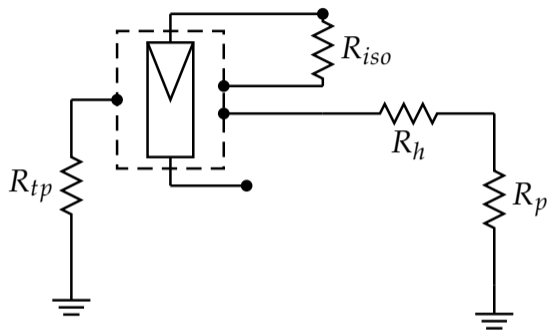
Niveles de Protección en Sistema IT

## REBT: Contactos Indirectos

La ITC-BT-24 recoge las formas de protección para contactos indirectos:

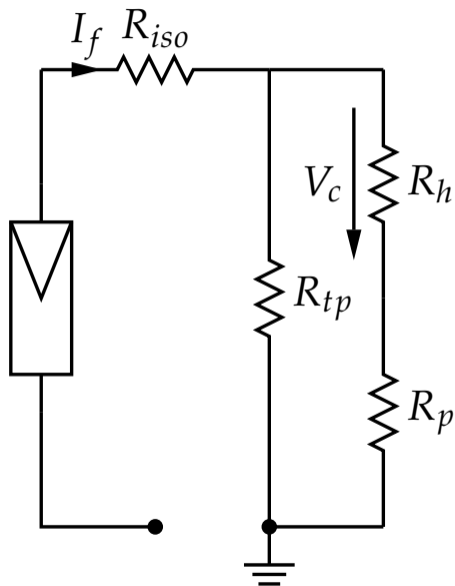
- ▶ Protección por **corte automático de la alimentación**: cuando se produce el contacto, el objetivo es evitar que la fuente eléctrica siga alimentando la fuga.
- ▶ Protección por empleo de **equipos de clase II o por aislamiento equivalente**, con la misión de alcanzar resistencias de aislamiento de alto valor y estables en el tiempo.
- ▶ **Puesta a tierra**, como camino preferente para conducir la corriente de fuga y para servir de potencial común para todos los elementos que entran en contacto con ella.

# Contacto Indirecto IT

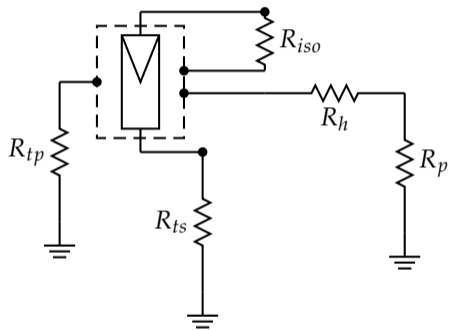


$$V_c = 0$$

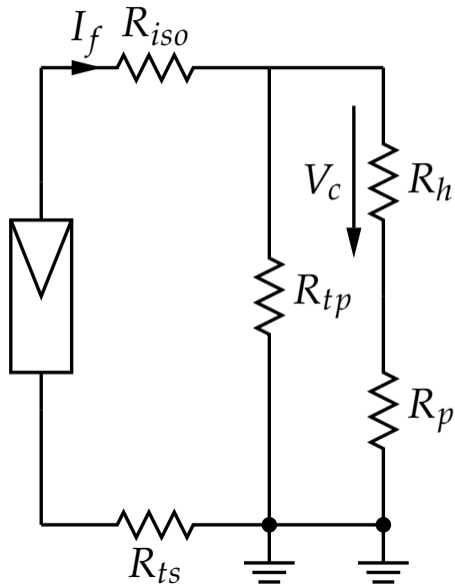
$$I_F = 0$$



# Contacto Indirecto TT



$$V_c \simeq I_{scG} \cdot R_{tp}$$



## ② Protección de las personas

Efectos de la corriente eléctrica

Contacto Directo

Contacto Indirecto

Niveles de Protección en Sistema IT

## Tres niveles de protección

Todo el sistema de protección para sistemas IT se puede concebir en tres niveles:

- ▶ Nivel 1: Refuerzo del aislamiento de las partes activas.
- ▶ Nivel 2: Sistema de detección de aislamiento.
- ▶ Nivel 3: Puesta a tierra.

## Nivel 1: Refuerzo del aislamiento de las partes activas.

**Configuración flotante del generador:** se imposibilitan los accidentes por la aparición de contactos indirectos de primer contacto.

**Cableado con aislamiento de protección:** Estos aislamientos refuerzan la protección contra contactos indirectos.

**Aislamiento galvánico AC-DC:** Mediante transformadores de devanados independientes en los inversores se imposibilita el cierre de corriente de fallo a través del inversor.

## Nivel 2: Sistema de detección de aislamiento.

**Vigilante de aislamiento:** Este elemento genera una señal de baja frecuencia (2 a 5 Hz) para evitar las fugas capacitivas del cableado, y que inyecta en un polo activo midiendo la corriente de retorno, y por tanto, la resistencia de aislamiento.

**En caso de pérdida de aislamiento,** el vigilante ordena el disparo de los interruptores aislando el campo fotovoltaico afectado. Idealmente activa el cortocircuito del campo y la puesta a tierra del mismo.



## Nivel 3: Protección en caso de fallo de los niveles 1 y 2:

En caso de fallo de los niveles anteriores aún queda la protección proporcionada por la puesta a tierra directa de todas las masas de la planta. Gracias a ella se limitará la tensión que con respecto a tierra puedan adquirir las masas en caso de derivación.

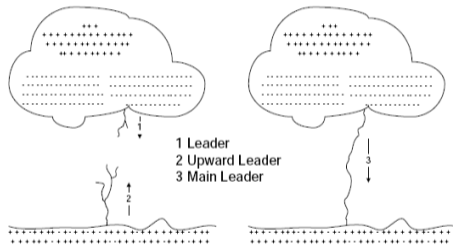
- ① Definiciones
- ② Protección de las personas
- ③ Protección de los equipos**
- ④ Resumen de protecciones
- ⑤ Puesta a tierra

### ③ Protección de los equipos

Tormentas eléctricas

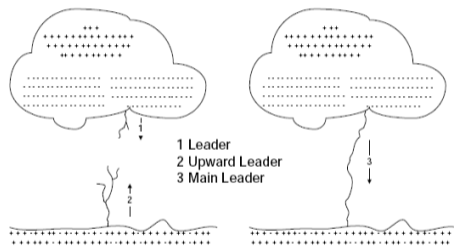
Protecciones

# Formación de las tormentas



- ▶ Dentro de los núcleos tormentosos se producen campos eléctricos.
- ▶ Cuando el campo eléctrico interno de la nube alcanza la ruptura del aire, se producen descargas eléctricas.
- ▶ **Esta descarga comienza en la nube** con un **trazador descendente** hacia la superficie terrestre.
- ▶ Trazadores ascendentes surgen cuando el descendente se acerca a 10-100 m de la superficie terrestre.
- ▶ Aquel trazador ascendente que conecta con el descendente cierra la descarga y determina el lugar del impacto.

# Influencia de las condiciones locales

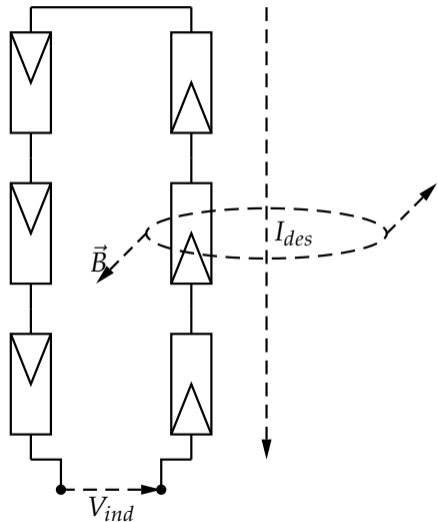


- ▶ La descarga está determinada principalmente por el campo eléctrico interno de la nube, con una menor influencia debida a las condiciones de la superficie terrestre.
- ▶ Las **condiciones locales sólo influyen** a distancias de 10-100 metros.
- ▶ Las **construcciones metálicas de mayor altura** (antenas) o superficie (instalaciones fotovoltaicas) favorecen la formación de trazadores ascendentes que conecten con el descendente.

## Influencia de los sistemas fotovoltaicos

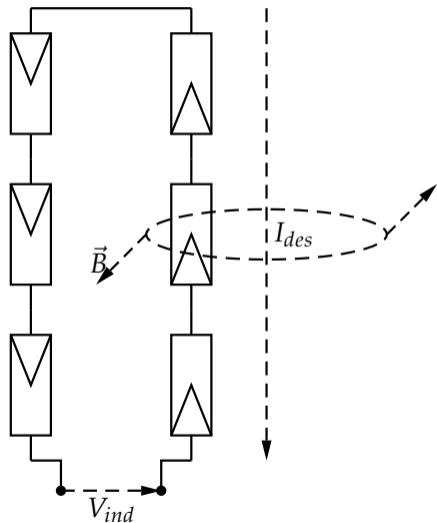
Por tanto, **las instalaciones fotovoltaicas no aumentan la probabilidad de descargas locales** (determinadas por las nubes), pero una vez que se producen, son lugares con mayor probabilidad de impacto.

## Descarga y campo magnético



- ▶ Una descarga eléctrica supone una **corriente de gran valor** en un lapso de **tiempo muy corto**.
- ▶ Esta corriente produce una **inducción magnética** a su alrededor de carácter **variable**.
- ▶ Un flujo magnético variable produce una **fuerza electromotriz** entre los extremos del área atravesada.

## Factores de influencia



La fuerza electromotriz inducida depende de:

- ▶ **Valor de la inducción magnética** (depende de la tormenta).
- ▶ **Distancia** de la descarga al sistema (depende principalmente de la tormenta).
- ▶ **Area efectiva del sistema** (depende del diseñador y del instalador).

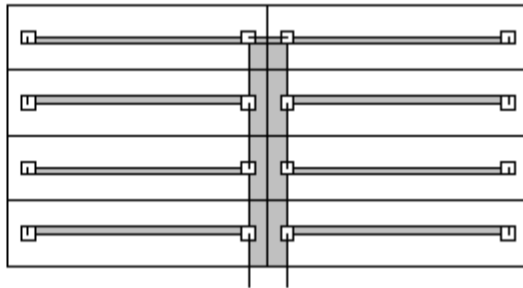
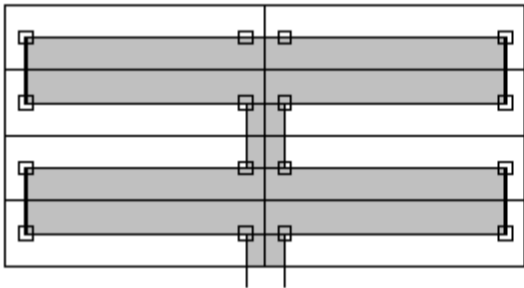


### ③ Protección de los equipos

Tormentas eléctricas

Protecciones

## Area y cableado

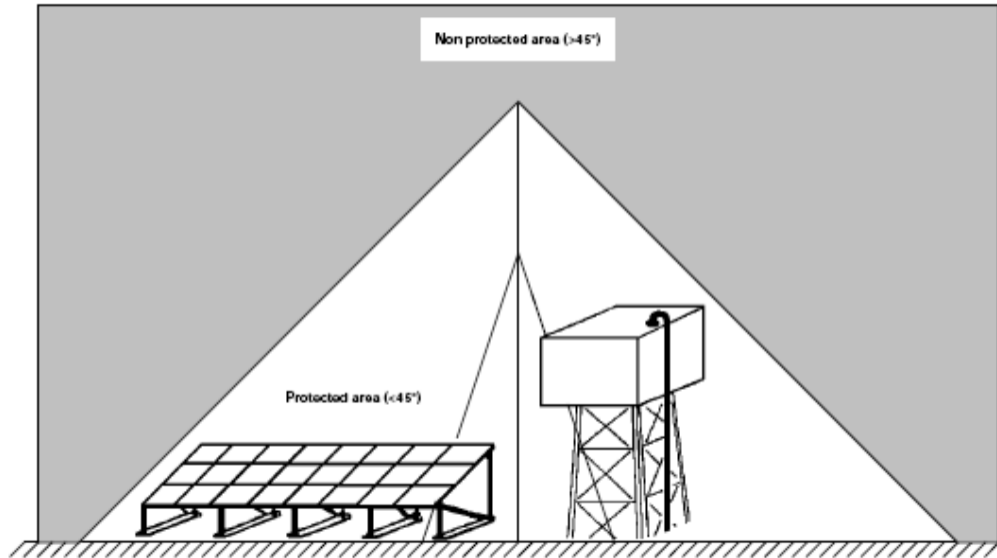


# Protección externa

Un sistema de protección externa contra el rayo se compone de:

- ▶ Terminal aéreo (punta)
- ▶ Conductor(es) de bajada (interconectados)
- ▶ Puesta a tierra.

## Protección externa



## Protección externa

- ▶ Se debe calcular una **distancia de seguridad** entre la bajada del pararrayos y las instalaciones metálicas cercanas.
  - ▶ Se asume que una distancia mayor a 1 metro es superior a la distancia de seguridad.
- ▶ **Si la distancia es inferior a la de seguridad**, el sistema de puesta a tierra de la protección externa y la estructura metálica deben **interconectarse** para evitar la existencia de descargas entre conductores.
- ▶ **Si la distancia es superior a la de seguridad**, los sistemas de puesta a tierra deben ser **independientes**.

## Protecciones internas

- ▶ **Todas las masas deben estar conectadas a un sistema de puesta a tierra.**
- ▶ En la entrada/salida de cada elemento a proteger se instalan **descargadores de tensión** entre conductores activos y tierra.

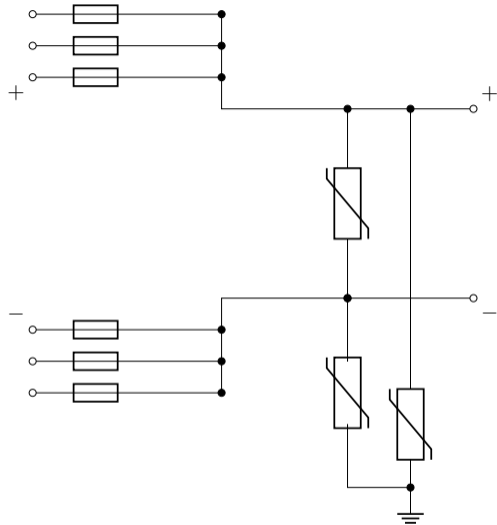
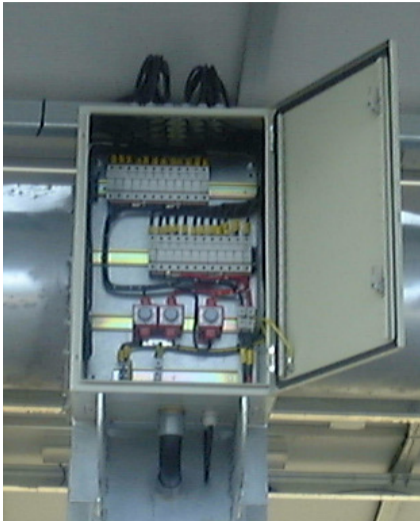
- ① Definiciones
- ② Protección de las personas
- ③ Protección de los equipos
- ④ **Resumen de protecciones**
- ⑤ Puesta a tierra

## ④ Resumen de protecciones

Circuito DC

Circuito AC





# Cortocircuitos

- ▶ El **cortocircuito** es un punto de trabajo **no peligroso para un módulo o rama**.
- ▶ Sin embargo, cuando hay **ramas en paralelo** hay que limitar la posible **corriente inversa** que podría circular por una rama alimentada por el resto del generador.
- ▶ Es recomendable la **conducción separada** del positivo y del negativo para evitar cortocircuitos por pérdida de aislamiento.
- ▶ Es **peligrosa la realización o eliminación de un cortocircuito franco en el campo generador** en funcionamiento, por la posibilidad de que se establezca un arco eléctrico.

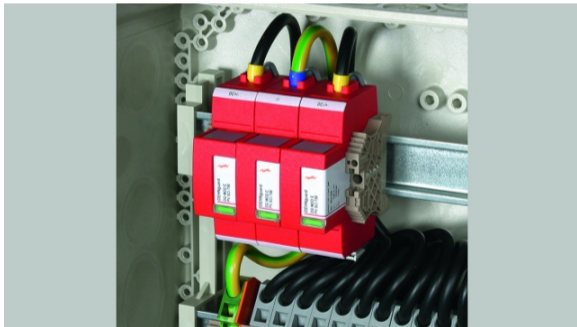
# Fusibles

- ▶ La norma IEC 62548 establece la necesidad de proteger con fusibles cuando la corriente total del conjunto de ramas en paralelo supera el umbral del módulo (según ficha de especificaciones).
- ▶ Se recomienda emplear **fusibles** de tipo gG **por cada rama** y polos normalizados según EN 60269.
- ▶ Además, el fusible por rama sirve como **elemento de seccionamiento** (facilita las tareas de mantenimiento).
- ▶ Se recomienda elegir el fusible con  $I_n \geq 1.25 \cdot I_{scG}$ . La corriente de activación es  $I_2 = 1.6 \cdot I_n$



# Descargadores de tensión

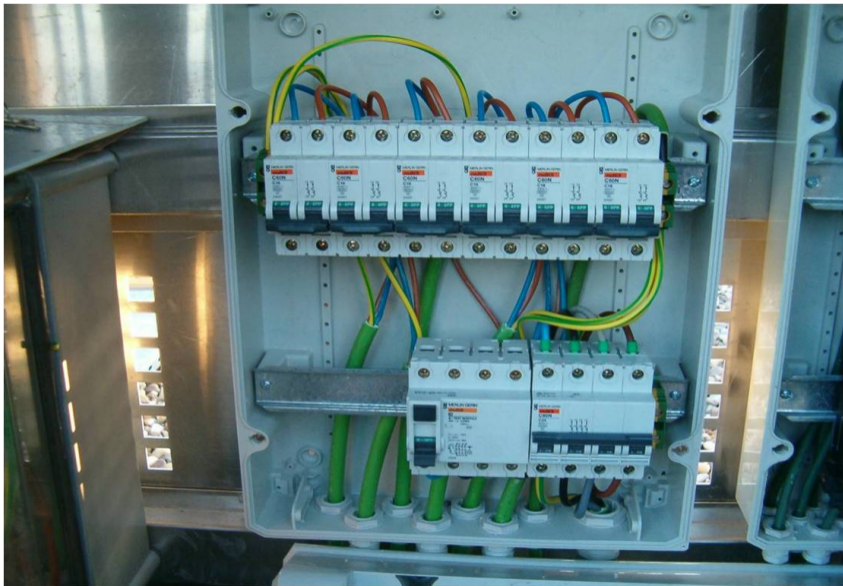
- ▶ Entrada CC del inversor protegida mediante **descargadores de tensión** para proteger contra sobretensiones de origen atmosférico.
- ▶ Tensión de operación marcada por el diseño del sistema concreto, entre la menor tensión en el punto de máxima potencia y la mayor tensión de circuito abierto.



## ④ Resumen de protecciones

Circuito DC

Circuito AC



## Cortocircuitos y sobrecargas

- ▶ Es necesario incluir un **interruptor general manual** (interruptor magnetotérmico omnipolar)
  - ▶ Ubicado en el cuadro de contadores de la instalación fotovoltaica, **accesible sólo a la empresa distribuidora**.
- ▶ Un **segundo magnetotérmico omnipolar** (de menor intensidad nominal) actuará antes que el interruptor general manual, salvo cortocircuitos de cierta importancia provenientes de la red de la compañía.
- ▶ Recomendable un magnetotérmico de menor corriente para cada inversor.

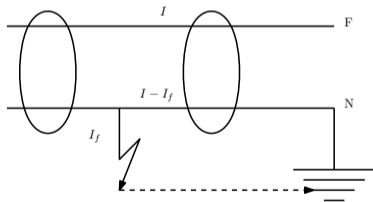
# Cortocircuitos y sobrecargas

- ▶ Se utilizarán **magnetotérmicos tipo C** (indicados cuando no existen corrientes de arranque de consumo elevadas).
- ▶ Su corriente de activación es  $I_2 = 1.45 \cdot I_n$ .



# Interruptor diferencial

- ▶ **No funciona en circuitos DC** (alternativa: vigilante de aislamiento).
- ▶ Se debe incluir un diferencial de 30 mA con corriente nominal superior a la del magnetotérmico de protección.
- ▶ El diferencial **no protege el tramo comprendido entre él y el punto de conexión a red** (conexión TT).



- ① Definiciones
- ② Protección de las personas
- ③ Protección de los equipos
- ④ Resumen de protecciones
- ⑤ Puesta a tierra

## Puesta a tierra

- ▶ **La puesta a tierra** se realizará de forma que **no altere la de la compañía eléctrica distribuidora**, con el fin de no transmitir defectos a la misma.
- ▶ **Las masas de la instalación fotovoltaica estarán conectadas a una tierra independiente de la del neutro** de la empresa distribuidora de acuerdo con el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión.

## Tomas de tierra existentes

A la hora de realizar puestas a tierra en lugares donde ya existen tomas a tierra que pertenecen a otras instalaciones eléctricas.

- ▶ Cuando corresponda a la **instalación de Baja Tensión del edificio se utilizará la puesta a tierra existente** para conectar las masas del sistema fotovoltaico.
- ▶ Cuando corresponde al **neutro de Media Tensión del transformador de la compañía eléctrica** es necesario **separarse suficientemente** para no interferir en su funcionamiento. Para terrenos de resistividad no elevada ( $\rho < 100 \Omega \text{ m}$ ), esta condición se cumple para distancias superiores a 15 m.

## Cálculo de resistencia para generador

- ▶ Un sistema IT es intrínsecamente seguro.
- ▶ No obstante, la corriente de defecto máxima es  $I_f = 30 \text{ mA}$  (vigilante de aislamiento).
- ▶ El sistema de puesta a tierra garantizará que cualquier masa no pueda dar lugar a tensiones de contacto superiores a  $V_{max} = 24 \text{ V}^*$ .

$$R_{tp} \leq \frac{V_{max}}{I_f} = 800 \Omega$$

---

\*Las anteriores ediciones del REBT distinguían las instalaciones entre locales secos y emplazamientos húmedos o mojados, incluyendo a las instalaciones a la intemperie en esta última categoría. En la revisión de 2022 esta distinción ya no existe, pero las guías de aplicación aún recomiendan los valores de tensión de contacto asociadas a emplazamientos mojados.

## Cálculo de la resistencia de tierra

### ► Resistencia de pica vertical

$$R_{tp} = \frac{\rho}{L_p}$$

siendo  $\rho$  la resistividad del terreno y  $L_p$  la longitud de la pica.

### ► Resistencia de un conductor enterrado horizontalmente:

$$R_{tc} = \frac{2\rho}{L_c}$$

siendo  $L_c$  la longitud del conductor.

### ► Resistividad en función del terreno

Terrenos cultivables fértiles	50 $\Omega$ m
Terrenos cultivables poco fértiles	500 $\Omega$ m
Suelos pedregosos	3000 $\Omega$ m

## Cálculo de la resistencia de tierra

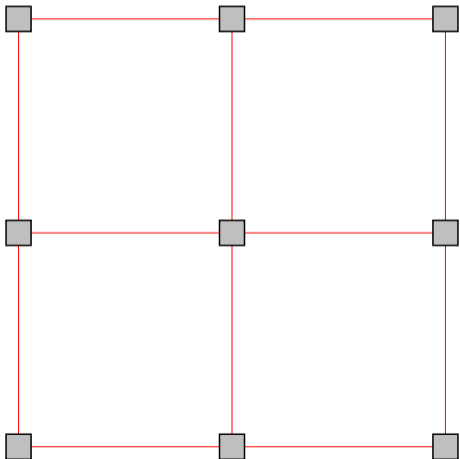
### ► Electrodo en paralelo:

Para mejorar la resistencia de toma de tierra, se utilizan varios electrodos interconectados. La **resistencia equivalente** es (aproximadamente) el **paralelo de las individuales**.

$$\begin{aligned}\frac{1}{R_t} &\simeq \frac{1}{R_{tp}} + \frac{1}{R_{tc}} = \\ &= \frac{n_p \cdot L_p}{\rho} + \frac{L_c}{2\rho}\end{aligned}$$

## Ejemplo

- ▶ Se desea conseguir una resistencia de puesta a tierra de  $R_t = 5 \Omega$ .
- ▶ Los apoyos están separados 4 m
- ▶ El terreno tiene una resistividad de  $\rho = 210 \Omega \text{ m}$ .





## Ejemplo

- ▶ En primer lugar calculamos la resistencia aportada por el conductor enterrado:

$$L_c = 4 \cdot 2 \cdot 6 = 48 \text{ m}$$

$$R_{tc} = \frac{2\rho}{L_c} = 8,75 \Omega$$

- ▶ La resistencia de una pica vertical de 2 m con este terreno es de:

$$R_{tp} = \frac{\rho}{L_p} = 105 \Omega$$

- ▶ Por tanto, el número total de picas necesarias es:

$$\frac{1}{5} = \frac{n_p}{105} + \frac{1}{8.75} \rightarrow n_p = 9$$