

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

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

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

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.

Clases de materiales

Material de clase 0

- ▶ Material en el cual la protección contra el choque eléctrico se basa en el aislamiento principal
- ▶ No existe ninguna disposición prevista para la conexión de las partes activas accesibles a un conductor de protección.
- ▶ La protección en caso de defecto en el aislamiento principal depende del entorno.

Clases de materiales

Material de clase I

- ▶ La protección contra el choque eléctrico se basa en el aislamiento principal **y** en medios de conexión de las partes conductoras accesibles a un conductor de protección puesto a tierra
- ▶ Las partes conductoras accesibles no pueden presentar tensiones peligrosas.

Clases de materiales

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.)

Tensión de contacto y defecto

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.

Tensión de contacto

- ▶ Tensión que aparece entre **partes accesibles simultáneamente** al ocurrir un fallo de aislamiento.
- ▶ Es la parte de la tensión de defecto que puede afectar a una persona.
- ▶ Terminología empleado en protección contra contactos indirectos.

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

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** y **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

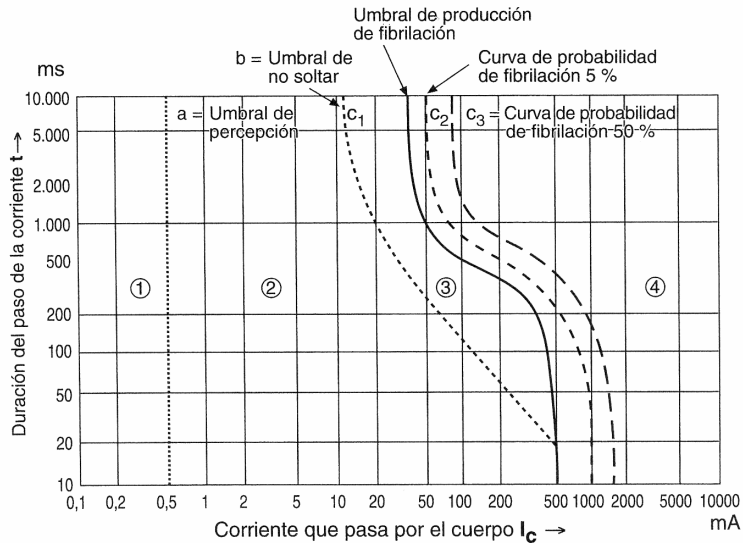
Contacto Indirecto

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)

Intensidad y tiempo de contacto



Trayectoria de la corriente

- ▶ La trayectoria se realiza siguiendo la ruta más corta o la de menor resistencia.
- ▶ Los efectos son más graves si en la trayectoria se encuentran órganos vitales.
- ▶ Además, los efectos dependen de la edad, el sexo, el estado físico, la fatiga, el miedo...

Resistencia del cuerpo

- ▶ **No es homogénea:** cada parte del cuerpo presenta valores diferentes.
- ▶ **No es estable con el tiempo:** depende de la duración del contacto y de la tensión aplicada (¡disminuye con la tensión!).
- ▶ Depende del estado de la piel, sudoración, estado físico, superficie de contacto, presión.

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

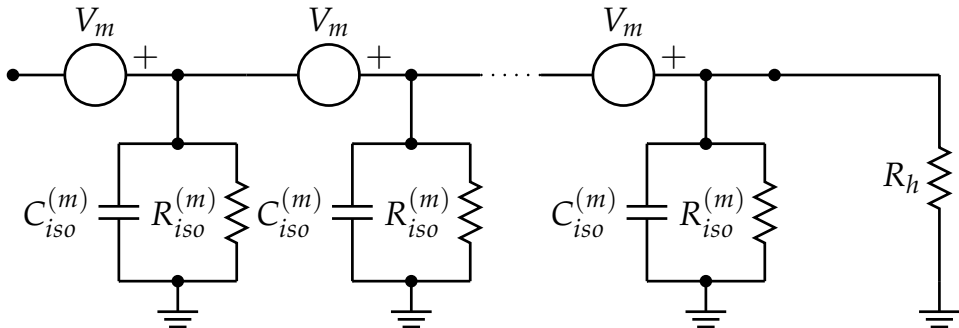
Niveles de Protección en Sistema IT

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, e incluye una protección complementaria cuando las anteriores no consiguen su objetivo:

- ▶ 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

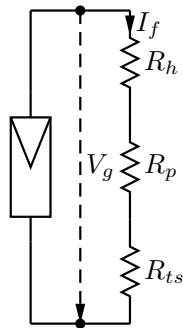
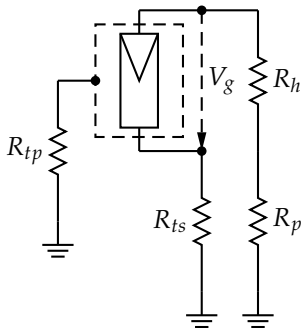


$$I_f \leq 100 \text{ mA} \implies R_{iso} \geq 10 \cdot V_{ocG} - R_H$$

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.

Contacto Directo TT

$$I_{F,max} = \frac{V_{ocG}}{R_H + R_p + R_{ts}}$$



② Protección de las personas

Efectos de la corriente eléctrica

Contacto Directo

Contacto Indirecto

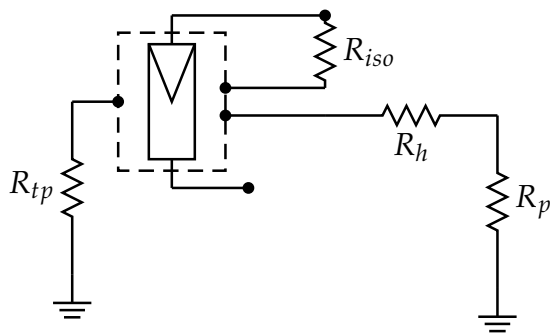
Niveles de Protección en Sistema IT

REBT: Contactos Indirectos

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

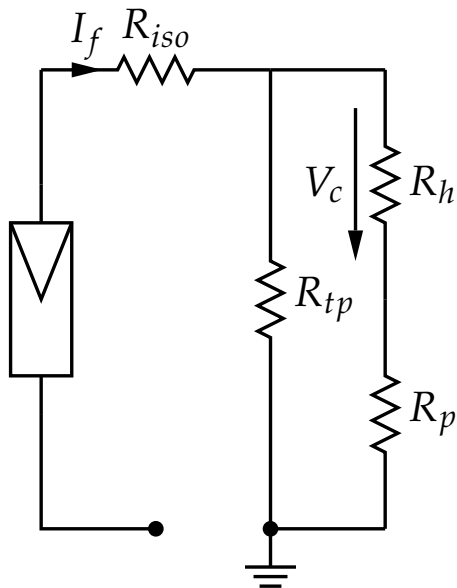
- ▶ Protección por **corte automático de la alimentación**: cuando se produce el contacto, el objetivo es evitar que la fuente eléctrica siga alimentando la fuga.
- ▶ Protección por empleo de **equipos de clase II o por aislamiento equivalente**, con la misión de alcanzar resistencias de aislamiento 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

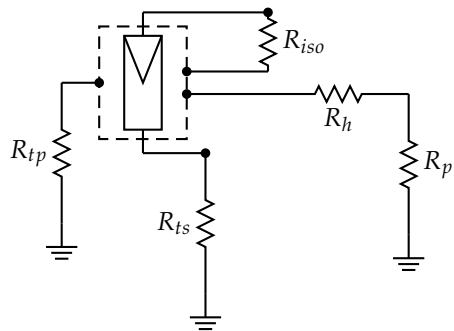


$$V_c = 0$$

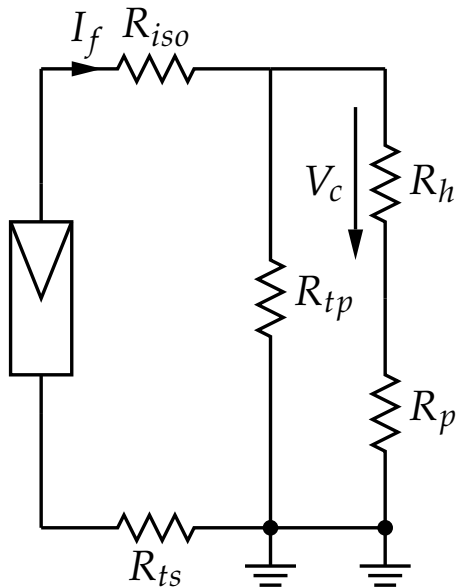
$$I_F = 0$$



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. La orden provoca la desconexión del inversor, 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 limitara la tensión que con respecto a tierra puedan adquirir las masas en caso de derivación.

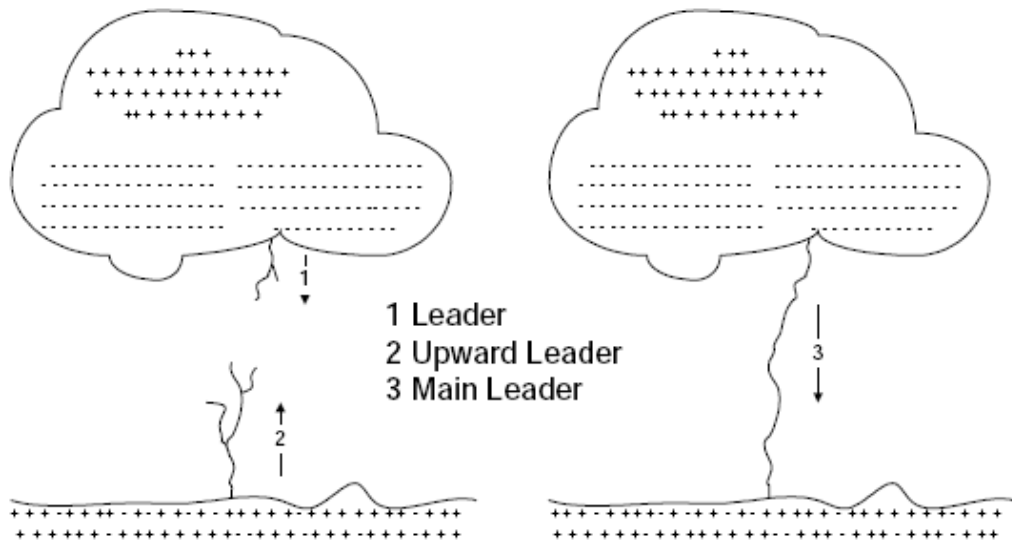
- ① Definiciones
- ② Protección de las personas
- ③ Protección de los equipos**
- ④ Resumen de protecciones
- ⑤ Puesta a tierra

③ Protección de los equipos

Tormentas eléctricas

Protecciones

Formación de las tormentas



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.

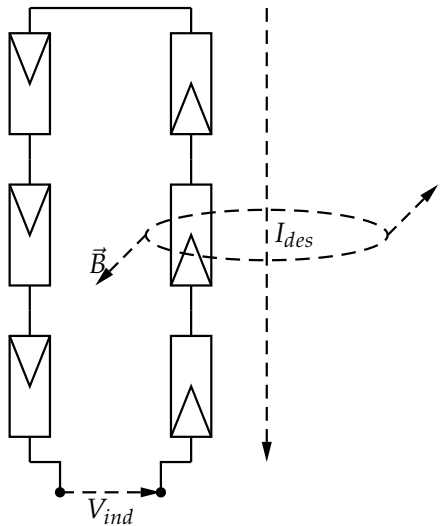
Influencia de las condiciones locales

- ▶ 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 caracter **variable**.
- ▶ Un flujo magnético variable produce una **fuerza electromotriz** entre los extremos del área atravesada.

Factores de influencia

La fuerza electromotriz inducida depende de:

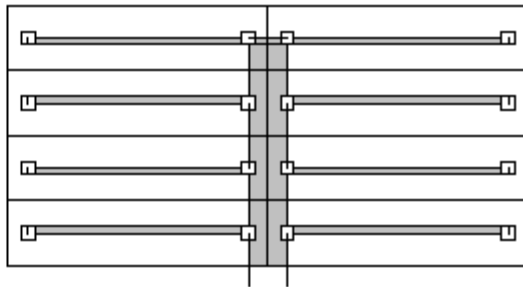
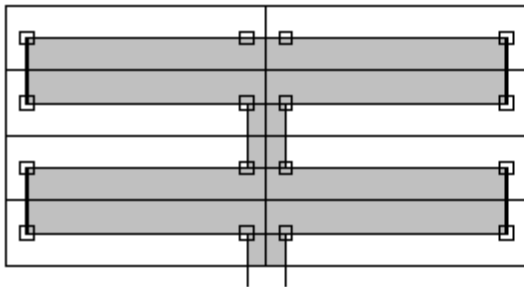
- ▶ **Valor de la inducción magnética** (depende de la tormenta).
- ▶ **Distancia** de la descarga al sistema (depende principalmente de la tormenta).
- ▶ **Area efectiva del sistema** (depende del diseñador y del instalador).

③ Protección de los equipos

Tormentas eléctricas

Protecciones

Area y cableado

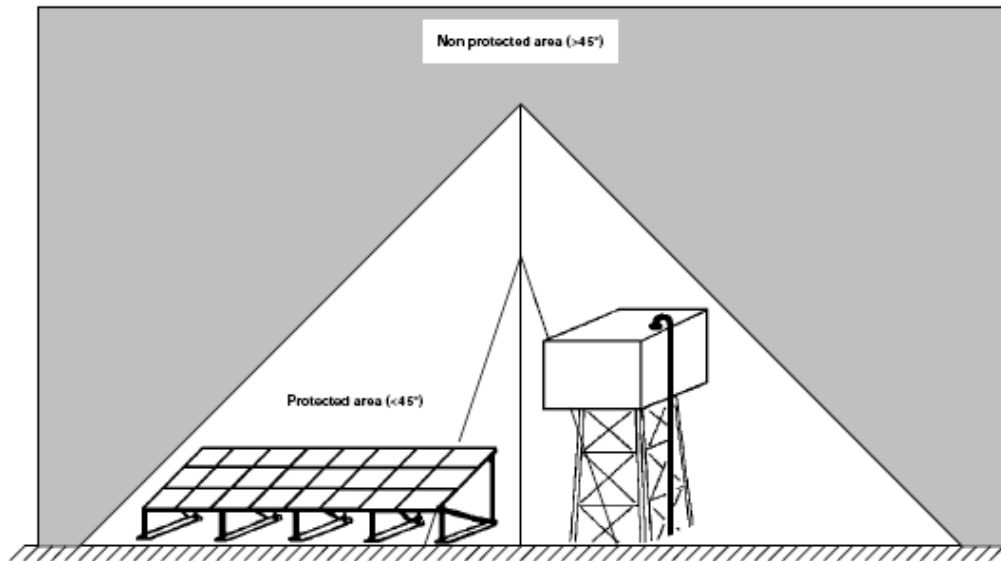


Protección externa

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 general, la estructura de soporte se conecta directamente a tierra, pero no el marco de los módulos.
- ▶ En la entrada/salida de cada elemento a proteger se instalan **supresores de tensión (varistores)** entre conductores activos y tierra.

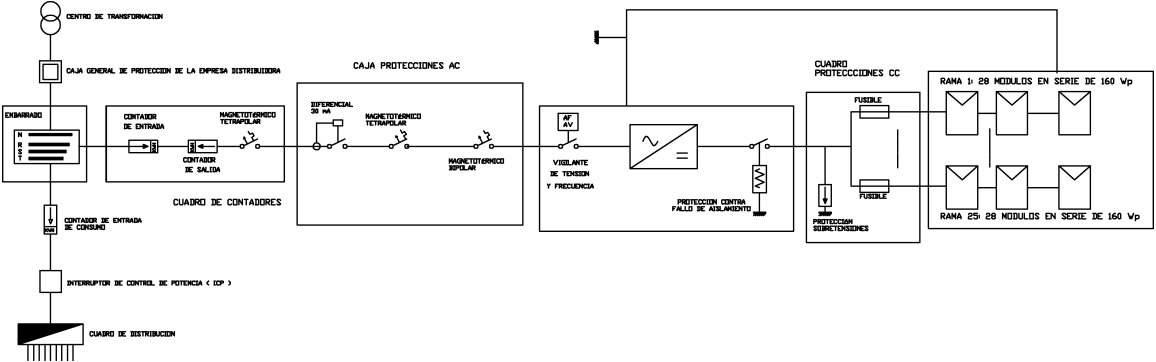
Protecciones Internas

Cuando un varistor actúa realiza un cortocircuito entre sus conexiones.



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

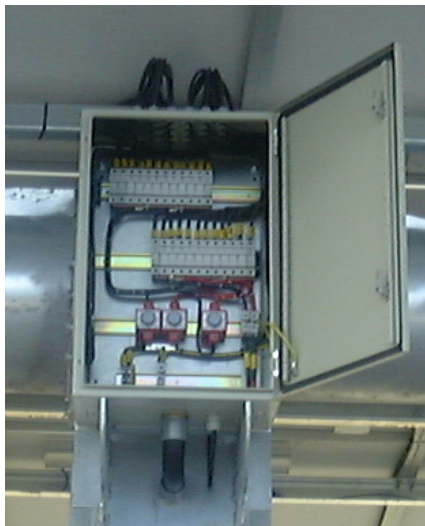
Diagrama Unifilar



④ Resumen de protecciones

Circuito DC

Circuito AC



Cortocircuitos

- ▶ El **cortocircuito** es un punto de trabajo **no peligroso para el generador fotovoltaico**.
- ▶ El cortocircuito puede, sin embargo, ser **perjudicial para el inversor**. Como medio de protección se incluyen fusibles de tipo gG normalizados según EN 60269 en cada polo.
- ▶ Para las personas es **peligrosa la realización o eliminación de un cortocircuito franco en el campo generador**, por la posibilidad de que se establezca un arco eléctrico.
- ▶ Es recomendable la **conducción separada** del positivo y del negativo para evitar cortocircuitos por pérdida de aislamiento.

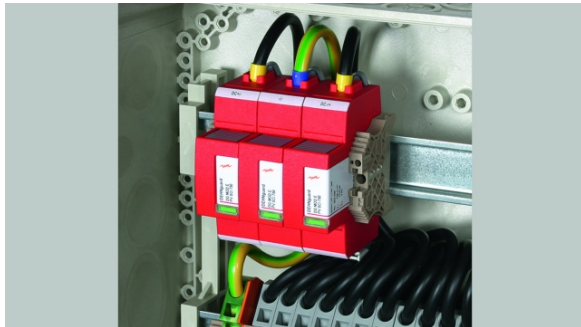
Fusibles

- ▶ El **fusible por rama** sirve principalmente como **elemento de seccionamiento** (facilita las tareas de mantenimiento).
- ▶ Suele utilizarse $I_n \geq 1.25 \cdot I_{scG}$
- ▶ La corriente de activación es $I_2 = 1.6 \cdot I_n$



Descargadores de tensión

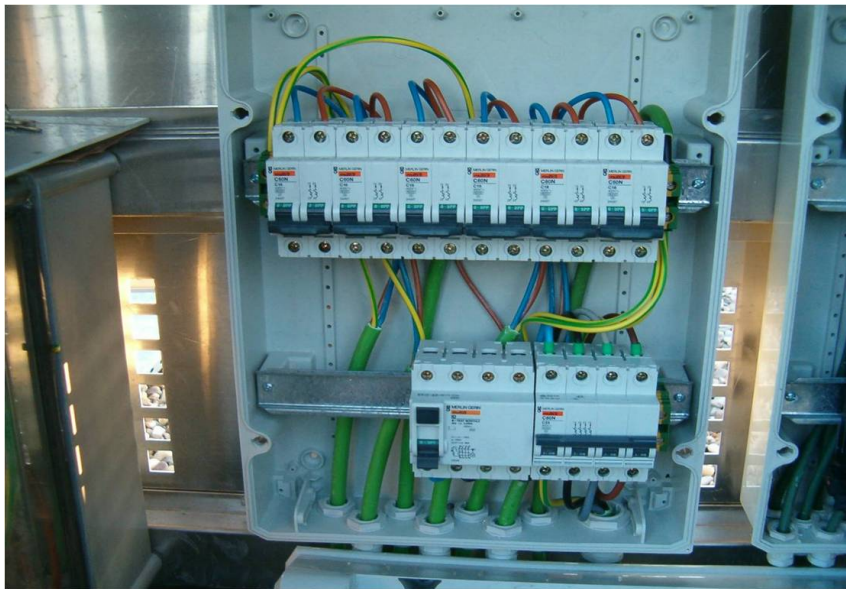
- ▶ Entrada CC del inversor protegida mediante **descargadores de tensión** para proteger contra sobretensiones de origen atmosférico.
- ▶ Tensión de operación marcada por el diseño del sistema concreto, entre la menor tensión en el punto de máxima potencia y la mayor tensión de circuito abierto.



④ Resumen de protecciones

Circuito DC

Circuito AC



Cortocircuitos y sobrecargas

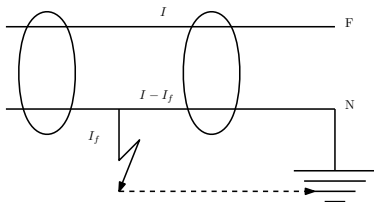
- ▶ Es necesario incluir un **interruptor general manual** (interruptor magnetotérmico omnipolar)
 - ▶ Ubicado en el cuadro de contadores de la instalación fotovoltaica, **accesible sólo a la empresa distribuidora**.
- ▶ Un **segundo magnetotérmico omnipolar** (de menor intensidad nominal) actuará antes 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).



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.

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

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 ρ 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 Ω m
Terrenos cultivables poco fértiles	500 Ω m
Suelos pedregosos	3000 Ω m

Cálculo de la resistencia de tierra

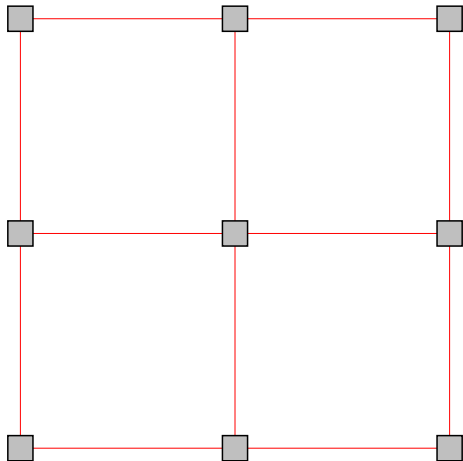
► Electrodo en paralelo:

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:

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