

RESISTENCIA DE LAS PUESTAS A TIERRA

Prof. Claudio González Cruz

Serie de Apuntes Técnicos

Apunte SAT-12-E2004

Edición 2004

Tabla de Contenido

Introducción	2
1.0 La Puesta a Tierra	3
1.1 Dispositivos de Puesta a Tierra	3
1.2 Resistividad Equivalente del Suelo	5
2.0 Cálculo de la Resistencia de una Puesta a Tierra.....	9
2.1 Resistencia de un Electrodo Vertical	9
2.2 Resistencia de un Conductor Enmallado	10
2.2.1 Método de Laurent	10
2.2.2 Método de Schwarz	11
2.3 Resistencia de un Electrodo Enmallado	11
3.0 Construcción de las Puestas a Tierra.....	12
3.1 Material	13
3.2 Conexiones	13
3.3 Uniones	13
4.0 Medición de la Resistencia de las Puestas a Tierra.....	17
5.0 Disminución de la Resistencia de las Puestas a Tierra	19
Referencias Bibliográficas	22

Introducción

Una puesta a tierra desde la óptica de su estudio, será la adecuada para una instalación cuando presente una resistencia menor o a lo sumo igual al valor máximo impuesto por las características del sistema en donde prestará servicio y por las restricciones impuestas por las normativas vigentes.

Cada dispositivo de puesta a tierra, en lo que a su forma geométrica se refiere, posee una expresión matemática que permite determinar su valor resistivo teórico según las condiciones del medio en donde ella será instalada. Esta resistencia calculada debe entenderse como un acercamiento al valor real que el dispositivo tendrá luego de encontrarse en su condición de trabajo definitiva, puesto que dentro del diseño es imposible integrar variables que son particulares del medio en donde la puesta a tierra será instalada.

El verdadero valor de resistencia de una puesta a tierra se obtiene luego de efectuarle mediciones en el terreno, entendiéndose como valor verdadero, a la magnitud medida en el momento particular de efectuado el proceso. Consideremos que la resistencia de una puesta a tierra está fuertemente influenciada por la resistividad del suelo, luego, cualquier variación en esta, por ejemplo por condiciones atmosféricas (estaciones del año), modificara permanentemente dicho valor.

En las páginas siguientes se revisaran los parámetros principales que definen la resistencia de los dispositivos comúnmente utilizados como puesta a tierra en nuestro medio, y se indicaran algunas condiciones extras en lo que a su construcción se refiere, y por cierto, a su proceso de medición.

1.0 La Puesta a Tierra

Las puestas a tierras constituyen una parte fundamental de todo sistema o instalación eléctrica, por lo que su correcto diseño es fundamental para asegurar un óptimo servicio de suministro sin riegos para las propias instalaciones como para sus usuarios.

Deberá entenderse como puesta a tierra a la conexión voluntaria al suelo, de diferentes partes de la instalación eléctrica por medio de algún dispositivo o configuración física de aterramiento. Las partes de una instalación que se deben conectar a tierra son: el neutro de la alimentación y el chasis metálico de los equipos eléctricos, la primera recibe el nombre de tierra de servicio y la segunda el de tierra de protección cuyos diseños serán abordados en el apunte técnico *“Cálculo de Puestas a Tierra”*.

La resistencia de una puesta a tierra está dada fundamentalmente por el tipo de dispositivo usado (forma física), y particularmente, por la resistividad que posea el suelo en donde ella se encuentre instalada.

1.1 Dispositivos de Puesta a Tierra

Entre las múltiples formas físicas que pueden tener los dispositivos de tierra, se destacan en nuestro medio los electrodos verticales, los conductores enmallados y los electrodos enmallados.

Los electrodos verticales constituyen el dispositivo de tierra más simple, y que normalmente, es utilizado en instalaciones domiciliarias unifamiliares. Consisten en una barra circular metálica, normalmente de cobre, o revestido en el.

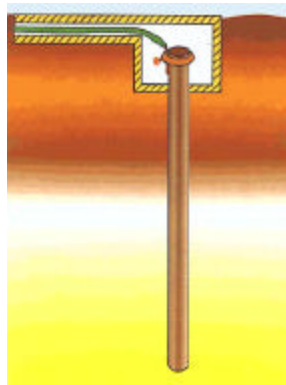


Figura 1 – Electrodo vertical

Los conductores enmallados son dispositivos conformados por arreglos cuadrados o rectangulares de conductores desnudos de cobre, los que se disponen en posición horizontal. Con ellos se logran resistencias bastante bajas comparativamente con las conseguidas al utilizar electrodos verticales

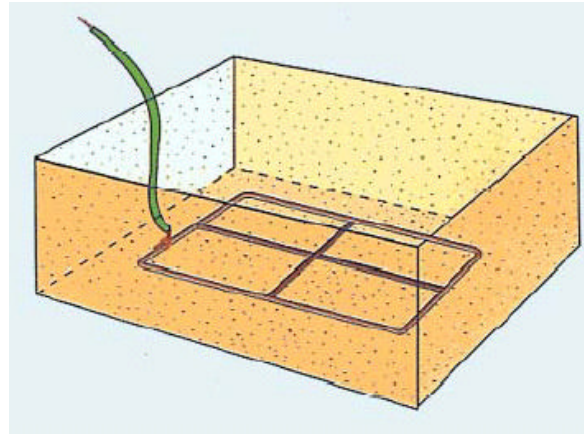


Figura 2 – Conductor enmallado

Los electrodos enmallados consisten en utilizar en forma combinada electrodos verticales y conductores enmallados con el fin de lograr resistencias finales por debajo de lo que normalmente se puede obtener al usar solo estos últimos.

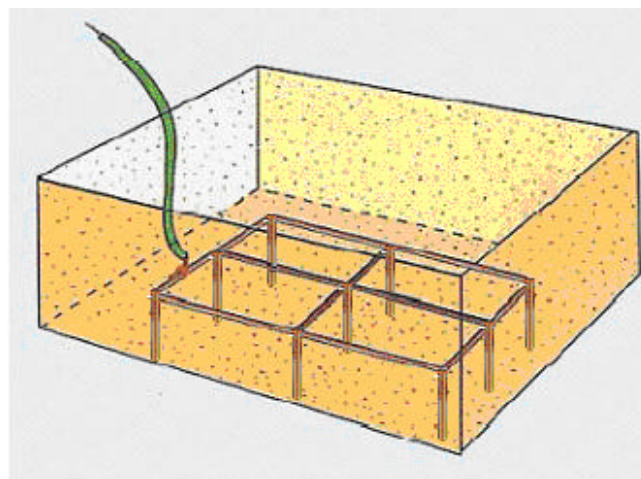


Figura 3 – Electrodo enmallado

1.2 Resistividad Equivalente del Suelo

La resistividad de un suelo será única cuando se trate de un terreno homogéneo, debido a que ésta, no sólo depende de las características eléctricas y del espesor de los estratos presentes en el suelo, si no que, además, depende de la configuración geométrica de la puesta a tierra.

Del estudio de suelos se logra determinar la resistividad particular de cada estrato presente en el terreno, pero esta información se debe mezclar con las características físicas del dispositivo de tierra elegido con el fin de conseguir una resistividad denominada equivalente.

Con electrodos verticales, la resistividad equivalente de un suelo está dada fundamentalmente por el promedio de las resistividades de las capas presentes, considerando empíricamente que el electrodo atraviesa todos los estratos existentes, y que cada uno de ellos, presenta la misma influencia respecto a la resistividad equivalente del suelo que circunda al electrodo.

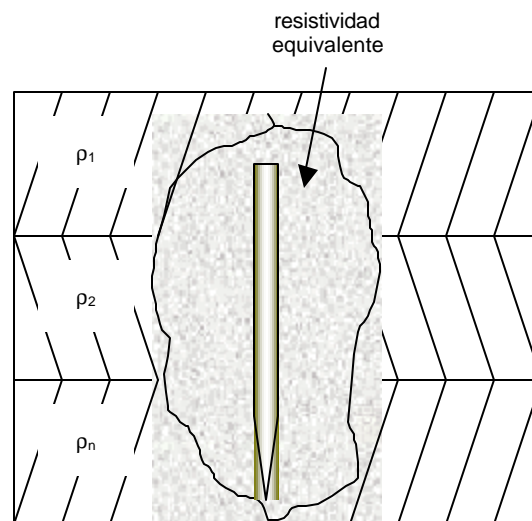


Figura 4 – Resistividad equivalente para el caso de electrodos verticales

En fórmula, la resistividad equivalente del suelo en ($\Omega \times m$), cuando se usan electrodos verticales se determina con:

$$\rho_e = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i}{N_c}$$

ρ_i : Resistividad de las capas presentes ($\Omega \times m$)

N_c : Número de capas presentes

Con conductores y electrodos enmallados, de acuerdo a Yakobs, una puesta a tierra compuesta por un conjunto de conductores horizontales enterrados a una profundidad “*t*” y un conjunto de barras verticales de longitud “*L*”, se aproxima a un prisma metálico recto en la medida que se incrementa el número de elementos verticales, y su resistencia disminuye hasta un valor mínimo. Este prisma metálico puede aproximarse por un semielipsoide de revolución ubicado a partir de la superficie del terreno, tal como se muestra en la figura 5. El semielipsoide cubre una superficie “*S*” igual a la abarcada por la puesta a tierra, y su eje menor “*b*” es igual a la profundidad máxima alcanzada por los elementos: $h_e=t+L$, si existen electrodos; o $h_e=t$ si solo existen conductores enmallados horizontales.

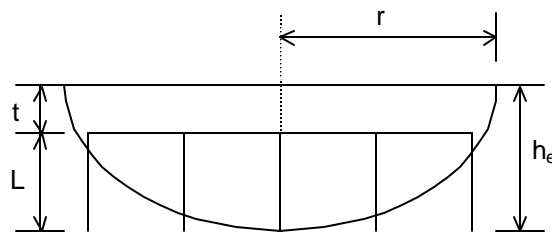


Figura 5 – Esquema representativo de del criterio de Yakobs

Yakobs establece que el área encerrada por el perímetro de la puesta a tierra horizontal o también llamada malla, que corresponde a un círculo de radio *r*, se calcula mediante la expresión:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

S : Superficie de la malla (m²)

r : Radio equivalente (m)

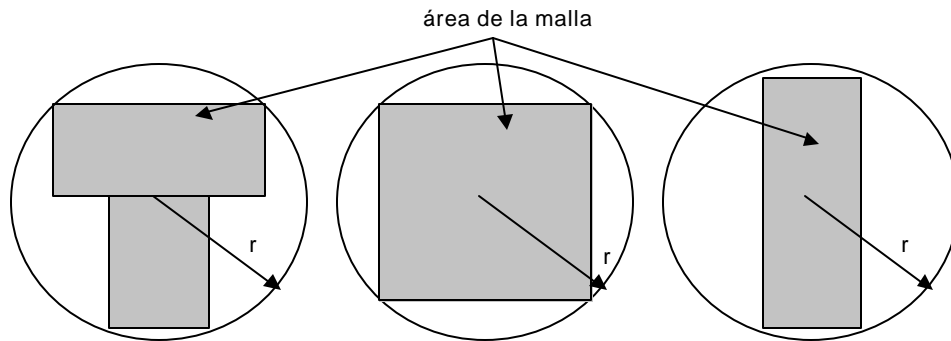


Figura 6 – Radio medio o equivalente de una malla

También se establece que la resistividad equivalente de un terreno de "n" capas equivale a la de uno homogéneo. Para él se han encontrado las siguientes expresiones:

$$R_h = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{r_0}{r}\right)}{2 \times r \times r_0} \rho_{eq}$$

$$r_0 = \sqrt{r^2 - h_e^2}$$

- R_h : Resistencia de la malla para un terreno homogéneo (Ω)
- r : Radio equivalente (m)
- h_e : Profundidad de la malla (m)
- r_0 : Variable auxiliar de cálculo (m)
- ρ_{eq} : Resistividad equivalente del terreno ($\Omega \times m$)

Para un terreno multiestratificado la resistencia de asociada a la puesta a tierra se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R_{me} = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{r_0}{r}\right)}{2 \times r \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_{eq}} \left[\sqrt{r_0^2 - v_i^2} - \sqrt{r_0^2 - v_{i-1}^2} \right]}$$

$$q = \sqrt{2 \times r \times (r + h_e)}$$

$$v_i = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(q^2 + h_i^2 + r_0^2) - \sqrt{(q^2 + h_i^2 + r_0^2)^2 - (4 \times q^2 \times r_0^2)} \right]}$$

- R_{me} : Resistencia de la malla para un terreno multiestratificado (Ω)
- r_0 : Variable auxiliar de cálculo (m)
- r : Radio equivalente (m)
- ρ_{eq} : Resistividad equivalente del terreno ($\Omega \times m$)
- v_i : Variable auxiliar de cálculo (m)
- q : Variable auxiliar de cálculo (m)
- h_e : Profundidad de la malla (m)
- h_i : Profundidad de la capa "i" (m)

Finalmente, igualando las expresiones anteriores, resulta que la resistividad de un suelo de “n” capas al que se le inserta una puesta a tierra horizontal enmallada, presenta una resistividad equivalente dada por la siguiente expresión:

$$\rho_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} [F_i - F_{i-1}]}$$

$$F_i = \sqrt{1 - \frac{v_i^2}{r_0^2}}$$

ρ_{eq} : Resistividad equivalente del terreno ($\Omega \times m$)

F_i : Variable auxiliar de cálculo de la capa “i”

ρ_i : Resistividad de la capa “i” ($\Omega \times m$)

Tomando como base las expresiones dadas anteriormente, a continuación se entrega el procedimiento de calculo recomendado para determinar la resistividad equivalente de un terreno sondeado cuando en se instala en él una puesta a tierra horizontal enmallada.

(a) Calcular el radio equivalente de la malla:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

(b) Calcular la variable auxiliar “ r_0 ”:

$$r_0 = \sqrt{r^2 - h_e^2}$$

(c) Calcular la variable auxiliar “ q ”:

$$q = \sqrt{2 \times r \times (r + h_e)}$$

(d) Calcular las variables auxiliares “ v_i ”:

$$v_i = \sqrt{\frac{1}{2} \left[q^2 + h_i^2 + r_0^2 - \sqrt{(q^2 + h_i^2 + r_0^2)^2 - (4 \times q^2 \times r_0^2)} \right]}$$

Nota: La cantidad de valores de “ v_i ” a calcular es función de la cantidad de capas que tenga el terreno.

e) Calcular las variables auxiliares “ F_i ”:

$$F_i = \sqrt{1 - \left(\frac{v_i}{r_0}\right)^2}$$

Nota: La cantidad de valores de “ F_i ”, esta en función de la cantidad de valores de “ v_i ”

f) Calcular la resistividad equivalente:

$$\rho_{eq} = \frac{F_2}{\frac{F_1 - F_0}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2}} \quad (1)$$

$$\rho_{eq} = \frac{F_3}{\frac{F_1 - F_0}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2} + \frac{F_3 - F_2}{\rho_3}} \quad (2)$$

$$\rho_{eq} = \frac{F_4}{\frac{F_1 - F_0}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2} + \frac{F_3 - F_2}{\rho_3} + \frac{F_4 - F_3}{\rho_4}} \quad (3)$$

Nota: Para suelos de: 2 Capas solo usar (1)

3 Capas solo usar (2)

4 Capas solo usar (3)

2.0 Cálculo de la Resistencia de una Puesta a Tierra

Conocida la resistividad equivalente del suelo, la resistencia de las puestas a tierra se determina con ecuaciones particulares por cada forma física que exista de ellas.

2.1 Resistencia de un Electrodo Vertical

Esta configuración de puesta a tierra, tiene como principal defecto el hecho de que su resistencia es bastante elevada. Por ejemplo, y tomando como base una resistividad de suelo de 100 (Ω -m), la resistencia de una electrodo de 1,5 mts. por $\frac{3}{4}$ " ϕ alcanza en promedio a los 60 (Ω).

La ecuación que permite determinar la resistencia de un electrodo vertical es:

$$R_e = \frac{\rho_e}{2 \times \pi \times L_1} \times \ln\left(\frac{2 \times L_1}{a}\right)$$

R_e : Resistencia del electrodo (Ω)

L_1 : Largo del electrodo (m)

ρ_e : Resistividad equivalente ($\Omega \times m$)

a : Radio del electrodo (m)

2.2 Resistencia de un Conductor Enmallado

Este tipo de configuración, a diferencia de la anterior, presenta la ventaja de que se pueden conseguir valores de resistencia bastante más pequeños, pero a un costo mayor.

Para el cálculo de la resistencia de un enmallado o también denominado malla de puesta a tierra, existen dos alternativas de cálculo, una debida a Laurent y la otra debida a Schwarz.

2.2.1 Método de Laurent

Este método de cálculo solamente considera como parámetros fundamentales de la malla, los concernientes a la longitud del conductor que la conforma, y el radio equivalente de la misma. Debido a esto, algunos autores nombran a este método como el “*método aproximado*” de Laurent.

La expresión que permite determinar la resistencia de la malla de puesta a tierra mediante este método, es la siguiente:

$$R_{ML} = \frac{\rho_{eq}}{4 \times r} + \frac{\rho_{eq}}{L_m}$$

R_{ML} : Resistencia de la malla según Laurent (Ω)

r : Radio equivalente (m)

L_m : Largo del conductor de la malla (m)

ρ_{eq} : Resistividad equivalente ($\Omega \times m$)

2.2.2 Método de Schwarz

Este método de cálculo a diferencia del anterior, considera tanto las características del terreno, como las concernientes a la malla, debido a esto, al método se le llama “exacto”.

Las expresiones de calculo que permiten determinar la resistencia de una malla mediante Schwarz, se presentan a continuación:

$$K_1 = 1,43 - \left(\frac{2,3 \times h_e}{\sqrt{S}} \right) - \left[0,044 \times \left(\frac{A}{B} \right) \right]$$

$$K_2 = 5,5 - \left(\frac{8 \times h_e}{\sqrt{S}} \right) + \left[\left(0,15 - \frac{h_e}{\sqrt{S}} \right) \times \left(\frac{A}{B} \right) \right]$$

$$R_{MS} = \frac{\rho_{eq}}{\pi \times L_m} \times \left[\text{Ln} \left(\frac{2 \times L_m}{\sqrt{h_e} \times d} \right) + \left(\frac{K_1 \times L_m}{\sqrt{S}} \right) - K_2 \right]$$

R_{MS} : Resistencia de la malla según Schwarz (Ω)

ρ_{eq} : Resistividad equivalente ($\Omega \times m$)

L_m : Largo del conductor de la malla (m)

S : Superficie de la puesta a tierra (m^2)

d : Diámetro del conductor de la malla (m)

h_e : Profundidad de enterramiento de la puesta a tierra (m)

A : Longitud por el lado de mayor dimensión de la malla (m)

B : Longitud por el lado de menor dimensión de la malla (m)

2.3 Resistencia de un Electrodo Enmallado

Si la resistencia de la malla determinada por Schwarz la denotamos como R_{MS} , y la resistencia de los electrodos asociados al sistema en conjunto como R_{EL} , tenderemos que las expresiones que permiten determinar la resistencia total de un electrodo enmallado son las siguientes:

$$R_{EL} = \frac{\rho_{eq}}{2 \times \pi \times L_1 \times n} \times \left[\left\langle \left\{ \text{Ln} \left(\frac{4 \times L_1}{a} \right) \right\} - 1 \right\rangle + \left\{ \left(\frac{2 \times K_1 \times L_1}{\sqrt{S}} \right) \times (\sqrt{n} - 1)^2 \right\} \right]$$

$$R_{ME} = R_{MS} - \frac{\rho_e}{\pi \times L_m} \times \left[\left\{ \text{Ln} \left(\frac{L_1}{\sqrt{h_e \times d}} \right) \right\} - 1 \right]$$

$$R_{EM} = \frac{R_{MS} \times R_{EL} - R_{ME}^2}{R_{MS} + R_{EL} - 2 \times R_{ME}}$$

- R_{EL} : Resistencia del conjunto de electrodos (Ω)
- R_{ME} : Resistencia mutua malla – electrodos (Ω)
- R_{MS} : Resistencia de la malla según Schwarz (Ω)
- R_{EM} : Resistencia del electrodo enmallado (Ω)
- ρ_{eq} : Resistividad equivalente ($\Omega \times m$)
- L_1 : Largo del electrodo (m)
- L_m : Largo del conductor de la malla (m)
- a : Radio del electrodo (m)
- n : Número de electrodos
- S : Superficie de la puesta a tierra (m^2)
- d : Diámetro del conductor de la malla (m)
- h_e : Profundidad de enterramiento de la puesta a tierra (m)
- K_1 : Ver ecuación de Schwarz

3.0 Construcción de las Puestas a Tierra

El diseño práctico de una puesta a tierra, especialmente de una malla, se comienza observando una planta de la disposición de los equipos y estructuras que deben ser puestas a tierra.

Dentro de una malla los cables se disponen siguiendo líneas paralelas y a intervalos razonablemente uniformes. Se debe tener presente que cruces muy frecuentes disminuyen la eficiencia total del conductor, debido evidentemente a que un conductor es menos eficiente, como emisor de corriente, cuando atraviesa una zona ya ocupada por otro conductor. Por otra parte, estos cruces son deseables para suministrar caminos múltiples a la corriente de falla en puntos de alta concentración, o para asegurar la continuidad ante daños mecánicos de algunos conductores.

3.1 Material

El cobre es el material más utilizado para la construcción de las puesta a tierra, especialmente las denominadas mallas. Además de su alta conductividad, el cobre tiene la ventaja de ser inmune a la corrosión galvánica desde el terreno circundante, debido a que el cobre es catódico con respecto a otros metales que pueden estar enterrados en las vecindades. Por otra parte, este echo acelera la corrosión de estos últimos metales, tales como tuberías de acero, cubiertas de plomo de los cables, etc. El estañado del cobre reduce este efecto en un 50% respecto al acero y al zinc, y lo elimina con respecto al plomo. Esta corrosión puede además disminuirse aislando ambos metales, en sus cruces, mediante huincha plástica.

Electrodos de acero revestidas en cobre (cooperweld), se usan normalmente como electrodos verticales, y en casos muy especiales, en la construcción de la malla propiamente tal.

3.2 Conexiones

Mediante cables continuos de cobre de secciones adecuadas y uniones estables, deberán conectarse a la puesta a tierra los siguientes elementos:

- Todas las partes metálicas que normalmente no conducen corriente, pero que accidentalmente por fallas de aislación, pueden quedar energizados.
- Varillas, tuberías y toda clase de estructuras metálicas enterradas dentro del perímetro del dispositivo de puesta a tierra.
- Pararrayos y cuando corresponda, los neutros de los transformadores y los neutros de alimentación.

3.3 Uniones

Existen dos alternativas de unión entre los conductores de una puesta a tierra, uno es el denominado prensas y el otro termofusión. En la práctica, no se recomienda el uso de prensas para la unión de los conductores de puesta a tierra, debido a que no ofrece un grado de unión adecuado entre los conductores, lo que trae como consecuencia un aumento de la resistencia de contacto.

Los procesos de termofusión se basan en reacciones químicas de Oxido-reducción. En el caso de procesos de termofusión aplicado a la unión de conductores de cobre, la reacción es la siguiente:



La gran cantidad de energía generada (H), funde el cobre que cae en forma de colada de fundición, en tanto que el oxido de aluminio arrastra impurezas, y por su menor densidad sube como escoria.

El polvo de soldadura es una mezcla de óxido de cobre y aluminio, cuya reacción exotérmica produce metal fundido. El cobre fundido fluye a través del canal sobre los conductores, fundiéndolos y soldándolos.

El equipo para realizar las conexiones es portátil y fácil de operar; consiste principalmente de un molde de grafito con los componentes asociados según lo muestra la siguiente figura:

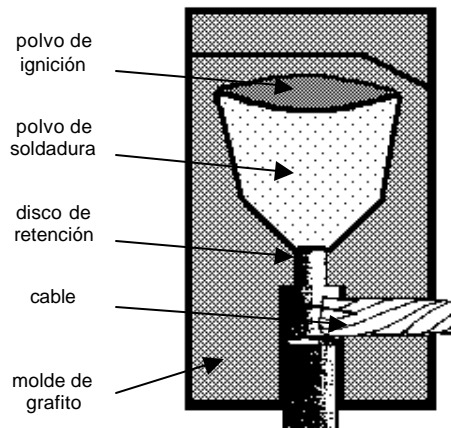


Figura 7 – Molde utilizado para las uniones por termofusión

La cantidad de colada de cobre obtenida en la reacción, debe ser suficiente para producir la fusión de los conductores, con una masa depositada que garantice una conductividad del 100% de la capacidad del conductor. Esta unión así obtenida es de gran estabilidad físico – química en el tiempo, y altamente resistente a las sollicitaciones térmicas y eléctricas a las cuales puede ser sometida.



Figura 8 – Ejemplo de uniones por termofusión

El proceso de termofusión es una verdadera mini fundición. Todas las precauciones que se deben tomar, deben estar orientadas desde ese punto de vista. Los principales obstáculos a vencer, para obtener una buena termofusión son:

Grasas. Las grasas o aceites raramente presentes en los conductores se deben eliminar mediante solventes.

Suciedad. Una limpieza con procedimientos mecánicos (escobilla de acero), elimina la suciedad.

Humedad. Sin lugar a dudas, el mayor obstáculo de una unión por termofusión es la humedad, ya que esta se encuentra presente en el molde de grafito, el conductor y en el ambiente. El grafito es un material higroscópico, por lo tanto absorbe humedad del medioambiente. Esta humedad debe ser eliminada mediante el proceso de precalentamiento del molde. El no secado del molde trae las siguientes consecuencias:

- Salpicadura de las soldaduras por la explosión del agua.
- Soldadura porosa (humedad atrapada en el cobre).
- Menor duración del molde debido a las microgrietas producidas por la expansión volumétrica del agua presente en el grafito.

Si los conductores a unir se encuentran húmedos o muy fríos, deben ser precalentados con un soplete a gas para evitar malas uniones.

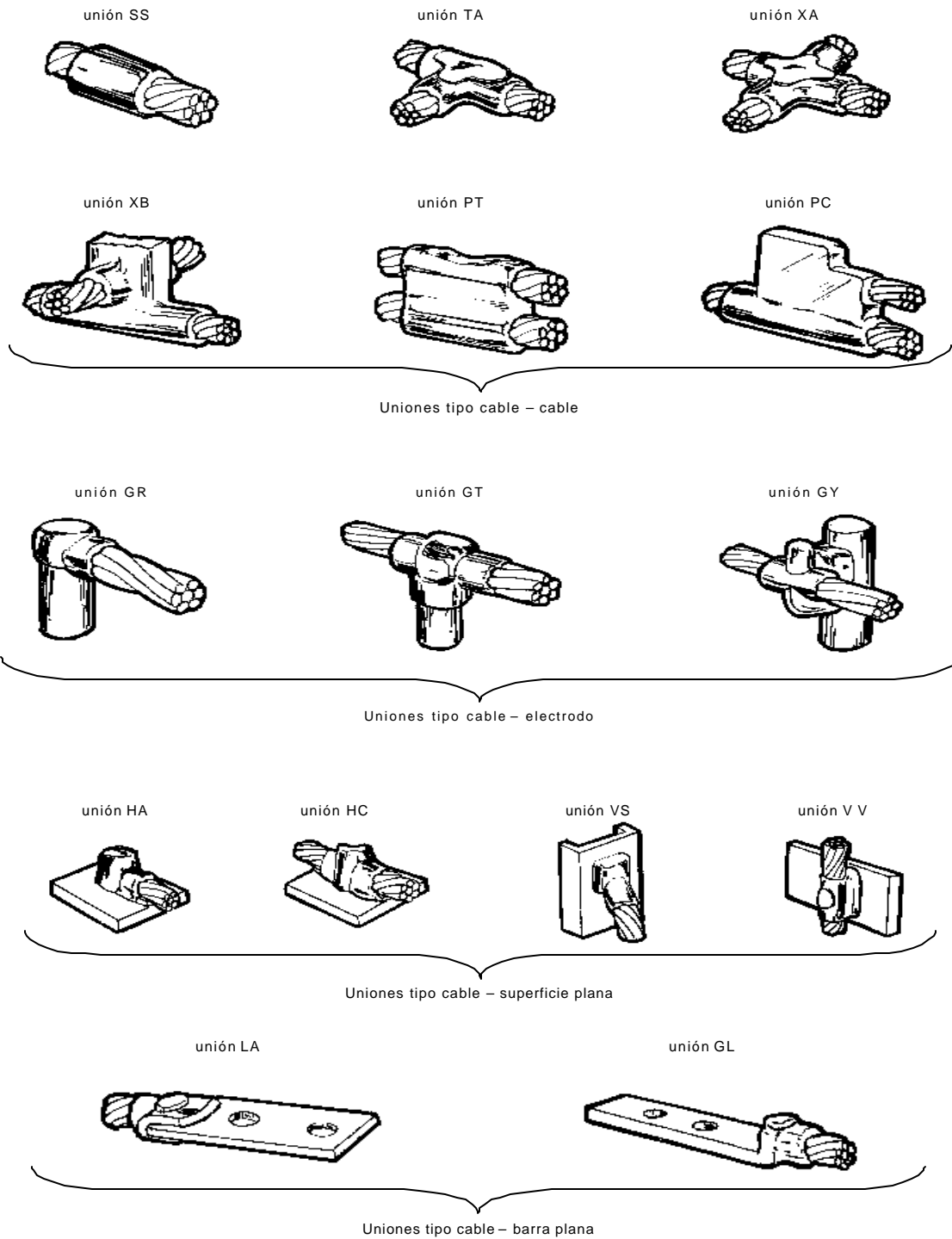


Figura 9 – Ejemplo de uniones por termofusión

4.0 Medición de la Resistencia de las Puestas a Tierra

La resistencia de puesta a tierra de un electrodo, un conjunto de electrodos o una malla, deberá poder medirse sin dificultades. Para cumplir lo anterior, se debe dejar por lo menos un punto de la puesta a tierra accesible, adoptándose una disposición como la mostrada en la siguiente figura:

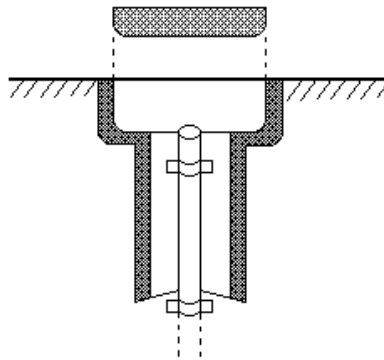


Figura 10 – Ejemplo de camarilla de registro para la medición de una puesta a tierra

Para efectuar la medición de la puesta a tierra, se utiliza en general, el mismo instrumento empleado para el estudio de terreno. Debe tenerse la precaución antes de medir, de desenergizar la instalación y retirar todas las conexiones a la puesta a tierra.

Para conocer el valor de la resistencia de una puesta a tierra ya instalada, se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- (1) Uno de los electrodos de corriente del instrumento se debe conectar al dispositivo de tierra a través de la camarilla de registro.

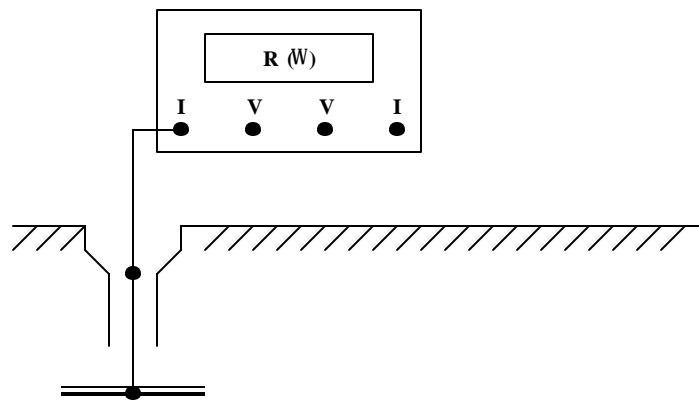


Figura 11.1 – Medición de la resistencia de las puestas a tierra

- (2) Se debe conectar un borne de potencial, al borne de corriente indicado anteriormente. El otro borne de corriente se conecta al terreno a través de un electrodo auxiliar, a una distancia (d), equivalente a 5 (cinco), veces el largo en el caso de electrodos verticales y 5 veces la longitud de su diagonal mayor en el caso de conductores enmallados.

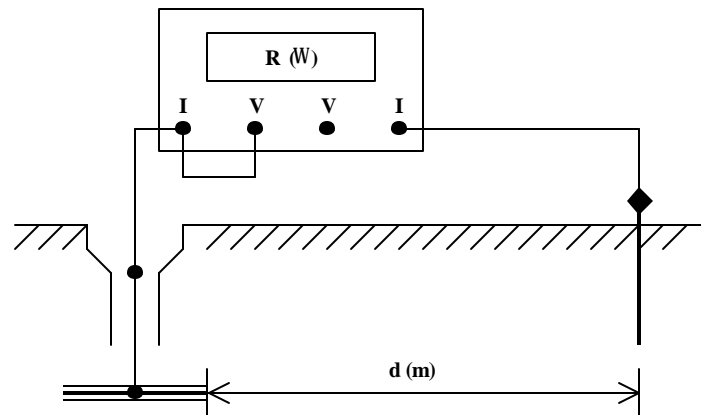


Figura 11.2 – Medición de la resistencia de las puestas a tierra

- (3) El tercer borne del instrumento (potencial), se conecta a través de un segundo electrodo auxiliar al terreno, y se desplaza sucesivamente entre los electrodos de corriente a una distancia (L), equivalente a un 20 avo de la distancia “ d ” indicada anteriormente ($L=d/20$).

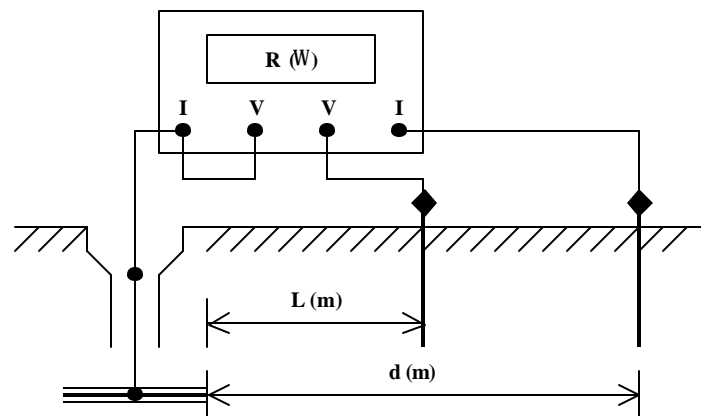


Figura 11.3 – Medición de la resistencia de las puestas a tierra

- (4) Finalmente con la distancia de separación del electrodo de potencial móvil “ L ” y los valores de resistencia medidos, se procede a confeccionar una gráfica de resultados. En donde la curva representativa de la medición adquiera un valor horizontal sostenido, se entenderá que éste es el valor de la resistencia de la puesta a tierra en estudio.

5.0 Disminución de la Resistencia de las Puestas a Tierra

Dependiendo del tipo de dispositivo de tierra, grado de disminución de resistencia y costo asociado, existen diferentes alternativas para poder reducir el valor de resistencia de una puesta a tierra. Los parámetros de mayor influencia en la resistencia de una puesta a tierra son:

- La resistencia propia del sistema de puesta a tierra o resistencia de contacto, dada por sus características físicas.
- La resistividad del suelo, dada por las características conductivas de éste.

La resistencia de un sistema de puesta a tierra, entonces, podrá mejorarse atacando las situaciones anteriormente descritas, mediante las siguientes posibilidades:

- Modificando la resistencia propia del sistema.
- Modificando la resistividad del terreno.

En el caso de que un solo electrodo no sea suficiente para cumplir con un valor adecuado de resistencia de puesta a tierra, una práctica útil es la de utilizar varias barras verticales con el fin de proveer trayectorias paralelas de corriente a tierra.

En este caso, el sistema de puesta a tierra tenderá a asemejarse a un circuito resistivo paralelo, con lo que la resistencia total de la puesta a tierra, disminuirá en función de la cantidad de barras verticales interconectadas.

Lo anterior expresado en formula, adopta la siguiente estructura:

$$R_F = K \times \frac{R_e}{N_e}$$

R_F : Resistencia final (Ω)

K : Constante de combinación según tabla 1

R_e : Resistencia de un electrodo (Ω)

N_e : Número de electrodos en paralelo

Tabla N°1
Constante de combinación para electrodos paralelos

N° de Electrodo	k
2	1.1523
3	1.3053
4	1.4139
5	1.4982
6	1.5670
7	1.6252
8	1.6756
9	1.7201
10	1.7599

Nota : La distancia de separación entre electrodos paralelos, debe ser igual al doble de la longitud del electrodo utilizado.

En el caso de los conductores enmallados, como la resistencia de la puesta a tierra es una resistencia de contacto, para bajarla bastará solo con aumentar la superficie de contacto entre el suelo y los conductores que forman la malla.

Para lograr lo anterior, solo es necesario aumentar el diámetro de los conductores de la malla y el área cubierta por la misma. Es claro asumir que esta solución es antieconómica, por lo tanto poco práctica, por lo que se recomienda en este caso modificar la resistividad del suelo.

Como sabemos, la conducción en el suelo es iónica y no electrónica como es en el caso de los conductores metálicos, por lo tanto, para bajar la resistividad de un terreno, bastará con adicionar iones al suelo.

Existen varias formas de realizar el acondicionamiento de un terreno, una de ellas es utilizando diversas sales químicas como lo son el sulfato de cobre, sulfato de sodio, sulfato de magnesio, carbonato de sodio, cloruro de sodio, etc.; sin embargo, este tipo de mejoramiento pierde efecto al cabo de varios meses debido a que las lluvias y la porosidad del suelo hacen que estos compuestos se disuelvan y migren totalmente.

Otros materiales utilizados en la reducción de la resistividad del terreno son los derivados del carbono, los cuales cuando son llevados a diámetros de una granulometría muy pequeña proporcionan elementos estabilizadores de muy baja resistividad.

Las arcillas osmóticas por su propiedad de retener el agua durante largos periodos de tiempo también son utilizados en el tratamiento de suelos, sin embargo hay que tener cuidado con la contracción y expansión de estas arcillas en los periodos de lluvia y sequía.

Otro de los métodos de modificación de la resistividad de los terrenos es el uso de barras químicas, la que es ideal en el caso de suelos que presentan una elevada resistividad, y tienen dimensiones físicas reducidas como para utilizar una malla de una superficie importante. Consisten en un electrodo tubular fabricado con cobre electrolítico, con el fin de que el oxido formado en su superficie sea buen conductor. Este tubo esta relleno con sales minerales, las cuales se saturan con el aire y se disuelven lentamente, saliendo al terreno por orificios diseminados a lo largo del tubo; minando con estas sales la hemisferia de influencia, proveyendo así el electrolito necesario para una buena conductividad.

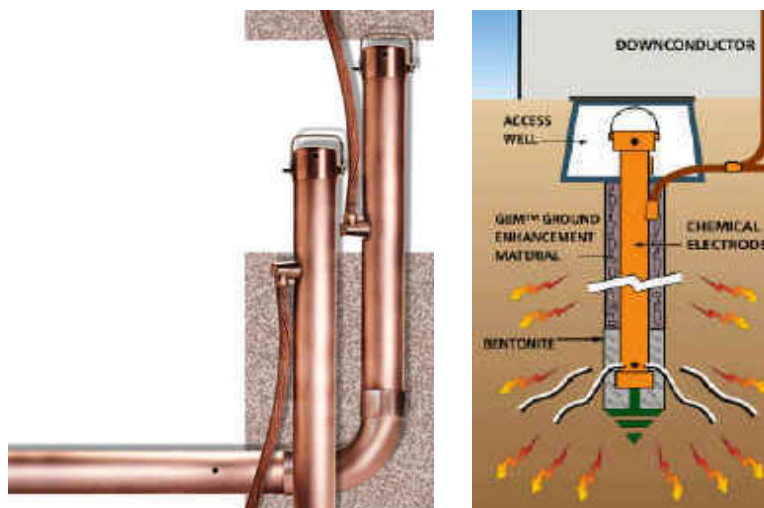


Figura 12 – Barras químicas

Referencias Bibliográficas

Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas

José Toledano Gasca – Juan Martínez Requena

Editorial Paraninfo, ITP and International Thomson Publishing Company, Madrid, España, 1997

Distribución Industrial de la Energía

Mario Lillo Saavedra

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 1996

Sistemas de Puesta a Tierra

Claudio González Cruz

Departamento de Capacitación, Legrand Chile, Santiago, Chile, 1999