

Artículo

Leonardo
ENERGY



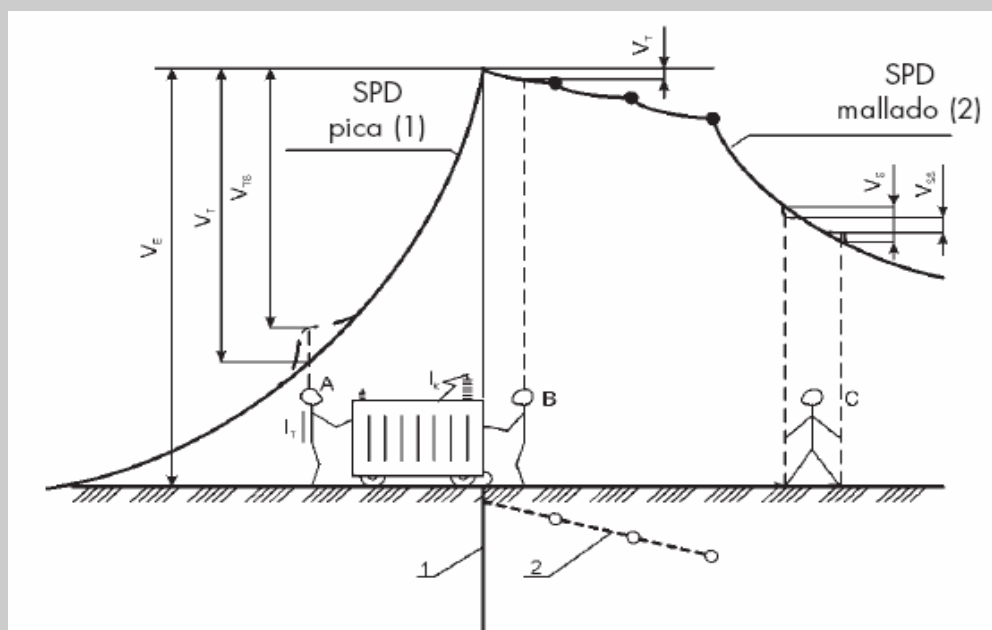
Sistemas de Puesta a Tierra

En Español

Manuel Llorente Antón

Ingeniero Técnico Industrial y Licenciado en Ciencias Físicas

Septiembre 2009



INSTALACIONES DE PUESTAS TIERRA

De una correcta ejecución en la instalación de los sistemas de puesta a tierra dependen la seguridad de las personas, de los animales domésticos y de los bienes, así como el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos y la calidad de la energía eléctrica utilizada.

El texto de referencia es el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión de España, en particular las Instrucciones ITC-BT-18, ITC-BT-19 e ITC-BT-26.

1 Sistemas de puesta a tierra

Sin una eficaz puesta a tierra es imposible el correcto uso de una instalación eléctrica, constituyendo el fundamento básico para la óptima utilización de los equipos y la garantía de la seguridad de los usuarios.

Como se indica en la Instrucción Técnica Complementaria ITC-BT-18 del citado Reglamento, "Las puestas a tierra se establecen principalmente con objeto de limitar la tensión que, con respecto a tierra, pueden presentar en un momento dado las masas metálicas, asegurar la actuación de las protecciones y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en los materiales eléctricos utilizados".

En general, cualquier Sistema de Puesta a Tierra debe ser capaz de:

a) proteger a los usuarios de la instalación contra los efectos de las descargas atmosféricas o de los cortocircuitos, evitando daños directos tales como: incendios, choques eléctricos o explosiones causadas por el impacto directo de un rayo o por un sobrecalentamiento de la instalación provocado por un cortocircuito, derivando las corrientes de defecto a tierra sin que se generen tensiones peligrosas y

b) proteger a los equipos y su funcionalidad facilitando una ruta de evacuación de baja impedancia de las corrientes de defecto, que evite la presencia de sobretensiones peligrosas en dichos equipos.

La ITC citada continúa: "La puesta a tierra es la unión eléctrica directa, sin fusibles ni protección alguna, de una parte del circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo, mediante una toma de tierra con un electrodo o grupos de electrodos enterrados en el suelo".

"Mediante la instalación de puesta a tierra se deberá conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no aparezcan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, se permita el paso a tierra de las corrientes de defecto o las de descarga de origen atmosférico".

"Las disposiciones de puesta a tierra pueden ser utilizadas a la vez o separadamente, por razones de protección o razones funcionales, según las prescripciones de la instalación".

"La elección e instalación de los materiales que aseguren la puesta a tierra deben ser tales que:

- el valor de la resistencia de puesta a tierra esté conforme con las normas de protección y de funcionamiento de la instalación y se mantenga de esta manera a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta los requisitos generales indicados en la ITC-BT-24 (Protección contra los contactos directos e indirectos) y los requisitos particulares de las Instrucciones Técnicas aplicables a cada instalación.
- las corrientes de defecto a tierra y las corrientes de fuga puedan circular sin peligro, particularmente desde el punto de vista de las sollicitaciones térmicas, mecánicas y eléctricas.
- la solidez o la protección mecánica quede asegurada con independencia de las condiciones estimadas de influencias externas.
- contemplen los posibles riesgos debidos a electrólisis que pudieran afectar a otras partes metálicas".

La norma UNE 20460, versión oficial en español del Documento de Armonización HD 384.1 S2 del CENELEC, que a su vez se adapta a la Norma de la Comisión Electrotécnica Internacional CEI 60364-1, distingue en los sistemas de puesta a tierra las siguientes partes:

- electrodos de puesta a tierra o tomas de tierra.
- conductores de tierra.
- bornes principales de tierra.
- conductores de protección.
- conductores de equipotencialidad..

2 Electrodo de puesta a tierra

Es el elemento metálico que en contacto directo con el terreno disipa las corrientes de defecto o de fuga procedentes de la instalación, así como las procedentes de las descargas atmosféricas.

Como se indica en el punto 9 de la ITC-BT-18 del REBT, "el electrodo de puesta a tierra se dimensionará de forma que su resistencia de tierra, en cualquier circunstancia previsible, no sea superior al valor especificado para ella en cada caso".

Este valor de la resistencia de tierra será tal que ninguna masa pueda dar lugar a tensiones de contacto superiores a:

- 24 V en locales o emplazamientos conductores, o a
- 50 V en los demás casos.

Si las condiciones de la instalación son tales que pudieran dar lugar a tensiones de contacto superiores a los valores señalados anteriormente, se asegurará la rápida eliminación de la falta mediante dispositivos de corte adecuados a la corriente de servicio.

Es relativamente fácil realizar una buena conexión a tierra de baja impedancia, lo único que se necesita es un conductor de elevada conductividad, resistente a la corrosión, enterrado en el terreno a suficiente profundidad para que no sufra los efectos de la congelación ni de la desecación del mismo, en contacto con

un volumen de tierra suficientemente amplio y en posición tal que no sufra la influencia de otros sistemas de puesta a tierra.

Los problemas pueden surgir cuando se conectan a esta red de tierras los equipos eléctricos o electrónicos correspondientes. En la práctica la eficacia de una red de tierras puede verse afectada por otros sistemas próximos y, en particular, por los equipos de la propia instalación. Se puede afirmar sin pecar de exagerados que el 85% de los problemas que se presentan en una instalación tienen su origen en la propia instalación., quedando sólo un residual 15% para los de origen externo.

Así, por ejemplo, el empleo de un conductor mixto de neutro y protección (CPN o PEN), como el que se utiliza en los esquemas TN-C, puede hacer que las corrientes que circulan por el neutro debidas a los desequilibrios de las fases, las provocadas por la presencia de armónicos triples, y las corrientes de fuga circulen también por los conductores de protección y por los elementos metálicos conectados, perturbando el correcto funcionamiento de los equipos. Mas adelante se tratará con detalle el importante tema de los "conductores de protección".

La citada norma UNE 20460-5-54 - "Puesta a tierra y conductores de protección", situada en el ámbito de la elección e instalación de los materiales eléctricos, indica que el valor de la resistencia de puesta a tierra deberá estar conforme con las normas de protección y de funcionamiento de la instalación eléctrica y se mantendrá continuamente de esta manera.

Por otro lado, la norma UNE 20460-4-41 - "Protección contra los choques eléctricos", en su apartado 413 desarrolla los procedimientos a aplicar para limitar los posibles daños por contactos indirectos en caso de defecto indicando que:

"Un dispositivo de protección debe aislar automáticamente de la alimentación el circuito o el material protegido contra los contactos indirectos por este dispositivo de tal manera que, tras un defecto entre una parte activa y masa en el circuito o el material, no se pueda mantener una tensión de contacto supuesta superior a los valores de las tensiones límites convencionales, U_L , durante un tiempo suficiente para crear un riesgo de daño fisiológico peligroso para una persona en contacto con partes conductoras accesibles".

Como ya se ha indicado, el valor de la tensión límite convencional U_L es de 50 V eficaces en c.a., en condiciones normales, si bien pueden prescribirse valores inferiores, 24 ó 12 V, para instalaciones o recintos concretos, por ejemplo, locales conductores, húmedos o mojados.

Puesta a tierra

En el esquema TT, habitual en las redes de distribución públicas, este dispositivo de protección debe cumplir siguiente condición:

$$R_A \times I_a \leq U_L$$

donde: R_A es la suma de las resistencias de la toma de tierra y de los conductores de protección de las masas.

I_a es la corriente que asegura el funcionamiento automático del dispositivo de protección. Cuando el dispositivo de protección es un diferencial, I_a es la corriente diferencial residual asignada I_{dN} .

U_L es la tensión límite convencional.

Expresiones similares aparecen en la norma UNE citada para los esquemas TN e IT.

Se puede observar que esta norma no señala ningún valor concreto para R_A , se limita a indicar que la tensión de defecto no debe superar el valor prefijado de U_L , lo que, a su vez, determina el valor de la resistencia de puesta a tierra, dependiendo del valor de la intensidad de disparo del dispositivo de protección. Así, por ejemplo, una instalación dotada de un interruptor diferencial de $I_{dN} = 300$ mA en un local húmedo ($U_L = 24$ V) deberá presentar, en las condiciones meteorológicas más desfavorables, una resistencia de puesta a tierra inferior a:

$$R_A < 24/0,3 = 80 \Omega.$$

Esto nos conduce a la necesidad de calcular el valor de la resistencia de puesta a tierra de una instalación en proyecto lo que, en ocasiones, está lejos de resultar un cálculo trivial.

El valor de esta resistencia depende de la superficie de contacto entre el "electrodo de tierra" y el terreno y de la resistividad eléctrica de éste. La "resistividad eléctrica del terreno" (ρ) es la resistencia óhmica medida entre las dos caras opuestas de un cubo del terreno de un metro de arista (figura 1). Se expresa en $\Omega \cdot m$.

A menudo, la determinación del valor de ρ se complica porque el terreno no presenta una estructura homogénea, sino que está formado por capas de diferentes materiales y porque el valor de la resistividad de un tipo dado de terreno varía mucho dependiendo de su contenido de humedad.

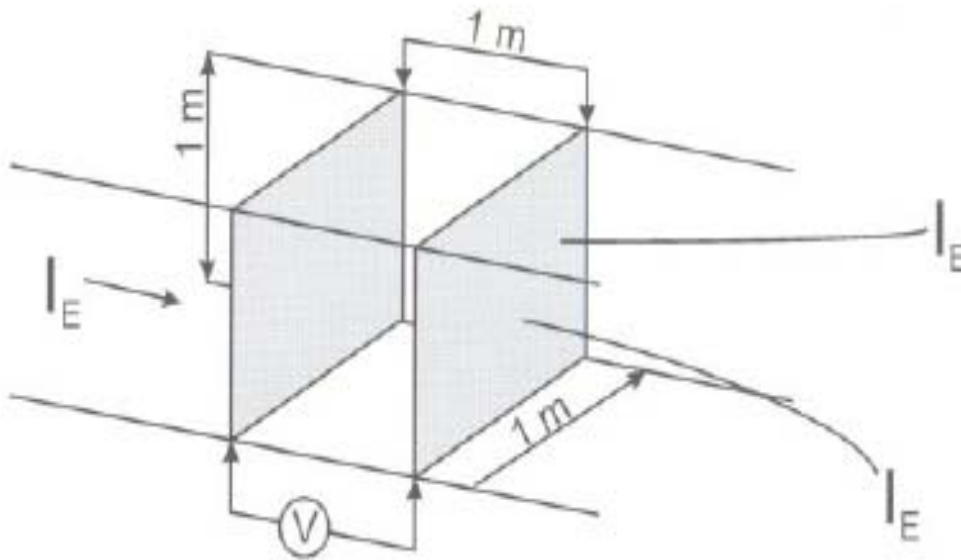


Figura 1 - Diagrama ilustrativo del concepto físico de la resistividad del terreno, ρ

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra requiere un buen conocimiento de las características del terreno, en particular de su resistividad eléctrica ρ , que, en general, presenta una gran variabilidad. En la práctica, se suele simplificar considerando una estructura del terreno homogénea, con un valor medio de ρ , que se estima por mediciones específicas, cuyos protocolos dependen de los equipos utilizados para su realización. Cuando no se dispone de una información más precisa se supone que $\rho = 100 \Omega \cdot m$. No obstante, como se puede comprobar en la tabla que sigue, el valor real puede ser muy distinto, lo que afectará al valor de la resistencia de puesta a tierra de la instalación.

Tipo de terreno	Resistividad del terreno ρ [$\Omega \cdot m$]	
	Margen de valores.	Valor medio.
Terreno pantanoso.	2 - 50	30
Barro mezclado con paja.	2 - 200	40

Puesta a tierra

Terreno fangoso y arcilloso, humus.	20 - 260	100
Arena y terreno arenoso.	50 - 3000	200 (húmedo)
Turba.	> 1200	200
Grava (húmeda)	50 - 3000	1000 (húmedo)
Terreno pedregoso y rocoso.	100 - 8000	2000
Hormigón: 1 parte cemento y 3 partes de arena.	50 - 300	150
Hormigón: 1 parte cemento y 5 partes de arena	100 - 8000	400

Valores similares aparecen en las tablas 3 y 4 de la ITC-BT 18 del vigente REBT.

Un problema adicional al tratar de determinar la resistividad del terreno es el contenido de humedad del suelo, cuya resistividad se desea determinar. Si bien la resistividad del agua pura es relativamente elevada, hasta el extremo que se la puede considerar un material aislante, pues su conductividad residual se debe a la presencia de iones H^+ y OH^- en una proporción de 10^{-7} respecto al número de moléculas de agua presentes en el volumen considerado, las impurezas que puede incorporar y, sobre todo, su facultad para rellenar los intersticios que separan las partículas sólidas del terreno, facilitando el contacto entre estas, mejoran la conductividad del mismo. En consecuencia, el valor de la resistividad eléctrica del terreno, dependiendo de su contenido de humedad puede variar dentro de un amplio margen, como se aprecia en los valores dados en la tabla anterior. Debe recordarse que la acción de las heladas es semejante al secado, aumentando notablemente la resistividad. En España este problema está limitado a ciertas regiones y, generalmente, sólo afecta a la capa superficial del terreno, por lo que puede soslayarse aumentando la profundidad a la que se colocan los electrodos de puesta a tierra.

Como consecuencia de lo dicho, es evidente que los cálculos de las resistencias de puesta a tierra y los métodos para la determinación de los electrodos necesarios, que se facilitan en esta Nota, deben considerarse aproximados, asumiéndose un error de $\pm 30\%$ que, en la práctica, se puede considerar aceptable.

De acuerdo con el contenido del punto 9 de la ITC-BT-18, aunque los cálculos efectuados a partir de los valores dados de la resistividad del terreno no dan

Puesta a tierra

más que un valor aproximado de la resistencia a tierra del electrodo, la medida posterior de la resistencia de tierra de éste, una vez realizada la instalación, puede permitir, aplicando las fórmulas dadas en la tabla 5 de dicha ITC, estimar el valor medio local de la resistividad del terreno considerado.

Tabla 5.

Electrodo	Resistencia de tierra en Ohmios.
Placa enterrada	$R = 0,8 \cdot \rho / P$
Pica vertical	$R = \rho / L$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = 2 \cdot \rho / L$
ρ , resistividad del terreno, en $\Omega \cdot m$. P , perímetro de la placa, en m.. L , longitud de la pica o del conductor, en m	

En lo que sigue se van a facilitar procedimientos adecuados para calcular la resistencia de puesta a tierra de algunas configuraciones de electrodos algo más complejas que las mencionadas en la tabla 5 de la ITC-BT-18.

En esencia, en un sistema de puesta a tierra se deben considerar dos parámetros:

- la resistencia de la puesta a tierra, y
- la configuración del electrodo de tierra.

La primera determina la capacidad del sistema para evacuar una determinada corriente de defecto y la segunda la distribución del potencial sobre la superficie del terreno, que determina las tensiones de paso y contacto.

La resistencia de puesta a tierra, R , está constituida por:

- la resistencia de disipación, R_D , que es la resistencia propia del terreno, medida entre el electrodo y una tierra de referencia, y
- la resistencia, R_L , de las partes conductoras del sistema (electrodo de tierra y conductores de puesta a tierra).

Evidentemente la resistencia R_L es mucho menor que la resistencia de disipación R_D por lo que, generalmente, se considera que la resistencia de puesta a tierra, R , es igual a la resistencia de disipación, R_D .

Por otro lado, la resistencia de puesta a tierra, R , de un electrodo de tierra, depende de la resistividad del terreno, ρ , y de la geometría del electrodo. Para obtener valores bajos de R , la superficie de contacto entre el metal del electrodo y el terreno debe ser lo mayor posible, para que la densidad de la corriente disipada al terreno sea lo más baja posible. Una densidad de corriente elevada podría secar el terreno aumentando su resistencia.

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra se realiza suponiendo que el terreno es ilimitado y de estructura uniforme, con un valor dado de la resistividad (ρ).

El REBT, en el punto 3.1 de la ITC-BT-26 - "Tomas de tierra - Instalación" prescribe:

"En toda nueva edificación se establecerá una toma de tierra de protección, según el siguiente sistema:

Instalando en el fondo de las zanjas de cimentación de los edificios, y antes de empezar ésta, un cable rígido de cobre desnudo de una sección mínima según se indica en la ITC-BT-18, formando un anillo cerrado que interese a todo el perímetro del edificio. A este anillo deberán conectarse electrodos verticalmente hincados en el terreno cuando se prevea la necesidad de disminuir la resistencia de tierra que pueda presentar el conductor en anillo. Cuando se trata de construcciones que comprendan varios edificios próximos, se procurará unir entre sí los anillos que forman la toma de tierra de cada uno de ellos, con objeto de formar una malla de la mayor extensión posible.

En la rehabilitación o reforma de edificios existentes, la toma de tierra se podrá realizar también situando en patios de luces o en jardines particulares del edificio, uno o varios electrodos de características adecuadas.

Al conductor en anillo, o bien a los electrodos, se conectarán, en su caso, la estructura metálica del edificio o, cuando la cimentación del mismo se haga con zapatas de hormigón armado, un cierto número de hierros de los considerados principales y, como mínimo, uno por zapata.

Puesta a tierra

Estas conexiones se establecerán de manera fiable y segura, mediante soldadura aluminotérmica o autógena".

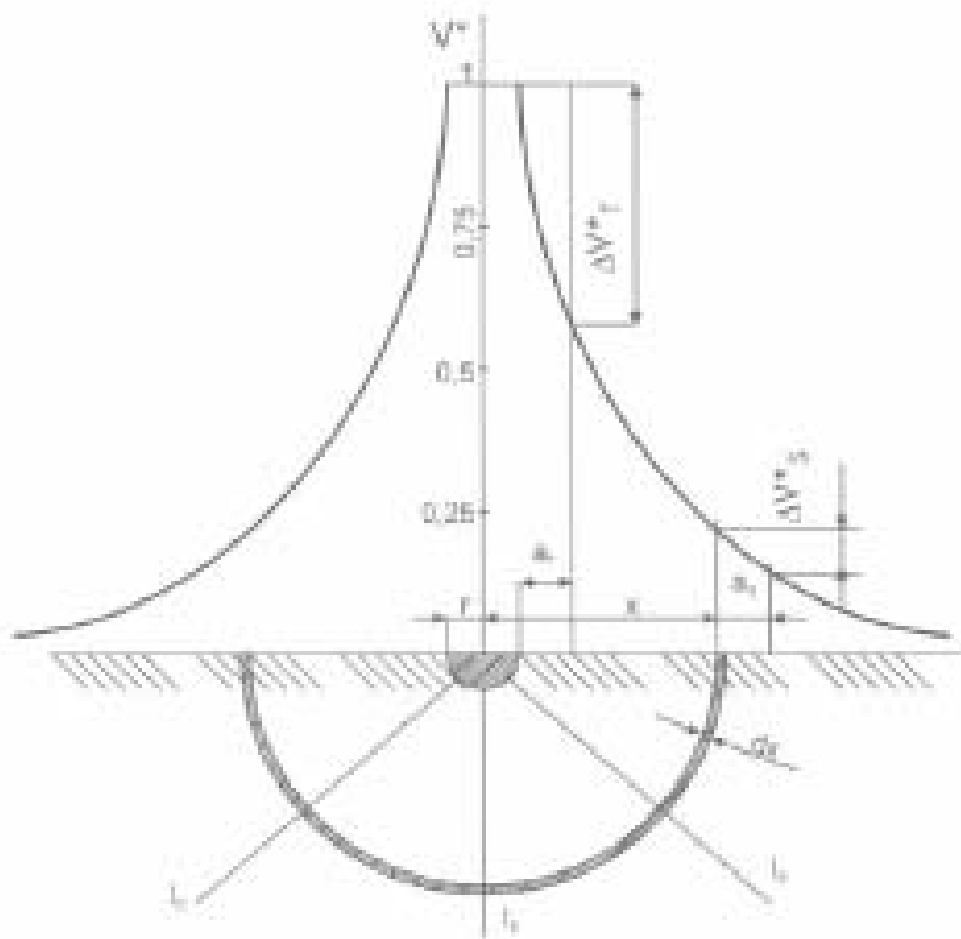


Figura 2 - Ilustración de la noción de un electrodo hemisférico, mostrando los parámetros necesarios para calcular la resistencia de tierra y la distribución del potencial en la superficie del terreno (con $\rho = \text{const.}$)

- x - distancia al centro del electrodo.
- r - radio del electrodo.
- a_p, a_c - distancias de paso y contacto.
- V - valor de la distribución del potencial.
- $\Delta V_p, \Delta V_c$ - valores respectivos de las tensiones de paso y contacto.

Como se indica en el apartado 542.2 - "Tomas de tierra" de la norma UNE 20460-5-54, Pueden utilizarse distintos tipos de electrodos de tierra:

- picas o tubos, que se clavan a una profundidad de tres, o más, metros.

Puesta a tierra

- pletinas o cables desnudos enterrados horizontalmente a poca profundidad.
- placas
- malla del fondo de zanja, estructurados como una rejilla colocada horizontalmente.
- armadura de hormigón enterrado, que proporcione una gran superficie de contacto con el terreno.
- conducciones metálicas de agua, en condiciones especiales indicadas en 542.2.5.
- otras estructuras enterradas apropiadas, según 542.2.6.

Un modelo básico de la configuración de un electrodo de tierra es un hemisferio metálico embebido en el terreno (figura 2). Se supone que la corriente de tierra que fluye desde un electrodo de este tipo, lo hace radialmente hacia el terreno y que son equipotenciales tanto la superficie del electrodo como todas las capas hemisféricas, d_x , del terreno, por lo que las líneas de corriente son perpendiculares a estas superficies.

En estas condiciones, la resistencia del elemento hemisférico de espesor d_x y radio x vale:

$$dR = \rho \cdot \frac{dx}{S} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot x^2} \cdot dx = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dx}{x^2}$$

Por lo tanto, la resistencia de tierra de ese electrodo vale:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Como se observa en la figura, cuando por el electrodo circula una corriente de defecto, en la superficie del terreno aparece una distribución de potencial, V .

El potencial de cualquier punto situado a una distancia x del centro del electrodo de tierra, por el que circula la corriente de defecto, I_D , (suponiendo que el potencial de la tierra de referencia sea igual a cero) valdrá:

Puesta a tierra

$$V_x = R_x \cdot I_D = \frac{\rho \cdot I_D}{2 \cdot \pi \cdot x}$$

El potencial de puesta a tierra se obtiene a partir de la expresión anterior, sustituyendo la x por el radio del electrodo r . La diferencia de potencial entre dos puntos sobre la superficie del terreno: uno a una distancia x y el otro a una distancia $x + a_p$, donde se supone que a_p es la separación entre los dos pies de una persona (se considera $a_p = 1$ m) determina lo que se conoce como "tensión de paso":

$$\Delta V_p = \frac{\rho \cdot I_D}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x + a_p} \right)$$

x - distancia al centro del electrodo
 r - radio del electrodo
 $a_p; a_c$ - distancias de paso y contacto.
 V - valor de la distribución de potencial
 $\Delta V_p, \Delta V_c$ - valores respectivos de las tensiones de paso y contacto

ΔV_p representa el choque eléctrico que sufriría una persona que se encontrara a x metros del punto de penetración del electrodo en el terreno en el momento en que por el mismo circulara la corriente de defecto I_D .

En el caso particular en que $x = r$, la fórmula anterior permite calcular la "tensión de contacto", es decir, la tensión entre la mano y el pie de una persona que está tocando el electrodo de tierra o una parte metálica unida al mismo.

$$V_c = \frac{\rho \cdot I_D}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r + a_p} \right)$$

Una ilustración de las tensiones de paso y contacto se muestra en la figura 3. Las personas A y B están sujetas a una tensión de contacto, V_c , mientras que la persona C está sometida a la tensión de paso, V_p .

El lado izquierdo de la figura muestra la situación para un electrodo de pica, mientras que el lado derecho muestra la de un electrodo mallado. El electrodo de pica (1) tiene una baja resistencia pero presenta una distribución de

potencial muy desfavorable, con el riesgo de valores de la tensión de paso y contacto muy elevados, mientras que el electrodo mallado (2) presenta un perfil de potencial más plano. Las tensiones de paso y contacto son considerablemente mayores en el electrodo de pica que en el mallado.

Cuando no es posible proporcionar una tierra mallada, puede ser una solución intermedia la colocación de un electrodo anular, constituido por un cable desnudo o una pletina, que rodee la instalación, lo que combina un coste y seguridad razonables.

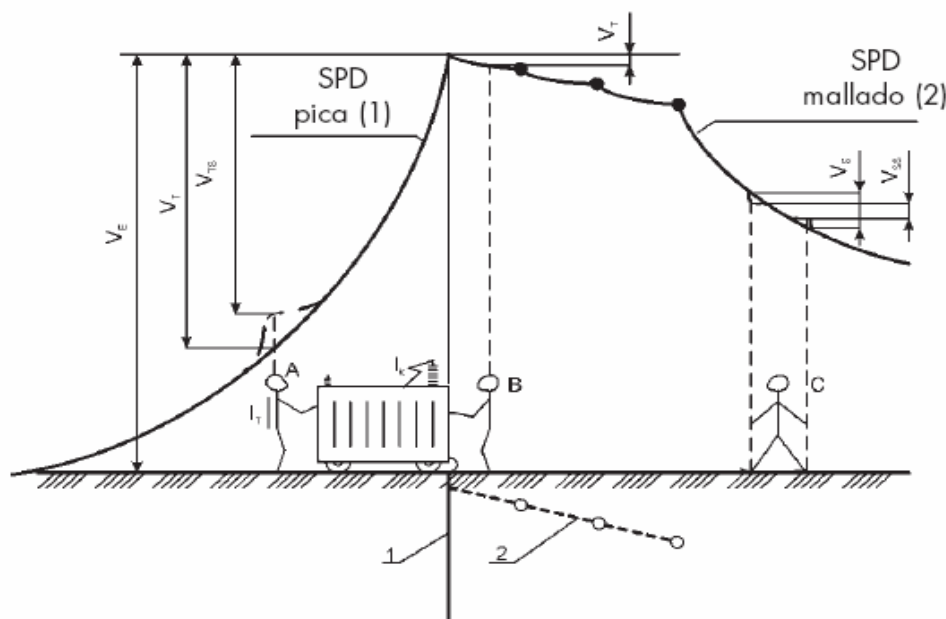


Figura 3 - Comparación de la distribución de la tensión superficial del terreno (SPD) durante un flujo de corriente en un Sistema de Puestas a Tierra, para dos tipos de electrodos de tierra.

- 1 - electrodo de pica;
- 2 - electrodo mallado
- V_E - tensión de puesta a tierra.
- V_{TS} - tensión de contacto en 1.
- V_T - tensión de contacto en 2
- V_S - tensión de paso en 2.
- I_T - corriente de choque eléctrico por contacto

Se puede resumir lo anterior indicando que la resistencia de puesta a tierra determina el valor de la tensión de puesta a tierra, mientras que la configuración del electrodo de tierra determina la distribución del potencial

sobre la superficie del terreno. Evidentemente, esta configuración también influye en el valor de la resistencia de puesta a tierra, ya un electrodo mallado hace contacto con un volumen mayor del terreno que una pica, por lo que la resistencia y la configuración deben considerarse conjuntamente.

2.1 Resistencia y distribución del potencial superficial de distintos tipos de electrodos de puesta a tierra.

Ya se han indicado las definiciones básicas y las fórmulas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra y de la distribución de potencial en la superficie del suelo, para un electrodo hemisférico situado en un terreno ideal de resistividad homogénea y extensión ilimitada. Análogamente podría desarrollarse la formulación correspondiente para otras configuraciones de electrodos de puesta a tierra. En la práctica estas condiciones ideales no se cumplen. La resistividad del suelo, ρ , no es homogénea en toda la masa del terreno afectado, además, varía con la humedad a lo largo del año, por lo que los resultados de los cálculos sólo pueden ser aproximados. Por otro lado, lo que la normativa vigente señala son las tensiones límite de contacto indirecto, U_L , de las superficies metálicas susceptibles de ponerse en tensión en caso de defecto. Luego será esta circunstancia la que nos determinará el valor máximo de la resistencia de puesta a tierra a considerar. Por lo tanto, los valores de las resistencias de puesta a tierra calculados con las fórmulas que se dan a continuación que, como se ha dicho anteriormente, deben considerarse aproximados con un error de $\pm 30\%$, pueden considerarse aceptables en la práctica, lo que nos permitirá diseñar el tipo de electrodo a considerar.

Se ha indicado anteriormente que la función de un Sistema de Puesta a Tierra es proporcionar:

a) una Puesta a Tierra de protección que proporcione un enlace eléctrico equipotencial de todas las partes metálicas simultáneamente accesibles con las que puede entrar en contacto una persona. En condiciones normales, estas partes no están en tensión, pero en caso de avería podrían alcanzar un potencial peligroso (contacto indirecto). Su requisito fundamental es que este potencial no supere la tensión límite convencional, U_L . Este enlace eléctrico equipotencial lo proporciona el conjunto de los conductores de protección que, unidos a los conductores de tierra, acompañan a los conductores activos de la instalación. (apartados. 543 y 544 de la norma UNE 20460-5-54).

b) una puesta a tierra funcional que asegure el correcto funcionamiento de los equipos y permita, también, un comportamiento correcto y fiable de la instalación (apartado. 545 de la norma UNE 20460-5-54) y

c) un camino funcional a tierra de las corrientes originadas por los rayos. Estas corrientes pueden alcanzar valores máximos muy elevados, I_R , de algunos cientos de kA, con fuertes incrementos de la corriente en tiempos muy cortos - cientos de kA/ μ s y desarrollar tensiones muy elevadas en los electrodos de puesta tierra, que se pueden estimar con la fórmula siguiente:

$$V_R \approx \sqrt{\left(L \cdot \frac{dI_R}{dt} \right)^2 + (I_R \cdot R_R)^2}$$

donde: L - es la inductancia del electrodo de toma de tierra y de los conductores del pararrayos, que puede estimarse del orden de 1 μ H/m

R_R - es la resistencia a impulsos tipo rayo del electrodo de toma de tierra.

El valor de V_R puede llegar a alcanzar cientos o incluso miles de kV, por lo que la protección total de las instalaciones contra los rayos debe contar con un sistema de pararrayos y disruptores de arco adecuados.

2.1.1 Electrodo superficial simple

Estos electrodos están constituidos por barras, tiras, cables o tubos metálicos desnudos, colocados horizontalmente, enterrados a una profundidad de t (m). Normalmente su longitud, l (en m), es mucho mayor que p . La distribución superficial del potencial, V_S , en la dirección x perpendicular a l , que se muestra en la figura 4, viene expresada por la fórmula:

$$V_S = \frac{\rho \cdot I_D}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \frac{\sqrt{(l^2 + 4 \cdot t^2 + 4 \cdot x^2)} + l}{\sqrt{(l^2 + 4 \cdot t^2 + 4 \cdot x^2)} - l}$$

donde:

V_S - es el potencial superficial de tierra, en V.

Puesta a tierra

ρ - es la resistividad del terreno, en $\Omega \cdot m$.

I_D - es la intensidad de defecto, en A.

l - longitud del electrodo de toma de tierra, en m.

t - profundidad de enterramiento, en m.

La resistencia de puesta a tierra de una barra cilíndrica enterrada viene dada por la expresión:

$$R = \frac{V_s}{I_D} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{t \cdot d}$$

Donde:

d - es el diámetro de la barra.

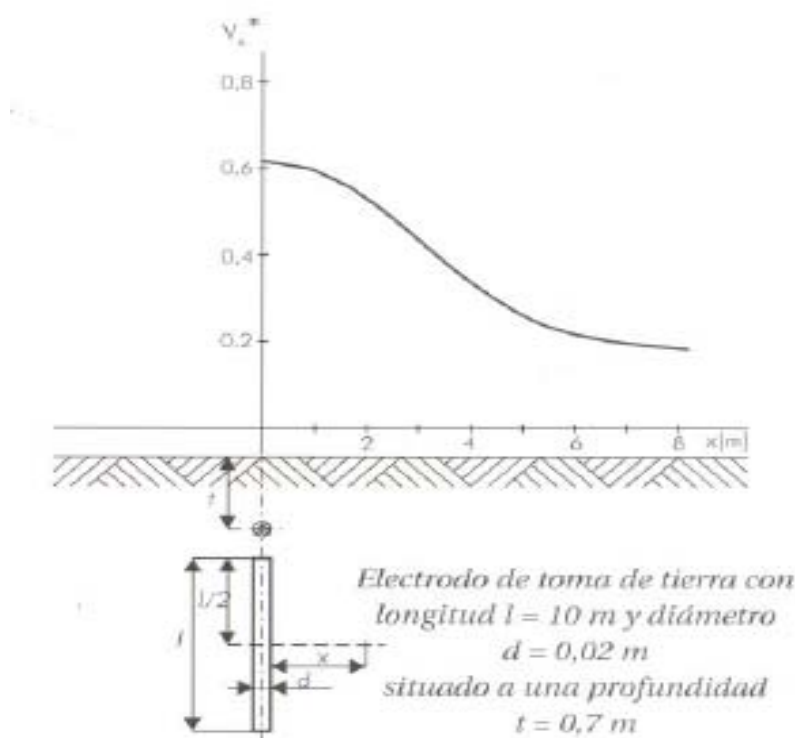


Figura 4 - Distribución del potencial superficial de tierra perpendicular al tubo horizontal.

Estas puestas a tierra suelen estar constituidas por pletinas de sección rectangular de una anchura de unos 30-40 mm (b) y un espesor de 4-5 mm (c). En este caso, el diámetro equivalente, d_e , a utilizar en la fórmula anterior se calcula mediante la expresión: $d_e = 2 \cdot b / \pi$.

Los valores de la resistencia de puesta a tierra de diversas configuraciones sencillas de electrodos colocados horizontalmente se calculan con auxilio de la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Sigma}} \cdot \ln \frac{B \cdot l^2}{t \cdot d_e}$$

donde l_{Σ} es la suma de la longitud de todos los elementos del electrodo y B un factor que depende de la construcción del electrodo.

Puesta a tierra

Electrodo superficial de toma de tierra	Factor B
Línea	1
Dos brazos en ángulo recto	1,46
Tres brazos, simétrico.	2,38
Cuatro brazos, simétrico	8,45
Seis brazos, simétrico.	19,2
Dos líneas paralelas, separadas a metros.	$l^2/4 \cdot a^2$
Cuadrado	5,53
Rectángulo, con relación de los lados: $l_1/l_2 = 1,5$	5,81
Rectángulo, con relación de los lados: $l_1/l_2 = 2$	6,42
Rectángulo, con relación de los lados: $l_1/l_2 = 3$	8,17
Rectángulo, con relación de los lados: $l_1/l_2 = 4$	10,4

(En todos los ejemplos que se dan en esta nota se supone que $\rho = 100 \Omega \cdot m$.)

Ejemplo 1.- Sea un electrodo simple, constituido por una pletina de 40 mm de ancho (b) y 5 mm de espesor (c), 5 metros de longitud, enterrada a 1 metro de profundidad en un terreno de resistividad, $\rho = 100 \Omega \cdot m$. El factor B tomado de la tabla anterior vale: $B = 1$.

El diámetro equivalente será: $d_e = 2 \cdot b / \pi = (2 \times 0,04) / \pi = 0,025 \text{ m}$.

La resistencia del electrodo de toma de tierra es:

$$\rho \quad B \cdot l^2 \quad 100 \quad 1 \times 5^2$$

Puesta a tierra

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Sigma}} \cdot \ln \frac{t \cdot d_e}{2 \times \pi \times 5} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times 5} \cdot \ln \frac{t \cdot d_e}{1 \times 0,025} =$$

$$3,18 \times \ln 1000 = 3,18 \times 6,9 = 22 \, \Omega.$$

Ejemplo 2.- Sea un electrodo constituido por dos barras de cinco metros, enterradas horizontalmente a un metro de profundidad, que se cruzan perpendicularmente en su punto medio ($B = 8,45$). Presenta los siguientes parámetros. $l = 2,5$ m y $d_e = 0,025$ m.

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Sigma}} \cdot \ln \frac{B \cdot l^2}{t \cdot d_e} = \frac{100}{2 \times \pi \times 10} \cdot \ln \frac{8,45 \times 2,5}{1 \times 0,025} = 1,59 \times \ln 2112,5 = 1,59 \times 7,66 = 12,2 \, \Omega.$$

2.1.2 Picas o electrodos verticales.

Las picas o electrodos verticales son barras metálicas o tubos largos clavados verticalmente en el suelo de forma que alcancen capas profundas del mismo. Como ya se ha indicado anteriormente, la resistividad del terreno depende considerablemente de la profundidad alcanzada, debido al mayor contenido de humedad que generalmente está presente en las capas más profundas. En consecuencia, las picas, en contacto con capas profundas, son especialmente útiles cuando se requiere un electrodo instalado en un área de superficie limitada, de gran densidad de edificación o en una superficie cubierta de asfalto u hormigón. Las picas verticales se suelen utilizar combinadas con electrodos de superficie con el fin de reducir al mínimo la resistencia total de puesta a tierra.

El inconveniente más importante que presenta la instalación de una pica vertical única es la desfavorable distribución del potencial superficial del terreno, que puede calcularse con la fórmula que sigue, suponiendo que la intensidad de defecto a tierra, I_D , está distribuida uniformemente a lo largo de toda la longitud del electrodo.

$$V_x = \frac{\rho \cdot I_D}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{\sqrt{x^2 + l^2} - l}$$

Donde:

x- es la distancia desde el electrodo de toma de tierra.

l- es la longitud del electrodo.

Las demás magnitudes análogas a las dadas para el electrodo superficial.

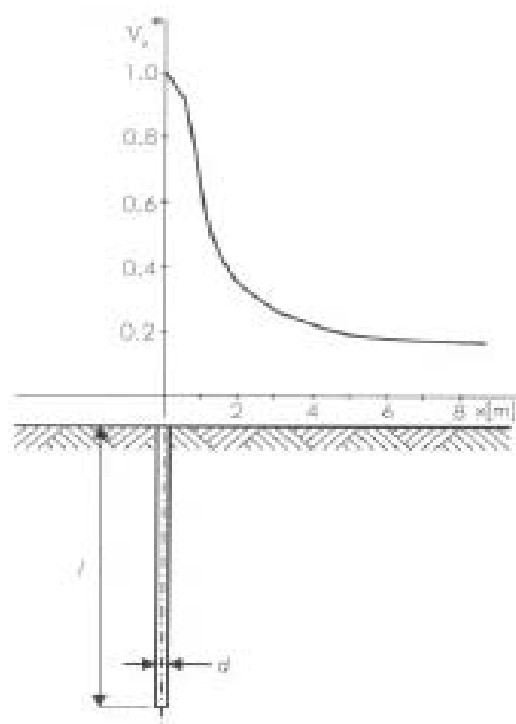


Figura 5 - Distribución del potencial en la superficie del terreno: $V_x = f(x)$, alrededor de una pica vertical de puesta a tierra, de una longitud $l = 3 \text{ m}$ y un diámetro $d = 0,04 \text{ m}$.

En la figura 5 se presenta un ejemplo de distribución relativa del potencial para ciertas dimensiones de la pica. La comparación con la distribución del potencial de superficie del electrodo horizontal muestra que los gradientes de potencial en la superficie del terreno son considerablemente más elevados en una pica vertical y, por tanto, las tensiones de paso y contacto serán más peligrosas. El valor aproximado de la resistencia de una pica vertical será:

$$\rho \quad 4 \cdot l^2$$

Puesta a tierra

$$R_{\text{pica}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{r} \quad \text{donde } r \text{ es el radio de la pica}$$

En el caso de n picas verticales en paralelo instaladas en línea a una distancia uniforme, a , una de otra, la resistencia de tierra efectiva será:

$R = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_i \right) \cdot k$ donde $R_1, R_2, R_3, R_4, \dots, R_n$, son las resistencias de puesta a tierra

$\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_i \right) \cdot k$ calculadas independientemente para cada pica por separado, asumiendo que no se ven afectadas por la presencia de las otras picas

y k es un coeficiente de "ocupación" mayor que uno debido a la influencia mutua de los campos eléctricos producidos por las picas adyacentes.

Se puede asumir que para $a \geq 2 \cdot l$, $k \approx 1,25$; y para $a \geq 4 \cdot l$, $k \approx 1$.

Ejemplo 3.- Calcular la resistencia de puesta a tierra de una pica instalada en posición vertical, con un diámetro de 20 mm y una longitud de 5 m.

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{r} = \frac{100}{4 \cdot \pi \cdot 5} \cdot \ln \frac{4 \cdot 5}{0,01} = 1,5915 \cdot \ln 10^6 = 1,5915 \times 13,8155 = 21,99 \, \Omega.$$

2.1.3 Electrodo mallados.

Los electrodos mallados se utilizan principalmente en sistemas de puesta a tierra en grandes superficies, por ejemplo en subestaciones transformadoras. La rejilla que constituye el electrodo se construye de acuerdo con las dimensiones de la instalación de tal manera que se asegure una favorable y aproximadamente uniforme distribución del potencial superficial del terreno.

La resistencia de puesta a tierra de los electrodos mallados puede calcularse mediante la fórmula simplificada siguiente:

Puesta a tierra

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot r_e} + \frac{\rho}{l_{\Sigma}} \quad \text{donde:}$$

- r_e es el radio equivalente y
- l_{Σ} es la suma de la longitud de los lados de todas las mallas de la rejilla.

Para áreas cuadradas, o aproximadamente cuadradas, el radio equivalente sería el correspondiente a una superficie igual a la superficie real.

Para áreas rectangulares, el radio equivalente sería igual a la suma de los lados exteriores dividida por π

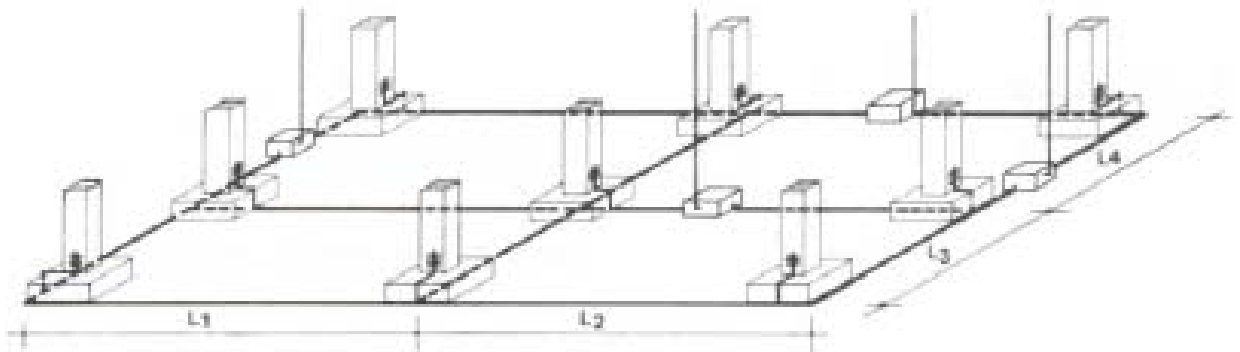


Figura 6 - esquema del diagrama de un electrodo de puesta a tierra mallado

Ejemplo 4.- Calcular la resistencia de puesta a tierra de un electrodo rectangular en forma de rejilla, instalado horizontalmente, con las dimensiones indicadas en la figura 6.

El radio equivalente, r_e , valdrá:

Puesta a tierra

$$r_e = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{(4 \times 4,5)/\pi} = 2,39 \text{ m}$$

La suma de la longitud de los lados de una malla es: $(1,5 + 1) \times 2 = 5 \text{ m}$, y la suma de la longitud de todas las mallas será:

$$l_{\Sigma} = 5 \times 12 \text{ mallas} = 60 \text{ m.}$$

Por tanto, la resistencia del electrodo de puesta a tierra será:

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot r_e} + \frac{\rho}{l_{\Sigma}} = \frac{100}{4 \times 2,39} + \frac{100}{60} = 10,46 + 1,67 \approx 12,13 \Omega.$$

2.1.4 Electrodo en la cimentación.

También pueden utilizarse como electrodos de toma de tierra las piezas metálicas empotradas en contacto directo con la masa del hormigón de los cimientos del edificio. El hormigón empotrado directamente en el terreno presenta un contenido natural de humedad por lo que, por lo que se ha indicado anteriormente, en grandes masas, puede considerarse un material conductor, con una conductividad similar a la del terreno circundante. Debido a la gran superficie de contacto que presenta este tipo de electrodos, pueden conseguirse unos valores de la resistencia de puesta a tierra bastante bajos. Por otro lado, como el hormigón protege estas partes metálicas contra la corrosión, los elementos de hierro del electrodo empotrados en el hormigón no necesitan ninguna protección adicional contra esta agresión. En la actualidad, se recomienda la utilización de electrodos de toma de tierra metálicos incorporados a la cimentación como una solución muy práctica para la puesta a tierra de las instalaciones de los edificios.

En la práctica, cuando se utilizan como electrodos de puesta a tierra la parte enterrada de la cimentación de los edificios, existen dos tipos de configuración básica:

- Cimentación sin refuerzo en el hormigón.
- Cimientos de hormigón armado con varillas de acero.

Puesta a tierra

En ambos casos, los electrodos de puesta a tierra empotrados en el hormigón pueden estar constituidos por:

- Pletinas de acero de sección rectangular no inferior a 30x3,5 mm, ó
- Barras de acero de sección circular con un diámetro no inferior a 10 mm.

Los elementos de acero pueden estar galvanizados, es decir, recubiertos con una capa de zinc, aunque esto no es necesario si el espesor de la capa de hormigón que cubre el electrodo es de más de 50 mm, ya que el hormigón proporciona suficiente protección contra la corrosión.

En una cimentación sin armadura en el hormigón el electrodo sigue normalmente el contorno de los cimientos del edificio, es decir, está situado debajo de los muros externos. En los edificios con una cimentación muy extensa, el electrodo adopta la forma de bucles que cubren partes de los perfiles de la cimentación y están conectados entre si.

En una cimentación con armadura de hierro en el hormigón, el electrodo de puesta a tierra se sitúa encima de la capa más baja del refuerzo del mallazo, asegurando así la adecuada protección del electrodo contra la corrosión. El electrodo debe estar unido eléctricamente al mallazo con tramos de cable desnudo a intervalos de no más de dos metros a lo largo de toda la longitud del electrodo. No es preciso efectuar una conexión eléctrica muy concienzuda en cada punto porque la conducción eléctrica principal se efectúa a través del hormigón. Si la cimentación está constituida por paneles de cemento separados por juntas de dilatación no conductoras, los electrodos de tierra de cada panel deben estar conectados unos con otros. Estas conexiones deben ser flexibles y realizadas de manera que permitan realizar mediciones y operaciones de mantenimiento.

La resistencia de una puesta a tierra a través de la cimentación se puede calcular utilizando la expresión simplificada siguiente:

$$R = 0,2 \cdot \frac{\rho}{\sqrt[3]{V}} \quad \text{donde } V \text{ es el volumen de la cimentación enterrada en m}^3.$$

El conductor de tierra, o línea de enlace de la instalación de puesta a tierra, une el electrodo de toma de tierra con el borne principal de tierra, que enlaza con los conductores de protección y equipotencialidad. Debe terminar a una altura

mínima de 1,5 m por encima del nivel del suelo. La conexión del electrodo de puesta a tierra de la cimentación con la protección contra los rayos debe estar situada fuera del edificio.

2.2 Conclusiones

Resumiendo lo indicado anteriormente, se puede decir que un Sistema de Puesta a Tierra debe presentar:

- a) una resistencia de puesta a tierra lo más baja posible en las condiciones climatológicas más desfavorables,
- b) una distribución del potencial de tierra superficial tal, que las tensiones de "paso" y "contacto" no superen los valores permitidos,
- c) una capacidad conductora suficiente. Esto es, debe ser capaz de evacuar la mayor corriente de defecto previsible sin que se produzca un calentamiento excesivo de sus elementos ni del terreno circundante y
- d) una durabilidad compatible con la vida útil prevista para la instalación, que se estima en unos treinta años.

En el caso de los electrodos de puesta a tierra, su durabilidad depende principalmente de su capacidad para soportar la corrosión, provocada principalmente de la presencia de:

En el caso de los electrodos de puesta a tierra, su durabilidad depende principalmente de su capacidad para soportar la corrosión, provocada principalmente de la presencia de:

- a) corrientes continuas vagabundas en el terreno;
- b) contaminación química del terreno
- c) fenómenos electroquímicos galvánicos por contacto entre diversos metales presentes en el terreno.

Puesta a tierra

Como colofón a lo dicho, de acuerdo con el contenido de la Norma Tecnológica de la Edificación NTE-IEP "Puesta a tierra", donde se resumen las consideraciones a tener en cuenta en el diseño y realización de las Puestas a Tierra, se recomienda que en los edificios, (figura 7) se conectarán a la puesta a tierra:

- a) - la instalación de pararrayos, según NTE-IPP - "Pararrayos"
- b) - la instalación de antena colectiva de TV y FM, según NTE-IAA - "Antenas".
- c) - los enchufes eléctricos y las masas metálicas comprendidas en los aseos y baños, según NTE-IEB - "Baja tensión"
- d) - las instalaciones de fontanería, gas y calefacción, depósitos, calderas, guías de aparatos elevadores y en general todo elemento metálico importante, según NTE-IEB - "Baja tensión" (Entendemos, de acuerdo con el contenido del punto 413.2.7 de la norma UNE 20460-4-41, que todo elemento conductor, que presente una resistencia respecto a la tierra de referencia superior a $100\text{ k}\Omega$ es una parte conductora encerrada en una envolvente aislante por lo que no debe estar conectada a un conductor de protección.)
- e) - las estructuras metálicas y armaduras de muros y soportes de hormigón.

Puesta a tierra

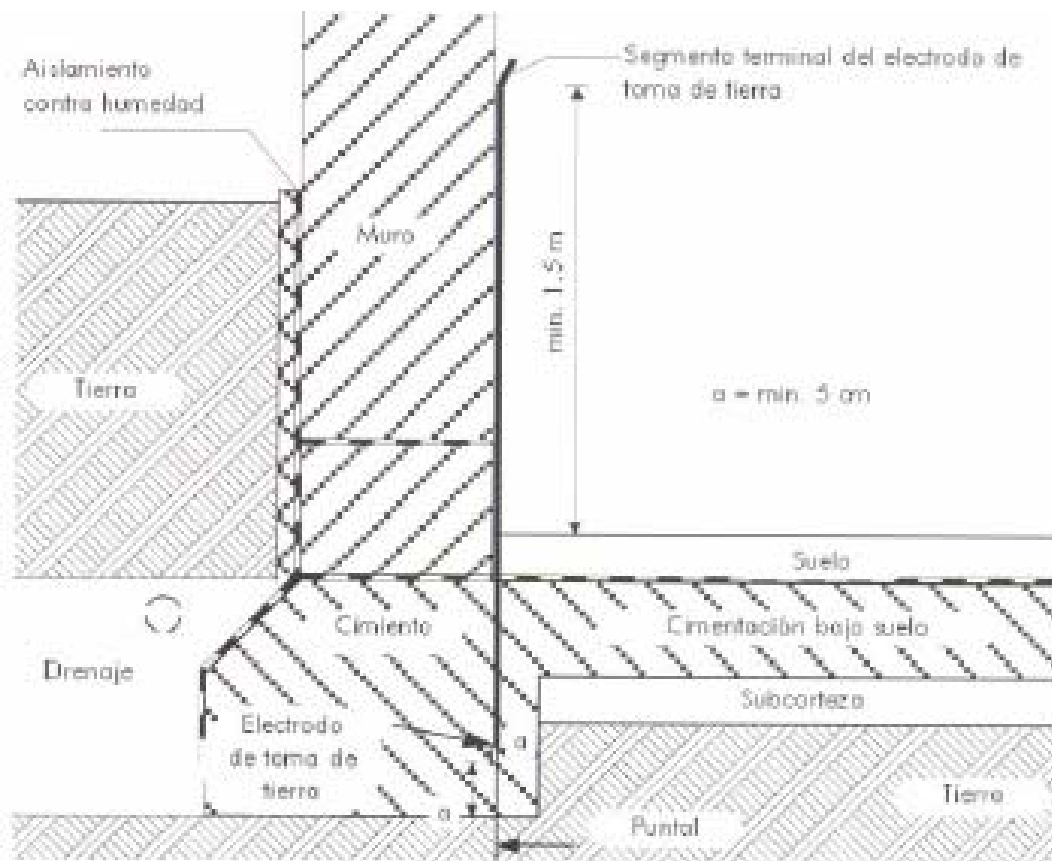


Figura 7 - electrodo de puesta a tierra en la cimentación de un edificio (NTE-CPI)

La citada Norma Tecnológica de la Edificación NTE-IEP denomina y define los siguientes elementos, citados al referirnos a la instalación de puesta a tierra:

IEP-1 -Cable conductor.- De cobre desnudo recocido, de 35 mm² de sección nominal. Cuerda conductora con un máximo de 7 alambres. Resistencia eléctrica a 20°C no superior a 0,514 Ω/km.

IEP-2 -Electrodo de pica.- De acero recubierto de cobre. Diámetro 1,4 cm. Longitud 200 cm.

IEP-3 -Punto de puesta a tierra. - Pletina de cobre amovible recubierta de cadmio, con apoyos de material aislante situada en una arqueta de conexión IEP-6, que enlazará el conductor de tierra (IEP-1) con los cables conductores de las líneas principales de bajada a tierra del edificio (protección o equipotencialidad).

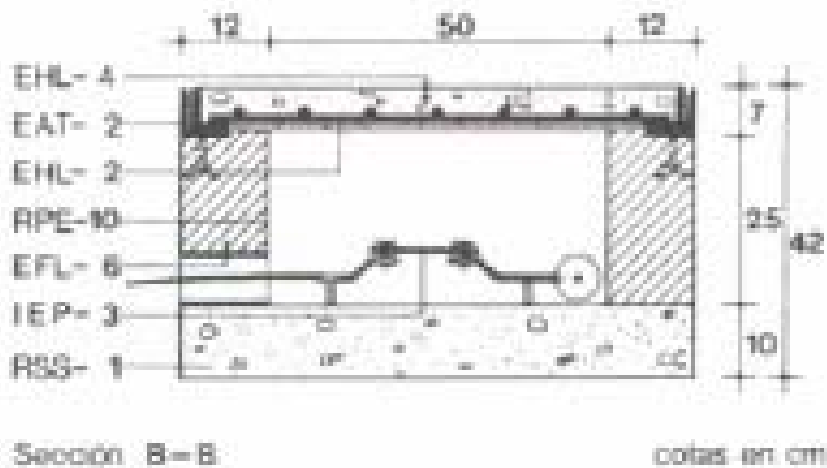


Figura 8 - IEP-6 - Arqueta de conexión en la que se encuentra el punto de puesta a tierra IEP-3, descrito en la NTE-IEP

3 Conductor de tierra o línea de enlace con el electrodo de puesta a tierra.

De acuerdo con el apartado 542.3 de la norma UNE 20460-5-54, que coincide con el apartado 3.2 de la ITC-BT-18 del REBT, el conductor de tierra, que enlaza el electrodo de puesta a tierra con el borne principal de tierra, que ya se ha mencionado anteriormente, deberá satisfacer las prescripciones del apartado 543.1, y cuando están enterrados deberán estar de acuerdo con los valores de la tabla 54 A. (Tabla 1 de la ITC-BT 18 del REBT).

Tabla 54 A - Secciones mínimas convencionales de los conductores de tierra.

	Protegido mecánicamente.	No protegido mecánicamente.
Protegido contra la corrosión.	Según el apartado 543.1.(*)	16 mm ² cobre. 16 mm ² acero

Puesta a tierra

	galvanizado.
No protegido contra la corrosión	25 mm ² cobre. 50 mm ² acero

(*) se refiere al cálculo de las secciones mínimas de los conductores de protección.

4 Borne principal de tierra o punto de puesta a tierra.

En el punto 542.4 de la norma UNE 20460-5-54 y el 3.3 de la ITC-BT-18 del vigente Reglamento de baja tensión dice:

"En toda instalación de puesta a tierra debe preverse un borne principal de tierra, al cual deben unirse los conductores siguientes:

- los conductores de tierra.
- los conductores de protección
- los conductores de unión equipotencial principal.
- los conductores de puesta a tierra funcional, si son necesarios.

Debe preverse sobre los conductores de tierra y en lugar accesible, un dispositivo que permita medir la resistencia de la toma de tierra correspondiente. Este dispositivo puede estar combinado con el borne principal de tierra, debe ser desmontable necesariamente por medio de un útil, tiene que ser mecánicamente seguro y debe asegurar la continuidad eléctrica".

Por otro lado, los puntos 3.2 y 3.3 de la ITC-BT-25 señalan:

3.2 - Elementos a conectar a tierra.

"A la toma de tierra establecida se conectará toda masa metálica importante existente en la zona de la instalación, y las masas metálicas accesibles de los aparatos de los aparatos receptores, cuando su clase de aislamiento o condiciones de instalación así lo exijan.

A esta misma toma de tierra deberán conectarse las partes metálicas de los depósitos de gasóleo, de las instalaciones de calefacción general, de las

instalaciones de agua, de las instalaciones de gas canalizado y de las antenas de radio y televisión".

3.3 - Puntos de puesta a tierra.

"Los puntos de puesta a tierra se situarán:

- a) En los patios de luces destinados a cocinas y cuartos de aseo, etc., en la rehabilitación o reforma de edificios existentes.
- b) En el local o lugar de centralización de contadores.
- c) En la base de las estructuras metálicas de los ascensores y montacargas, si los hubiere.
- d) En el punto de ubicación de la caja general de protección.
- e) En cualquier local donde se prevea la instalación de elementos destinados a servicios generales o especiales, y que por su clase de aislamiento o condiciones de instalación, deban ponerse a tierra".

5 Líneas principales de tierra y derivaciones.

Son los que enlazan los puntos de puesta a tierra con el resto de los conductores de la red de protección de la instalación (conductores de protección y de equipotencialidad). Tanto los conductores que constituyen las líneas principales de tierra como sus derivaciones se establecerán en las mismas canalizaciones por las que discurran las líneas generales de alimentación y las derivaciones individuales.

Para el caso de la rehabilitación de instalaciones antiguas, el punto 3.4 de la ITC-BT-26 dice:

"Únicamente es admitida la entrada directa de las derivaciones de la línea principal de tierra en cocinas y cuartos de aseo, cuando, por la fecha de construcción del edificio, no se hubiese previsto la instalación de conductores de protección. En este caso, las masas de los aparatos receptores, cuando sus condiciones de instalación lo exijan, podrán ser conectadas a la derivación de

la línea principal de tierra directamente, o bien a través de tomas de corriente que dispongan de contacto de puesta a tierra. Al punto o puntos de puesta a tierra indicados como a) en el apartado anterior, se conectarán las líneas principales de tierra. estas líneas podrán instalarse en los patios de luces o por canalizaciones interiores, con el fin de establecer a la altura de cada planta del edificio su derivación hasta el borne de conexión de los conductores de protección de cada local o vivienda".

Las líneas principales de tierra estarán constituidas por conductores de cobre de igual sección que la establecida para los conductores de protección, que se tratarán más adelante, con una sección mínima de 16 mm².

La sección de los conductores que constituyen las derivaciones de la línea principal de tierra, será la señalada para los conductores de protección.

No deberán utilizarse como conductores de tierra las tuberías de agua, gas, calefacción, desagües, conductos de evacuación de humos o basuras, ni las cubiertas metálicas de los cables, tanto de la instalación eléctrica como de teléfonos o de cualquier otro servicio similar, ni las partes conductoras de los sistemas de conducción de los cables: tubos, canales y bandejas.

Las conexiones de los conductores de tierra se realizarán mediante dispositivos con tornillos de apriete u otros similares, que garanticen una continua y perfecta conexión entre aquellos.

La identificación de los conductores de la red de tierras de la instalación (línea principal de tierra, derivaciones, conductores de protección o de equipotencialidad) se verificará por la coloración verde-amarillo de su cubierta.

6 Conductores de protección

Como se indica en el apartado 3.4 de la ITC-BT-18 del REBT, los conductores de protección sirven para unir eléctricamente las masas de una instalación a ciertos elementos con el fin de asegurar su protección contra los contactos indirectos

En el circuito de conexión a tierra, los conductores de protección unirán las masas conductoras, susceptibles de ponerse en tensión en caso de defecto, al conductor de tierra a través del borne principal de tierra al que estarán conectados por medio de la línea principal de tierra y sus derivaciones.

Como se indica en el punto 413.2.7, de la norma UNE 20460-4-41 - "Protección contra los choques eléctricos", las partes conductoras encerradas en una envolvente aislante no deben estar conectadas a un conductor de protección. Se entiende que esta parte conductora está aislada de la instalación si supera los valores mínimos de la resistencia de aislamiento citados en la tabla 61 A de la norma UNE 20460-6-61.

Tabla 61 A.

Valores mínimos de la resistencia de aislamiento.

Tensión nominal del circuito (V)	Tensión de ensayo en c.c. (V)	Resistencia de aislamiento. (MΩ)
MBTS ó MBTP	250	≥ 0,25
Inferior o igual a 500V, con excepción del caso anterior	500	≥ 0,5
Superior a 500 V	1000	≥ 1.0

La sección de los conductores de protección debe ser suficiente para evacuar a tierra la máxima corriente de defecto que pueda presentarse en la instalación. La corriente máxima se producirá en caso de cortocircuito. Por lo tanto, la sección de los conductores de protección se determinara de acuerdo con el contenido de la norma UNE 21145 - "Guía sobre la aplicación de los límites de temperatura de cortocircuito de los cables eléctricos de tensión nominal no superior a 0,6/1 kV".

En dicha norma se facilita la fórmula general siguiente:

$$I_{CC}^2 \cdot t_{CC} = K^2 \cdot S^2 \cdot \ln \left| \frac{(\theta_f + \beta)}{(\theta_i + \beta)} \right| \quad \text{donde:}$$

- I_{CC} - es la intensidad del cortocircuito prevista (en amperios)
- t_{CC} - es el tiempo de duración del cortocircuito (en segundos)
- K - es una constante que depende del material conductor (en $A \cdot s^{1/2} / mm^2$)
- S - es la sección del conductor (en mm^2)

Puesta a tierra

- θ_f - temperatura del conductor al final del cortocircuito (en °C)
- θ_i - temperatura inicial del conductor antes de producirse el cortocircuito (en °C)
- β - es la inversa del coeficiente de variación de la resistencia del conductor con la temperatura a 0°C (en °C).

$$K^2 = \frac{Q_C \cdot (\beta + 20)}{\rho_{20}} \quad \text{donde:}$$

- Q_C - es el calor específico del conductor por unidad de volumen a 20°C (en J/°C·mm³)
- ρ_{20} - resistividad del conductor a 20°C (en Ω·mm).

Las constantes utilizadas en las fórmulas anteriores se indican en la tabla siguiente:

Material	K(en A·s ¹⁷² /mm ²)	β (en °C)	Q_C (en J/°C·mm ³)	ρ_{20} (en Ω·mm).
Cobre	226	234,5	$3,45 \times 10^{-3}$	$17,241 \times 10^{-6}$
Aluminio	148	228	$2,50 \times 10^{-3}$	$28,264 \times 10^{-6}$
Acero	78	202	$3,80 \times 10^{-3}$	138×10^{-6}

A título de ejemplo, calculemos el valor de K^2 para un conductor de cobre:

$$K^2 = \frac{Q_C \cdot (\beta + 20)}{\rho_{20}} = \frac{3,45 \times 10^{-3} \cdot (234,5 + 20)}{17,241 \times 10^{-6}} = \frac{878,025 \times 10^{-3}}{17,241 \times 10^{-6}} = 50,9265 \times 10^3$$

La temperatura máxima aceptable en un conductor aislado, en condiciones de cortocircuito, depende de la naturaleza del material aislante en contacto con el material conductor. Así, el valor de θ_f en un cable aislado con un material termoplástico, tipo PVC, es de 160°C y en un material termoestable, tipo XLPE, es de 250°C. Las temperaturas iniciales, antes del cortocircuito serían las normales de trabajo del cable: 70°C para el PVC y 90°C para el XLPE.

Puesta a tierra

Si aplicamos estos valores para el caso de un conductor de cobre aislado con polietileno reticulado (XLPE) a la fórmula dada para la determinación de la corriente de cortocircuito admisible queda:

$$\begin{aligned}
 & \frac{484,5}{\ln \frac{250 + 234,5}{324,5}} = \frac{I_{CC}^2 \cdot t_{CC}}{K^2 \cdot S^2 \cdot \ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}} = 50,9265 \times 10^3 \cdot S^2 \cdot \ln \frac{250 + 234,5}{324,5} = 50,9265 \times 10^3 \cdot S^2 \cdot \ln 1,493 \\
 & \frac{\sqrt{I_{CC}^2 \cdot t_{CC}}}{S} = 50,9265 \times 10^3 \times S^2 \times \ln 1,493 = 20412 \times S^2; \quad I_{CC}^2 \cdot t_{CC} = 20412 \cdot S^2; \quad S = \frac{\sqrt{I_{CC}^2 \cdot t_{CC}}}{142,87}
 \end{aligned}$$

La expresión que aparece en la norma UNE 20460-5-54, apartado 543.1.1, a la que nos remite el REBT es la siguiente:

El valor de k , que en el ejemplo que hemos citado anteriormente, (conductor

$S = \frac{\sqrt{I_{CC}^2 \cdot t_{CC}}}{k}$ de cobre, aislado con polietileno reticulado-XLPE) ha resultado por cálculo

ser $k = 142,87$, también se puede obtener a partir de la tabla 54C de dicha norma, donde se observa que nos da el valor: $k = 143$.

Tabla 54 C.-

Valores de k para los conductores de protección que constituyen un cable multiconductor.

	Naturaleza del aislamiento.		
	Policloruro de vinilo (PVC)	Polietileno reticulado (XLPE) Etileno propileno (EPR)	Caucho butilo
Temperatura inicial	70°C	90°C	85°C
Temperatura final	160°C	250°C	220°C

Puesta a tierra

Material conductor del			
Cobre	115	<u>143</u>	134
Aluminio	76	94	89

Para el ejemplo anterior, $k = 143$.

Como se supone que, en condiciones de cortocircuito y con dispositivos de protección adecuados que desconecten la instalación en un tiempo muy breve, del orden de un segundo, las secciones adoptadas para los conductores de fase están sobradamente dimensionadas para soportar las eventuales corrientes de cortocircuito, se admite la adopción para las secciones de los conductores de protección las obtenidas a partir de las premisas establecidas en la tabla 2 de la ITC-BT-18:

Tabla 2. Relación entre las secciones de los conductores de protección y los de fase:

Sección de los conductores de fase de la instalación. (S en mm ²)	Sección mínima de los conductores de protección (S _P en mm ²)
$S \leq 16$	$S_P = S$
$16 < S \leq 35$	$S_P = 16$
$S > 35$	$S_P = S/2$

Si la aplicación de la tabla conduce a valores no normalizados, se han de utilizar los conductores que tengan la sección normalizada superior más próxima.

Los valores de la tabla 2 sólo son válidos en el caso de que los conductores de protección hayan sido fabricados del mismo material que los conductores activos, de no ser así, las secciones de los conductores de protección se determinarán de forma que presenten una conductividad equivalente a la que resulta aplicando la tabla 2.

En todos los casos, los conductores de protección que no forman parte de la canalización de alimentación serán de cobre con una sección, al menos de:

Puesta a tierra

- 2,5 mm², si los conductores de protección disponen de una protección mecánica.

- 4 mm², si los conductores de protección no disponen de una protección mecánica.

Deberá tenerse en cuenta, también, el contenido del apartado 522, de la norma UNE 20460-5-52 referente a la selección e instalación de los conductores en función de las influencias externas, por lo que estos conductores deberán ser adecuados a las características generales de la instalación..

Cuando el conductor de protección sea común a varios circuitos, la sección de ese conductor debe dimensionarse en función de la mayor sección de los conductores de fase.

Pueden utilizarse como conductores de protección conductores específicos en los cables multiconductores, o conductores aislados o desnudos que posean una envolvente común con los conductores activos, o conductores separados desnudos o aislados. En todos los casos, estos conductores deberán diferenciarse claramente de los demás, generalmente por la coloración amarillo-verde de sus cubiertas o aislamientos.

Cuando la instalación consta de partes de envolventes metálicas de conjuntos montadas o de canalizaciones prefabricadas con envolvente metálica, estas envolventes pueden ser utilizadas como conductores de protección si satisfacen, simultáneamente, las tres condiciones siguientes:

a) Su continuidad eléctrica debe realizarse de forma que esté protegida contra los deterioros mecánicos, químicos o electroquímicos.

b) Su conductibilidad debe ser, como mínimo, igual a la que resulta de la aplicación de los calculos anteriores.

c) Deben permitir la conexión de otros conductores de protección en toda derivación predeterminada (sólo aplicable en conductores de protección exteriores).

Las cubiertas metálicas (desnudas o aisladas) de ciertas canalizaciones, en particular la cubierta exterior de los conductores blindados con aislante mineral, y ciertos conductos y argollas metálicas, pueden utilizarse como conductores de protección de los circuitos correspondientes, si satisfacen simultáneamente las condiciones a) y b) anteriores..

Otros conductos metálicos (de agua, gas u otros tipos) o estructuras metálicas ajenos a la instalación eléctrica, no pueden servir de conductores de protección.

Los elementos conductores pueden utilizarse como conductores de protección si satisfacen, simultáneamente, las cuatro condiciones siguientes:

- a) Su continuidad eléctrica está asegurada, ya sea por construcción, ya sea por medio de conexiones apropiadas, de manera que estén protegidas contra deterioros mecánicos, químicos o electroquímicos y contra esfuerzos electrodinámicos.
- b) Su conductibilidad debe ser, como mínimo, igual a la que resulta de la aplicación de los cálculos anteriores.
- c) Sólo podrán ser desmontados si se han previsto medidas compensatorias.
- d) Hayan sido estudiados y adaptados para este uso.

Las canalizaciones metálicas de agua no satisfacen, normalmente, estas condiciones y las condiciones de gas no deben ser utilizadas como conductores de protección. Como se ha indicado anteriormente, en general se desaconseja el empleo de los conductores PEN, o CPN, (neutro y protección comunes).

Las conexiones deben ser accesibles para la verificación y ensayos, a excepción de aquellas efectuadas en cajas selladas con material de relleno o en cajas no desmontables con juntas estancas.

Ningún aparato deberá intercalarse en el conductor de protección, aunque para los ensayos podrán utilizarse conexiones desmontables mediante útiles adecuados.

Las masas de los equipos a unir con los conductores de protección, no deben estar conectadas en serie en un circuito de protección, con excepción de las envolventes montadas en fábrica o canalizaciones prefabricadas mencionadas anteriormente.

7 Puesta a tierra por razones de protección

Para las medidas de protección de los esquemas TN, TT e IT, nos remitimos al contenido de la Instrucción ITC-BT-24 del REBT o el capítulo 41 de la norma UNE 20460-4-41 que, como se recordará, coincide con el Documento de Armonización HD 384.1 S2 del CENELEC, que a su vez se adapta a la Norma Internacional CEI 60364-1.

Cuando se utilicen dispositivos de protección contra sobrecorrientes para la protección contra los choques eléctricos, será preceptiva la incorporación del conductor de protección en la misma canalización que contiene los conductores activos o en su proximidad inmediata.

Por lo que se refiere a las tomas de tierra y conductores de protección para los dispositivos de control de tensión de defecto, la toma de tierra auxiliar del dispositivo debe ser eléctricamente independiente de todos los demás elementos metálicos puestos a tierra, tales como elementos de construcciones metálicas, conducciones metálicas, cubiertas metálicas de los cables, etc. Esta condición se considera satisfecha si la toma de tierra auxiliar se instala a una distancia suficiente de todo elemento metálico puesto a tierra, de tal manera que quede fuera de la zona de influencia de la puesta a tierra principal.

La unión a esta toma de tierra auxiliar debe estar aislada, con el fin de evitar todo contacto con el conductor de protección o los elementos que estén conectados o con los elementos conductores que puedan estar o estén en contacto con ellos.

Esta prescripción es necesaria con el fin de evitar que el elemento sensible a la tensión no sea cortocircuitado por inadvertencia.

El conductor de protección no debe estar unido mas que a las masas de aquellos equipos eléctricos cuya alimentación pueda ser interrumpida cuando el dispositivo de protección funcione en las condiciones de defecto.

8 Puesta a tierra por razones funcionales

Las puestas a tierra por razones funcionales deben realizarse de forma que aseguren el funcionamiento correcto del equipo y permitan un funcionamiento correcto y fiable de la instalación.

9 Puesta a tierra por razones combinadas de protección y funcionales

Cuando la puesta a tierra sea necesaria a la vez, por razones de protección y funcionales, prevalecerán las prescripciones de las medidas de protección.

Si bien ya se ha indicado que, en general, no es aconsejable la utilización de los conductores mixtos de protección y neutro (CPN ó PEN), en el esquema TN, cuando en las instalaciones fijas el conductor de protección tenga una sección al menos igual a 10 mm^2 , en cobre o aluminio, las funciones de conductor de protección y de conductor neutro pueden combinarse, a condición de que la parte de la instalación común no se encuentre protegida por un dispositivo de protección de corriente diferencial residual.

Sin embargo, la sección mínima de un conductor CPN puede ser de 4 mm^2 , a condición de que el cable sea de cobre y del tipo concéntrico y que las conexiones que aseguran la continuidad estén duplicadas en todos los puntos de conexión sobre el recorrido del conductor externo. El conductor CPN concéntrico debe utilizarse a partir del transformador y debe limitarse a aquellas instalaciones en las que se utilizan accesorios concebidos para este fin.

El conductor CPN debe estar aislado para la tensión más elevada a la que puede estar sometido, con el fin de evitar las corrientes de fuga

El conductor CPN no tiene necesidad de estar aislado en el interior de los aparatos.

Si a partir de un punto cualquiera de la instalación, el conductor neutro y el conductor de protección están separados, no estará permitido conectarlos entre sí en la continuación del circuito por detrás de este punto. En el punto de separación, deben preverse bornes o barras separadas para el conductor de protección y para el conductor neutro. El conductor CPN debe estar unido al borne o a la barra prevista para el conductor de protección.

10 Conductores de equipotencialidad

Se denomina conductor de equipotencialidad a un conductor de protección que asegura una conexión equipotencial, esto es, que pone al mismo potencial, o a potenciales prácticamente iguales, a partes conductoras simultáneamente

accesibles. Como al resto de los conductores de protección, se identifican por la coloración amarillo-verde de su cubierta.

El conductor principal de equipotencialidad deberá tener una sección no inferior a la mitad del mayor conductor de protección de la instalación, con un mínimo de 6 mm^2 . Sin embargo, su sección puede estar limitada a $2,5 \text{ mm}^2$, si es de cobre o a la sección equivalente si es de otro material conductor.

Si un conductor de equipotencialidad suplementario uniera dos masas, su sección no será inferior a la más pequeña de la de los conductores de protección unidos a dichas masas. Si el conductor suplementario de equipotencialidad uniera una masa a un elemento conductor, su sección no será inferior a la mitad de la del conductor de protección unido a esta masa. Este conductor, caso de ser necesario, debe ser tal que pueda adaptarse a las influencias externas de la instalación y ajustarse a las secciones mínimas de:

- $2,5 \text{ mm}^2$, si los conductores de equipotencialidad disponen de una protección mecánica.

- 4 mm^2 , si los conductores de equipotencialidad no disponen de una protección mecánica.

La unión equipotencial suplementaria puede estar asegurada, bien por elementos conductores no desmontables, tales como armazones metálicos, bien por conductores suplementarios o por combinación de los dos.