

“DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA”

*Elaborado por: Ing. Frank Amores Sánchez,
Especialista PCI, APCI.*



El objetivo de este trabajo es brindar a todos los especialistas relacionados con las instalaciones de puesta a tierra para la protección contra rayo, los elementos básicos que permitan su diseño. Se incluyen las expresiones de cálculo de resistencia a tierra de los diferentes tipos y configuraciones de electrodos más apropiados para cada situación y algunos gráficos que ilustran los factores más importantes que influyen en su comportamiento.

Constitución de una instalación de puesta a tierra

Una instalación de puesta a tierra se compone, esencialmente, de un grupo de electrodos (elementos metálicos que se hallan en contacto íntimo con el suelo) y de una red de conductores que los conectan a las partes del sistema eléctrico que deben ser puestas a tierra.

Existen otros elementos que contribuyen a dispersar las corrientes del rayo o de una falla eléctrica en el terreno, como son: el acero enterrado de la cimentación y el acero estructural de la edificación, las tuberías metálicas, la envoltura metálica de cables, etc. Sin embargo, en años recientes, debido al uso creciente del plástico en la funda de cables soterrados y en las tuberías de suministro y de drenaje de agua, ha ocurrido una pérdida de la eficiencia general de los sistemas de puesta a tierra. Por estas razones, ahora más que nunca, es importante asegurar que las instalaciones de puesta a tierra sean correctamente diseñadas, instaladas y mantenidas.

Estudio previo para el diseño de una instalación de puesta a tierra

El proceso de diseño de una instalación de puesta a tierra tiene que comenzar con un estudio exhaustivo del sitio donde se prevé su emplazamiento. Este estudio deberá incluir:

- el examen de todos los sistemas tecnológicos existentes (eléctricos normal y de emergencia, de telecomunicaciones, de protección contra sobretensiones, de seguridad, etc.),
- el análisis de la resistividad del suelo a varias profundidades y
- la exploración de limitaciones físicas del suelo, como son: el área disponible, la existencia de roca sólida a poca profundidad y la presencia de conducciones metálicas enterradas para electricidad, agua o gas.



Resistencia del electrodo de tierra

La dispersión de la corriente del rayo mediante un electrodo de tierra no ocurre en un punto del terreno, sino en un volumen específico de este alrededor de dicho electrodo.

Para asegurar que las tensiones que afectan la superficie del terreno (tensiones de contacto y de paso) no alcancen valores peligrosos, tienen que seleccionarse adecuadamente el tipo de electrodo de tierra y la manera de instalación.

La resistencia R_A de un electrodo de tierra puede explicarse mejor con ayuda de una esfera metálica enterrada. Ver Figura 1. Si la esfera está enterrada a suficiente profundidad, la corriente se dispersa radialmente y se distribuye igualmente sobre toda la superficie de la misma.

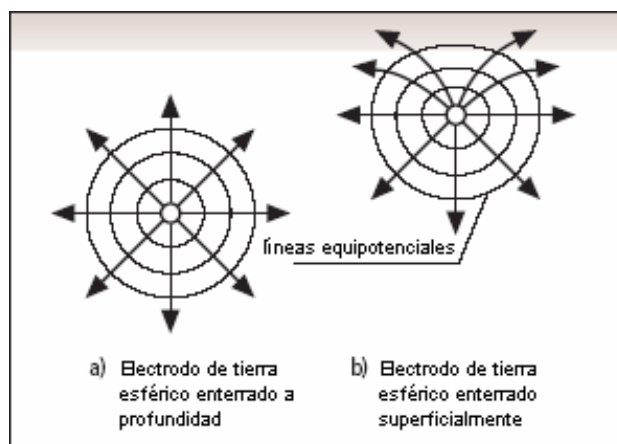


Fig. 1 Distribución de corriente del electrodo de tierra esférico

Los círculos concéntricos alrededor de la esfera representan superficies de igual potencial. La resistencia R_A del electrodo de tierra está compuesta por las resistencias parciales de los círculos individuales conectados en serie. La resistencia de una capa de la esfera se calcula como:

$$R_A = \rho_E \cdot \frac{l}{q}$$

donde:

ρ_E Resistividad del suelo, asumiendo que es homogéneo

l Espesor de una capa imaginaria de la esfera

q Superficie media de la capa de la esfera

Para ilustrar este ejemplo, asúmase una esfera metálica de 20 cm de diámetro enterrada a una profundidad de 3 m con una resistividad del terreno de 200 $\Omega \cdot m$.

Si se calcula la variación de la resistencia del electrodo de tierra en las diferentes capas alrededor de la esfera, que es función de la distancia desde el centro de la misma, se obtiene la curva mostrada en la Figura 2.

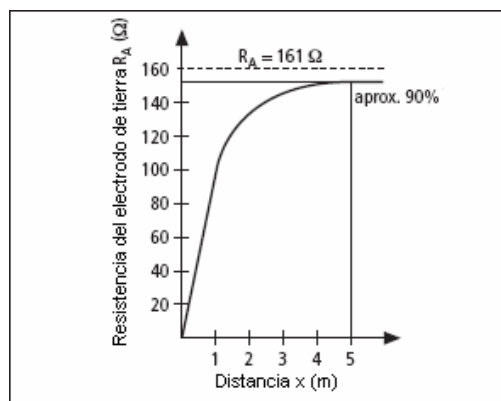


Fig. 2 Ejemplo de la variación R_A en función de la distancia x del centro de la esfera

La resistencia a tierra R_A para un electrodo esférico se calcula como:

$$R_A = \frac{\rho_E \cdot 100}{2\pi \cdot r_K} \cdot \frac{1 + \frac{r_K}{2t}}{2}$$

donde:

t profundidad de enterramiento del electrodo (m)

r_K radio del electrodo de tierra esférico (m)

Para estas condiciones R_A da 161Ω .

En la curva de la figura anterior se aprecia que la mayor parte de la resistencia del electrodo de tierra ocurre en su vecindad inmediata. Por ejemplo, a una distancia de 5 m desde el centro de la esfera, ya se ha logrado el 90 % de la resistencia R_A del electrodo.

Fluctuaciones estacionales

Se ha demostrado, mediante múltiples mediciones, que la resistividad del suelo varía grandemente según la profundidad de enterramiento del electrodo de tierra. Debido al coeficiente de temperatura negativo del terreno ($\alpha = 0,02...0,004$), la resistividad tiene un máximo en invierno y un mínimo en verano. Es aconsejable, por consiguiente, convertir los valores de resistencia a tierra medidos a los máximos probables, ya que no deben excederse los valores permitidos bajo las condiciones más desfavorables (temperaturas muy bajas). La variación de resistividad (ρ_E) en función de la temperatura del terreno (estación del año) puede representarse con bastante aproximación por una curva sinusoidal que tiene un



máximo alrededor de mediados de febrero y un mínimo alrededor de mediados de agosto. Dichas investigaciones también han mostrado que, para electrodos enterrados a profundidades menores que 1,5 m, la desviación máxima de la resistividad de su valor medio es aproximadamente de $\pm 30\%$ (Figura 3).

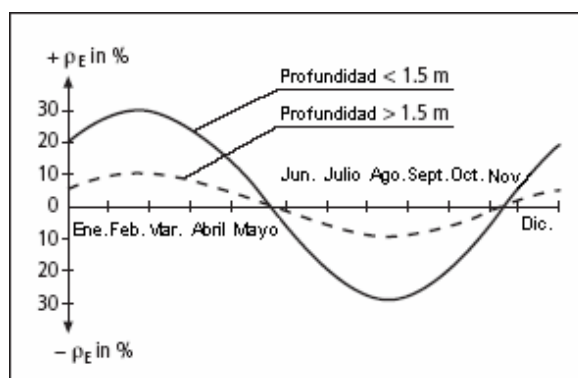


Fig. 3 Resistividad p_E en función de las estaciones del año sin influencia de la lluvia (profundidad de enterramiento del electrodo $< 1,5\text{ m}$)

Para los electrodos enterrados a mayor profundidad (particularmente para las varillas), la fluctuación es simplemente del $\pm 10\%$. De la curva de forma sinusoidal de resistividad, la resistencia a tierra R_A de una instalación de puesta a tierra medida en un día particular puede estimarse al valor máximo esperado.

Las partes metálicas (envolturas de lavadoras, lavaplatos, refrigeradores) y las masas metálicas (tuberías de agua, bañeras, cocinas) en edificaciones de uso civil así como las carcasas de los generadores, motores y transformadores, las envolturas metálicas de los interruptores, los soportes de base de los seccionadores y descargadores, las estructuras de las cabinas de transformación, las torres de alta tensión en las centrales eléctricas, subestaciones de transformación, etc. en edificaciones de uso industrial se conectan a tierra con la función de protección. Para ello, la instalación de puesta a tierra deberá tener una resistencia a tierra tanto menor cuanto mayor sean las eventuales corrientes de falla que fluyan hacia el terreno. En este caso, el valor de resistencia necesario comúnmente lo calcula el diseñador de la protección por medio de los programas de análisis de falla y lo deberá facilitar a la persona encargada del diseño de la instalación de puesta a tierra. En su defecto, este último lo definirá en función de la aplicación de que se trate.

En casi todas las normas de protección contra rayo a nivel mundial se establece como límite máximo de resistencia a tierra $10\ \Omega$. En nuestro país se ha establecido una diferenciación de este valor para instalaciones ordinarias y tanques de



APCI

almacenamiento del petróleo y sus derivados; siendo de $10\ \Omega$ (según NC IEC 620305) para las primeras y de $5\ \Omega$ (según NC 96-38) para los segundos.

La filosofía básica de la instalación de puesta a tierra es asegurar la dispersión de la corriente del rayo en el terreno sin provocar sobretensiones peligrosas. Para ello hay que conseguir la máxima área posible de superficie de contacto de los electrodos de tierra con el suelo circundante. Por lo que son más importantes las disposiciones y dimensiones ofrecidas por los mismos que un valor específico de resistencia.

Una configuración de electrodos de tierra de gran extensión no solo ayuda lograr a una resistencia a tierra inferior medida a baja frecuencia sino también a mejorar considerablemente la impedancia de tierra ante la alta frecuencia asociada con el rápido flanco de subida de la onda impulsiva del rayo.

Tipos de electrodos de tierra

Los electrodos de tierra idealmente deben penetrar hasta el nivel de humedad por debajo de la superficie del terreno.

Los electrodos de tierra pueden tener forma de: varilla, cable, cinta, placa o malla.

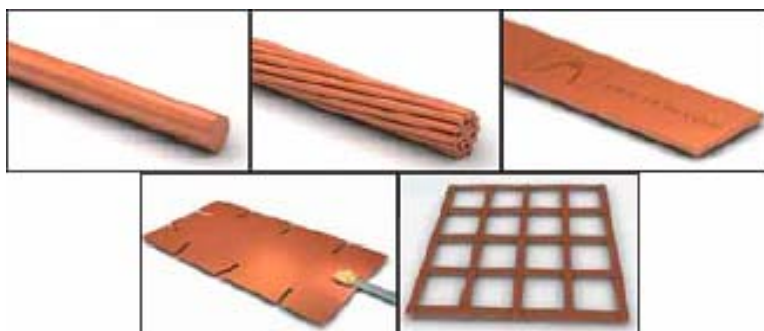


Fig. 4 Tipos de electrodos de tierra

Materiales de los electrodos de tierra

De forma general, los materiales de la puesta a tierra deben ser tales que:

- Sean duraderos.
- Permitan la circulación de la corriente de rayo sin sufrir alteraciones térmicas, mecánicas y eléctricas.
- Garanticen su solidez mecánica frente de las influencias externas.
- No afecten a otras partes metálicas conectadas por el posible efecto de electrólisis.

Al elegir el material de los electrodos de tierra se tendrá en cuenta que el metal o la combinación de metales de fabricación no se corroan excesivamente durante el



tiempo de funcionamiento previsto. La Tabla 1 muestra un resumen de los materiales de electrodo de tierra y sus dimensiones mínimas aprobadas, según establece la NC IEC 62305.

Material	Configuración	Dimensiones Mínimas			Comentarios
		Varilla (Ø mm)	Radial	Placa (mm)	
Cobre	cable ³⁾		50 mm ²		Diámetro min. de cada hebra 1,7 mm
	barra ³⁾		50 mm ²		Diámetro min. 8 mm
	cinta ³⁾		50 mm ²		Espesor min. 2 mm
	barra	15 ⁸⁾			Espesor min. de pared 2 mm
	tubo	20			Espesor min. 2 mm
	Placa			500 x 500	sección 25 mm x 2 mm
	mallla			600 x 600	Lado min. de retícula 4,8 m
Acero galvanizado	Barra galvanizada ^{1), 2)}	16 ⁹⁾	diámetro 10 mm		
	Tubo galvanizado ^{1), 2)}	25			Espesor min. de pared 2 mm
	Cinta galvanizada ¹⁾		90 mm ²		espesor 3 mm
	Placa galvanizada ¹⁾			500 x 500	Espesor min. 3 mm
	Malla galvanizada ¹⁾			600 x 600	Sección 30 x 3 mm
	Barra recubierta de cobre ⁴⁾	14			Cubrimiento con 250 µm de cobre al 99,9 %
	cable galvanizado ^{5), 6)}		diámetro 10 mm		
	Barra ⁵⁾		75 mm ²		Espesor min. 3 mm
	Cinta desnuda o galvanizada ^{5), 6)}		70 mm ²		Diámetro min. de cada hilo 1,7 mm
Acero Inoxidable ⁷⁾	barra	15	diámetro 10 mm		
	cinta		100 mm ²		Espesor min. 2 mm

- ¹⁾ El cubrimiento tiene que ser liso, continuo y libre de impurezas con un espesor medio del cubrimiento de 50 μm para material redondo y de 70 μm para plano.
- ²⁾ Los cabezales serán maquinados antes de ser galvanizados. Threads must be tapped before galvanising.
- ³⁾ También pueden ser estañadas.
- ⁴⁾ El cobre tiene que estar intrínsecamente unido al acero.
- ⁵⁾ Se permite solo si está completamente embebido en el hormigón.
- ⁶⁾ Solo se permite para la parte de la cimentación en contacto con el terreno, si está conectado de manera segura con el refuerzo cada 5 m.
- ⁷⁾ Cromo $\geq 16 \%$, níquel $\geq 5 \%$, molibdeno $\geq 2 \%$, carbón $\leq 0,08 \%$.
- ⁸⁾ En algunos países se permite 12 mm.
- ⁹⁾ en algunos países se requieren barras de penetración para conectar el conductor de bajada con el electrodo de tierra.

Tabla 1 Materiales, configuraciones y dimensiones mínimas con las que deben cumplir los electrodos de tierras.

Cobre

El cobre es el material más usado en los electrodos y demás componentes de las instalaciones de puesta a tierra debido a sus altas conductividad eléctrica, maleabilidad y resistencia a la corrosión.

Acero recubierto de cobre

El daño del cubrimiento de cobre crea un riesgo de corrosión del núcleo de acero, por tanto tiene que garantizarse la presencia de una capa de cobre completamente cerrada.

Acero galvanizado en caliente

Es adecuado para embeber en el hormigón. Los electrodos de tierra de cimentación y los conductores de unión equipotencial conformados por acero galvanizado embebido en hormigón pueden conectarse con el hierro de refuerzo.

Acero inoxidable

Ciertas aleaciones de acero inoxidable son inertes y resistentes a la corrosión en el terreno. La corrosión libre de potencial de estos aceros limpios en los terrenos normalmente aireados es similar a la de cobre. La superficie de los electrodos de tierra de acero se torna pasiva al cabo de unas semanas y se les consideran son neutros respecto a otros materiales. Los aceros inoxidables contendrán al menos 16 % de cromo, 5 % de níquel y 2 % de molibdeno.

Material	Ambiente	
	Terreno	Hormigón
Cobre	Sólido, trenzado, como recubrimiento	No usar
Acero galvanizado en caliente	Sólido	Sólido
Acero inoxidable	Sólido	No usar

Tabla 2 Uso recomendado de materiales de electrodos

Configuraciones de electrodos de tierra

Las configuraciones de electrodos de tierra pueden variar en dependencia de la aplicación, el tipo de suelo y el espacio disponible.


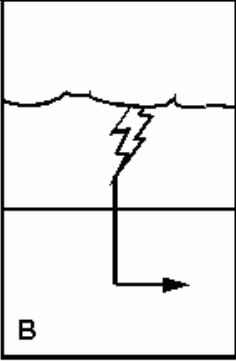
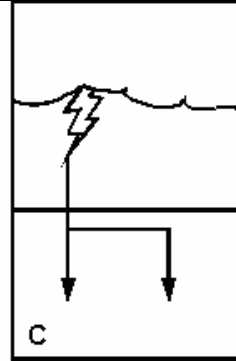
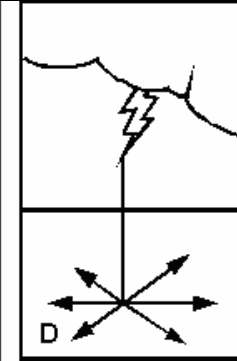
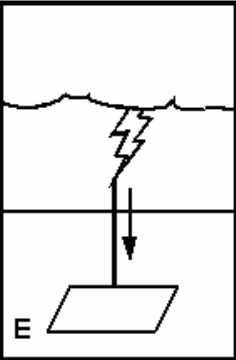
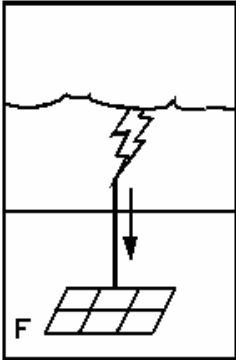
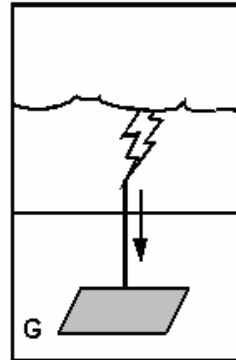
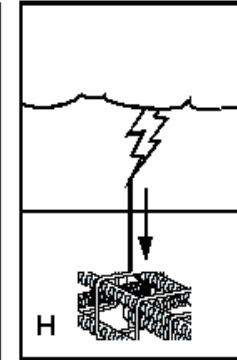
							
							
A	Electrodo vertical			E	Electrodo de anillo		
B	Electrodo horizontal			F	Electrodo de malla		
C	Electrodos horizontales -verticales combinados			G	Electrodo de placa		
D	Electrodo radial			H	Electrodo de cimentación		

Tabla 3 Configuraciones básicas de electrodos de tierra de protección contra rayo

Configuración	Ventajas	Desventajas
Anillo perimetral	Diseño directo. Fácil de instalar (particularmente alrededor de la edificación existente). Materiales fácilmente disponibles. Puede enterrarse hasta alcanzar el manto freático.	No es útil donde existen grandes formaciones rocosas cerca de la superficie.
Radial	Puede lograr bajo valor de resistencia en formaciones rocosas evitando el uso de varillas verticales. Baja impedancia de impulso. Buena compensación de RF cuando se dispone en forma de estrella.	Sujeto a las fluctuaciones de resistencia con el secado del suelo.
Malla horizontal	Mínimo gradiente de potencial en la superficie. Instalación directa si se hace antes de la construcción. Puede lograr baja resistencia de contacto en áreas donde las formaciones rocosas impiden el uso de varillas verticales. Puede combinarse con varillas verticales para estabilizar las fluctuaciones de resistencia.	Sujeto a las fluctuaciones de resistencia con el secado del suelo si no se usan varillas verticales.
Varilla vertical	Diseño directo. Es la más fácil de instalar (particularmente alrededor de la edificación existente). Materiales fácilmente disponibles. Puede enterrarse hasta alcanzar el manto freático.	Alta impedancia de impulso. No es útil donde existan formaciones rocosas cerca de la superficie. Las tensiones de paso en la superficie del terreno pueden ser altas en caso de altas corrientes de falla o durante impactos directos de rayo.
Placa	Puede lograr baja resistencia de contacto en áreas limitadas.	Es el más difícil de instalar.
Electrodos naturales	Pueden tener muy baja resistencia.	Poco o ningún control sobre futuras variaciones. Tienen que emplearse conjuntamente con electrodos artificiales.

Tabla 4 Comparación entre configuraciones de electrodos de tierra

Cálculo de la resistencia de un electrodo

Debido a que el suelo presenta cierta resistencia al paso de la corriente eléctrica y no es un conductor ideal, siempre existirá una resistencia entre el electrodo de tierra y la “tierra verdadera”. Esta es conocida como *resistencia del electrodo de tierra*



y depende de la resistividad del suelo, del tipo y dimensiones del electrodo y de su profundidad de enterramiento.

Una vez conocida la resistividad del suelo, puede calcularse la resistencia de las diferentes configuraciones de electrodos de tierra de acuerdo a los tipos y dimensiones de estos.

Electrodo de tierra	Expresión aproximada	Auxiliar
horizontal (superficial)	$R_A = \frac{2 \cdot \rho_E}{l}$	–
vertical (varilla)	$R_A = \frac{\rho_E}{l}$	–
anillo	$R_A = \frac{2 \cdot \rho_E}{3 \cdot d}$	$d = 1,13 \cdot \sqrt{A}$
mallla	$R_A = \frac{\rho_E}{2 \cdot d}$	$d = 1,13 \cdot \sqrt{A}$
placa	$R_A = \frac{\rho_E}{4,5 \cdot a} = 0,8 \cdot \frac{\rho_E}{P}$	–
semiesférico	$R_A = \frac{\rho_E}{\pi \cdot d}$	$d = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V}$
R_A	Resistencia del electrodo de tierra (Ω)	
ρ_E	Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)	
l	Longitud del electrodo de tierra (m)	
d	Diámetro del anillo, del área equivalente o del electrodo semiesférico (m)	
A	Área de la superficie encerrada por el anillo o de la malla (m^2)	
a	Longitud del lado de la placa cuadrada. Para la placa rectangular $a = \sqrt{b \cdot c}$, donde b y c son los lados del rectángulo (m)	
P	Perímetro de la placa	
V	Volumen de un elemento de cimentación (m^3)	

Tabla 4 Expresiones de cálculo de resistencia del electrodo de tierra

La Tabla 4 ofrece fórmulas prácticas para el cálculo de la resistencia a tierra aproximada de los tipos de electrodos de tierra más usados. Las fórmulas precisas de cálculo se dan a continuación.



Electrodo horizontal (superficial)



Los electrodos de tierra superficiales se entierran horizontalmente bajo la superficie del terreno generalmente a profundidades entre 0,5 y 1 m. Pueden tener forma de cable o cinta y estar fabricados de cobre o acero galvanizado. Estos logran muy buena conexión con el terreno.

Estos electrodos no deberán tener una longitud muy larga porque, como el tiempo de elevación de la corriente del rayo es muy breve, esta habrá alcanzado el valor pico de intensidad en el punto de conexión antes de que el frente delantero haya viajado unos 100 m a lo largo de los mismos.

No toda la extensión del electrodo presenta el mismo comportamiento a diferentes frecuencias, por lo que existen dimensiones efectivas para cada una de estas por encima de las cuales no se obtiene una reducción significativa de la impedancia. La práctica común al usar conductor horizontal enterrado es a una profundidad > 0,5 m y con longitud < 60 m.

Por ejemplo, un conductor de cobre sólido de 10 mm de diámetro que corre unos 50 m a una profundidad de 0,5 m por debajo de superficie, produce una resistencia teórica de 4 Ω en un suelo con una resistividad de 90 Ω .m.

En las regiones de clima templado debe tenerse en cuenta que la capa de suelo que cubre el electrodo de tierra se seca en verano y se congela en invierno. Por ello la resistencia R_A de dicho electrodo superficial se calcula como si descansara en la superficie del terreno. Afortunadamente, nuestro país presenta un clima subtropical húmedo con medias anuales de temperatura de 26° C y de precipitaciones de 1 320 mm que no permite se produzcan estos efectos por muy bajas sequedad y temperatura del terreno.

$$R_A = \frac{\rho_E}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{r}$$

donde:

R_A Resistencia del electrodo superficial (Ω)

ρ_E Resistividad del suelo (Ω .m)

l Longitud del electrodo (m)

r Cuarta parte de la anchura de la cinta plana (m) o diámetro cable redondo (m)

Estos electrodos son efectivos cuando se conecta a su punto medio un conductor de bajada. Con esta configuración, la inductancia de onda impulsiva se divide a la mitad, debido a que habrá dos vías de transmisión paralelas.

La R_A en función de la longitud del electrodo puede tomarse de la Figura 5.

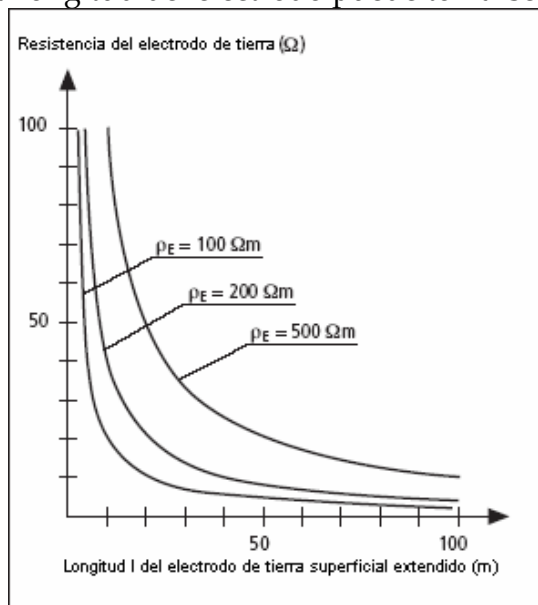


Fig. 5 Resistencia R_A en función de la longitud l del electrodo de tierra superficial a diferentes resistividades ρ_E

La Figura 6 muestra los potenciales de tierra U_E longitudinal y transversal para un electrodo de cinta plana de 8 m de longitud. Puede verse claramente el efecto de la profundidad de enterramiento en el potencial de tierra.

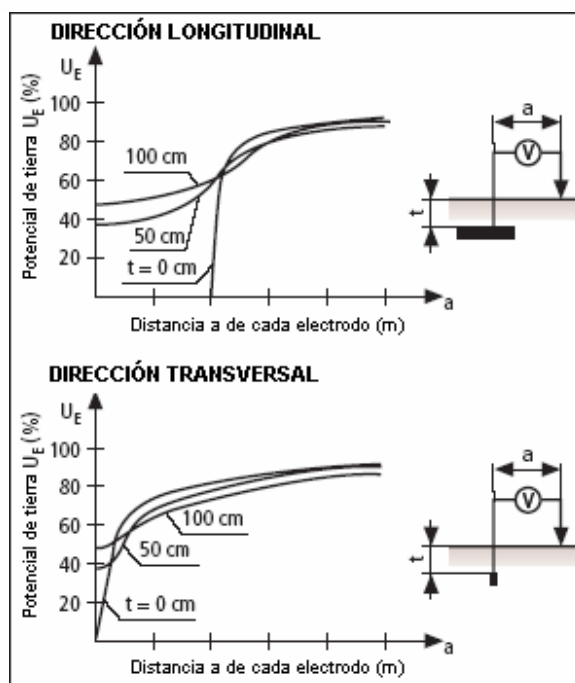


Fig. 6 Potencial de tierra U_E entre el conductor de suministro y la superficie del terreno en función de la distancia del electrodo de tierra, para una cinta (8 m de largo) a diferentes profundidades

La Figura 7 ilustra la tensión de paso U_s en función de la profundidad de enterramiento.

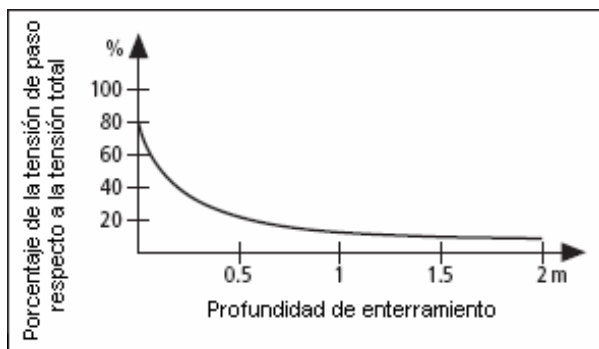


Fig. 7 Máxima tensión de paso U_s en función de la profundidad de enterramiento para una cinta de tierra

Estos electrodos son más efectivos aún cuando se emplean en combinación con varillas, ubicados próximos a la unión con el conductor de bajada.

Electrodo radiales o de estrella

Los electrodos radiales o de estrella son importantes cuando deben obtenerse resistencias a tierra relativamente bajas en suelos pobremente conductores a un precio factible.

Las configuraciones prácticas pueden tener la forma de estrellas de varias puntas radiales respecto a un punto central. Al poseer varias vías en paralelo se obtiene una impedancia respecto a la onda impulsiva menor que a baja frecuencia (50/60 Hz) debido a la interacción de los campos de cada uno de los conductores radiales. Debido a dicha interacción, el hecho de duplicar la cantidad de conductores radiales no significa dividir a la mitad la resistencia.

Una instalación de puesta a tierra constituida por varios conductores radiales de longitudes efectivas menores será mucho más conveniente bajo condiciones transitorias que si estuviera compuesta por un conductor único muy largo.

El cálculo de la resistencia de los radiales enterrados está dado por:

$$R_A = \frac{\rho_E}{n \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot l}{\sqrt{d \cdot h}} \right) - 1 + N(n) \right]$$

$$N(n) = \sum_{m=1}^{m=n-1} \ln \frac{1 + \sin(\pi \cdot m / n)}{\sin(\pi \cdot m / n)}$$

n	2	3	4	6	8	12
N(n)	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11

donde:

- R_A Resistencia de los radiales (Ω)
- ρ_E Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)
- n Cantidad de radiales
- l Longitud de cada radial (m)
- d Diámetro de cada radial (m)
- h Profundidad de enterramiento de los radiales (m)

Para el caso un electrodo de cuatro radiales (cuyos brazos están a 90 ° uno del otro) de la resistencia R_A se calcula mediante la expresión:

$$R_A = \frac{\rho_E}{4\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + 2,5 \right)$$

donde:

- R_A Resistencia del electrodo superficial cruciforme (Ω)
- ρ_E Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)
- l Longitud del lado (m)
- d Mitad de la anchura de la cinta (m) o diámetro del alambre redondo (m)



APCI

La Figura 8 muestra la curva de la resistencia R_A de los electrodos radiales en función de la profundidad de enterramiento y la Figura 9 muestra la curva de potencial de tierra.

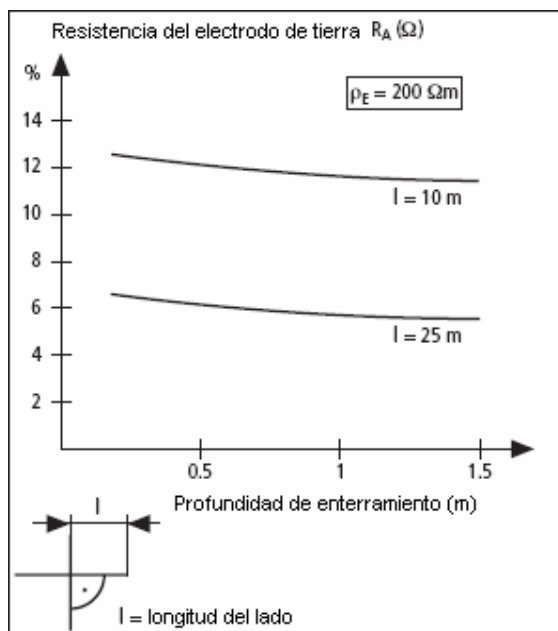


Fig. 8 Resistencia R_A de un electrodo radial cruzado a 90° en función de la profundidad de enterramiento

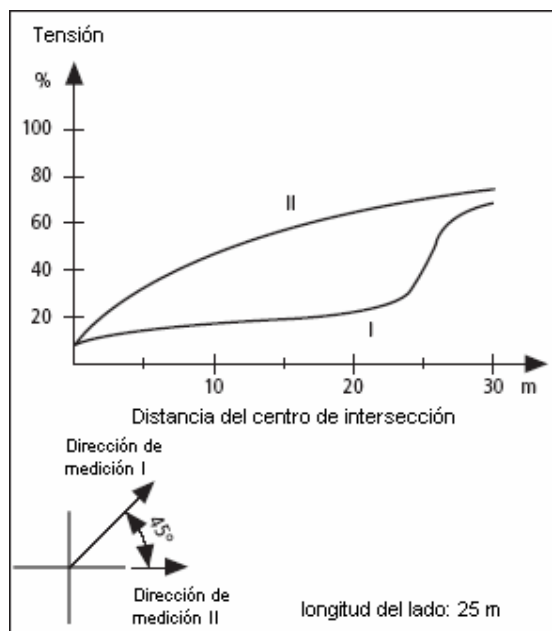
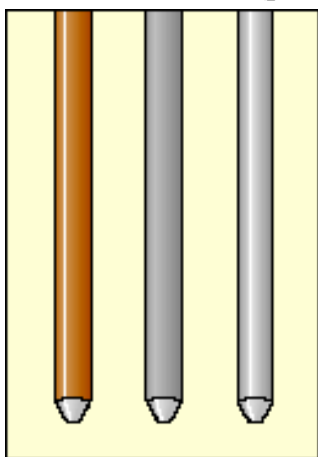


Fig. 9 Potencial de tierra UE entre el conductor del electrodo y la superficie del terreno de un electrodo radial cruzado a 90° en función de la distancia del punto central de la cruz (profundidad de enterramiento de 0,5 m)

Electrodo vertical (picas)



Este electrodo, también conocido como pica, puede tener forma de tubo, perfil o varilla y se entierra verticalmente. La varilla es quizá el tipo más utilizado y por su constitución, existen tres tipos:

- Cobre sólido
- Núcleo de acero enchapado en cobre
- Núcleo de acero niquelado recubierto molecularmente con cobre

Las varillas de cobre sólido son más resistentes a la corrosión, pero son muy caras y difíciles de clavar en suelos duros sin que se doblen. Por esta razón mayormente se usan las varillas combinadas de acero-cobre. Las enchapadas son propensas a que el recubrimiento se desprenda del núcleo cuando se clavan en suelo rocoso o cuando se doblan. Este efecto expone a la corrosión al acero interior del núcleo. Las recubiertas molecularmente son la solución de costo más efectiva.

La resistencia a tierra R_A de una varilla se calcula como:

$$R_A = \frac{\rho_E}{2\pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot l}{r} \right) - 1 \right]$$

donde:

- R_A Resistencia de la varilla (Ω)
- ρ_E Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)
- l Longitud de la varilla (m)
- r Radio de la varilla (m)

La Figura 10 muestra la resistencia R_A en función de la longitud de la varilla l y la resistividad ρ_E .

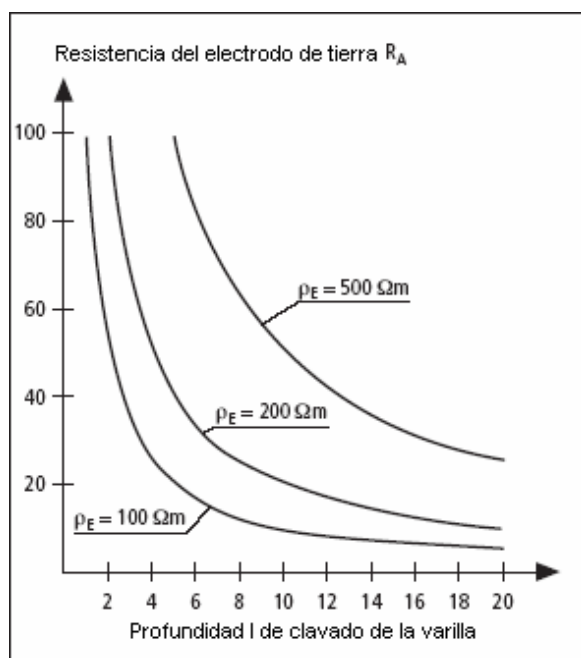


Fig. 10 Resistencia R_A de la varilla de tierra en función de la longitud l a diferentes resistividades ρ_E

Ejemplos:

- Varilla de 20 mm de diámetro, 3 m de longitud y resistividad del suelo de 50 $\Omega \cdot m$, da una $R_A = 16,1 \Omega$.
- Varilla de 25 mm de diámetro, 2 m de longitud y resistividad del suelo de 30 $\Omega \cdot m$, da una $R_A = 13,0 \Omega$.

Se debe prestar atención al hecho de que, en el caso de varillas de gran longitud, éstas pueden alcanzar estratos con resistividades menores.

Electrodos verticales en paralelo

Si las condiciones del suelo hacen que la resistencia deseada no pueda lograrse con un único electrodo, entonces se intentará la reducción de su valor mediante el uso



de varios electrodos en paralelo. A esta configuración generalmente se le llama "arreglo de varillas".

La resistencia de electrodos en paralelo es una función compleja que depende de factores tales como cantidad, dimensiones, configuración, separación entre los mismos y la resistividad del suelo. Esta no toma en consideración el efecto de los conductores horizontales que conectan las varillas en el arreglo, pero depende de la distancia entre las áreas de influencia correspondientes a cada electrodo. La distancia mínima de separación entre electrodos es la profundidad de clavado. Si están espaciadas a al menos dos veces su longitud enterrada, entonces se logra sacar ventaja máxima de los electrodos adicionales. Si la separación de los electrodos es mucho mayor que sus longitudes y los electrodos conectados en paralelo no son muchos, la resistencia a tierra resultante puede calcularse usando la conocida ecuación de resistencias en paralelo.

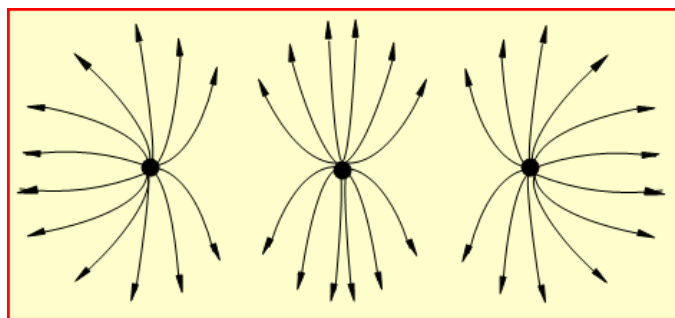


Fig. 11 Efecto de apantallamiento entre varillas muy próximas

El valor de la resistencia R_A de varillas espaciadas a una distancia menor es dado por la siguiente ecuación:

$$R_A = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{a'} \right) - 1 \right]$$

donde:

- R_A Resistencia de la varilla (Ω)
- ρ Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)
- l Longitud de la varilla (m)
- a' Radio equivalente del electrodo en la superficie (m)

$$a' = \sqrt{\sqrt{dh} \cdot \sqrt{ss'}} \quad a' = \sqrt[4]{dhss'} \quad s' = \sqrt{4h^2 + s^2}$$

donde:

- d Diámetro del electrodo (Ω)



- h Profundidad de enterramiento del electrodo (m)
- s Longitud de la varilla (m)
- s' Distancia de un electrodo a la imagen del otro (m)

Si los electrodos individuales están dispuestos aproximadamente en un círculo y si todos tienen la misma longitud, entonces la resistencia puede calcularse de la siguiente manera:

$$R_A = \frac{R_{A'}}{p}$$

donde:

- R_A Resistencia total (Ω)
- $R_{A'}$ Resistencia promedio de los electrodos individuales
- p Factor de reducción

Este factor de reducción es función de la cantidad, la longitud del electrodo y la distancia entre electrodos y se toma de la Figura 12.

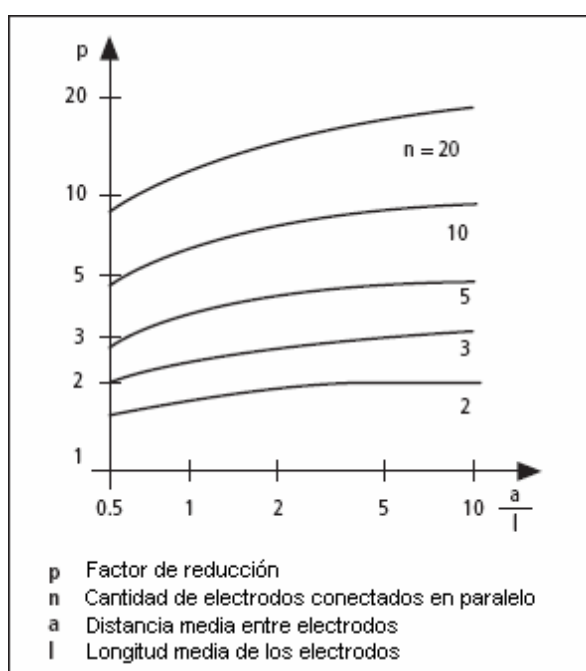


Fig. 12 Factor de reducción p para el cálculo de la R_A total de varillas conectadas en paralelo

Otra forma de calcular la resistencia a tierra R_A cuando se emplean múltiples varillas es:

$$R_A = \frac{R'_A}{n \cdot n_r}$$

donde:



R_A Resistencia total (Ω)

R_A' Resistencia de un electrodo

n Cantidad de electrodos conectados

n_r Coeficiente de apantallamiento

El factor de apantallamiento depende de la longitud, la configuración y la separación entre las varillas. Su valor se encuentra en la Tabla 5.

Coeficientes de apantallamiento η_r para varillas			
Cantidad de varillas	Relación $\frac{a}{l}$, donde: $\frac{a}{l}$ distancia entre varillas 1 longitud de las varillas		
	1	2	3
Varillas en línea recta			
2	0.85	0.90	0.95
3	0.78	0.86	0.91
4	0.74	0.83	0.88
5	0.70	0.81	0.87
6	0.63	0.77	0.83
10	0.59	0.75	0.81
Varillas en círculo o polígono			
3	0.75	0.77	0.88
4	0.69	0.75	0.85
6	0.62	0.73	0.80
8	0.58	0.71	0.78
10	0.55	0.69	0.76
20	0.47	0.64	0.71

Tabla 5 Coeficientes de apantallamiento

Combinación de electrodos horizontales y verticales

Si la resistencia del electrodo se asegura mediante varillas hasta las capas profundas que contienen agua en los suelos arenosos, entonces podrán colocarse tan próximas como sea posible al objeto a proteger. Si se requiere una línea larga, es aconsejable instalar un electrodo radial múltiple tipo estrella en paralelo con este para reducir la resistencia en la medida que la corriente se eleva.

De forma aproximada, la resistencia de una combinación de electrodos horizontal y vertical puede calcularse como si el cable o la cinta estuviesen extendidos a lo largo de la profundidad de clavado de la varilla.

$$R_A \approx \frac{\rho_E}{l_{horizontal} + l_{vertical}}$$



APCI

Electrodo de anillo

Es un conductor enterrado alrededor de la estructura a proteger. Si no es posible lograr un anillo cerrado, al menos se garantizará que el 80 % de su longitud esté en contacto con el terreno y será complementado usando los conductores que existan dentro de la misma, como los conductos u otros componentes metálicos que sean permanentes).

Para los electrodos de anillo circular con grandes diámetros ($d > 30$ m), la resistencia se calcula aproximadamente usando la formula para electrodo superficial (donde la longitud del electrodo es el perímetro del círculo $\pi \cdot d$):

$$R_A = \frac{\rho_E}{\pi^2 \cdot d} \cdot \ln \frac{\pi \cdot d}{r}$$

donde:

r Radio del conductor redondo o $\frac{1}{4}$ de la anchura de la cinta plana (m)

Para un electrodo de anillo no circular, la resistencia se calcula usando el diámetro d del círculo equivalente con la misma área:

$$R_A = \frac{2 \cdot \rho_E}{3 \cdot d}$$
$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

donde:

A Área encerrada por el anillo (m)

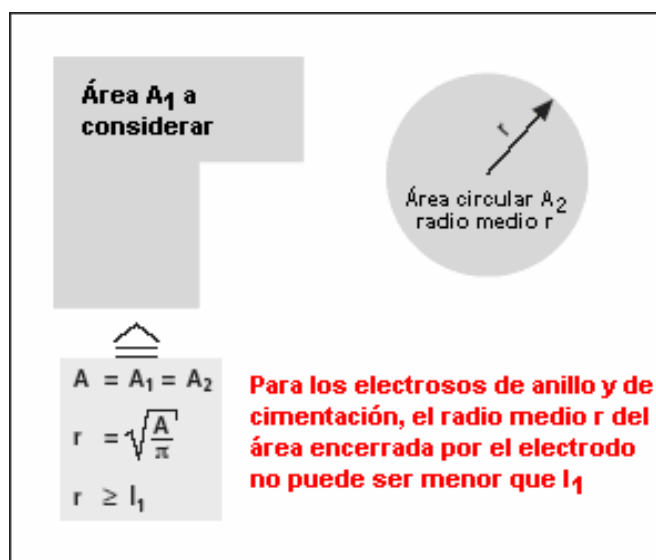
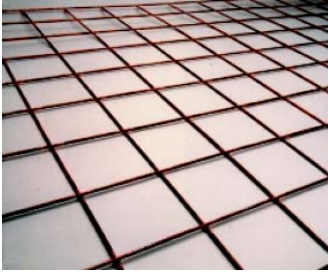


Fig. 13 Determinación del radio medio para el electrodo de anillo.

Electrodos de malla



La malla es otro ejemplo del uso de conductores enterrados bajo la superficie del terreno. Se utiliza sola o se complementa con varillas cuando es práctico el clavado de estas debido a las características del suelo. Presenta un excelente comportamiento para la dispersión de la corriente del rayo, aunque con mayor frecuencia se usa en la puesta a tierra de subestaciones eléctricas para crear una plataforma equipotencial capaz de manejar las altas corrientes de falla y permitir múltiples puntos de inyección. Además, se puede reducir significativamente su resistencia a tierra aumentando su área.

La resistencia de un electrodo mallado es dada por la fórmula:

$$R_A = \frac{\rho_E}{2 \cdot d}$$

donde:

R_A Resistencia del electrodo mallado (Ω)

ρ_E Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)

d Diámetro de el círculo equivalente que tiene la misma área que el electrodo mallado, que se determina de la siguiente manera:

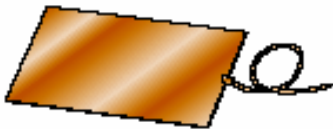
Para dimensiones rectangulares o poligonales:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \quad A \text{ Área del electrodo mallado}$$

Para dimensiones cuadradas:

$$d = 1,1 \cdot b \quad b \text{ longitud del lado}$$

Electrodo de placa



El valor de resistencia a tierra de la Tabla 1 se refiere a la instalación vertical de la placa; de este modo se consigue el máximo contacto de las dos caras con el terreno, por ello se recomienda instalarla en esta posición.

Cuando, por las condiciones del terreno, no sea posible su instalación de este modo, se podrá instalar horizontalmente y el valor de la resistencia a tierra se calculará según la fórmula siguiente:

$$R_A = \frac{\rho_E}{2,25 \cdot a} \text{ ó } R_A = 1,6 \cdot \frac{\rho_E}{P}$$



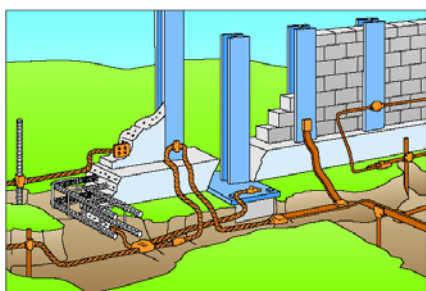
APCI

donde:

- a Longitud del lado de la placa cuadrada. Para la placa rectangular $a = \sqrt{b \cdot c}$, donde b y c son los lados del rectángulo (m)
- P Perímetro de la placa (m)

Este electrodo es recomendable para terrenos en que la profundidad de la capa vegetal sea grande (entre 1 y 1,5 m). Tienen el inconveniente de que la mayor parte de la corriente se concentra alrededor de las aristas que tienen una superficie total muy pequeña. Deben tener un espesor mínimo de 2 mm para el cobre y 2,5 mm para el acero galvanizado. En ningún caso la superficie útil de la placa será inferior a 0,5 m². Cuando sea necesaria la colocación de varias placas se separarán unos 3 m unas de otras.

Electrodo de cimentación



El electrodo de cimentación está constituido por los elementos metálicos, generalmente de acero, embebidos en el hormigón.

La resistencia de un conductor metálico en el hormigón de cimentación puede calcularse aproximadamente usando la fórmula para electros semiesféricos:

$$R_A = \frac{\rho_E}{\pi \cdot d}$$

donde:

R_A Resistencia del electrodo de cimentación (Ω)

ρ_E Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)

d Diámetro de la semiesfera equivalente que tiene el mismo volumen que la cimentación:

$$d = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V} \quad V \text{ Volumen de la cimentación}$$

Cuando se calcula la resistencia del electrodo, se debe tener en cuenta que el electrodo de cimentación solo es efectivo si el cuerpo del hormigón tiene un área de contacto grande con el terreno circundante. La cubierta de aislamiento repelente del agua que muchas veces se le aplica aumenta significativamente la resistencia o aísla al electrodo de cimentación.

El electrodo de cimentación tiene que diseñarse como un anillo cerrado y disponerse en los cimientos de las paredes exteriores de la estructura o en la losa de cimentación. Cuando se trate de estructuras de gran extensión, será necesario



que este tenga interconexiones intermedias de modo que las dimensiones de la malla se excedan de 20 x 20 m.

En el local de entrada de servicio, tiene que establecerse la conexión entre el electrodo de cimentación y la barra de unión equipotencial. Con este fin se preverá un borne que sale del hormigón para la conexión de los conductores de bajada del sistema externo de protección contra rayo y de otras aplicaciones de tierra.

Implementación

De acuerdo con las normas, toda instalación a proteger debe tener su propia instalación de puesta a tierra que debe ser completamente funcional por sí mismo sin requerir tuberías metálicas de agua o conductores conectados a tierra de la instalación eléctrica.

La magnitud de la resistencia de la puesta a tierra R_A tiene una importancia secundaria para la protección contra daños físicos de la edificación. Lo esencial es que se realice sistemáticamente la unión equipotencial a nivel del terreno y que la corriente sea distribuida de manera segura en este.

La corriente del rayo i eleva la estructura a proteger al potencial de tierra U_E .

$$U_E = i \cdot R_A + \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{di}{dt} \text{ con respecto a la tierra de referencia.}$$

El potencial de la superficie de la tierra decrece con el aumento de la distancia respecto al electrodo de tierra.

La caída de tensión inductiva a través del electrodo de tierra durante la elevación de la corriente del rayo debe tomarse en cuenta para instalaciones de puesta a tierra extensas (como los que requieren electrodos de tierra superficiales largos en suelos de pobre conductividad con roca sólida).

Para evitar el riesgo de que se produzcan perforaciones y arcos eléctricos en el punto donde los conductores aislados entran a la estructura, estos conductores se conectan mediante vías de chipa de aislamiento o dispositivos de protección contra sobretensiones al sistema de puesta a tierra como parte de la unión equipotencial del rayo.

Para mantener las tensiones de paso y de contacto tan bajas como sea posible, tiene que limitarse la magnitud de la resistencia de puesta a tierra.



APCI

Los dobleces agudos de los conductores de tierra crean una inductancia insignificante a frecuencia industrial, pero a la frecuencia de la corriente del rayo esta puede ser alta. Este efecto facilita la ocurrencia de saltos de chispa, lo cual hace que la corriente circule a tierra a través de otras rutas en lugar de la cual está prevista para este fin, pudiendo provocar un daño significativo.

Además, la resistencia de los electrodos de tierra hasta aquí calculada no es totalmente válida para las frecuencias de la corriente de rayo. Como el efecto inductivo juega un papel importante en la impedancia, cuando se trata de una instalación de puesta a tierra de gran extensión, lo que realmente interesa es determinar la resistencia al impulso.

El aumento de la longitud de los electrodos superficial o de tipo varilla por encima de 30 m reduce la resistencia al impulso solo en una cantidad insignificante. Por tanto, es conveniente combinar varios electrodos más cortos. En estos casos, debido a la interacción entre los mismos, debe velarse por que la resistencia total no exceda el valor calculado a partir de las resistencias individuales de electrodos conectados en paralelo.

La resistencia de tierra al impulso de los electrodos es una función del valor pico de la corriente del rayo y de la resistividad del terreno. La longitud efectiva del electrodo para la corriente del rayo se calcula mediante las siguientes expresiones aproximadas:

Electrodo superficial:

$$l_{eff} = 0,28 \sqrt{\hat{i} \cdot \rho_E}$$

Electrodo vertical:

$$l_{eff} = 0,2 \sqrt{\hat{i} \cdot \rho_E}$$

donde:

l_{eff} Longitud efectiva del electrodo de tierra (m)

\hat{i} Valor pico de la corriente del rayo (KA)

ρ_E Resistividad del suelo ($\Omega.m$)

La resistencia de tierra al impulso R_{st} puede calcularse usando las mismas fórmulas dadas anteriormente, pero sustituyendo la longitud l por la longitud efectiva del electrodo de tierra l_{eff} .

Los electrodos superficiales tienen ventaja cuando las capas superiores del suelo tienen una resistividad menor que la del subsuelo. Si el terreno es relativamente homogéneo (o sea, la resistividad en la superficie es aproximadamente la misma que en su profundidad) entonces, para una resistencia de electrodo de tierra dada, el costo de construcción de los electrodos superficiales y verticales es casi el mismo.

De acuerdo con la Figura 14, un electrodo vertical debe tener alrededor de la mitad de la longitud de un electrodo superficial.

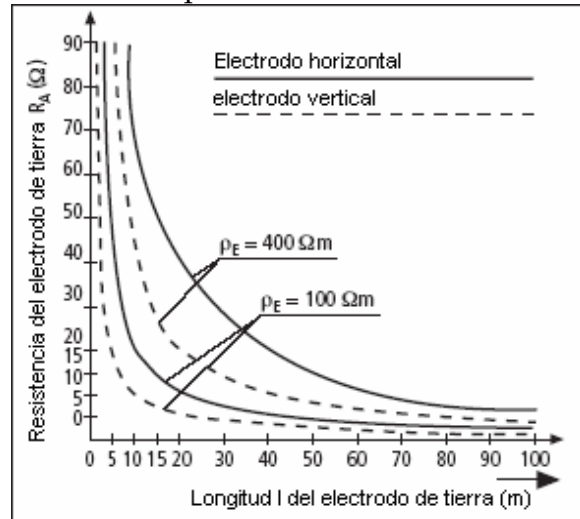


Fig. 14 Resistencia R_A de los electrodos horizontal y vertical en función de la longitud l del electrodo.

Si la conductividad del terreno es más alta a una profundidad mayor que en su superficie, por ejemplo debido a las aguas subterráneas, entonces un electrodo vertical generalmente es una solución de costo más efectiva que el electrodo superficial.

La disyuntiva de cual electrodo (vertical u horizontal) es mejor para un caso particular, solo puede resolverse mediante la medición de la resistividad en función de la profundidad. Aunque, generalmente, los electrodos verticales son la mejor solución porque su montaje se realiza con mayor facilidad (no hay necesidad de excavar trincheras), no alteran las propiedades mecánicas del terreno y se logran valores de resistencias a tierra bastante estables.

REFERENCIAS:

- "Lightning Protection Guide", DEHN+SÖHNE, 2006.
- NC IEC 62305: 2007 "Protección contra Rayo".
- "Dissipate the energy into a low impedance Grounding System", ERICO Inc., 2001.