

# TOPICOS ESPECIALES EN SISTEMAS DE POTENCIA

## PUESTA A TIERRA

### 1. INTRODUCCIÓN

La palabra *aterramiento* es comúnmente utilizada en sistemas eléctricos de potencia, para cubrir los *sistemas de puesta a tierra* y el *aterramiento de equipos y del neutro*<sup>1</sup>.

La *Puesta a tierra* comprende cualquier conexión metálica, sin fusible, ni protección alguna, de sección suficiente, entre una parte de una instalación y un electrodo o placa metálica, de dimensiones y situaciones tales que, en todo momento, se pueda asegurar que los elementos se encuentran al mismo potencial de tierra. CEAC (1982).

El objeto de la conexión a tierra en los sistemas de potencia, es reducir al mínimo el peligro que presenta el sistema, por causa de su propia energía, o por causas externas, unas eventuales y otras previsibles; pero si la puesta a tierra aumenta el peligro, esta no debe existir. Luca (1991)

Uno de los aspectos importantes para la protección contra sobretensiones en los sistemas de potencia, es el disponer de un sistema de puesta a tierra (*grounding system*) adecuado, al cual se conectan los neutros del sistema, los pararrayos, los cables de guarda, las estructura metálicas, la cuba y los tanques de los equipos y todos aquellas parte metálicas que deben estar al potencial de tierra. Raúll (1981).

<sup>1</sup> El neutro de un sistema eléctrico de potencia, es aquel punto que tiene el mismo potencial que el punto de unión de un grupo de impedancias no reactivas iguales, si están conectadas a los extremos libres a los terminales apropiados o líneas del sistemas.

### 2. CLASIFICACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA.

En los sistemas de potencia, se utilizan dos tipos principales de puesta a tierra (*grounding system*):

- Puesta a tierra de Protección.
- Puesta a tierra de Servicio.

La *puesta a tierra de Protección*, es aquella que se instala con el objetivo primario de prevenir accidentes a las personas que interactúan con el sistema de potencia.

En el sistema de potencia, con el fin de prevenir el riesgo de shock eléctrico, se deben conectar todas las partes de una instalación que no se encuentren energizadas al sistema de puesta a tierra, en especial cuando estas piezas puedan entrar en contacto con partes energizadas por condiciones de averías o falla. Es una práctica muy común en los sistemas de potencia, conectar los siguientes elementos a tierra:

Las carcasas de máquinas, cubas y tanques de transformadores, reactores y equipos eléctricos similares.

- Los arrollados de los transformadores de medida, debido a que estos pueden ser sometidos a alta tensión, en los casos en que se produzca un daño de la aislación. En los transformadores de corriente (TC), se conecta a tierra uno de los bornes de baja tensión, y en los transformadores de potencial (TP), se conecta a tierra el neutro del circuito secundario trifásico, o bien una de las fases.
- En los transformadores y reactores, se suele conectar a tierra el centro de la estrella (Y) o una fase.
- Las partes metálicas, bridas de aisladores, y todos aquellos elementos

de metal que puedan bajo alguna circunstancia entrar en contacto con partes energizadas o que puedan ser sujetos a elevaciones de potencial, como consecuencia de la inducción electromagnética.

- Los elementos de maniobra (palanca, manivela, rejillas de protección) de metal de los equipos eléctricos del sistema de potencia.

La *puesta a tierra e Servicio*, por su parte, es aquella conexión a tierra que pertenece al circuito de corriente de trabajo, es decir, el centro de la estrella de generadores y transformadores. Algunos autores incluyen en esta categoría los circuitos de tierra de los pararrayos y otros dispositivos de protección contra sobretensiones (bobinas, cables de tierra, etc.).

En condiciones normales de operación del sistema de potencia, las conexiones a tierra, independientemente de su tipo, no deben conducir corrientes, y solo deben conducirla mientras funcionan los sistemas de protección de falla a tierra o los dispositivos de protección contra sobretensiones (pararrayos).

### 3. NECESIDAD DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La función primordial de la puesta a tierra de una instalación es forzar la derivación a la tierra (terreno) de las intensidades de corriente que de cualquier manera puedan originar, ya se trate de corrientes de falla, bajo frecuencia industrial o debidas a descargas atmosféricas, de carácter impulsional.

La necesidad de disponer de un sistema de puesta a tierra dentro de los sistemas de potencia es:

- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra. (producto de las corrientes de cortocircuito o por la operación de una protección contra sobretensión como el pararrayos).
- Disminuir los riegos de shock eléctrico del personal cuando se eleva el potencial entre los distintos puntos del sistema de potencia, como consecuencia de la circulación de las corrientes de tierra.

- Facilitar la detección de fallas a tierra y asegurarse de la actuación y coordinación de los sistemas de protección.
- Limitar las sobretensiones internas (Maniobra, transitorias y temporales) que puedan aparecer en el sistema de potencia.
- Evitar las tensiones de frente escarpado que originan las descargas atmosféricas (*lightning*) y que provocan “*cebados inversos*” (descarga de retroceso). Constituyendo una trayectoria de descarga a pararrayos de barra, protectores espinterómetros y equipos similares.
- Proporcionan un medio para descargar y desenergizar equipos para efectuar trabajos de conservación en el mismo.
- Aumentar la confiabilidad y continuidad del servicio eléctrico.

El estándar ANSI/IEEE<sup>2</sup> Std.80 1986, establece que el diseño de una puesta a tierra segura (*safety in grounding*) posee solamente dos objetivos:

- Proveer un medio para enviar la corriente eléctrica dentro de la tierra bajo condiciones normales o anormales, sin que se exceda ningún los límites operativos o de los equipos o afecte la continuidad del servicio.
- Asegurar que las personas en la vecindad de la instalación aterrada (*grounding facilities*) no sean expuestas a peligro de una descarga eléctrica (*critical electric shock*).

Para lograr una instalación de puesta a tierra segura, se debe tener presente el control de la interacción de dos sistemas de tierras:

- La tierra intencional (protección o servicio), consistente en los equipos para descargas las corrientes a tierra (terreno).
- La tierra accidental, la establecida temporalmente por una persona expuesta la gradiente de potencial en la vecindad del sistema de puesta a tierra.

---

<sup>2</sup> An American National Standard (ANSI), IEEE Guide for Aafety in AC Substation Grounding. ANSI-IEEE Std.80 1986.

Las personas frecuentemente asumen que un objeto aterrado (*grounded*), puede ser tocado con seguridad; esta idea equivocada probablemente contribuyó con accidentes en el pasado, un instalación con una baja resistencia de el sistema de puesta a tierra, por si solo, no es una garantía de seguridad. No es una simple relación entre la resistencias del sistema de puesta a tierra como un todo y a corriente máxima de descarga que puede ser una persona expuesta. Como quiera que sea, una instalación con una relativa baja resistencia de tierra puede ser peligrosa bajo algunas circunstancias, mientras que otra con una muy alta resistencia puede ser segura con un cuidadoso diseño.

#### 4. ELEMENTOS QUE COMPONEN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Un sistema de puesta a tierra está constituido por tres partes:

- Circuito de conductores de unión.
- Electrodo o toma de tierra.
- Tierra propiamente dicha.

##### 4.1. CIRCUITO DE CONDUCTORES DE UNIÓN

Los elementos conductores que conforman el sistema de puesta a tierra deben de poseer una sección apropiada a la intensidad de corriente que ha de recorrerlos durante su operación, de forma que no se produzca un calentamiento inadmisibles.

Los conductores utilizados en los sistemas de tierra son de cable de cobre de calibres por encima de 4/0 AWG dependiendo del sistema que se utilice<sup>3</sup>. La escogencia del calibre 4/0 AWG de cobre como mínimo obedece a razones mecánicas, ya que eléctricamente pueden usarse cables de cobre hasta #2 AWG. Raúll (1987).

El cobre se utiliza como conductor en los sistemas de tierra, debido a su mejor conductividad, tanto eléctrica como térmica, y sobre todo, por ser resistente a la corrosión ya que este es catódico respecto a otros materiales que pudieran estar enterrados en las vecindades de él.

<sup>3</sup> Las disposiciones básicas de las redes de tierra son: sistema radial, Sistema de anillo y sistema de red.

Por su parte, la enciclopedia del CEAC establece como calibres mínimos:

**Tabla Nº 1**  
**Calibre mínimo de conductores de tierra**

Material	Area (mm <sup>2</sup> )
Hilo o cable de cobre estañado	35
Hierro Galvanizado	100

Fuente: CEAC

El tendido de los conductores de tierra ha de realizarse con conductor desnudo, sin aisladores, al descubierto, de forma visible y de tal forma que no resulte fácil su deterioro por acciones mecánicas o químicas.

En la medida de lo posible, los conductores de puesta a tierra han de tener un contacto eléctrico perfecto, tanto con las partes metálicas que se desea poner a tierra, como con la placa o electrodo que constituye la toma de tierra propiamente dicha; de tal forma, que es necesario que las conexiones de los conductores de tierra con las partes metálicas y la toma de tierra, se realice con sumo cuidado, utilizando piezas de conexión y empalme adecuados; de igual forma los contactos han de disponerse limpios, sin la presencia de humedad y de tal forma que los posible efectos electroquímicos no destruyan con el tiempo las conexiones realizadas.

Es una práctica muy general, proteger los contactos con pasta o revestimientos de tipo químicos, siempre que la resistencia eléctrica del contacto no resulta elevada.

**Tabla Nº 2**  
**Corriente permisible en los conductores a tierra, con una temperatura final de 150° C**

Sección en mm <sup>2</sup>	Máxima corriente admisible en amperios		
	Conductores de acero	Conductores de aluminio	Conductores de cobre
35	-	200	250
50	100	250	350
70	175	-	-
100	200	-	-
200	300	-	-

Fuente: CEAC

En Venezuela, el Código Eléctrico Nacional, en su artículo 250-91a, establece que el conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser de cobre, de aluminio o de

núcleo de aluminio con recubrimiento de cobre (10% de la sección transversal). El material elegido será resistente a toda condición de corrosión que exista en la instalación o estará adecuadamente protegido contra la corrosión. El conductor puede ser sólido o cableado con cubierta o desnudo y debe ser instalado en un solo tramo, sin uniones o empalmes intermedios.

#### 4.1.1. CONECTORES Y ACCESORIOS

Los conectores son lo elementos encargados de unir a la red o sistema de tierra las tomas.

Los conectores utilizados en los sistemas de tierra son principalmente de tres tipos:

- Conectores atornillados
- Conectores a presión.
- Conectores soldados

Los conectores, independientemente de su tipo, deben poder soportar la corriente de la red de tierra en forma continua.

Los conectores de tipo atornillados, se fabrican en materiales como bronce con alto contenido de cobre, y formando dos piezas que se unen por medio de tornillos. Cuyo material es de bronce con alto contenido de silicio, lo que le aporta una gran resistencia a la corrosión y de tipo mecánica.

E bronce se utiliza, especialmente porque es un material no magnético, proporcionando una conducción segura de las descargas atmosféricas, que son de alta frecuencia.

Por otra parte, los conductores a presión son económicos y seguros (siempre que sean apretados con la fuerza necesaria), por lo que se usan muy frecuentemente, proporcionando un buen contacto y una buena relación costo beneficio.

Los conductores soldados (*cadweld*) son los más económicos y seguros, por lo que se utilizan con gran frecuencia.

Ilustración 2

#### EMPALME DE CABLE A SUPERFICIE DE HIERRO

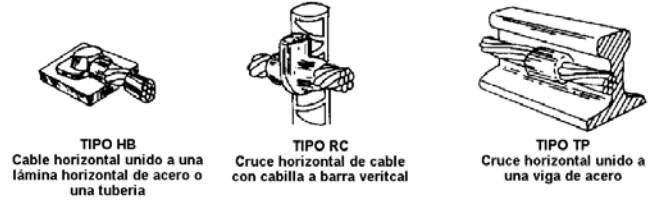


Ilustración 3

#### EMPALME DE CABLE A BARRA DE TIERRA



Ilustración 4

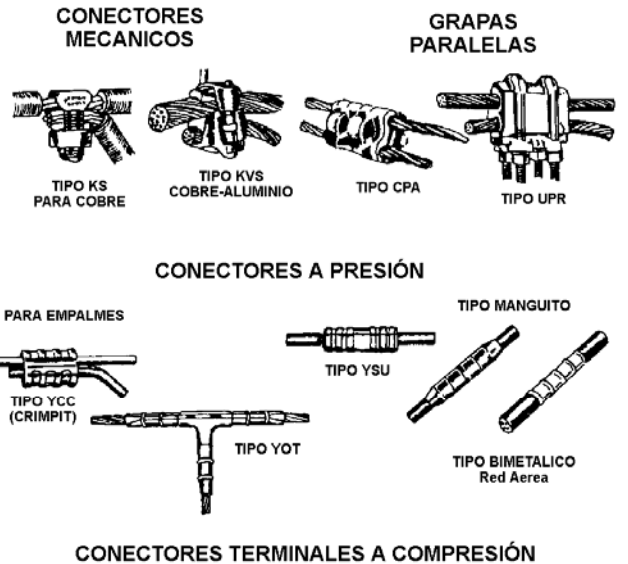
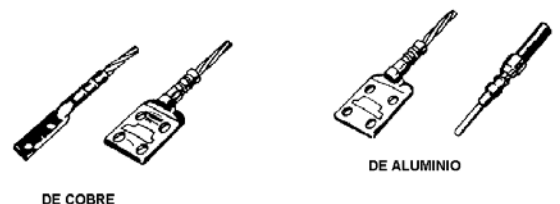


Ilustración 1

#### EMPALME CABLE CON CABLE



## 4.2. TOMA DE TIERRA

Las *tomas de tierra* es el mecanismo por el cual se realiza la puesta a tierra, estas son las partes metálicas conductoras, introducidas en el suelo y que forman unión conductora con el suelo. La toma a tierra se utiliza para derivar las corrientes que proveniente desde un conductor metálico de pequeña sección y buna condcutividad eléctrica a la tierra propiamente dicha. Para el paso de la corriente a la tierra, se hace necesario disponer de una sección suficientemente grande, ya que la resistencia de paso de un conductor metálico a tierra, no resulta de un efecto de resistencia de la superficie de limitación o contacto, sino más bien, de la resistencia de difusión de la corriente en el terreno. Es importante mencionar que el drenaje o difusión de la corriente en la tierra depende de la forma de la toma, el valor de su superficie, y la resistividad del terreno.

El drenaje o difusión de la corriente por la tierra ocasiona una caída de tensión en el mismo, que depende esencialmente de la resistividad.

Experimentalmente se ha demostrado que la caída de tensión entre una toma de tierra única y un punto de tierra durante la difusión de corriente, es máxima en la vertical de la toma de tierra y va disminuyendo a medida que aumenta la distancia radial desde la toma de tierra, a unos 20 metros de dicha toma resulta de un valor despreciable. La consecuencia de esto es la formación de un *embudo de tensión*, en las zonas próximas a la toma de tierra.

El mecanismo experimental para construir el embudo de tensión, es inyectar a una toma de tierra una corriente, y se mide la caída de tensión metro a metro con un voltímetro y una sonda, estos valores se llevan a una curva equipotencial.

Ilustración 5  
Embudo de tensión, para una toma de electrodo  
Fuente: González, F. (1998)

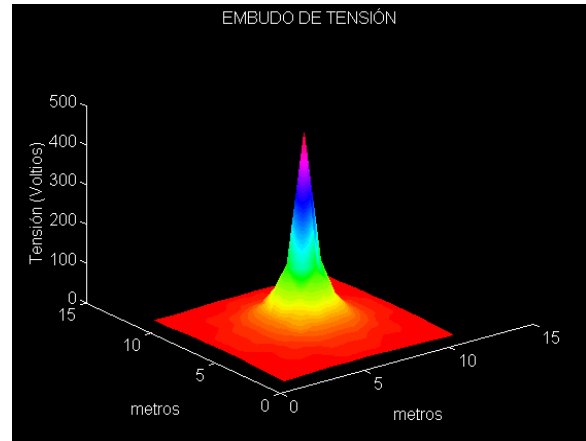
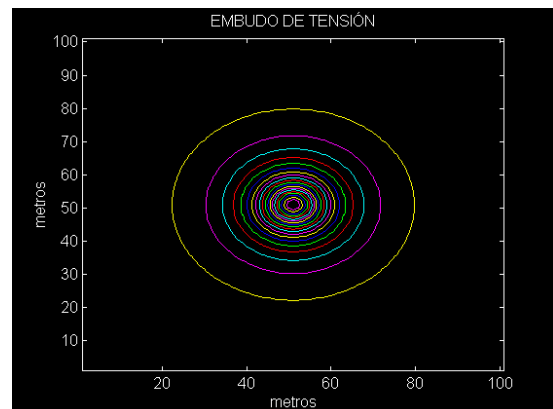
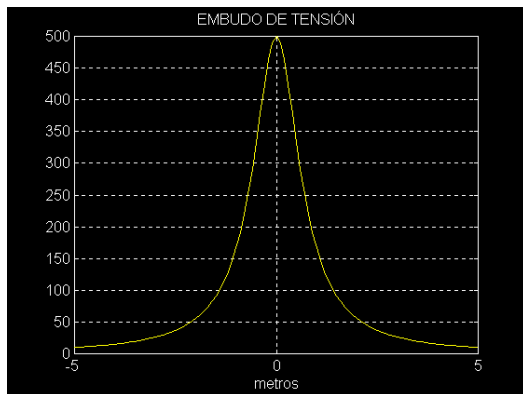


Ilustración 6  
Superficies equipotenciales, para una toma de electrodo



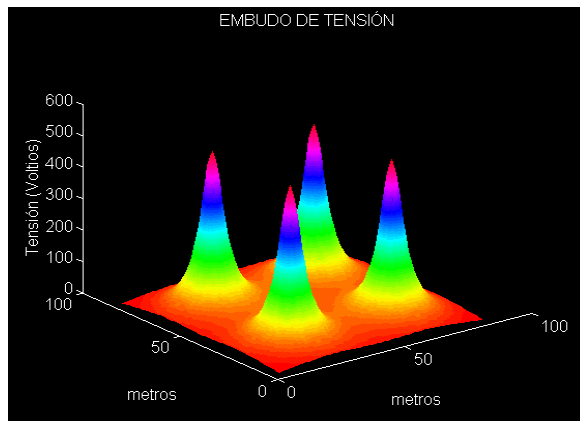
Fuente: González, F. (1998)

**Ilustración 7**  
Embudo de tensión, para una toma de electrodo



Fuente: González, F. (1998)

**Ilustración 8**  
Embudo de tensión para cuatro varillas



Fuente: González, F. (1998)

#### 4.2.1. TOMA DE TIERRA: ELECTRODOS, FORMA DE PICA, ESTACAS, VARILLAS O JABALINA (GROUND ELECTRODE O GROUNDING ROD)

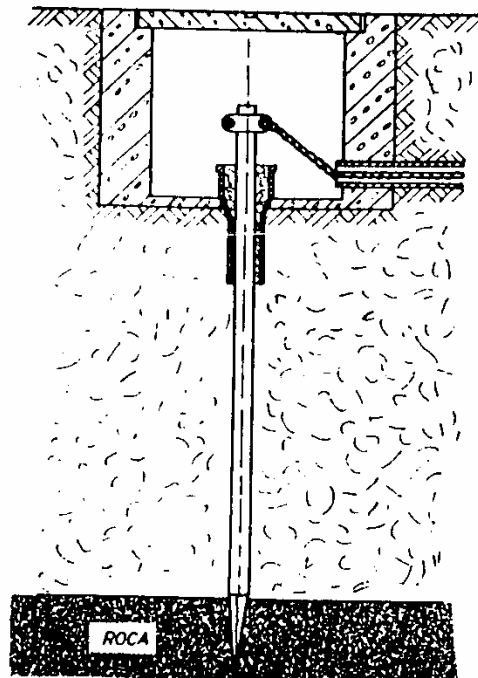
El sistema de toma de tierra por medio de varillas metálicas, es probablemente el más simple empleado, consiste en clavar verticalmente en el terreno tubos metálicos, varillas, perfiles laminados agudizados, etc. Este consta de un conductor que se introduce en la tierra y es usado para difundir las corrientes de tierra.

Estas varillas se clavan en terrenos más o menos blandos y sirven para encontrar zonas del suelo más húmeda, y por tanto con menor resistividad eléctrica. Esta toma de tierra es especialmente importante en suelos

completamente secos (expuestos al sol, escasos de vegetación).

Las varillas empleadas para esta toma de tierra pueden fabricarse de una gran cantidad de materiales, hierro galvanizado o bien *Copperweld*<sup>4</sup>.

**Ilustración 9**  
Toma de Tierra en forma de pica



El hierro galvanizado, es apropiado para aquellos suelos que poseen una constitución química que no ataque al material, en casos de suelos químicamente más activos, corrosivos, se emplea con bastante éxito, el copperweld; además este tipo de toma posee una buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión al tiempo que provee resistencia mecánica que lo hace fácilmente clavada en el suelo; además que se pueden sujetar a estas conectores para los conductores de tierra.

<sup>4</sup> Copperweld: Consiste en hierro al cual se le adhiere mecánicamente una capa de cobre, de forma que combina la alta conductividad del cobre con la alta resistencia mecánica del hierro. Los conductores Copperweld, son hechos de sección circular de cobre con núcleo de acero estirado en frío, según la norma de proyecto NL-P de CADAPE, especifica que estos conductores deben fabricarse según las normas ASTM B227, B228 y B229

El CEAC recomienda que los tubos de metal no férrico o de hierro galvanizado deben tener como mínimo un diámetro interior de 30 mm, y una longitud mínima de 2 m. Si los tubos son de hierro, en lo que se ha fijado electrolíticamente una capa exterior de cobre, de un espesor mínimo de 2mm, el diámetro interior mínimo puede ser de 25 mm.

En Venezuela el Código Eléctrico Nacional (CEN), establece que los electrodos de barras y tubos deben tener una longitud no menor de 2.5m, y además deben cumplir: Los electrodos de barras de hierro o acero deben tener un diámetro no menor de 16mm (calibre 5/8). Las barras de metal no ferroso y los equivalentes deben ser aprobadas y tener un diámetro no menor a 12.7 mm (calibre 1/2).

Mediante experimentación, se ha establecido que la resistencia de una toma ( $R_t$ ) se puede calcular mediante la ecuación (1):

$$R_t = \frac{\rho}{l} \quad (1)$$

Siendo:  $\rho$  la resistividad del terreno, expresada en Ohmios por metro, y  $l$ , la profundidad de la toma.

En la actualidad existe una gran diversidad de tipos de tomas de tierra de pica. Hay tomas de tierra que constan de tubos o barras que se empalman entre si, para proveer un mecanismo más simple de incamiento, a la vez de poder variar la profundidad según requerimientos.

En la práctica, existen además tomas de tierra en forma de tubos, con orificios homogéneamente esparcidos en su pared. Esta toma se rellena periódicamente con solución salina, de manera que por los orificios se difunda las sales al suelo, saturando las regiones de suelo próximas a la toma, y se mejora por *tratamiento químico* la resistencia de la tierra.

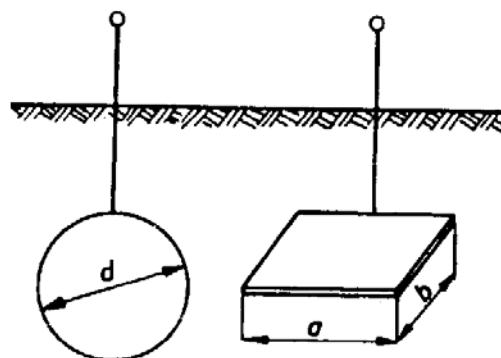
#### 4.2.2. TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLACA (GROUND MAT)

El sistema de toma de tierra en forma de placa es un mecanismo que es recomendable en aquellos casos en que el terreno tiene a una gran profundidad (1 a 2m) la tierra vegetal, o en aquellas instalaciones donde se requiere un valor muy bajo de resistencia de puesta a tierra como los laboratorios de alta tensión. En los restantes

casos es recomendable utilizar otro tipo de puesta a tierra.

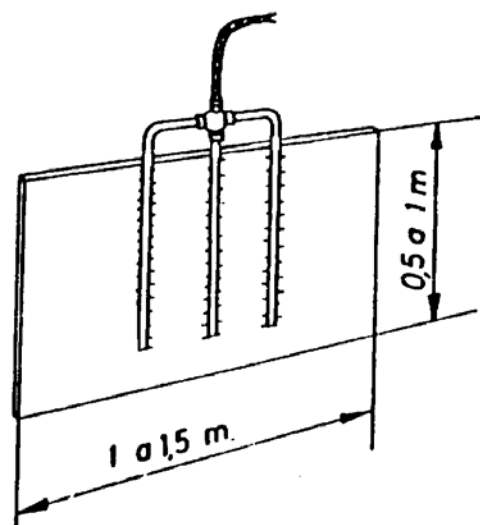
El emplear placas para las tomas de tierra es un mecanismo menos racional porque la mayor parte de la corriente de paso se concentra en las aristas que tienen una superficie lateral muy pequeña, aunque esto se puede remediar mediante la utilización de placas perforadas, para aumentar de esta forma la longitud de la aristas vivas.

Ilustración 10



El CEAC recomienda que las placas utilizadas para tomas de tierra que son de cobre deben tener un espesor mínimo de 2mm y si son de palastro galvanizado, su espesor será de 2.5 mm. En todos los casos la superficie total de la placa ha de ser como mínimo de 0.5 m<sup>2</sup>.

Ilustración 11



espesor mínimo de 6mm, mientras que las de metal no ferroso serán de un espesor mínimo de 1.3 mm.

Para placas de forma circular, se ha establecido que la resistencia de la toma de tierra ( $R_t$ ) dado por:

$$R_t = \frac{\rho}{4d} \quad (2)$$

Siendo  $d$  el diámetro de la placa. Por otra parte si se trata de una placa rectangular de lados  $a$  y  $b$ , la resistencia de la toma es:

$$R_t = \frac{\rho}{4.5\sqrt{ab}} \quad (3)$$

En las ecuaciones (2) y (3) el significado de  $\rho$  es la resistividad del terreno en Ohmios por metro.

El CEAC recomienda que las placas de puesta a tierra sean enterradas preferentemente de forma vertical, y hasta una profundidad suficiente para encontrar un terreno bastante húmedo, y por consiguiente es mejor conductor. En terreno homogéneo y en condiciones normales se pueden instalar a una profundidad de 2m. Es importante mencionar que no se recomienda profundidades mayores, aunque se trate de suelos de mala calidad, una que se desea la mayor cercanía entre el equipo de puesta a tierra y el equipo de proteger. En aquellos casos en que exista una capa de rocas, grava, etc., a una profundidad menor de 2 m, la placa se debe instalar en forma horizontal, de manera que se consiga un buen contacto con la capa superficial.

#### 4.2.3. TOMA DE TIERRA EN FORMA DE PLETINA

El sistema de puesta a tierra con toma en pletina, consiste en una pletina o banda metálica que se instala debajo del suelo, a una poca profundidad y horizontalmente; esta se extiende sobre una gran superficie y se utiliza especialmente en instalaciones de tipo exterior o intemperie, o en aquellos casos en que el suelo no admite otra forma de toma de tierra (suelos muy rocosos).

En el caso de una pletina de longitud  $l$ , de espesor despreciable, en un suelo de resistividad  $\rho$  en Ohmios por metro, se tiene que  $l$  resistencia de la toma es:

$$R_t = \frac{2\rho}{l} \quad (4)$$

De la ecuación anterior (4), se desprende el hecho de que indistintamente se pueden emplear tomas de tierra en forma de tubo o en forma de pletina, ya que la forma no influye en el valor de la resistencia.

El CEAC recomienda las dimensiones mínimas para tomas de tierra en forma de pletinas:

Longitud: 5m.

Sección :

Cobre : 90 mm<sup>2</sup>

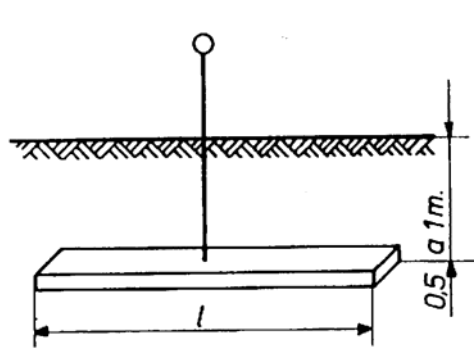
Hierro Galvanizado: 120 mm<sup>2</sup>

Espesor:

Cobre: 3 mm

Hierro Galvanizado: 4 mm

Ilustración 12



#### 4.2.4. TOMA DE TIERRA EN FORMA RADIAL

Este tipo de toma consiste en uno o varios electrodos a los cuales se le conectan las derivaciones a cada equipo.

La toma de tierra en forma radial, es el más barato pero menos satisfactorio de las puesta a tierra, ya que al producirse una falla en un equipo, se producen elevados gradientes de potencia; esto se debe a que si el grupo de electrodos se encuentran localizados lejos de la barra común, la longitud de la línea de conexión a tierra y en consecuencia la distancia entre cualquier grupo de estructura y electrodos puede ser excesivamente grande, presentando una alta impedancia,

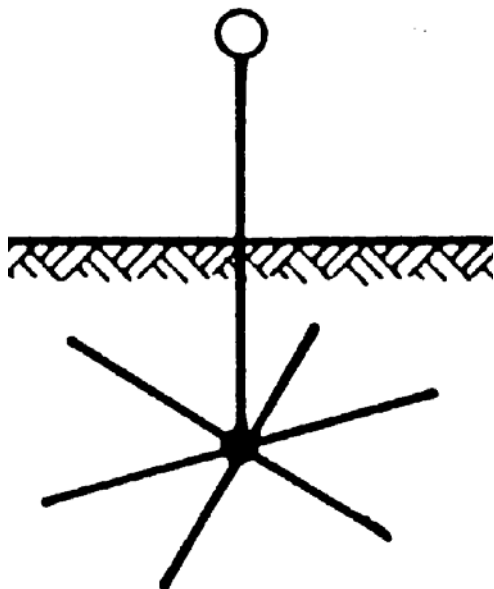


aun pueden atenuar la corriente de falla a tierra.

La toma de tierra de tipo radial, es de utilidad en algunos casos donde se encuentra condiciones de terrenos difíciles. (Por ejemplo: capas rocosas superficiales)

Mediante la instalación de grupos de electrodos y su conexión a la barra común a través de conductores de gran calibre, se puede incrementar la confiabilidad en este sistema de aterramiento.

Ilustración 13



#### 4.2.5. TOMA DE TIERRA EN FORMA DE BUCLE O LAZO O ANILLO

En algunas ocasiones se suelen crear la toma de tierra en forma de lazo, la cual consiste en utilizar el propio conductor de puesta a tierra, para crear un lazo cerrado, ya sea en forma circular, rectangular, etc. Este método resulta sumamente económico, ya que no involucra el uso de otros electrodos. En la práctica la resistencia de esta toma se aproxima por la ecuación (4), correspondiente a una pletina.

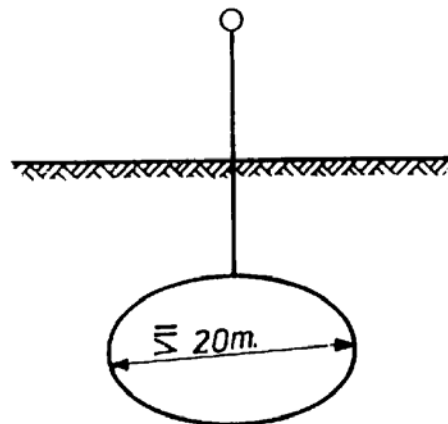
El sistema de lazo o anillo se construye simplemente colocando en forma de lazo o anillo un cable de suficiente calibre (100 mcm) alrededor de la superficie

ocupada por el equipo o la subestación, y conectando derivaciones a cada aparato, mediante un cable de calibre menor (500 mcm o #4/0 AWG). Este sistema es sumamente económico y eficiente, además en el se eliminan grandes distancias de descarga a tierra del sistema radial.

En la conexión en anillo como la longitud de conexión entre la estructura y el anillo es relativamente corta y por causa de los numerosos pasos de conexión en paralelo, la resistencia efectiva de todas las conexiones a tierra es menor. Por otra parte la multiplicidad de pasos minimiza la posibilidad de que todas las conexiones de tierra fallen al mismo tiempo es estrictamente remota.

El calibre del conductor para los sistemas en anillo según Raúll (1987), es cable de cobre de 1000 mcm.

Ilustración 14



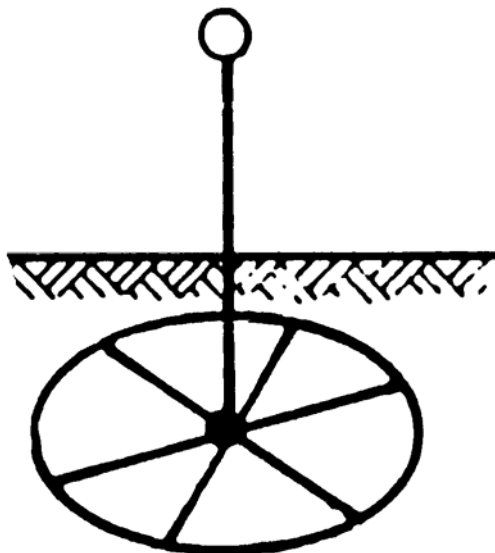
#### 4.2.6. TOMA DE TIERRA EN FORMA DE ESTRELLA

La toma de tierra en forma de estrella, consiste de conductores radialmente distribuidos en torno a un punto central, por lo general se trata de una estrella de seis puntas, en la cual la separación entre conductores ramificados no debe exceder los 60°. El aumento del número de las ramas de la estrella apenas contribuye a la disminución de la resistencia de la toma.

En forma teórica para estimar la resistencia de este tipo de toma, se aproxima mediante la ecuación número (4), para la

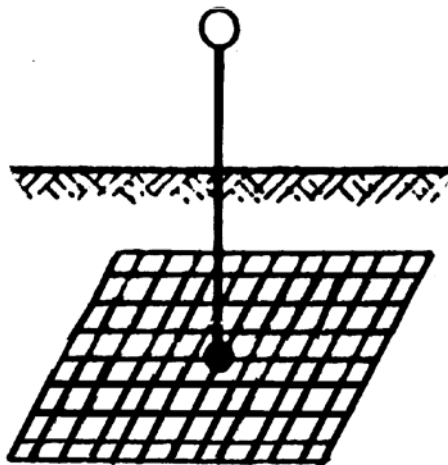
toma de tierra con forma de pletina con la salvedad que la longitud es igual a la suma de las longitudes de los conductores radiales.

Ilustración 15



Los equipos y estructuras que se conectan a la malla en el punto más cercano y el número de pasos en paralelo entre un terminal dado y los electrodos de tierra resulta ser un camino de alta conductividad y baja resistencia.

Ilustración 16



#### 4.2.7. TOMA DE TIERRA EN FORMA DE ESTRELLA EN LAZO

La toma de tierra en forma de estrella en lazo consiste en utilizar una configuración de toma en forma de estrella,, cuyos extremos de la ramificaciones son cerradas mediante un conductor que forma el lazo o bucle.

El calculo de la resistencia de tierra, se efectúa mediante la aproximación mediante la ecuación (2) o (3) para placas.

#### 4.2.8. TOMA DE TIERRA DE RED EN MALLA (*GROUNDING GRID*)

El aterramiento en malla, es un sistema de electrodos enterrados y un número de interconexiones entre ellos.

Esta toma consiste en una malla metálica, por lo general, rectangular. En este sistema se crea la malla formada por cables de cobre, con electrodos de puesta a tierra generalmente conectadas entre las intersecciones de los cables que forman la red.

Este sistema de puesta a tierra, es actualmente el más utilizado en el Sistema Interconectado Nacional, por ser el sistema más eficiente, pero también resulta ser el más caro de todos los tipos.

La malla de puesta a tierra en las subestaciones convencionales, alcanza una extensión apreciable. Así por ejemplo, se tiene que una subestación de 230 KV, configuración *interruptor y medio*, afecta un área promedio de 12000 a 14000 m<sup>2</sup>. La malla de instalación a tierra, denota, en consecuencia, casi la misma extensión, siendo su valor ohmico muy bajo, aun en condiciones de suelo seco. En numerosas mediciones de conexiones a tierra realizadas en Venezuela, se ha podido apreciar que la resistencia de puesta a tierra de estas mallas difícilmente excede los 2Ω. Siegert (1996)

El CEAC, establece que de diámetro o la longitud del mayor lado de la superficie mallada no debe sobrepasar los 20m. De igual forma para el montaje de tomas de tierra en anillo, estrella o mallas, se emplea frecuentemente el cable de acero, o de hierro galvanizado de 100 mm<sup>2</sup> de sección mínima

y 3 mm de espesor mínimo. Algunas veces, se emplea también el acero cableado, con sección mínima de 50 mm<sup>2</sup>, la cinta de cobre con sección mínima de 50 mm<sup>2</sup> u espesor mínimo de 3mm y, finalmente, conductor desnudo de cobre de 35 mm<sup>2</sup> de sección mínima.

El autor Raúll (1987), recomienda como calibre mínimo el #4/0 AWG de cobre con electrodos de varilla Copperweld.

Algunas de las razones para usar la combinación de varillas verticales y conductores horizontales son los siguientes:

1. En subestaciones un solo electrodo es, por si solo, inadecuado para proveer seguridad al sistema de tierra. En cambio, cuando varios electrodos, son conectados los unos a los otros y todo el equipo de neutro y estructuras son aterradas, el resultado es esencialmente un arreglo de malla que asegura un sistema de aterramiento más seguro.
2. Si la magnitud de la corriente disipada en tierra es alta, raramente es posible instalar una malla con resistencia tan baja como para asegurar que el pico del potencial de tierra no genere en la superficie gradiente para poner en peligro el contacto humano. Entonces, el peligro puede ser eliminado solo por el control del potencial local a través del área entera. Un sistema que combina una malla horizontal con un número de varillas verticales entrando en una suelo bajo, posee las siguientes ventajas:
  - Una malla horizontal es más efectiva reduciendo el peligroso tensión de paso y de toque en la superficie de la tierra, con tal que la malla se instale en una profundidad pequeña comúnmente 0.3 a 0.5 m (12-18 pulgadas) debajo del suelo, suficientes varillas de tierra pueden estabilizar el rendimiento del sistema.
  - Las varillas que penetran el suelo con baja resistencia son mucho más efectivas en disipar la corriente de falla.
  - Si las varillas son instaladas predominantemente a lo largo del perímetro de la malla en suelo uniforme o no, las varillas moderaran considerablemente el incremento de el gradiente superficial cercano a la periferia de la malla.

Algunas de las ideas y conceptos, de los siguientes puntos pueden servir como guías

para comenzar el diseño de una malla de tierra típica:

- Un conductor continuo debe bordear todo el perímetro que encierra el área de la subestación o un poco más. Esta medida ayuda a prevenir concentraciones de altos valores de corrientes y altos gradientes de potencial, ambos en el área de la malla y cerca del final del proyecto de puesta a tierra, Encerrando más área también reduce la resistencia de aterramiento de la malla.
- Dentro del anillo, conductores pueden ser conectados en líneas paralelas y, es una buena práctica, a lo largo de estructuras y las varillas, para proveer una corta conexión de tierra.
- Un sistema de malla de tierra típica puede incluir conductor de cobre #4/0 AWG, enterrado 0.3 a 0.5 m (12-18 pulgadas) debajo del suelo, espaciados 3 a 7m (10 a 20 pies), en una malla tipo. En las conexiones de cruce, los conductores deben seguramente ser conectados- Las varillas de tierra pueden estar en las esquinas de la malla y en cada unión secundaria a lo largo del perímetro. Las varillas de tierra también pueden estar instalados en los puntos de los equipos más grandes de las subestación. En suelos de mixtos o muy rocosos, se puede utilizar varillas de una gran longitud (algunas que exceden los 100 pies han sido utilizadas).
- La extensión del sistema de puesta a tierra se deben extender por debajo de toda el área de la subestación, e incluso frecuentemente alcanza hasta las rejas del perímetro de seguridad. Múltiples conductores o de un calibre mayor pueden ser utilizados donde grandes concentraciones de corriente pueden ocurrir, tales como la conexión de neutro de generadores, bancos de capacitores o transformadores.
- La razón de los lados de los cuadros de la malla son usualmente 1:1 a 1:3, a menos que un análisis preciso garantice un valor más extremo. Frecuentemente las conexiones de los cruces de la malla, posee una relativamente menor efecto en la reducción de la resistencia de la malla. Su función primaria es asegurar el control adecuado del gradiente de potencial en la superficie. Las conexiones de cruce son también usados

en asegurar que múltiples partes dividan la corriente de falla, minimizando la caída de voltaje en la malla misma, y proveyendo una cierta medida redundante en caso de que un conductor de tierra falle.

#### 4.2.9. PUNTA FRANKLIN O ELECTRODOS PARA PARARRAYOS

Como punta Franklin, se entienden el conjunto de electrodos que se instalan en la parte más elevada de las estructuras de una subestación y que sirven para complementar la red de cables de guarda, que se extienden por encima de los topes de las estructuras metálicas de las subestaciones.

Estas puntas son fabricadas con tramos de tubos de hierro galvanizado, de unos 40 mm de diámetro y unos 3 m de largo, estos se atornillan a la estructura metálica de la subestación, y en su extremo superior se cortan en forma de bisel, para crear el efecto punta.

En cuando al calibre de los terminales del cable de guarda como el de los pararrayos, deben tener como mínimo, el calibre del cable de la red de tierra, esto es debido a que las descargas de los rayos son de alta frecuencia, Lo ideal es que el calibre del cable de descarga a tierra del mismo calibre de las barras de tierra, para atenuar el reflejo de las ondas viajeras que provocan un aumento de la amplitud de la onda de choque.

#### VALORES RECOMENDADOS DE LA RESISTENCIA DE LAS TOMAS DE TIERRA

La resistencia que ofrece un sistema de puesta a tierra es una función de la resistividad del terreno ( $\rho$ ) y de las dimensiones de la propia toma. El valor máximo que la CEAC admite resulta ser:

Redes de baja tensión: 15  $\Omega$

Redes de alta tensión: 20  $\Omega$

Pero, de acuerdo a la resistencia de la toma de tierra, el CEAC, ha establecido en cierta forma la calidad del sistema de puesta a tierra.

Tabla Nº 3  
Calidad de las tomas de tierra

Resistencia Eléctrica ( $\Omega$ ) ( $R_t$ )	Calidad	
	Redes de alta tensión	Redes de baja tensión
Menos de 1 $\Omega$	Excelente	Excelente
Entre 1 a 5 $\Omega$	Muy buena	Buena
Entre 5 y 10 $\Omega$	Buena	Aceptable
Entre 10 t 15 $\Omega$	Aceptable	Regular
Entre 15 y 20 $\Omega$	Regular	Mala
Más de 20 $\Omega$	Mala	Mala

Fuente: CEAC

En Venezuela, CADAFE exige que la resistencia a tierra de las estructuras y los cables de guarda utilizados en líneas de transmisión sea como máximo de 20  $\Omega$ . En el caso de que la resistencia de puesta a tierra de un soporte metálico este comprendido entre 20 y 80 Ohmios se colocarán cuatro conductores en forma de estrella, enterrados a 0.8 m de profundidad sobre 25 m de largo cada uno. Utilizándose para el conductor acero galvanizado o Copperweld con secciones mínimas aceptables de 100 mm<sup>2</sup>, para el acero y 35 mm<sup>2</sup>, para el copperweld.

#### 4.3. TIERRA PROPIAMENTE DICHA

Se llama tierra, en general, a los elementos que constituyen el terreno, tales como: arena, grava, arcilla, etc... Para determinar el valor de la resistencia eléctrica que ofrecen los circuitos de tierra, tiene capital importancia la *resistividad* ( $\rho$ ) o resistencia específica del suelo, de hecho, la resistencia de puesta a tierra tienen fundamentalmente como factor proporcional determinante la resistividad del terreno y del subsuelo en que esta enterrada el sistema de puesta a tierra

La resistividad del suelo se expresa en unidades de Ohmios por metro ( $\Omega.m$ ), suponiendo una sección fija de 1 m<sup>2</sup>. El determinar la resistividad del suelo es una tarea sumamente importante, debido a que determinar la resistencia de una toma única de tierra, solo requiere del perfil de la resistividad aparente del terreno, pero en el caso de las mallas de tierra de una gran extensión (caso de subestaciones) este procedimiento no es aplicable.

Para determinar la configuración de la malla de tierra que ocupa una gran superficie, se requiere del conocimiento de la resistividad a diversas profundidades, debido a que la presencia de estratos muy profundos

de gran resistencia o muy conductores, puede tener una influencia mínima sobre la resistividad aparente, pero esas peculiaridades pueden variar notablemente la resistencia de la red de tierra que se establezca más a la superficie por la deformación que provocan sobre los estratos de corriente.

Sin embargo, las resistividades del terreno en la superficie y a profundidad, raramente se conocen antes del establecimiento de la obra, por tanto se han de emplear mecanismos para la medición del mismo.

La resistividad del suelo depende entre otros factores de:

#### 4.3.1. TIPOS DE SUELO

La resistividad del suelo aumenta con la edad de formación del mismo y por la poca uniformidad que presentan los terrenos. Debido a la propia composición del terreno la resistividad de este no es uniforme; si no que puede variar en capas o depósitos según la profundidad, o según la dirección en que mide.

TABLA Nº 4

##### Resistividad del Suelo según su clase

Tipo de suelo	Resistividad ( $\Omega.m$ )
Terreno pantanoso o húmedo	50
Terreno de labor o arcillosa	100
Tierra arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca	1000
Tierra guijarosa	1000
Suelo rocoso	3000

Fuente: CEAC

Tabla Nº 4.1.

##### Resistividad de Suelo, según su material

Tipo de suelo	Resistividad ( $\Omega.m$ )
Arcilla	3 - 163 (40)
Arcilla con poca arena o grava	100 - 1350 (158)
Concreto	300 - 500 (400)
Roca suelta, arena, grava con un poco de arcilla	590- 4580 (940)
Roca Sólida	5000 - 40000 (10000)
Agua	100 - 200 (800)

NOTA: los valores encerrados entre paréntesis son valores promedios

Los terrenos rocosos no son aceptables debido a su elevada resistividad y si no resultase fácil encontrar terrenos adecuados en las proximidades de la instalación, se probará como solución el *tratamiento químico*

del terreno, y de ser posible se dispondrá de una canalización que permita humedecer las tomas de tierra en situaciones calurosas.

#### 4.3.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SUELO

La resistividad del suelo varía según la cantidad de sales soluble, ácidas o alcalinas, materia orgánica, etc., que puedan contener. De hecho este es un aspecto muy importante, porque además de afectar la resistividad del suelo, compromete las propiedades de los conductores que se utilicen por la corrosión.

#### 4.3.3. TEMPERATURA

La resistividad del terreno aumenta abruptamente cuando la temperatura cae por debajo del punto de congelación del agua (0° Celsius). El aumento de la temperatura disminuye el valor de la resistividad del terreno, por lo que muchas veces es más conveniente profundizar las tomas de tierra hasta encontrar capas de terreno situado bajo la zona susceptible a la congelación en las estaciones frías.

#### 4.3.4. HUMEDAD

La resistividad aumenta abruptamente cuando la humedad cae por debajo de un 15% por cantidad de peso. Por ello, cuando sea posible, las barras de la malla de tierra deben enterrarse a una profundidad para asegurar el contacto con partes húmedas.

En algunas ocasiones resulta conveniente cultivar un pequeño prado 50 a 100 m<sup>2</sup> encima de las tomas de tierra, para mantener húmeda la tierra sobrepuesta. No deben instalarse las tomas de tierra directamente dentro del agua, pues, aunque disuelve las sales del terreno, resulta, por sí misma, mala conductora y además existe mayor peligro de corrosión.

Resulta conveniente tratar los terrenos con sal común, la cual actúa sobre el agua haciéndola conductora y además, a

causa de que es un sustancia higroscópica<sup>5</sup>, la sal retiene la humedad en el terreno.

#### **4.3.5. CAPACITANCIA**

---

En la gran mayoría de estudios el suelo se considera que actúa como un conductor de resistividad " $\rho$ ", y una constante dieléctrica " $K$ ", sin embargo excepto para altas frecuencias de combinación con muy altas resistividades, puede considerarse el efecto de la capacitancia y el suelo como una resistencia pura.

#### **4.3.6. GRANULOMETRÍA**

---

La granulometría es la técnica para la medida del tamaño de los granos que conforman el suelo. Este es un elemento importante que influye sobre la *porosidad* y el poder de retener la humedad, además sobre la calidad del contacto con los electrodos. La resistividad aumenta en la medida en que mayor es el tamaño de los granos que conforman el suelo. Por esta razón el valor de la resistividad de la grava es mayor que el correspondiente a la arena y que esta supera al de la arcilla.

Los suelos de granos gruesos (grava, guijarros, etc.) no son convenientes para la construcción de buenas instalaciones de tierra, pero para paliar la situación, se rodea la superficie de los electrodos con un cierto espesor de tierra fina o de otro material granulométricamente menor y mejor conductor.

#### **4.3.7. COMPACIDAD**

---

La compactación del suelo al igual que la ya mencionada granulometría afecta el grado de la resistividad. Así, mientras mayor es la compactación del suelo, disminuye la resistividad.

#### **4.3.8. GRADIENTES DE POTENCIAL**

---

Cuando un contacto entre un electrodo y el terreno es de poca calidad, puede establecerse durante la circulación de cierto valor corrientes de falla, pequeñas descargas que franqueando las delgadas

capas de aislantes que separan los dos medios, contribuya a igualar el potencial entre ambos. En estas condiciones la resistencia de tierra resultaría menor al que se obtiene en ausencia de este fenómeno (sobretudo en instalaciones de puesta a tierra pequeña).

#### **4.4. CORROSIÓN DE CONDUCTORES**

---

Los materiales conductores cuando son utilizados para el sistema de puesta a tierra, al entrar en contacto con los diferentes agentes químicos que componen el terreno, sufren un fenómeno de corrosión. La severidad de la corrosión va a depender tipo de suelo y el material conductor.

El proceso de la corrosión que sufren los metales en los suelos o soluciones acuosas conductoras, es básicamente de naturaleza electroquímico, que se debe a la diferencia de potencial entre los metales, o las condiciones de electrolito del medio que rodea el metal.

En forma muy simplista, cuando dos metales se halla incrustados en el suelo, se forma un especie de batería, en la cual la corriente fluye del cátodo al ánodo, los iones positivos se desplazan hacia el cátodo; por tanto este entra en reacción electroquímica, por lo que no se corroerá como sucede en el ánodo.

Las sales y ácidos disueltos en el agua que contiene los suelos, hace que se formen en esta pseudobaterías, formen celdas o baterías galvánicas, dando como resultado la corrosión de los metales enterrados.

La corrosión que los suelos provocan en los metales enterrados, es de gran importancia, ya que este ocasiona costos en forma directa por el mantenimiento y reemplazo del sistema de puesta a tierra, en ocasiones esta corrosión sino es estudiada con cuidado, deteriora la estructura del sistema de puesta a tierra, lo que puede dar lugar situaciones peligrosas.

Los materiales más comúnmente empleados para la construcción de sistemas de puesta a tierra son:

- Aceros corrientes o de bajo carbono, Aceros galvanizados.
- Aceros inoxidables, tipo 302, 304, 316, Aluminio.
- Copperweld.

---

<sup>5</sup> La higroscopicidad es la propiedad de algunos cuerpos inorgánicos, de absorber rápidamente la humedad atmosférica.

- Aleaciones cobre níquel.
- Aceros al carbono con protección catódica.

En la actualidad no existen valores tabulados que establezcan en forma exacta la corrosión que sufre un metal dado el suelo en general, esto se debe a la complejidad de factores que influyen en la corrosividad del suelo, y que el comportamiento de cada material es diferente para factores comunes.

Los factores que afectan la corrosividad del suelo son:

- **Porosidad o aireación:** Este factor es sumamente negativo para el caso del Hierro (Fe) y el Zinc (Zn), pero en cambio es positivo para aquellos metales que forman una capa protectora con el oxígeno; Aluminio (Al), acero inoxidable. Un suelo que resulta poroso, posee la característica de retener la humedad por un período mayor de tiempo, al igual que contribuye la aireación; ambos factores que aumentan la corrosión inicial de material. Los productos derivados de la corrosión en un suelo aireado pueden ser más protectores que en aquellos formados en un suelo desairado; ocasionando esto una situación compleja. En los suelos mal desairados, la corrosión puede localizarse en ciertas partes del metal, provocando picaduras, afectando esto negativamente la resistencia mecánica y eléctrica; aspecto que no sucede con la corrosión uniforme. De igual forma en un suelo mal aireado puede encontrarse bacterias sulfato reductoras, organismos estos que provocan la mayor parte de la corrosión. De lo antes expuesto, se evidencia que en un suelo bien aireado, la tasa de corrosión es alta inicialmente, pero decae rápidamente con el tiempo debido a la presencia de abundante oxígeno, pero en cambio los suelos mal aireados, mantienen una tasa de corrosión que decae muy poco en el tiempo.
- **Resistividad:** Este factor tiene un efecto común con todos los metales, y es quizá con el porcentaje de humedad del suelo el factor más negativo. Un suelo es más corrosivo cuando más conductor o menos resistividad tenga, igualmente a mayor humedad mayor corrosión.

Tabla N° 5

Clasificación de la corrosividad de los suelos atendiendo a su resistividad según E. R. Evans

Resistividad del suelo ( $\Omega.m$ )	Clasificación
0 – 900	Muy severamente corrosivo
900- 2300	Severamente corrosivo
2300 – 5000	Moderadamente corrosivo
5000 – 10000	Poco corrosivo
Mayor de 10000	No corrosivo

- **Materias Orgánicas:** La presencia de materias orgánicas resulta altamente perjudicial al Hierro, Zinc, Plomo y Cobre. De ser posible la instalación de tomas de tierra debe evitar las tierras que contengan, basura, escorias, residuos industriales. En tales condiciones o en caso de tierra salada (playa de mar), es conveniente emplear siempre varillas en lugar de cable conductor, enfundándola en tubo plástico en la parte enterrada desde unos 30 cm encima del suelo hasta el empalme con la placa o estaca.
- **Ph o Acidez:** Los terrenos ácidos suelen ser más corrosivos que los alcalinos.

Tabla N° 6

Valores de corrosión según M. Romanoff

Metal	Perdida de peso <sup>6</sup>
Acero al carbono	4.50
Cobre	0.70
Plomo	0.52
Zinc	0.30

Las fluctuaciones mayores se suelen encontrar en el Hierro y Zinc en suelos ácidos y de alta conductividad con valores de corrosión de 5 veces el expresado.

El NACE Technical Committee, cita los siguientes resultados (Tabla N° 7) en pérdida de peso en gramos de unas barras de 3.7 Kg. De peso total, enterrados durante un año en 3 suelos de diferentes resistividad, en estas barras un gramo equivale a 0.027%.

TABLA N° 7

Metal	Corrosión, según el tipo de suelo		
	Resistividad ( $\Omega. Cm$ )		
	300	3000	5000
Acero al carbono	18	10	2
Acero acoplado con cobre	50	48	2

<sup>6</sup> Pérdida de peso en miligramos por decímetro cuadrado de superficie por día. Tomado para 44 suelos diferentes en un período de 12 años.

Cobre	4	2	2
Acero inoxidable	1	0	0
Acero galvanizado	6	1.5	1.5

- **Sales disueltas:** La presencia de sales disueltas en el terreno es altamente perjudicial, aunque varía bastante con el metal y la sal que se trate. Generalmente el NaCl y SO<sub>4</sub> Na<sub>2</sub> presentes en los suelos son perjudiciales. Las altas concentraciones de Cloruro de Sodio (NaCl), como en las tierras playeras) y Sulfato de Sodio en los suelos cuyo drenaje, provocan que el suelo sea extremadamente corrosivo. El efecto de las sales se debe al hecho de que la conducción de la corriente se realiza primordialmente a través del electrolito, por las sales y el agua contenida en el terreno, la cantidad de sales disueltas en el agua, afectan su resistividad en diferentes formas.

El cobre y sus aleaciones son materiales de uso muy común en las instalaciones de puesta a tierra, estos son resistentes a la corrosión en la mayoría de los suelos, en comparación en otros metales como el hierro, zinc, aluminio, etc.

La NACE Technical Committee of the Naval Facilities Engineering Command, publicaron un trabajo titulado "Field Testing of Electrical Grounding Rods", en este se incluyen ensayos en todos los metales y aleaciones de posible aplicación como elementos disipadores o difusores de corrientes de tierra. Las muestras fueron barras cilíndricas de aproximadamente 5/8 de pulgadas de diámetro y 8 pies de largo, enterrados en dos tipos de terreno, 1200Ω.cm y 85Ω.cm, sujetas a inundaciones con agua salada. Los resultados se refieren al terreno con resistividad de 1200Ω.cm, ya que para el de 85Ω.cm son parciales los resultados. El peso de las muestras fue de 3.7 Kg., cada una.

TABLA N° 8

Pérdida de peso expresadas en porcentaje del peso original para 1, 3 y 7 años

Material	Pérdida de peso en % del peso inicial		
	1 años	3 años	5 años
Acero al carbono (solo)	2.60	6.11	7.61

Acero galvanizado (solo)	1.50	2.40	2.20
Copperweld (solo)	0.52	0.03	1.40
Acero Inoxidable 302 (solo)	0.20	0.53	1.40
Aluminio 6061 T-6 (solo)	0.92	1.60	2.30
Acero al carbono recubierto con inoxidable 304 (solo)	0.29	-	0.87
Zinc acoplado con acero	6.88	13.0	29.60
Acero al carbono acoplado con zinc	0.92	0.830	0.200
Acero al carbono con aluminio	1.00	0.53	0.38
Aluminio acoplado con acero	7.4	20.5	22.7

En general, un suelo mal conductor, con poca humedad y con pocas sales disueltas, es generalmente menos corrosivo que un suelo altamente conductor. Se debe acotar que la conductividad no es una indicativa suficiente para la corrosividad del suelo, otros factores también juegan papel en este fenómeno.

#### 4.6. TRATAMIENTO DE MATERIALES Y SUELOS PARA DISMINUIR LA CORROSIÓN

Algunas técnicas han sido probadas con éxito, para disminuir la corrosión de los metales sujetos al contacto con el terreno:

- Aplicar pinturas a la superficie de los metales (en el caso de los sistemas de puesta a tierra, no se emplea, porque la pintura es aislante).
- Revestimientos con cemento Portland.
- Envoltura metálicas como galvanizados y cubiertas de cobre hacen el acero más duradero.
- Alteración de los suelos. Un suelo con alto contenido de ácidos orgánicos, puede ser hecho menos corrosivo si se agregan piedras calcáreas picadas. Una capa de tiza o yeso (CaCO<sub>3</sub>) alrededor de las estructuras enterradas ha sido usada en algunos suelos, agregados de Bentonita calcálicas y sódios, resinas, etc.

#### 5. VALORES TÍPICOS DE LA RESISTIVIDAD EN VENEZUELA

Venezuela, es un mostrario de resistividades en sus suelos. La magnitud de la resistividad puede variar desde valores tan bajos como 5 Ω-m en ciertos puntos de los valles de Tuy y el valle de Caracas. Hasta 1



M $\Omega$ -m medidas en las cercanías de Puesto Ayacucho.

Por ejemplo en las montañas un valor representativo es mayor a 1000  $\Omega$ -m y en los páramos este valor son diez veces mayor. En la cuenca del lago de Maracaibo casi siempre esta por debajo de los 100  $\Omega$ -m, en los llanos altos el rango está entre los 40 y 200  $\Omega$ -m aproximadamente, en los llanos bajos este valor se ubica como en la cuenca del Lago de Maracaibo. En los valles bien irrigados la resistividad está en el orden de 100  $\Omega$ -m, pero en valles rocosos esta cifra aumenta al menos 10 veces.

El macizo Guayanes y todo lo ubicado al sur del Río Orinoco es frustrante, se puede estar contento si se consigue una resistividad de 1000 $\Omega$ -m, siendo una cifra representativa los 4000 $\Omega$ -m.

Las zonas costeras con normalmente de baja resistividad (menor a 100 $\Omega$ -m), y las zonas desérticas de Lara de alta resistividad (mayor a 2000 $\Omega$ -m).

Las mesetas de los llanos orientales son otro caso de alta resistividad cuyos valores normalmente exceden los 3000 $\Omega$ -m.

De lo anterior se puede deducir que Venezuela es normalmente un país de alta resistividad del terreno, agravado esto por los largos períodos de sequía. En consecuencia muchas soluciones de otros países no son suficientes en Venezuela.

**Tabla N° 9**  
Valores Típicos de resistividad en la Zona central Venezolana

Subestación	Resistividad promedio ( $\Omega$ -m)	Tipo de Terreno
Valle seco	40	No especificado
Camatagua	20	No especificado
Soco	15	Arcilloso-greda

En la región central del país se puede encontrar en la mayoría de la subestaciones eléctricas, una resistividad entre 10 y los 100 $\Omega$ -m, mientras que en las zonas centro Occidental se logran valores cercano a los 100  $\Omega$ -m en el terreno de la subestación Cabudare.

**Tabla N° 10**  
Valores Típicos de resistividad en la Zona Llanos Occidentales de Venezuela

Subestación	Resistividad promedio ( $\Omega$ -m)	Tipo de Terreno
-------------	--------------------------------------	-----------------

Guanare	3000	Greda-rosa
Barinas	400	Arenoso

Es una excepción es el terreno de la subestación Valera, con una resistividad promedio de 100  $\Omega$ -m.

En el oriente del país, es donde se han hallado los mayores valores de resistividad, según datos aportados por EDELCA, el terreno que sigue la ruta de la línea de 400 KV, Gurí, santa Teresa presenta las siguiente resistividades.

**Tabla N° 11**  
Valores Típicos de resistividad de la línea 400 KV, Gurí Santa teresa, de EDELCA, Venezuela

Desde	Hasta	Long (Km)	Resistiv v prom ( $\Omega$ -m)	Terreno
Gurí	Orinoco	70	2000 a 3000	Arenoso
Soledad	El Tigre	1100	5700	Arena Húmeda
El Tigre	Pariaguan	60	3000	Arena Húmeda
Pariaguan	Altagracia	254	20-100	Arcillas compactas
Altagracia	Santa Teresa	70	100-200	Arcillas arenosas

## 7. TRATAMIENTO QUÍMICO DEL SUELO

En ocasiones se desea reducir artificialmente la resistividad del suelo, con la cual se reduciría la resistencia del sistema de puesta a tierra, es ahí donde surge el tratamiento químico del suelo.

En aquellos terrenos cuya resistividad resulta muy alta, resulta difícil lograr una penetración profunda en el suelo, es muy seco en cualquier estación del año, o esta compuesto por arenas y otros minerales que son verdaderamente aislantes; surge como alternativa el utilizar componentes químicos en el suelo, ya sea colocándolo alrededor de las varillas de puesta tierra, como en zanjas horizontales que rodean el conductor de la malla de tierra.

La finalidad del tratamiento químico del suelo, es mejorar la conductividad del suelo a un grado tal que facilite una mejor transferencia de la corriente del sistema de puesta a tierra al suelo o estrato, capa u horizonte que lo rodea, y a su vez, este mejore su transferencia a las capas adyacentes, pero sin causar la corrosión del sistema de puesta a tierra. Este tratamiento

del suelo tiene impacto sobre el valor a obtener para la puesta a tierra y su permanencia en el tiempo a un valor en forma más estable. Además, sobre el dimensionamiento y el costo del sistema de aterramiento, el tratamiento del suelo por sales es de un costo marginal respecto del sistema de aterramiento y del valor final de resistencia a obtener.

El tratamiento químico, posee varios mecanismos, todo en función del tipo de químico que se emplee.

El tratamiento por sales, se basa en el hecho de que la conducción de la corriente en el suelo se realiza por medio de electrolitos disueltos en el agua contenida en el terreno, es decir, en una transferencia de iones, por tanto al agregar sales.

El *sulfato de Magnesio* es una sal de baja resistividad, pero su efecto en el suelo se ha demostrado que en poca cuantía modifica la resistencia de la puesta a tierra, por otra parte, la Sal común, *Cloruro de Sodio* provee una baja resistividad, pero resulta altamente corrosivo a los metales, aunque con una utilización moderada se logra una salida bastante buena y sencilla; este se emplea en zonas de clima frío, donde los problemas de puesta a tierra se acentúan con los cambios de estaciones. La sal más empleada es el *sulfato de Cobre*, debido a que es medianamente costoso, y no tiene efecto corrosivo, también se ha empleado con éxito frecuente el carbón o "coke".

Otra sustancia que es empleada para el tratamiento es el *Acido sulfónico*, el cual es el mejor mecanismo para reducir la resistividad, pero su gran efecto corrosivo, lo hacen inutilizarse.

El tratamiento del suelo alrededor de las barras pueden efectuarse por varios métodos:

**Método de Trinchera:** Consiste en cavar un hueco en forma toroidal en torno a la varilla de puesta a tierra, el cual se rellena con la sal que se va a emplear. Este método posee la ventaja que al no existir contacto directo de la sal con el electrodo la corrosión, resulta menor, además que se da una mejor distribución del material, utilizándose comúnmente la sal común como una alternativa económica y efectiva. Este tipo de tratamiento debe supervisarse periódicamente, pues existen agentes (lluvia, drenaje natural, etc.) van esparciendo y disminuyendo hasta agotarse las sales del

lugar. Se considera como un promedio de mantenimiento 4 a 5 años.

**Método de Cuenca:** Consiste en colocar el material químico directamente alrededor de los electrodos en contacto con el mismo.

**Método de Varilla Huecas:** Consiste en emplear varillas huecas que se rellenan con sales, este método no resulta muy efectivo de a corto plazo, pero en el tiempo las sales se van depositando en un extremo del electrodo y va siendo más duradera su acción que cualquier otro método.

**Método de Zanja Horizontal:** consiste en rellenar zanjas con material que cubre el conductor de la malla de tierra, en estos casos es posible utilizar materiales que aparte de aumentar la conductividad del terreno, disminuyen la corrosividad, con lo cual es posible utilizar conductores de acero. Estas mezclas utilizadas son: yeso, cal, Bentonita, resinas, etc. También denominadas arcillas higroscópicas.

Otro mecanismo que ayuda a disminuir la resistividad del suelo es que el suelo mantenga su contenido de humedad adecuado, esto se puede conseguir con la adición de estratos correspondientes del suelo material con propiedades higroscópicas, es decir, con capacidad de absorber y exhalar humedad. Uno de estos materiales es la arcilla denominada Bentonita; esta es fundamentalmente una tierra arcillosa que contiene carbonatos, hidrosilicatos y sulfatos, además que posee una serie de propiedades que la hacen más ventajosa con respecto a otros materiales utilizados en los tratamientos de suelos, estas ventajas son:

Forma un gel al mezclarse con el agua, que una vez formado, es impermeable al agua, al aire lo que impide la corrosión del conductor.

El gel formado tiene una humedad mayor que cualquier suelo, pues en su estructura hay moléculas de agua atadas a la estructura del gel.

De la misma manera que las sales que forman parte de la Bentonita, permanecen en el gel y por lo tanto no se dispersan en el terreno, lo cual equivale a tener en forma permanente un conductor de diámetro mayor que el que forma la malla.

La solución adecuada para el suelo bajo uso para instalaciones de puesta a tierra, podrá consistir de una combinación de las técnicas combinadas. Un tratamiento con sales y material higroscópico, como complemento a

la configuración de electrodos escogidas ayuda a la obtención de bajos valores de resistencia de puesta a tierra, ofreciendo así al sistema una referencia confiable.

### **CONDICIONES DE PELIGRO**

---

Durante una falla típica a tierra, el flujo de corriente a tierra producirá unos gradientes de potencial dentro y alrededor de la instalación.

A menos que apropiadas precauciones sean tomadas durante el diseño, el máximo gradiente de potencial a lo largo de la superficie de la tierra puede ser de suficiente magnitud que durante una condición de falla pueda poner en peligro a las personas en el área. Además, el peligro potencial debe ser diferenciado entre estructuras o equipos conectados a tierra y la tierra cercana.

Las circunstancias que hacen posible un shock eléctrico accidental son:

1. Flujo relativamente alto de corriente a tierra en relación a el área del sistema de tierra y su resistencia a la tierra remota (terreno, suelo: *remote earth*).
2. Resistividad del suelo y distribución de las corrientes de tierra tales que altos gradientes de potencial pueden ocurrir en puntos de la superficie de la tierra.
3. Presencia de un individuo, en un punto, tiempo y posición, tales que el cuerpo es el puente entre dos puntos de gran diferencia de potencial.
4. Ausencia de suficiente resistencia de contacto u otras resistencias series para limitar el valor de la corriente a través del cuerpo a un valor seguro.

Duración de la falla y contacto del cuerpo, tal que el flujo de corriente a través del cuerpo humano causar daños.

### **RANGO Y TOLERANCIA DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA POR EL CUERPO HUMANO**

---

Los efectos de la corriente eléctrica circulando a través de partes vitales de un cuerpo humano dependen de la duración y frecuencia de la corriente. La más peligrosa consecuencia de un exposición de este tipo es un condición del corazón conocida como fibrilación ventricular, resultando en un paro de la circulación de la sangre.

### **EFECTO DE LA FRECUENCIA**

---

Los seres humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica a frecuencia de 50 o 60 Hz. Corrientes eléctricas con una magnitud de 0.1 mAmperes pueden llegar a ser letales. Las autoridades generalmente concuerdan que el cuerpo humano puede tolerar una corriente pequeña a 25 Hz, de valor cinco veces mayor que la que puede tolerar en corriente continua. A frecuencias de 3000 Hz a 10000Hz, se pueden tolerar corrientes de magnitudes más altas. El cuerpo humano en casos es fuerte para tolerar corrientes muy altas debido a la naturaleza de la fuente.

### **EFFECTOS DE MAGNITUD Y DURACIÓN**

---

Los efectos fisiológicos más comunes de la corriente eléctrica en el cuerpo humano, comenzando en orden al incremento de la magnitud: percepción, contracción muscular, inconsciencia, fibrilación del corazón, bloqueo nervioso respiratorio, quemaduras.

Las corrientes de 1 mAmpere son generalmente reconocidas como el limite inferior de percepción, estas es la magnitud de corriente para el cual una persona es lo suficientemente capaz de detectar una ligera sensación de picazón en la mano o punta de los dedos, causado por el paso de la corriente.

Corrientes de 1 a 6 mAmperes, son frecuentemente llamadas corriente LET-GO, aunque son desagradables para sostenerlas, generalmente no impiden la habilidad de una persona que detienen un objeto energizado, para controlar los músculos y soltarlo.

El experimento realizado por Dalziel<sup>7</sup> con 28 mujeres y 131 hombres provee datos, indicando que el promedio de la corriente Let-go es de 105 mAmperes para mujeres y 16 mAmperes para el hombre, siendo 6 mAmperes y 9 mAmperes los valores umbrales respectivos.

En un rango de corrientes eléctricas entre 9 a 25 mAmperes, pudiendo ser doloroso y difícil o imposible soltar el objeto energizado agarrado por una mano.

---

<sup>7</sup> Dalziel, C. and Massoglia F. (1965). Let-go currents and olt-oltages. AIEE Transactions. OI 75. Part II, pp. 49-56.

Para valores más altos de corriente eléctrica, la contracción muscular puede hacer la respiración difícil. Diferentes a los caos de inhibición respiratoria debido a valores mucho mayores de corriente eléctrica que son mencionados más adelante, estos efectos son no permanentes y pueden desaparecer cuando la corriente es interrumpida –a menos que la contracción sea muy severa y la respiración es detenida, no por segundo, sino por minutos-, en estos casos es frecuente que se responda a la resucitación. Esto es a corrientes de rangos menores en magnitud de 60 a 100 mAmperes, por el contrario corrientes en este orden de magnitud o mayores son capaces de provocar la fibrilación ventricular, paro del corazón, y causar daños severos o la muerte. Una persona entrenada en resucitación cardio pulmonar debe administrar CPR, a menos que la víctima pueda ser tratada con rapidez por un medico.

Se debe enfatizar la importancia del valor umbral de la fibrilación. La corriente eléctrica debe quedar por debajo de este valor (Shock eléctrico: Choque eléctrico) con un diseño seguro del sistema de puesta a tierra, evitando daños y muertes de personas, como es demostrado por Dalziel y otros autores, la magnitud de la corriente no fibrilante  $I_b$  con duraciones estimadas de 0.03 a 3 segundos, son relacionados a la energía absorbida por el cuerpo a través de la siguiente ecuación:

$$S_b = T_s (I_b)^2 \quad (5)$$

Siendo:

$I_b$  = magnitud de la corriente RMS a través del cuerpo

$T_s$  = Tiempo de exposición a la corriente.

$S_b$  = Constante empírica relacionada a la energía del choque eléctrico tolerado por un cierto porcentaje de la población

### **IMPORTANCIA DE LOS DESPEJES DE ALTA VELOCIDAD DE LAS FALLAS (HIGH SPEED FAULT CLEARING)**

Considerando la importancia de la duración de la falla en términos de la ecuación (5), e implícitos en el factor de exposición en accidentes, los despejes de alta velocidad de fallas a tierra son ventajosos por las siguientes razones:

- La probabilidad de shock eléctrico es reducida en gran parte por la acción de las protecciones de alta velocidad, en contraste con los devastadores efectos que puede ocasionar una corriente de falla que se perpetúe por minutos u horas.
- Tanto pruebas como la experiencia muestran que la posibilidad de daños severos o la muerte es reducido en gran parte si la duración del flujo de corriente a través del cuerpo es muy pequeño; entonces la corriente puede ser basado en el tiempo de despeje de la protección primario en el pero de los casos en el de la protección de respaldo.

Si la posibilidad de daño de los relés es alta, utilice protecciones de respaldo con un tiempo de despeje conservador, para que se logre un margen seguro de acuerdo a la ecuación (5).

Investigaciones realizadas por Biegelmeir and Lee, han dado evidencia de que el corazón humano empieza a su susceptibilidad a la fibrilación ventricular cuando el tiempo de exposición se aproxima al período del latido del corazón, pero que el peligro es mucho menor si el tiempo de exposición a la corrientes esta dentro de la región de 0.06 a 0.3 segundos. Por tanto se aconseja el uso de tiempos de despeje menores a 0.5 segundos.

### **LIMITE DE CORRIENTE PERMISIBLE POR EL CUERPO HUMANO**

La magnitud y duración de la corriente conducida a través de un cuerpo a 50 o 60 Hz, debe ser menores que aquella que ocasiona fibrilación ventricular.

### **FORMULA DE DURACIÓN**

La duración para la cual una corriente de 50 o 60 Hz, puede ser tolerada por la mayoría de las personas se expresa en la ecuación (6), basado en los estudios de Dalziel, este asume que el 99.5% de todas las personas pueden resistir seguramente, sin fibrilación ventricular, el aso de una corriente con magnitud y duración determinado por la siguiente ecuación:

$$I_b = \frac{K}{\sqrt{T_s}} \quad (6)$$

De donde:  $T_s$ , es el tiempo de exposición a la corriente.

$$K = \sqrt{S_b}$$

Dalziel encontró que el choque eléctrico que puede ser sobrevivido por el 99.5% de las personas pesando aproximadamente 50 Kg. (110 Lbs) resulto ser en un valor de  $S_b$  de 0.0135, entonces  $K_{50} = 0.116$  y la ecuación para la corriente tolerable por el cuerpo humano resulta:

$$I_b = \frac{0.0116}{\sqrt{T_s}} \quad (7)$$

Para cuerpos que pesan 50 Kg.

Nótese que la ecuación (7) resulta en valores de 116 mAmperes para 1 segundo y 367 mAmperes para una exposición de 0.1 segundos. Es importante acotar que la ecuación (6), esta basada en los ensayos limitados para un rango de 0.03 a 3 segundos, esto obviamente no es válido para muy cortos o largos intervalos de tiempos, y algunos valores de corriente pueden ser tolerados indefinidamente.

En una perspectiva de los pasados 40 años de investigaciones,  $I_b$ , en 1936 Rerris seguiría 100 mAmperes como causa de fibrilación ventricular si la duración del choque no es especificado. El valor de 100 mAmperes fue derivado de las extensas experiencias en la Universidad de Columbia, en animales que poseen un cuerpo y corazones de peso comparables a los del hombre, para un máximo de duración del choque de 3 segundos.

Algunos estudios más recientes sugieren de dos distintas restricciones, una en donde el tiempo de exposición es más corto que el período del latido del corazón y otro para una exposición a la corriente más larga que un latido. Para un adulto de 50 Kg (110 Lbs), Biegelmeier propone el valor de 500 a 50 mAmperes, respectivamente. Otros trabajos más recientes en este aspecto han sido realizados por Lee y Kouwenhoven.

### **ALTERNATIVA APROPIADA**

La corriente de fibrilación es actualmente una función del peso individual del cuerpo como lo muestra la Figura N° 5

Figura N° 5

Corriente de fibrilación versus Peso de varios animales.

Basado en un choque de tres segundos.

En la edición de 1961, de la guía ANSI/IEEE Std 80-1961, contenía  $S_b$  y  $K$  para la ecuación (5) y (6) dados como 0.272 y 0.165 respectivamente, siendo asumido para 99.5% de todos los hombres pesando aproximadamente 70.3 Kg. (155Lbs). Dalziel es estudios más recientes (1968) en la cual la ecuación (6) esta basada, condujo a un valor alterno de  $K=0.157$  y  $S_b= 0.0246$ , siendo aplicable a personas cuyo peso es de 70 Kg. (155Lbs) entonces

$$I_b = \frac{0.157}{\sqrt{T_s}} \quad (8)$$

Aplicable para cuerpos cuyo peso es de 70 Kg.

El máximo de 3 segundos de corriente no fibrilizante de 91 mAmperes a la base de 70 Kg es fijado por debajo del limite de 107 mAmperes a 50 Kg.

En los estudios de puesta a tierra se puede seleccionar  $K=0.157$  previendo que el promedio del peso de la población es cercano a los 70 Kg. Típicamente, esta condición puede ser encontrada en lugares donde no es accesible a el público, en donde las partes energizadas se protegen por rejas o paredes. dependiendo de las circunstancias específicas, se puede asumir el criterio de 50 Kg. o puede ser basada en aras fuera de las cercas.

La ecuación (5) indica mucho más altas corrientes pueden ser admitidas donde operen protecciones de alta velocidad que sean calibradas por debajo del limite de duración de la falla.

Un criterio de decisión es necesario para ser usado en el tiempo de despeje de los relés de alta velocidad, o para las protecciones de respaldo, como base de cálculo.

### **NOTA DE RECIERRE (RECLOSING)**

El recierre después de una falla a tierra es menos común en la moderna práctica operativa, en estas circunstancias, una persona puede ser sujeta a un primer choque, el cual puede no dañarla permanentemente, pero puede trastornar o perturbar permanentemente. Luego, un simple recierre rápido puede resultar en un segundo choque, ocurriendo luego de un relativo corto intervalo de tiempo, pudiendo ocasionar en la persona un accidente serio. Cuando el recierre es manual la posibilidad de exposición a un segundo choque es reducido debido a que el intervalo de tiempo del recierre puede ser sustancialmente mayor.

El efecto acumulativo de dos o más recierre espaciados no ha sido totalmente evaluado, pero una razonable idea puede ser hecha por el uso de la suma individuales de choque de duración menor al tiempo de una simple exposición.

## **RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO**

Para Corriente Continua (DC) o Alterna (AC) a frecuencia industrial, el cuerpo humano puede ser expresado por una resistencia no inductiva, pudiendo ser la resistencia entre extremidades: desde un brazo a la planta del pie, o desde un pie al otro. En otros casos la resistencia es difícil de establecer. La resistencia típica del cuerpo humano, no incluyendo los pies es de aproximadamente  $300\Omega$ . En ciertas áreas del cuerpo humano incluyendo la piel la resistencia puede ser de 500 a  $3000\Omega$ .

Como ya se ha mencionado Dalziel condujo extensas pruebas para dominar la corriente Let-go segura, con manos y pies húmedos, en agua salada. Los valores obtenidos usando una frecuencia de 60 Hz para hombres fue los siguientes: corriente de 9 mAmperes, correspondiente a voltajes: mano-mano: 21 Voltios, mano-pie: 10.2 Voltios, de aquí que la resistencia AC en el contacto mano-mano igual a  $21/0.009$  o  $2330\Omega$  y la resistencia mano-pies es igual a  $10.2/0.009$  o  $1130\Omega$  basados en estos experimentos.

Para los voltajes (cercaos a un 1KV) y corrientes (cercaas a 5 Amperes) la resistencia humana es disminuida por el daño o agujero de la piel en el punto de contacto.

La resistencia de los zapatos es dudosa o incierta, debido a que esta puede ser muy baja para suelas de piel.

Para el propósito de los estudios de puesta a tierra se puede considerar:

La resistencia de contacto de manos y zapatos pueden ser asumidas cero.

Un valor de  $1000\Omega$  es seleccionado para representar la resistencia del cuerpo humano de mano a pie, también de mano a mano, o de un pie al otro,  $R_b = 1000\Omega$ .

## **CORRIENTE QUE ATRAVIESA EL CUERPO HUMANO**

Es muy importante recordar que el valor de resistencia de  $1000\Omega$ , relata un sendero el cual se encuentra entre mano y un pie, donde la mayor parte de la corriente atraviesa órganos vitales, incluyendo el corazón. Por otra parte pasando de un pie al otro, el contenido de órganos es menos peligroso.

Pruebas realizada en Alemania por Loucks menciona que son mucho más altas las corrientes de pie a pie, que de mano a pie, para lograr la misma corriente en la región cercana al corazón, partiendo que la razón mayor es de 25:1.

Basado en esta condición, valores de resistencias mayores a  $1000\Omega$  pueden ser admitidos cuando se trata de un contacto de pie a pie.

Como quiera que sea, los siguientes factores deben ser considerados:

Un voltaje entre los dos pies, doloroso pero no letal, puede resultar en una caída que puede causar un flujo de corriente atravesando al área del pecho o tórax, siendo el grado de peligro de esto viene dado por la duración de la falla y otra posible falla-recierre.

Una persona puede estar trabajando o descansando en una posición inclinada en el instante que la falla ocurre, es aparente que el peligro del contacto pie-pie es menor que otro tipo, pero algunas muertes han ocurrido de esta forma, por lo que es un riesgo que no debe ser ignorado.

## **CIRCUITO EQUIVALENTES DE ACCIDENTES**

Utilizando el valor de la corriente tolerable por el cuerpo, y las apropiadas constantes del circuito (resistencias no inductivas), es posible determinar el voltaje tolerable entre algunos puntos críticos de contacto.

Para comprender el desarrollo de los circuito equivalente de accidentes, se hará uso de la siguiente notación:

$I_a$  = Corriente a través del circuito accidental.  
 $R_a$  = Resistencia total efectiva en el circuito accidental

$I_b$  = Corriente permisible por el cuerpo.

Obviamente la corriente que circula por el circuito accidental debe ser menor a la permisible por el cuerpo ( $I_a < I_b$ ), para que se provea seguridad.

La resistencia del cuerpo humano es asumida constante, de manera que para obtener una corriente  $I_a$  menor que  $I_b$ , es equivalente a decir que la fibrilación debe ser prevenida manteniendo el total de Watt-segundos (W-sec) de energía absorbida por el cuerpo durante un cierto choque por debajo de un cierto valor. Este valor es 0.0135 W-sec, para  $K_{50}$  0.116 y a 0.0246 W-sec, para  $K_{70} = 0.157$  respectivamente, entonces esto puede ser visto como la ecuación de Dalziel que representa la relación entre la magnitud de la corriente de choque y la duración para una constante de energía de choque.

La resistencia del circuito accidental  $R_a$ , es una función de la resistencia del cuerpo  $R_b$ , y la resistencia de pie  $R_f$ , resistencia de la tierra justo debajo de los pies.

La resistencia de pie  $R_f$ , puede afectar apreciablemente el valor de  $R_a$ , un hecho que puede ser más de ayuda en algunas situaciones difíciles, para los propósitos del análisis del circuito de pie humano usualmente es representado por un disco metálico conductor y la resistencia de contacto del zapato y las medias son despreciadas. Como es mostrado por Sundem la resistencia propia y mutua de los dos discos metálicos de radio "b", separados una distancia "d<sub>f</sub>" en una superficie de tierra homogénea de resistividad  $\rho$  es:

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (9)$$

Siendo  $R_f$  la resistencia propia de cada pie a tierra remota o tierra propiamente dicha, en Ohmios.

Por su parte la resistencia mutua entre los dos pies  $R_{mf}$  en Ohmios es:

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi d_f} \quad (10)$$

Finalmente la resistencia debajo de los dos pies en serie o paralelo resulta:

$$R_{2fs} = 2(R_f - R_{mf}) \quad (11)$$

$$R_{2fp} = \frac{1}{2}(R_f - R_{mf}) \quad (12)$$

Donde:

$R_{2fs}$  = Resistencia entre los dos pies en serie.

$R_{2fp}$  = resistencia entre los dos pies en paralelo.

La figura N° 6, define el circuito equivalente accidental de un contacto pie a pie, aunque el potencia U, es desviado por el cuerpo, es la misma diferencia de potencial entre dos puntos accesibles en la superficie de la tierra separadas una distancia de un paso

**Figura N° 6**  
**Circuito Equivalente de Voltaje de paso**

La resistencia equivalente del circuito accidental para el potencial de paso viene dado por:

$$R_a = R_b + 2(R_f - R_{mf}) \quad (13)$$

En la Figura N° 7, se muestra el circuito accidental equivalente que corresponde al caso de un contacto mano pie.

**FIGURA N° 7**

**Circuito Equivalente de Voltaje de Toque**

La resistencia del circuito para el potencial de toque U, viene dado por:

$$R_a = R_b + \frac{1}{2}(R_f + R_{mf}) \quad (14)$$

Algunos autores eligen como 0.08m (3 pulgadas) el radio del disco representativo de un pie y despreciar los términos de resistencia mutua, con solo esas aproximaciones las ecuaciones de resistencia serie y paralelo resultan

$$R_{2fs} = 6\rho \quad (15)$$

$$R_{2fp} = \frac{3\rho}{2} \quad (16)$$

En la mayoría de los casos prácticos se suele tomar la resistencia de un pie igual a  $3\rho$ .

La ecuación (15) es usada para la corriente en el cuerpo resultante para la tensión de paso, y la ecuación (16), se utiliza para calcular la corriente en el cuerpo por una malla o potencial de toque con una profundidad de los pies casi nula y la tierra cerca de la superficie.

Por ejemplo: Si  $\rho = 2000\Omega.m$  (un valor bastante malo), se tiene que  $R_{2fs} = 12000\Omega$  y  $R_{2fp} = 3000\Omega$ . Para los modelos serie y paralelo respectivamente. Un calculo más exacto de la resistencia propia y mutua usando 1m de separación se obtiene:  $R_{2fs} = 11863\Omega$  y  $R_{2fp} = 3284\Omega$ .

Utilizar un valor de separación entre los pies de un metro,  $d_f = 1m$ , es conservador en el calculo de  $R_{2fs}$ , esto puede producir un valor de resistencia más alta que la de una separación pequeña entre los pies, el resultado es una tensión de paso más alta con una larga separación que la que se obtiene con una pequeña, y que debe ser dominante el efecto de la corriente en el cuerpo.

Una gran separación es también conservadora para el calculo de  $R_{2fp}$ , debido a que esto produce un valor bajo de resistencia que con una separación menor.

Nota: Las ecuaciones asumidas hasta ahora, son basadas en asumir una resistividad uniforme del suelo, como quiera que sea,

unos 0.08 a 0.13 m (3 a 6 pulgadas) de roca partidas se encuentra frecuentemente en la superficie de la tierra, incrementando la resistencia de contacto entre el suelo y el pie de las personas en la subestación.

## **EFFECTO DE UNA SUPERFICIE CUBIERTA CON ROCAS PARTIDAS**

Las ecuaciones (9) y (10) son basadas en el hecho de asumir un suelo con resistividad uniforme. En algunas ocasiones una capa de rocas partidas es colocada en la superficie del suelo, sobre la malla de tierra, de manera que se incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y el pie de las personas en las subestaciones. La roca partida también es utilizada para mejorar el movimiento de vehículo y equipos en las subestaciones. El área cubierta por esta piedra picada es generalmente de suficiente tamaño para validar la suposición de que el pie entra en contacto con un material de resistividad uniforme en dirección lateral. No obstante, la poca profundidad de las piedras picadas es comparable al radio equivalente de los pies, impide la suposición de una resistividad uniforme en la dirección vertical cuando se calcula la resistencia mutua y propia de los pies.

Si el suelo subyacente tiene una resistividad más pequeña que la roca picada, única alguna corriente de malla se circulará en forma ascendente en la capa superior delgada de roca picada, y el voltaje en superficie será aproximadamente igual que existiría sin la capa de roca picada. La corriente a través del cuerpo humano puede ser disminuida considerablemente con la adición de piedra picada en la superficie, debido a la gran resistencia de contacto entre la tierra y el pie. No obstante, la resistencia de contacto puede ser considerablemente menor con piedra picada de menor espesor. La cantidad de resistencia de contacto depende de el valor relativo de tierra y al resistividad de la piedra picada y además de el espesor de la capa de estas. Un típico caso descrito en investigaciones muestran que la resistencia efectiva de 0.25m de piedra caliza con una resistividad de  $5000\Omega.m$  (seco) es ásperamente equivalente a 75% de el valor nominal si la resistividad de el suelo es de  $250\Omega.m$ .



Un suelo que posea una capa de piedra picada, modifica la resistencia de los pies propia y mutua:

$$R_f = \frac{\rho}{4b} F(X_1) \quad (17)$$

$$R_{mf} = \frac{\rho}{2\pi d_{foot}} F(X_2) \quad (18)$$

Siendo  $F(X)$  una función basada en el espaciamiento de los pies y el valor relativo de la resistividad de la tierra y la piedra picada:

$$F(X) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (19)$$

Siendo:

$$Q_n = \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nX)^2}}$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

Donde:

$\rho_s$  = Resistividad de la piedra picada en  $\Omega.m$ .

$\rho$  = Resistividad de la tierra en  $\Omega.m$ .

$X = X_1 = h_s/b$  para  $R_f$ .

$X = X_2 = h_s/d_f$  para  $R_{mf}$ .

$h_s$  = Espesor de la capa de piedra picada en metros.

El estimar el valor de  $F(X)$ , es altamente tedioso de calcular sin una computadora o una calculadora programable, por eso estos valores han sido precalculado y graficados para un gran rango de valores de  $X$  y el factor  $K$ .

En base a considerar el efecto de la piedra picada en la resistencia propia y mutua del los pies, se han establecido expresiones simplificadas, donde además se asume una separación  $b = 0.08m$

$$R_{2fs} = 6C_s \rho_s \quad (20)$$

$$R_{2fp} = 1.5C_s \rho_s \quad (21)$$

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left( \frac{2nh_s}{0.08} \right)^2}} \right]$$

$$C_s \approx 1 - a \left[ \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s + a} \right]$$

esta es una alternativa basado en el concepto de hemisferio equivalente, y para la cual  $a=0.106m$ .

Donde  $C_s$  es el factor de desproporción del valor nominal de la resistividad del suelo.  $C_s = 1$  para rocas picadas de resistividad igual a la del suelo. Por lo general ocurre que  $C_s < 1$ .

## DEFINICIONES DE POTENCIALES RELACIONADOS CON LA PUESTA A TIERRA

Existen una serie de definiciones de potenciales relacionados al sistema de puesta a tierra:

- **Elevación de potencial de tierra (*grounding potential rise GPR*):** El máximo voltaje que una malla de tierra de subestación puede alcanzar relativo a un punto distante de tierra que se asume es el potencial de tierra remota. Bajo condiciones normales, los equipos de tierra operan cerca del potencial cero de tierra, que es el potencial de un conductor de tierra neutral que esta muy cerca del potencial de tierra remota. Durante una falla a tierra, la porción de la corriente que es conducida por la malla de tierra a tierra causa el aumento del potencial de la malla respecto a la tierra remota. Entonces el aumento del voltaje, GRP, es proporcional a la magnitud de la corriente de la malla y a la resistencia de esta.
- **Voltaje de Paso (*Step Voltage E<sub>step</sub>*):** Es la diferencia de potencial en la superficie experimentado por una persona cruzando una distancia de 1 metro con sus pies sin tener contacto con otro objeto a tierra.
- **Voltaje de Toque (*Touch Voltage E<sub>touch</sub>*):** La diferencia de potencial entre la elevación de potencial de tierra y el potencial de superficie en un punto donde una persona esta de pie, mientras que al mismo tiempo sus manos están en contacto con una estructura a tierra. La distancia medida sobre el suelo, igual al alcance normal es de 1 metro. En una

subestación convencional, el peor voltaje de contacto es encontrado como la diferencia de potencial entre una mano y los pies en un punto de máximo alcance de distancia. No obstante un contacto metal a metal de mano a mano, o de mano a pie, ha sido investigado y se ha determinado que la peor condición es la mano a mano.

- **Voltaje de Malla (Mesh Voltage):** El máximo voltaje de toque que es encontrado dentro de cuadro de una malla.
- **Voltaje de Transferencia (Transferes Voltage):** Es un caso especial del voltaje de toque donde el voltaje es transferido dentro o fuera de la subestación. Es el caso que se hace contacto con un conductor puesto a tierra en un punto lejano. Típicamente el voltaje transferido ocurre cuando una persona de pie dentro del área de una subestación toca un conductor aterrado en un punto remoto o una persona de pie en un punto remoto toca un conductor conectado a la tierra de la subestación. Durante condiciones de falla, el potencial resultante a tierra puede ser igual o exceder el mayor GPR de la malla de tierra, descargando la corriente de falla, más de la fracción de este voltaje total es encontrado en el contacto ordinario por toque. De hecho, el voltaje transferido puede exceder la suma de GPR en dos subestaciones, debido a voltajes inducidos sobre los circuitos de comunicación, tuberías, cables de neutro. Resulta impracticó y frecuentemente imposible diseñar una sistema de tierra basado en el voltaje de toque causado por los voltajes transferidos externos. Los mecanismos de cuidado para estos voltajes transferidos externos es usar mejor aislamiento o nutralizadores o simplemente el utilizar indicativos en las partes susceptibles de ellas.

## CRITERIO DE VOLTAJE DE PASO Y TOQUE

La seguridad de una persona depende en prevenir él crítico aumento de energía que provoca el shock, el cual es absorbido durante una falla o durante un recierre.

Para el voltaje de paso el límite es:

$$E_{\text{step}} = (R_b + R_{2fs})_b \quad (22)$$

resultando:

$$E_{\text{step50}} = \frac{0.116(1000 + 6C_s \rho_s)}{\sqrt{t_s}} \quad (23)$$

$$E_{\text{step70}} = \frac{0.157(1000 + 6C_s \rho_s)}{\sqrt{t_s}} \quad (24)$$

El límite de del voltaje de toque resulta ser:

$$E_{\text{touch}} = (R_b + R_{2fp})_b \quad (25)$$

$$E_{\text{touch50}} = \frac{0.116(1000 + 1.5C_s \rho_s)}{\sqrt{t_s}} \quad (26)$$

$$E_{\text{touch70}} = \frac{0.157(1000 + 1.5C_s \rho_s)}{\sqrt{t_s}} \quad (27)$$

Donde:

$C_s = 1$  para superficie no protegidas con piedra picada, y se determina por la ecuación ( )

$\rho_s =$  Resistividad de la superficie en  $\Omega.m$ .

$t_s =$  Duración del shock en segundos

El voltaje de paso actual ( $E_s$ ) debe ser menor que el máximo voltaje de paso permisible ( $E_{\text{step}}$ ) para proveer seguridad. El voltaje de toque ( $E_t$ ), el voltaje de malla ( $E_m$ ) o el voltaje transferido ( $E_{\text{treg}}$ ) debe ser menor que el máximo voltaje de toque ( $E_{\text{touch}}$ ) permisible, para proveer seguridad.

Según Raúll (1987), se ha tomado como máximo de tensión que puede soportar el cuerpo humano para un tiempo de 1.2 segundos el valor de 150 voltios.

## MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La medición de la resistencia a tierra es necesaria tanto en el momento de la energización inicial de una instalación, como a intervalos periódicos de tiempo de allí en adelante, con el objeto de asegurar que el valor de la resistencia a tierra no aumente de valor, y pueda llagar a valores peligrosos.

La medición de la resistencia de una conexión a tierra con respecto a la tierra propiamente dicha o absoluta es un poco difícil. Todos los resultados son aproximaciones y requieren la cuidadosa aplicación de equipos de prueba y la selección de puntos de referencia a tierra.

Existen varios métodos de probar el valor de la resistencia a tierra, pero todos son similares, ya que usan dos conexiones de referencia a tierra y una fuente apropiada de corriente para la prueba. En estos ensayos circula una corriente alterna por la tierra bajo prueba, en cantidades que pueden ir desde unos pocos miliamperes como los métodos de puente y con algunos de los probadores de tierra patentados, hasta 100 Amperes y más.

La cantidad de corriente utilizada depende del método, y los métodos que se utilicen corrientes eléctricas muy pequeñas proveerán resultados tan precisos como los que utilicen elevadas corrientes si el suelo bajo prueba es apropiado para el método de prueba.

- **Método de triangulación de tres puntos:** En este método se utilizan dos tierras auxiliares y el punto que será medido se disponen en configuración triangular. La resistencia en serie de cada par de puntos de tierra del triángulo se determina al medir el voltaje en paralelo con la resistencia a tierra que haya de medirse, así como al medir la corriente que pasa por dicha resistencia. Las mediciones de resistencia se hacen por el método voltímetro Amperímetro, o por medio de un puente apropiado. Para resultados precisos, la resistencia de las tierras auxiliares y la tierra bajo prueba deben ser del mismo orden de magnitud, y los resultados pueden no tener sentido si las tierras de prueba tienen más de 10 veces la resistencia de la tierra bajo prueba. Este método es apropiado para medir la resistencia de cientos de torres, varillas aisladas a tierra o pequeñas instalaciones de conexión a tierra; no es apropiado para medir tierras de baja resistencia, como es el caso de rejillas a tierra de subestaciones grandes.
- **Método de razones o relaciones:** En los que la resistencia serie  $R$  del suelo bajo prueba y de una sonda de prueba se miden por medio de un puente que opera bajo el principio de equilibrio a cero. Un potenciómetro calibrado de resistencia de cursor se conecta a las dos conexiones a tierra, con el cursor del potenciómetro conectado a una segunda sonda de prueba. El potencial del cursor a tierra se ajusta a cero nulo. Si  $R_D$  es la resistencia total del cursor y  $R_X$  la

resistencia entre el cursor y la tierra bajo prueba, la resistencia  $R$  de tierra bajo prueba es  $(R_X/R_D) \cdot R$ . El *Vibrometer* y el *groundmeter*, son instrumentos de prueba integrados, que utilizan este principio de operación. Este método es mucho más satisfactorio que los métodos de triangulación, dado que las razones de resistencia entre la sonda de prueba y de la resistencia de la tierra bajo prueba son de hasta 300:1 con instrumentos de prueba como el *groundmeter*. Aún cuando este método tiene limitaciones para efectuar pruebas en terrenos de baja resistencia y superficies grandes, se pueden obtener lecturas apropiadas al ubicar las sondas de prueba en línea recta, en una dirección a  $90^\circ$  con respecto a la cerca de la subestación y con la distancia de la sonda más alejada al doble del ancho de la subestación. Puede alcanzarse la mejor precisión si se toman las medidas a la mayor distancia posible de la malla de tierra que se mida.

- **Métodos de Caída de Potencial:** Incluyen métodos que utilizan tierras cerradas de referencia, situadas por lo general a menos de mil pies de tierra bajo prueba. El principio del método de caída de potencial que utiliza tierras cerradas como referencia, consiste de una sonda fija que se entierra en el punto C2 con la sonda móvil P2 puesta en varios puntos en la línea recta entre C2 y la malla de tierra G bajo prueba. Se hace circular corriente ya sea alterna o continua por la malla de tierra G y la sonda fija de prueba C2. Se conecta un Voltímetro entre el punto G y la sonda P2, y un amperímetro para observar la circulación de corriente por la sonda C2. Las lecturas  $E$  del voltímetro se toman simultáneamente con las lecturas  $I$  del amperímetro. Las lecturas  $E/I$ , es igual a la resistencia en Ohmios, se gráfica. La resistencia mostrada en la parte plana de la curva o en el punto de inflexión, se toma como resistencia de la tierra. Este método puede ser sujeto a error considerable si se presenta una corriente parásita. Por lo común se aplica con el uso de varias lecturas de sonda de prueba a intervalos del 10% de la distancia G a C2, con la sonda de prueba ubicada en el medio del camino entre G y C2. Se fabrican instrumentos de prueba

que utilizan este método: entre ellos esta el probados de tierra *Ground Ohmer* y el *Megger*. Estos dan mejores resultados que el método voltímetro amperímetro dado que están diseñados para eliminar los efectos de corrientes parásitas.

## SELECCIÓN DEL CONDUCTOR DE LA MALLA DE TIERRA

El conductor de la malla de tierra debe estar diseñado de manera que satisfaga:

- Resistir la fusión y deterioro de las juntas eléctricas bajo las más adversas combinaciones de magnitud y duración de las corrientes de falla.
- Resistir las sollicitaciones mecánicas, especialmente en aquellos puntos de mayor esfuerzo.
- Poseer suficiente resistividad de manera que no contribuyan substancialmente a diferencias de potenciales locales que resulten peligrosos.

La determinación cuantitativa del corto tiempo (*short time*) aumento de temperatura en el conductor de tierra pueden ser obtenido de las ecuación derivada por Sverak. Esta ecuación evalúa la capacidad en Amperes de un conductor para el cual son conocidas las constantes del material, o que pueden ser determinados por calculo.

$$I = A \sqrt{\left( \frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left( \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \quad (28)$$

Donde:

I = Corriente RMS en kAmperes.

A = Sección transversal del conductor en mm<sup>2</sup>.

T<sub>m</sub> = Máxima temperatura permitida en °C.

T<sub>a</sub> = Temperatura ambiente en °C.

T<sub>r</sub> = Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.

α<sub>0</sub> = Coeficiente térmico de la resistividad a 0 °C.

α<sub>r</sub> = Coeficiente térmico de resistividad a temperatura de referencia T<sub>r</sub>.

ρ<sub>r</sub> = Resistividad del conductor de tierra a temperatura referencia T<sub>r</sub>, en μΩ/cm<sup>3</sup>.

K<sub>0</sub> = 1/α<sub>0</sub> = (1/α<sub>r</sub>)-T<sub>r</sub>

t<sub>c</sub> = Tiempo de flujo de corriente en segundos.

TCAP = Factor de capacidad térmica en J/cm<sup>3</sup>/°C.

Notece que α<sub>r</sub> y ρ<sub>r</sub>, son ambos dados para la misma temperatura de referencia T<sub>r</sub> en grados Celcius, entonces una simplificación puede ser hecha, si además la sección del conductor es dado en circular mils.

$$I = 5.0671 \cdot 10^{-6} A \sqrt{\left( \frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left( \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}$$

Tabla Nº 12  
Constante de materiales

Descripción	(%) (1)	α <sub>r</sub> (2)	K (3)	Temp. de fusión (4)	ρ <sub>r</sub> (5)	TCAP (6)
Alambre de cobre blando templado	100	0.003 9	234	1083	1.724 1	3.442
Cable telegráfico de cobre duro	97.0	0.003 8	242	1084	1.777 4	3.422
Cable Acero cubierto con cobre	40.0	0.003 7	245	1087/ 1300	4.397	3.846
Cable de Aluminio EC	61.0	0.004 0	228	657	2.862	2.556
Cable de aleación de aluminio 5005	53.2	0.035	263	660	3.222 6	2.598
Cable de aleación de aluminio 6201	52.5	0.003 4	268	600	3.284 0	2.598
Cable de aluminio con centro acero	20.3	0.003 6	258	600/ 1.300	8.480 5	2.670
Cables de Zinc cubierto con acero	8.5	0.003 2	293	419/ 1300	20.1	3.931
Acero inoxidable 304	2.4	0.001 3	749	1400	72.0	4.032

(1): Resistividad en %

(2): Coeficiente termal a 20°C.

(3) K<sub>0</sub> a 0°C.

(4): Punto de fusión en °C.

(5): Resistividad del conductor de tierra a 20°C en μΩ/cm.

(6): Factor de Capacidad Térmica en J/cm<sup>3</sup>/°C.

Fuente: ANSI/IEEE Std 80-1986

La aplicación de la ecuación (28) es el mecanismo riguroso del cálculo, pero existe una forma alternativa, obtenida del desarrollo de Onderdonk's, para conductores de cobre, con la suposición de una resistividad de  $1.589 \mu\Omega/\text{cm}$  a  $0^\circ\text{C}$ , TCAP asumido a  $3.4964 \text{ J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$ , y el coeficiente de temperatura del cobre igual a  $0.004274$  a  $0^\circ\text{C}$ , la sustitución de estos valores en la ecuación (28), resulta en una ecuación sumamente sencilla de evaluar.

$$I = A \sqrt{\left(\frac{1}{33S}\right) \log_{10}\left(1 + \frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right)} \quad (29)$$

Siendo :

$I$  = Corriente RMS en kAmperes.

$A$  = Sección transversal del conductor en cmils.

$T_m$  = Máxima temperatura permitida en  $^\circ\text{C}$ .

$T_a$  = Temperatura ambiente en  $^\circ\text{C}$ .

$S$  = Tiempo de ración del el flujo de corriente  $I$  aplicado.

Es una práctica muy común en asumir la temperatura ambiental de ( $T_a$ ) igual a  $40^\circ\text{C}$ , aunque temperaturas menores pueden ser consideradas en especiales circunstancias. La temperatura máxima permisible ( $T_m$ ) se recomendada como  $250^\circ\text{C}$  para las uniones apenadas en la malla a tierra esto por razones mecánicas) y un límite de temperatura de  $450^\circ\text{C}$  para uniones de fusión, aunque en la practica algunos empalmes de cobre fundente empiezan a fundirse a los  $600^\circ\text{C}$ .

En la práctica, los requerimientos mecánicos establecen una sección mínima de conductor. En los comienzos de la AIEE y de la IEEE, estos recomendaban como calibre mínimo el #1/0 AWG y 2/0 AWG de cobre para juntas soldadas y apenadas, respectivamente. Un reciente estudio internacional ha mostrado que cerca del 66% de la instalaciones revisadas usan el #4/0AWG de cobre para la malla, mientras el 16% prefiere el uso de conductores mayores a 500mcm. Por otra parte, alrededor del 25% de las instalaciones muestran un uso de conductor de cobre de tamaño menor a #1/0 AWG sin ningún problema mecánico.

En Venezuela es una práctica muy común el emplear el #4/0 AWG de cobre como mínimo para la malla de tierra y un conductor #2/0 AWG de cobre como mínimo

para la puesta a tierra de los equipos y estructuras a la malla de tierra.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Luca, Carlos. (1991). Líneas e Instalaciones Eléctricas. México: Editorial Alfaomega.

Raúll, José. (1987). Diseño de Subestaciones Eléctricas. México: Mc. Graw Hill.