

Sistemas de Puesta a Tierra: Una introducción a la Seguridad

Francisco M. González-Longatt

Resumen—La seguridad en las instalaciones eléctricas, es un aspecto de gran importancia, en particular lo que corresponde al riesgo eléctrico de las personas dentro de la instalación y fuera de ella, al igual que la integridad de los equipos. Los sistemas de potencias son los encargados de prestar un amino adecuado y seguro para el drenaje de sobrevoltaje y corrientes de falla a tierra remota. En este artículo se muestra los fundamentos de los sistemas de puesta a tierra en instalaciones de alto voltaje a frecuencia fundamental. Primeramente se muestra la conceptualización de los sistemas de puesta a tierra, sus elementos, clasificación, hasta finalmente presentar los fundamentos de cálculos asociados a garantizar la seguridad de las personas y equipos dentro de la instalación eléctrica.

Palabras claves—Malla de tierra, puesta a tierra, seguridad, voltaje de paso y voltaje de toque.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia, son extensas y complejas estructuras por donde circula el flujo de potencia desde los puntos de generación a los centros de consumo. Los aspectos referentes a la seguridad del personal y los equipos dentro del sistema de potencia son de especial consideración. En particular, la integridad física y la vida de las personas que laboran en el proceso de producción de electricidad junto con los equipos asociados requieren especial consideración. Los sistemas de puesta a tierra, son los elementos fundamentales encargados, de entre otras cosas, propiciar un camino de baja impedancia que permita drenar en forma adecuada los sobrevoltajes y corrientes de cortocircuito, en condiciones anormales de operación del sistema de potencia.

En este artículo se muestra los fundamentos de los sistemas de puesta a tierra en instalaciones de alto voltaje a frecuencia fundamental. Primeramente se muestra la conceptualización de los sistemas de puesta a tierra, considerando la normativa

Artículo redactado para la presentación del Seminario: Seguridad eléctrica en la industria y riesgo eléctrico en la empresa, UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela, 16 de Abril de 2005.

FGL está con la Universidad Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, Carretera Vieja Maracay-Mariara, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Maracay, Estado Aragua, Venezuela, Tlf. +58-414-4572832, E-mail: fgongatt@ieec.org

El autor es candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, Loas Chaguaramos, Caracas, Distrito Capital, Venezuela, E-mail: flongatt@electrisc.ing.ucv.ve

nacional: CADEFE, Código Eléctrico Nacional, hasta llegar a definiciones, de consideración internacional. Luego se presenta la clasificación y cada uno de los elementos que conforman el sistema de puesta a tierra. Finalmente, se presentan algunos elementos de calculo para los sistemas de puesta a tierra, haciendo especial énfasis en la seguridad de las personas, considerando los voltajes máximos tolareables por las personas.

II. CONCEPTUALIZACIÓN

La palabra "puesta a tierra" es comúnmente usada en el área de los sistemas eléctricos de potencia para referirse tanto a los "sistemas puestos a tierra" como a los "equipos puestos a tierra". A fin de evitar confusiones o malos entendidos el presente punto se dedica exclusivamente a los "sistemas puestos a tierra".

A. CADAFE

Sistemas de Puesta a Tierra. Según el Manual de Mantenimiento de Líneas y Operaciones de Subestaciones CADAFE (1996), dice que el Sistema de Puesta A Tierra de una subestación es diseñado a fin de garantizar las máximas condiciones de seguridad del personal que opera las subestaciones y los equipos instalados en las mismas. Y también comentan que los elementos que integran el sistema son:

Malla de Tierra. Formadas por conductores y barras enterradas a una profundidad adecuada y cuya configuración es la de unas retícula.

Cable de Guarda. Tiene por función proteger a la subestación contra impactos directos de descargas atmosféricas.

B. Código Eléctrico Nacional

Un sistema puesto a tierra es una conexión a tierra desde uno de sus conductores portadores de energía, ya sea en un sistema de distribución o en un sistema de cableado interior.

Equipo a tierra. Un equipo puesto a tierra es una conexión a tierra desde una o más partes metálicas, no conductoras de corriente eléctrica, del sistema de cableado o de los aparatos conectados al sistema. En este sentido, el término "equipo" abarca las partes metálicas como tuberías conduits, cajas y gabinetes metálicos, carcasa de motores y cubiertas metálicas de los controladores de los motores.

C. AIEE Estándar N° 32, "Dispositivos de Puesta a Tierra del Neutro"

Sistema con neutro puesto a tierra. Un sistema con neutro puesto a tierra es una conexión a tierra desde el punto neutro o puntos de un circuito, transformador, maquinas de campo rotante o sistema. El punto neutro de un sistema es el punto en cual tiene el mismo potencial, como el que tiene el punto de unión de un grupo de resistencias iguales y no reactivas, si están conectados de manera apropiada en sus terminales libres a los terminales principales de las líneas del sistema.

Sistema puesto a tierra. Es un sistema de conductores en el cual al menos uno de estos (en general el cable del medio o el punto neutro de un transformador o del arrollado de un generador) es intencionalmente puesto a tierra, sólidamente o a través de un dispositivo limitador de corriente.

Observación: Los sistemas puestos a tierra pueden ser sometidos a sobretensiones en régimen permanente o en régimen transitorio, dependiendo de los valores de los cocientes de X_0/X_1 y R_0/X_1 vistas desde el punto de falla. R_0 , X_0 y X_1 , son respectivamente la resistencia de secuencia cero, la reactancia de secuencia cero, tomada como positiva si es inductiva y negativa si es capacitiva, y la reactancia subtransitoria de secuencia positiva.

No puesto a tierra. Significa sin una conexión intencional a tierra, excepto la que se da a través de un indicador de potencial o dispositivo de medida. Los sistemas de puesta a tierra (SPAT) habrá que entenderlos de ahora en adelante un poco más complejos que lo que se especificó anteriormente. Los procedimientos para diseñar y sobre todo para reconstruir los SPAT se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja.

III. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Los SPAT pueden ser clasificados en varias formas. La Norma de Presentación de Proyectos de Subestaciones de Transmisión Sistemas de Puesta a Tierra de CADAPE (1992), quedan clasificados como:

Sistema de Puesta a Tierra a Baja Frecuencia: es el conjunto de elementos que, en caso de una falla a tierra en alguna parte de un Sistema de Potencia con sus neutros puestos a tierra, constituyen junto con el suelo, el divisor de corrientes de retorno a los neutros de las fuentes de energía eléctrica contribuyentes a la falla. Entre los elementos mas comunes de un sistema de puesta a tierra se encuentran los siguientes: suelo natural, cables de guarda, neutros corridos, pantallas de cables de potencia, envolturas metálicas de cables de potencia y tuberías de cables enterradas. En caso de utilizarse el termino abreviado "Sistema de Puesta a Tierra" (SPAT), se entenderá que se refiere a lo concerniente a baja frecuencia. Por lo nombrado anteriormente, todas las especificaciones que se darán a continuación se referirán a sistemas a bajas frecuencias (50-60 Hz).

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 propósito de colocar a tierra los sistemas eléctricos es para limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o de contactos no intencionales con cables de voltajes mas altos. Cuando se colocan a tierra los equipos eléctricos, es para eliminar los potenciales de toque que pudieran poner en peligro: la vida de cualquier persona que este en contacto con dicho equipo, y las propiedades para que operen las protecciones por sobrecorriente de los instrumentos. Es decir que los SPAT proporcionan una vía de baja impedancia y conducen a tierra corrientes provenientes de descargas atmosféricas.

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).

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 choque 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 en el aislamiento. 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 de 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).

El estándar *An American National Standard (ANSI), IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. ANSI-IEEE 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.

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 del SPAT, por si solo, no es una garantía de seguridad.

No es una simple relación entre las resistencias del SPAT como un todo y una corriente máxima de descarga a la que una persona puede ser 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.

IV. ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN SPAT

Los elementos que componen un sistema de puesta a tierra son: el suelo, conductores y malla de Tierra, el electrodo de tierra y la interfase. Todos los elementos nombrados con anterioridad son factores de estudios muy independientemente, para después lograr concatenarlos obteniéndose un producto final satisfactorio.

A continuación se detallaran cada uno de los factores y se explicara sus vinculaciones con el SPAT.

V. EL SUELO

Es el elemento encargado de disipar las corrientes a tierra,

ya sean de falla, de descargas atmosféricas y otras no deseables. El se estudiará desde el punto de vista eléctrico por lo que se define la resistividad del suelo como la resistencia de un cubo de un m^3 de suelo cuando es medido entre cualquiera de las dos caras opuestas. La mayoría de los suelos son malos conductores de electricidad, excepto los que tienen contenido mineral que por su naturaleza son conductores. Sin embargo, dado los volúmenes que entran en juego, es posible conseguir una conducción aceptable a través de este. Suelos arcillosos, arenosos y rocosos algunas veces tienen una resistencia elevada, por lo que pueden considerarse como conductores pobres. Cuando estos terrenos presentan un contenido de humedad, la resistividad disminuye considerablemente y en este caso se puede considerar como buenos conductores (pero en comparación con los metálicos algunos son muy pobres).

La resistividad de suelo depende en gran parte de los elementos componentes que aportan electrones libres concatenados por un electrolito, que en la mayoría de las veces es el agua común. La conducción del terreno es fundamentalmente electroquímica y depende principalmente de:

- Volumen de los poros del material que compone el terreno.
- Dispersión y distribución de los poros.
- Porción de los poros rellenos de agua.
- Conductividad del agua que llena los poros, la cual compone a su vez de:
 - Conductividad primaria: La del agua que entra en los poros.
 - Conductividad secundaria: La adquirida por disolución del material y que depende del estancamiento.

La resistividad de un terreno vale aproximadamente:

$$\rho_T = a(c \times V_p) \quad (1)$$

donde: a es la resistividad del agua que llena los poros. c es una constante que depende de la distribución de los poros V_p es el volumen de los poros

A. Factores que Determinan la Resistividad del Terreno

Los factores, principales que determinan la resistividad del suelo son: tipo de suelo, salinidad, humedad del terreno, temperatura, tamaño del grano y distribución, resistividad de las aguas naturales, estratigrafía y por último efectos de la propiedades físico-químicas del suelo sobre la corrosión.

1) Tipos de Suelo

Desafortunadamente los tipos de suelo no están definidos claramente, por ejemplo al mencionar la palabra arcilla, se cubre una amplia variedad de suelo, es por ello que es difícil o prácticamente imposible decir cual es la resistividad promedio, igual ocurre con otros; y peor aún en diferentes localidades el mismo tipo de suelo presenta diferentes valores de resistividad.

A continuación se presentan las Tablas 1, 2 y 3 que muestran los valores de resistividad de los terrenos de acuerdo a los materiales y naturaleza, los cuales son indicativos solamente. Tanto la temperatura y especialmente la humedad del suelo tiene una influencia sumamente importante en la

resistividad del mismo. El conocimiento de la influencia de la humedad y la temperatura sobre la resistencia a tierra de los electrodos, resulta indispensable para garantizar que el sistema de aterramiento mantenga en el tiempo características satisfactorias.

TABLA 1
RESISTIVIDAD DE ACUERDO AL TERRENO

Naturaleza del terreno	Resistividad en $\Omega\cdot m$
Terrenos pantanosos	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras.	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1.500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

TABLA 3
VALORES MEDIOS DE LA RESISTIVIDAD DE ACUERDO AL TERRENO

Naturaleza del terreno	Valor medio de la resistividad en $\Omega\cdot m$
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles y terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables.	3.000

B. Humedad del Suelo

Debido a que la conducción de corriente es mayormente electrolítica, la humedad facilita la disociación de las sales en iones positivos y negativos; al haber más humedad hay mayor conductividad y por lo tanto menor resistividad, esto se aprecia en el Figura 1.

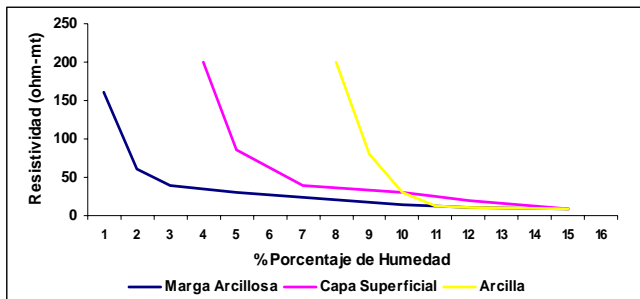


Fig. 1. Variación de la Resistividad en Función de la Humedad Se puede decir que hay una variación considerable de la

resistividad medida en temporada de lluvia y la medida en temporada de sequía, en la Tabla 4 se presentan algunos ejemplos específicos. Muchas veces, una manera de reducir la resistencia de puesta a tierra es humedeciendo el terreno a lo largo del tiempo, logrando así valores bajos de resistividad. Hay algunas instalaciones que tiene prevista una tubería de agua, la que utilizan para mantener una concentración de humedad en todas las épocas y durante años; manteniendo valores bajos de resistividad.

TABLA 4
RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES

Materiales	Resistividad en $\Omega\cdot m$
Sal Gema	10^{13}
Cuarzo	10^9
Arenisca, guijarros de río, piedra triturada	10^9
Rocas compactas, cemento, esquistos	10^6
Carbón	$10^5 - 10^6$
Rocas madres, basaltos, cascajos	10^4
Granitos antiguos	10^4
Terrenos rocosos, calizas(jurasico)secos	3×10^3
Yeso seco	10^3
Concreto normal(seco)	$10 - 50 \times 10^3$
Arena fina y guijarros(secos)	10^4
Arena arcillosa, grava y arena gruesa húmeda	5×10^2
Suelos calcáreos y rocas aluviónarias	$3 \text{ a } 4 \times 10^2$
Tierra arenosa con humedad	2×10^2
Barro arenoso	1.5×10^2
Concreto normal en suelo	$1 - 2.4 \times 10^2$
Margas turbas	10^2
Arcillas(secas)	30
Arcillas ferrosas, piritosas	10
Agua de mar	1
Soluciones salinas	0.1 - 0.001
Minerales conductores	0.01
Grafitos	0.0001

TABLA 5
EFECTO DE LA HUMEDAD EN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Contenido De Humedad (% Por Peso)	Resistividad $\Omega\cdot m$	
	Capa Vegetal	Arcilla Arenosa
0	10^7	10^7
2,5	2500	1500
5	1650	430
10	530	185
15	190	105
20	120	63
30	64	42

C. Temperatura del Suelo

La resistividad del suelo es aproximadamente independiente de la temperatura hasta que alcanza el punto de congelamiento; en ese momento la resistividad del suelo se incrementa muy rápidamente pareciendo que no hay virtualmente ningún contacto con la tierra, la razón de ello es debido a que no hay disociación de sales. En la tabla 6 se indica como varía la resistividad en función de la temperatura

para un suelo del tipo arcilla-arenoso.

Para sitios de climas tropicales como Venezuela, no es necesario penetrar o clavar un electrodo a grandes profundidades, procedimiento muy común en países donde generalmente no les conviene colocar conductores enterrados horizontalmente a poca profundidad porque los primeros uno o dos metros de la superficie del suelo se congelan en el invierno, lo que produce un aumento en la resistividad. También cabe decir, que existen lugares donde la resistividad puede bajar y subir a medida que aumenta la profundidad, o sea, un comportamiento de suelo estratificado.

TABLA 6
EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Temperatura °C	Resistividad en Ω-m
20	72
10	99
0 (agua)	138
0 (hielo)	300
-5	790
-10	3300

Entonces se puede decir o afirmar, qué en los países tropicales la resistividad es menor cuando la profundidad es mayor, porque el contenido de humedad y nivel freático es mayor, siempre teniendo en cuenta las excepciones anteriores.

D. Tamaño y Distribución del Grano del Suelo

El suelo al estar compuesto de partículas más pequeñas (menor granulometría) es más compacto, denso y osmótico, en la mayoría de los casos. Una mayor compactación disminuye la distancia entre las partículas y se logra mejor conducción a través del liquido contenido. A medida que se aumenta el contenido de humedad, se alcanza una especie de saturación ya que el agua envuelve la mayorías de las partículas y un mayor acercamiento entre ellas no influye en la conducción. Esta es determinada, esencialmente, por la características del material y agua contenida.

Al retener la humedad por períodos largos de tiempo lo hacen conductores independientes de las temporadas de lluvia y sequía; por lo que la resistividad varía poco a lo largo del año. La tabla 7 evalúa cualitativamente los dos movimientos del agua en algunos materiales: el movimiento de zonas superiores a zonas inferiores debido a la infiltración y el movimiento de zonas superiores a zonas inferiores debido a la capilaridad.

TABLA 7
MOVIMIENTOS DEL AGUA EN ALGUNOS MATERIALES

Tipo de terreno	Infiltración	Retención del agua	Capilaridad	Altura del Terreno influenciada por el terreno
Humus	Rápida	Óptima	Normal	Pequeña
Arena	Normal	Mucha	Rápida	Mediana
Creta	Lenta	Poca	Lenta	Mediana
Arcilla	Lentísima	Poquísima	Lentísima	Grande

La estimación de la resistividad o resistividades promedio

de un terreno con el fin de ser utilizadas en el diseño de un sistema de aterramiento, debe ser realizada sobre la base de la etapa mas negativa del año al respecto, generalmente la época seca, ya que este define la peor condición en lo que a resistividad se refiere.

E. Salinidad del Suelo

Como es sabido la cantidad de agua presente en el suelo es un factor determinante en la resistividad del suelo y la del agua está determinada por la cantidad de sales disueltas en ella. Las curvas de la Figura 2 ilustran, como pequeñas cantidades de sales disueltas pueden reducir considerablemente la resistividad del suelo.

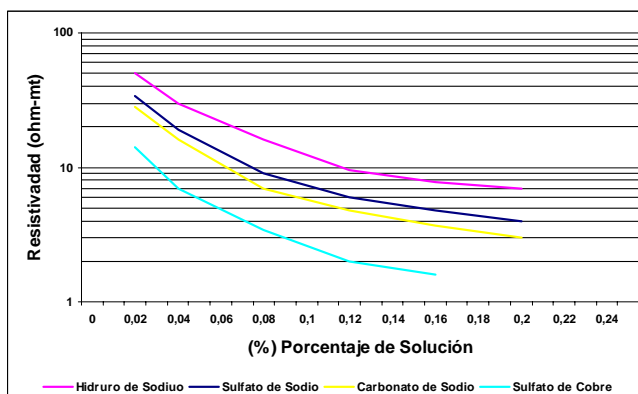


Fig. 2. Variación de la Resistividad en Función al Contenido de Sales

F. Resistividad de las Aguas Naturales que se Encuentran en el Suelo

Las aguas que se encuentran en la naturaleza poseen conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna cantidad de sales. La cantidad y clase de estas sales dependen de la naturaleza de las rocas con que las aguas hayan entrado en contacto en su marcha por la superficie del terreno o subterránea. La cantidad de sales de las aguas suele oscilar entre 0,1 y 35 gramos/litros, cifras que corresponden estas últimas a las aguas marinas. A continuación se puede observar en la tabla 8 los márgenes de variación de las resistividades de las aguas naturales.

TABLA 8
VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE LAS AGUAS NATURALES

Aguas Naturales	Resistividad Ω-m
Aguas de lagos y arroyos de alta montaña	10 ³ - 3x10 ³
Aguas dulces superficiales	10 - 3x10 ³
Aguas salobres superficiales	2 a 10
Aguas subterráneas	1 - 20
Aguas lagos salados	0,1 a 1
Aguas marinas	0,2
Aguas de impregnación de rocas	0,03 a 10

Todos los datos especificados en la tabla anterior se refieren a márgenes usuales de variación.

G. Estratificación del Suelo

Este término se refiere a que el suelo no es uniforme, sino que puede presentar diferentes capas cuya composición no es igual, por lo tanto su resistividad variaría con cada una de ellas. Por lo general las capas más profundas tienen una

resistividad media menor por ser más ricas en contenido mineral y humedad o se puede decir que están mas cerca del nivel freático.

H. Efectos de las Propiedades Físico-Químicas del Suelo sobre la Corrosión.

La corrosión puede afectar el comportamiento y la confiabilidad de un sistema de tierra cuando la sección transversal del conductor afectado se torna inadecuado para llevar la corriente para la cual fue diseñado. Por lo tanto, la corrosión se convierte así en un factor decisivo en el diseño de un sistema de puesta a tierra, puesto que no es fácil inspeccionar o probar la red de tierra para localizar la corrosión, ni practico reforzar o reemplazar las partes dañadas. Además, la corrosión de los metales en el suelo es en primer lugar un fenómeno electroquímico y resulta de la acción de numerosas celdas galvánicas. Cada celda galvánica consta de:

- Áreas de cátodo y ánodo de la superficie del metal.
- Electrolito del terreno capaz de provocar el proceso entre ánodo, cátodo y de la corriente que fluye entre estos.

La aparición de diferencias de potenciales en la superficie del metal inmerso en un electrolito, es atribuida básicamente a la inestabilidad termodinámica del metal en un ambiente dado. Esta inestabilidad termodinámica de los metales es expresada en términos de potenciales electroquímicos. Mientras mayor es la inestabilidad, mayor es la tendencia del metal a migrar hacia el electrolito en forma de iones. A continuación se enumeraran varios factores que afectan en la corrosión, estos son:

1) Influencia de la resistividad del suelo

La acidez del suelo es una medida de casi todas las características físico-químicas del mismo. Mediante datos experimentales se ha logrado determinar que el grado de corrosión de la mayoría de los suelos se incrementa con la acidez del terreno. El rango de corrosividad de suelos aceptado se muestra en la Tabla 9.

TABLA 9
RESISTIVIDAD DE SUELOS Y CORROSIÓN

Rango de suavemente $\Omega\text{-m}$	Clase
Menos de 25	Suavemente corrosivo
25-50	Moderadamente corrosivo
51-100	suavemente corrosivo
Mas de 100	Poco corrosivo

2) Penetración del aire en el suelo:

Algunos investigadores consideran que una pobre aireación del suelo ocasiona mayor grado de corrosión que un suelo con buena propiedad de penetración de aire.

3) Contenido de humedad

La razón de penetración de aire y la resistividad del terreno decrece con el incremento del contenido de humedad. En general, la corrosividad del suelo se incrementa con el contenido de humedad hasta un punto critico y mas allá de este punto la corrosividad decrece debido a la reducción de la cantidad de oxígeno requerido para la despolarización catódica. La humedad en el ánodo acelera el proceso allí.

4) Contenido de ácidos y sales

En suelos altamente ácidos, se incrementa la despolarización en el cátodo debido a la disponibilidad de hidrógeno y además, la corrosividad del suelo aumenta con la acidez. La presencia de sales reduce la resistividad. Las sales ácidas generalmente incrementan la corrosión y las sales alcalinas actúan como inhibidores de la corrosión. Las sales ligeramente oxidantes son extremadamente corrosivas, no ocurre así con las fuertemente oxidantes.

VI. CONDUCTORES Y MALLA DE TIERRA

Los elementos conductores que conforman el SPAT 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 inadmisibile. 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(las disposiciones básicas de las redes de tierra son: Sistema Radial, Sistema de Anillo y Sistema de Red). 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. Por su parte, la enciclopedia del CEAC establece como calibres mínimos:

TABLA 10
CALIBRE MÍNIMO DE CONDUCTORES DE TIERRA

Material	Área (mm ²)
Hilo o cable de cobre estañado	35
Hierro Galvanizado	100

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. 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.

TABLA 11
CORRIENTE PERMISIBLE EN LOS CONDUCTORES A TIERRA, CON UNA TEMPERATURA FINAL DE 150° C.

Sección en mm ²	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	-	-

A. Conectores y sus Accesorios

Los conectores son lo elementos encargados de unir a la red o sistema de tierra las tomas. Los 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. El bronce se utiliza, especialmente porque es un material no magnético, proporcionando una conducción segura de las descargas atmosféricas, que son de alta frecuencia. En la figura 3, se pueden observar algunos tipos de conectores atornillados.

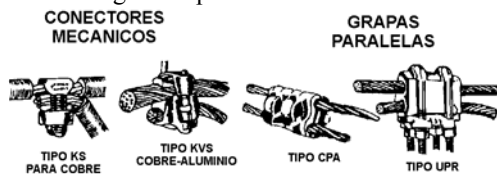
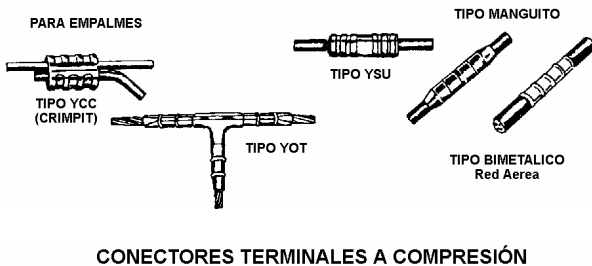


Fig. 3. Conectores tipos atornillados

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.

CONECTORES A PRESIÓN



CONECTORES TERMINALES A COMPRESIÓN

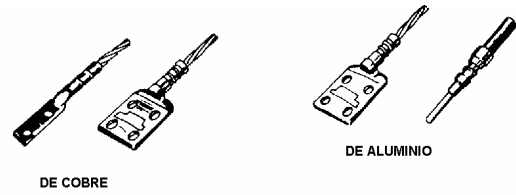


Fig. 4. Conectores tipo a presión

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



Fig. 5. Tipos de soldaduras, conductor a conductor

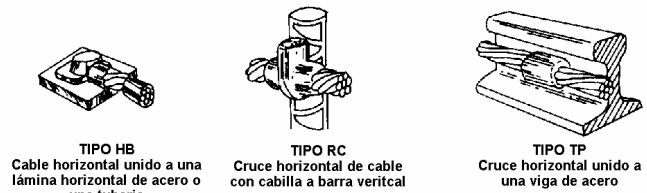


Fig. 6. Soldaduras tipo conductor a estructuras



Fig. 7. Tipos de Soldaduras de Conductor con la Barra

VII. CONFIGURACIÓN DE REDES DE PUESTA A TIERRA

A continuación se explicaran las disposiciones básicas de las redes de tierra.

A. Disposición en Forma Radial:

Este tipo de disposición o 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 potencial; 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 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 disposición 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.

B. Disposición en Forma de Bucle, 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. 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. (Ver Figura 8).

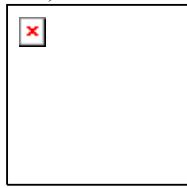


Fig. 8. Disposición en Forma de Anillo.

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.

C. Disposición en Forma de Estrella:

La toma de tierra en forma de estrella, consiste de conductores radialmente distribuidos en tono 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 60o. El aumento del número de las ramas de la estrella apenas contribuye a la disminución de la resistencia de la toma.

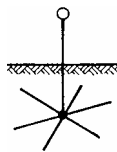


Fig. 9. Disposición en Forma de Estrella

D. Disposición en Forma de Estrella en Lazo:

Esta disposición 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.

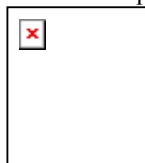


Fig. 10. Disposición en Forma de Estrella en Lazo

E. Disposición en Forma de Red en Malla:

La puesta a tierra en forma de malla, es un sistema de conductores 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. 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. (Ver figura 11)

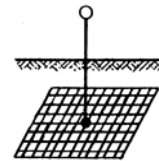


Fig. 11. Disposición en Forma de Malla

Este sistema es actualmente el más utilizado en toda Venezuela, por ser el más eficaz, pero también resulta ser el más caro de todos los nombrados anteriormente. Según Siegert (1996), la malla de puesta a tierra en las subestaciones convencionales, alcanza una extensión apreciable. 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 .

El CEAC, establece que de diámetro o la longitud del mayor lado de la superficie de la malla 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^2 de sección mínima y 3 mm de espesor mínimo. Algunas veces, se emplea también el acero cableado, con sección mínima de 50 mm^2 , la cinta de cobre con sección mínima de 50 mm^2 u espesor mínimo de 3mm y, finalmente, conductor desnudo de cobre de 35 mm^2 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 conductor es, por si solo, inadecuado para proveer seguridad al sistema de tierra. En cambio, cuando varios conductores, son conectados los unos a los otros y todo el equipo de neutro y estructuras son colocados a tierra, el resultado es esencialmente un arreglo de malla que asegura un buen SPAT.
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 a las personas. Entonces, el peligro puede ser eliminado solo por el control del potencial local a través del área entera. Un sistema que combina conductores colocados horizontalmente (malla horizontal) con un número de varillas verticales, ambos enterrados en el suelo, posee las

siguientes ventajas:

- Una malla horizontal es más efectiva porque reduce el peligro de la tensión de paso y de toque en la superficie de la tierra, con tal que la malla se instale a una profundidad pequeña, comúnmente 0,3 a 0,5 m (12-18 pulgadas) debajo del suelo, suficientes varillas o electrodos de tierra pueden estabilizar el rendimiento del sistema.
- Las varillas que se penetran en el suelo con baja resistencia son mucho más efectivas para 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 gradiente superficial cercano a la periferia de la malla.

Como cita La Norma de Presentación de Proyectos de Subestaciones de Transmisión Sistemas de Puesta A Tierra de CADAPE.(1992). Pág. 11.

La Malla de Tierra: Es el conjunto de elementos conductores, que enterrados en el suelo de la subestación, permite disipar a través de ella, corrientes de cortocircuito a tierra del sistema de potencia y controlar gradientes de potencial en la superficie del suelo. En esta malla de tierra deben estar conectados todos los equipos de la subestación, para que en caso de que se energice cualquiera de ellos, esta pueda disipar las corrientes peligrosas , por todo el suelo de la subestación. La malla puede estar compuesta por cables desnudos de cobre trenzado o copperweld, cinta de cobre o un tubo de cobre flexible y por electrodos. Y también pueden ser conectados a electrodos tipo varilla o químicos, a fin de lograr una disminución de la densidad de corriente en el conductor y así obtener una baja diferencia de potencial, durante las descargas súbitas a tierra.

El conductor más usado comúnmente es el cable de cobre trenzado cuya sección queda determinada por la máxima corriente de falla que se prevé. La sección mínima (tamaño) de estos conductores está establecida por el Código Eléctrico Nacional en los Artículos 250-93,94 y 95. Se usan generalmente para subestaciones o estaciones de generación para proveer superficies equipotenciales con voltajes de toque y paso (estos conceptos se definirán mas adelante) no peligrosos a través de toda el área de la subestación, allí se justifica su alto costo. La configuración básica de una malla consiste en conductores enterrados horizontalmente a una profundidad que usualmente varia de 0,5 a 1,0 m. formando una red de cuadrados y rectángulos.

El cable que forme el perímetro exterior de la malla debe ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo de la subestación con ello se evitan altas concentraciones de corrientes y gradientes de potencial en el área y terminales cercanas. En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente entre sí y en los puntos adecuados deben conectarse a electrodos de tierra de 2,4 m de longitud mínima, clavados verticalmente. Los cables que conforman la malla deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de estructuras o equipos para facilitar la conexión a los mismos.

Para saber la sección del conductor de la malla y las

derivaciones a equipos y estructuras se utiliza la Norma Presentación de Proyectos de Subestaciones de Transmisión Sistema de Puesta a Tierra de CADAPE.(1992) Pág. 21, que especifica lo siguiente:

La sección del conductor de la malla principal y de las derivaciones a equipos, será determinada de forma de no exceder la máxima temperatura recomendada para los puntos de conexión, cuando por ellos fluya la máxima corriente esperada de cortocircuito franco a tierra, durante el tiempo máximo de despeje de la falla. El cálculo de la sección admisible del conductor será realizado en base a los procedimientos y recomendaciones de la última versión del documento ANSI/IEEE Std. 80. Las conexiones a equipos efectuados con dos o mas conductores, serán dimensionadas de forma que uno solo de ellos, debe satisfacer lo antes prescrito. Solo se admitirá que el conductor de una derivación a equipo sea de una sección menor a la del conductor de la malla principal, cuando el equipo en cuestión se a de baja tensión. En este caso, el conductor podrá ser dimensionado en base al nivel de cortocircuito y tiempo de despeje de la falla correspondiente. En subestación donde existan varios patios o niveles de tensión, podrán utilizarse distintas secciones de conductores para la malla de tierra y derivaciones a equipos de cada patio, determinadas en base a la corriente y tiempo aplicable a cada caso. La malla y derivaciones a equipos asociados a dos niveles de tensión, serán determinadas en base a las condiciones pesimistas. En lo que respecta a la geometría de la malla se utiliza la misma norma antes menciona, la cual especifica lo siguiente:

La malla de tierra será diseñada de forma de satisfacer el compromiso de minimizar la cantidad de conductor, conexiones, excavaciones, bote, relleno, sin que los voltajes de toque y paso que puedan presentarse para las condiciones de diseño, excedan los correspondientes valores.

La disposición mínima, es la que permite un fácil y corto camino a las ramificaciones de la malla a los equipos.

El espaciamiento entre conductores será preferiblemente de forma irregular, de forma de compensar el efecto de la distribución no uniforme de la corriente entre los diferentes conductores de la malla y por lo tanto optimizar el diseño.

El amplio uso de la malla de tierra es debido a las siguientes ventajas:

- En los sistemas donde sea muy alta la máxima corriente a tierra, raramente es posible obtener una resistencia tierra tan baja como para que garantice que el alza de potencial del SPAT no alcance valores peligrosa para el contacto con los humanos. En este caso el riesgo puede ser evitado solamente controlando los potenciales locales mediante el uso de una malla a tierra.
- En una subestación de cualquier tamaño, ningún conductor sencillo y corriente es adecuado para proveer la conductividad necesaria, pero cuando algunos de ellos son conectados entre si a las estructuras, carcasas de las máquinas y a los neutros de los circuitos conectados a tierra, el resultado es una malla. Si esta malla de tierra es enterrada en un suelo de conductividad razonablemente

buena, entonces dicha red proveerá por sí sola un excelente sistema de puesta a tierra. Es decir, un diseño que use múltiples conductores, puede requerir una red de conexión de manera que los conductores originales estén demás.

VIII. ELECTRODO DE TIERRA

El electrodo es el elemento del sistema de puesta a tierra que conecta a la malla de tierra con la interfase facilitando el paso de la corriente a tierra; por lo tanto un electrodo es todo elemento conductor en permanente contacto eléctrico con el suelo. Este puede ser en forma de varilla, cable, tubo, placa, cinta, tubería metálica de agua, o un semiconductor tal como un bloque de carbón, una fundación de concreto conductor, etc. Según La Norma Presentación de Proyectos de Subestaciones de Transmisión Sistemas de Puesta a Tierra de CADAFE (1992).Pág.11 especifica los dos conceptos que se definirán a continuación como:

Electrodo de Puesta a Tierra: es todo elemento conductor, de cualquier configuración y dimensiones, que intencionalmente sea enterrado en el suelo para dispersar corrientes eléctricas a éste.

Barra de Tierra: es un electrodo de puesta a tierra constituido por una o mas barras de acero de alta resistencia mecánica, cobrizada por electrodeposición. En caso de que la malla de tierra sea construida con guaya de acero, las barras de tierra son de acero inoxidable.

Como se puede notar en esta norma el electrodo de tierra puede ser toda la malla, incluyendo las barras de tierras que estén unidas a ella, o sea es todo el sistema de puesta a tierra que se encuentren debajo de la tierra. En este artículo de denominara a las Barras de Tierra como Electrodo de Tierra, para evitar confusiones mas adelante. Los electrodos que se utilizan comúnmente son: varilla metálica, tipo placas, barras químicas y fundaciones de concreto conductor.

A. Varilla Metálica

La varilla es la forma más común de electrodo de tierra, ella se coloca mayormente en forma vertical y su valor útil depende de su habilidad de hacer un contacto con la interfase, sin intentar cambiar el ambiente de la misma. Hay dos variables que deben considerarse: la longitud y el diámetro; de ellos dependerá el valor de la resistencia de contacto, siendo esta última inversamente proporcional a esa área de contacto. 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 varilla de tierra y un punto de tierra durante la difusión de corriente, es máxima

en la vertical de la varilla de tierra y va disminuyendo a medida que aumenta la distancia radial desde la varilla de tierra, a unos 20 metros de dicha varilla 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 varilla 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. Generalmente las varillas son fabricadas de acero al carbono recubierto de cobre, acero galvanizado, acero inoxidable, bronce, cobre; siendo la primera de éstas las más utilizadas, con una longitud de 2,4 mts y debe instalarse de tal modo que por lo menos 2,4 mts este en contacto con la tierra, diámetro de 20 mm y espesor de cobre de 250 mm. Este espesor es el que exige la norma de CADAFE como espesor mínimo.

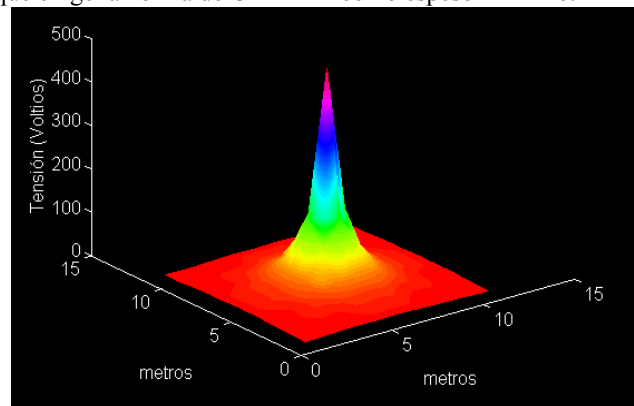


Fig. 12. Embudo de Voltaje, para una Varilla de Tierra.

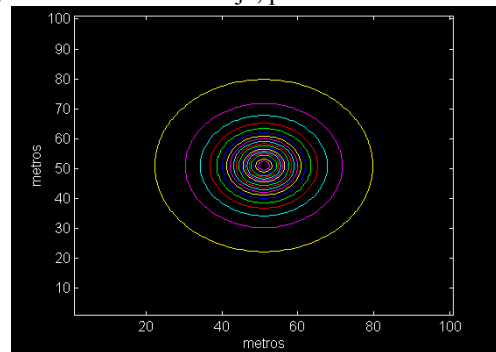


Fig. 13. Superficie Equipotencial, para una Varilla de Tierra.

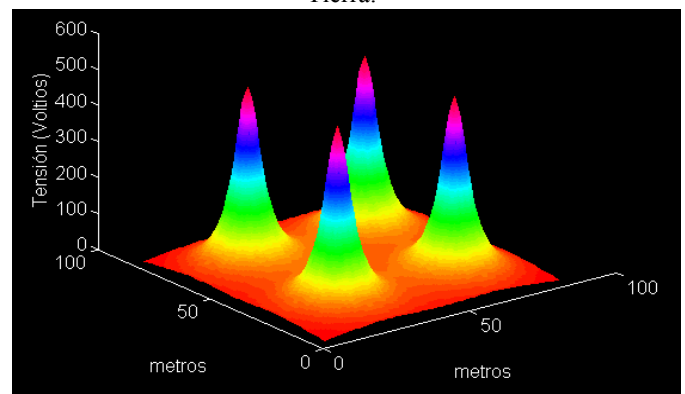


Fig. 14 Embudo de Tensión para Cuatro Varillas de Tierra.

En la Figura 15 se muestran las diferentes posiciones que pueden colocarse las varillas de tierras. Estos electrodos se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanza la profundidad adecuada. En casos de terrenos rocosos, las varillas no pueden introducirse de esa manera; se doblan o solamente no pueden entrar. Se han conocidos casos donde las varillas han sido regresadas hacia la superficie después de haber tratado de clavarlas en terrenos rocosos. Cuando la roca está a menos de 2,4 m, estos electrodos pueden ser colocados en forma diagonal hasta con un ángulo de 45° de la vertical. Pero, si así no es el caso, se deben enterrar horizontalmente en una zanja abierta para el caso a 800 mm de profundidad por lo menos. La alternativa al golpeado es perforar un agujero, instalar la varilla y rellenar nuevamente el agujero.

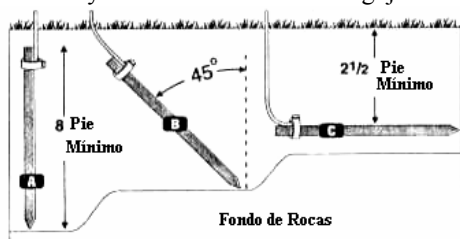


Fig. 15. Diferentes Posiciones de La Varillas

B. Placas

Las placas son electrodos en forma de láminas con longitud y ancho mucho mayores que su espesor, ofreciendo una gran superficie de contacto con el suelo. Ellas son usualmente de cobre, acero o hierro, y normalmente se diseñan con una superficie de contacto con el suelo de por lo menos $0,2 \text{ m}^2$.

Para el acero o hierro el espesor mínimo debe de ser de 6,35 mm y para el cobre o los electrodos de material no ferroso es de 1,5 mm. La diferencia en el espesor de cada tipo de material es debido a la capacidad del mismo a resistir la corrosión y está dado por el CEN. Art. 250-83.d.

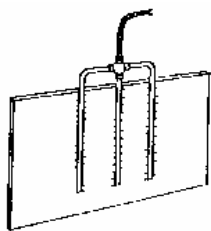


Fig. 15. Electrodo Tipo Placa

C. Barras Químicas

Cuando la resistividad del suelo no se logra reducir usando tecnología convencional la cual consiste en barras copperweld directamente enterradas, se utilizan las barras químicas que consisten en tubos de cobre electrolítico de 67 mm, de diámetro exterior y de espesor 2 mm. (existen diversos diámetros, pero este es uno de los mas utilizados), en cuyo interior está relleno de compuestos químicos, básicamente de sales que se incorporan lentamente a la interfase a través de orificios en el tubo. Estos tubos pueden ser colocados de acuerdo a su diseño en forma vertical u horizontal dependiendo de las características del suelo.

D. Fundaciones de Concreto Conductivo

Cuando se trata del diseño de subestaciones, el concreto puede ser utilizado como electrodo principal. Esto consiste en agregar al concreto de las bases de cualquier estructura, compuestos químicos que lo hacen conductor, quedando de esta forma aterrada la estructura. Por su costo este sistema se utiliza casi exclusivamente para prevenir el robo de cobre.

IX. HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

En 1956, un grupo, bajo la presidencia del Sr. Richard f. Stevens, empezó una investigación, que con el futuro llevo a la realización de AIEE-80 en 1961. El primer trabajo de este grupo era determinar que información técnica ya se había publicado sobre la puesta a tierra de las subestaciones. Con lo que encontraron que existía una gran cantidad de información independientes o sea trabajos aislados. Era tarea del grupo combinar esta información en un documento.

Uno de los papeles que mas tempranos se publico fue en 1936, el cual trataba de colocar a tierra los electrodos, fue escrito por H. B. Dwight de MIT. En este documento se dieron formulas para los cálculos de uso practico, de la resistencia de electrodos de tierra, junto con ejemplos para mostrar sus usos. Muchas de las ecuaciones que Dwight presento para electrodos simples, con una sola barra, dos barras en paralelo y para cables enterrados horizontalmente, todavía son la base de aplicaciones modernas.

En 1941, se publico, por el profesor J. R. Eaton, las diferentes resistencias con respecto a la naturaleza de la tierra, la resistividad en tipos diferentes de tierra y los efectos de la sal, temperatura y humedad. Toda esta información era una acumulación del papel técnico que habría realizado el Sr. O. S. Peters, publicado en 1918, y un método para medir la resistividad del terreno publicado por F. Wenner. Los dos últimos señores conectaron con tierra dos barras, tres barras, y cuatro barras. El método de Wenner de cuatro electrodos para medir la resistividad del terreno, todavía es ampliamente utilizado. El segundo papel de Eaton, allí se extendió las formulas de Dwight a las aplicaciones mas practicas. En el tercer papel, discutió el alza de los voltajes en la subestación y explico el fenómeno de las diferencias de potenciales en los sistemas de puesta a tierra. Eaton enfatizo, sobre el uso de barras de tierras para bajar la resistencia, y el uso de conductores horizontales para minimizar las pendientes de potenciales. Después existieron tres papeles, el primero de ellos lo publico Reinhold Rudenberg en 1945, considerando los problemas científicos relacionados con la conducción de las corrientes a través de la tierra, y el también fue el primero en explicar el comportamiento de las barras en el suelos en diferentes estratos. Y de esta manera han ido apareciendo las diferentes teorías de los distintos científicos, para ir evolucionando y mejorando los SPAT.

Con todo esto se puede observar que cada una de las formulas y métodos de medición que se nombraran a continuación han sido elaboradas y mejoradas durante el transcurso de los años por notables científicos, por lo que aquí

no se pretenderá explicar el origen de estas, si no que solo serán utilizadas según sus especificaciones.

X. MEDICIÓN DE RESITIVIDAD DEL TERRENO

A. Método de los dos Electrodo

Con este método se realizan mediciones aproximadas sobre pequeños volúmenes de suelo homogéneos, utilizando para ellos dos (2) pequeños electrodos de hierro. Uno de los electrodos es más corto que el otro, y se conectan a una batería a través de un miliamperímetro. El terminal positivo de la batería se conecta a través del miliamperímetro al electrodo más pequeño y el terminal negativo al otro electrodo, tal como se muestra en la Fig. 16.

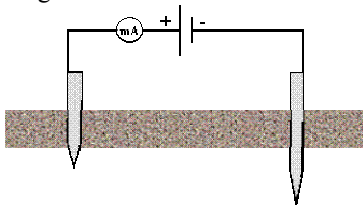


Fig. 16. Método de los Dos (2) Electrodo

En este arreglo, similar al medidor de resistividad tipo Shepard, el miliamperímetro puede ser calibrado para leer directamente Ohmios-Centímetros al voltaje nominal de la batería. La ventaja de este método es que la medición se realiza fácilmente, pero su aplicación esta limitada a pequeños volúmenes de suelos, enterrando los electrodos en el terreno, en las paredes o en el fondo de las excavaciones.

B. Metodo de los cuatro Electrodo

Este consiste en inyectar corrientes a través de dos (2) electrodos externos y medir la tensión o caída de potencial entre los dos (2) electrodos internos. Todos los electrodos están alineados y enterrados a una misma profundidad "b", como se pude observar en la Fig. 17.

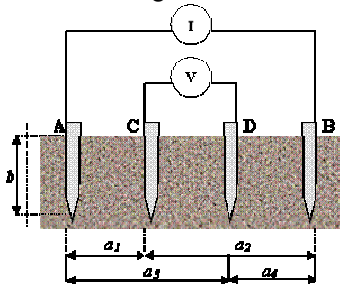


Fig. 17. Método de los cuatro electrodos

Entre los electrodos A y B se inyecta una corriente I, y entre C y D se mide la diferencia de potencial. Si la profundidad b es muy pequeña, en comparación a la separación entre electrodos ($a \gg b$), puede suponerse una distribución radial de corriente y electrodos puntuales y además se supone homogeneidad o uniformidad del terreno, entonces la resistividad en términos de unidades de longitud es dada por la ecuación de B. Tajar y E. T. B. Gross:

$$\rho = \frac{2 \times \pi \times V}{I} \times \frac{1}{\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right) - \left(\frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_4}\right)}$$

Actualmente existen muchos instrumentos que la lectura es en ohmios directamente, entonces la resistividad del suelo se puede calcular también por la ecuación:

$$\rho = 2 \times \pi \times R \times \frac{1}{\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right) - \left(\frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_4}\right)}$$

En la práctica, como los terrenos no son uniformes, el valor que se obtiene con la primera ecuación es ficticio y no corresponde, en general, a ninguna de las resistividades presentes en el terreno bajo estudio. Entonces para determinar la constitución del terreno investigado es necesario tener diferentes separaciones entre electrodos, con el objeto de lograr lecturas a lo largo o a través de las diferentes composiciones del terreno investigado y poder conseguir así un promedio de la resistividad. Esto trae como consecuencias variaciones del método antes descrito, lo que conlleva a configuraciones clásicas de acuerdo a la ubicación relativa de los electrodos en el terreno, cada una de ellas con ligeras ventajas y desventajas de un método sobre otro.

1) Configuración Wenner o Distanciamiento Igual Entre Electrodo

Este es el método mas utilizado. En este arreglo, los electrodos se ubican sobre una línea recta con una separación entre los electrodos de a y enterrados a una profundidad de b, como se ilustra en la Fig. 18.

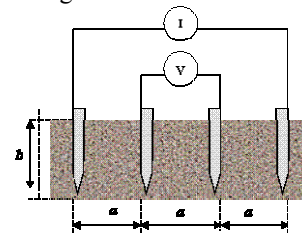


Fig. 18. Configuración de Wenner
 $\rho = 2 \times \pi \times a \times R$

Con un cierto numero de lecturas, tomadas a diferentes separaciones entre electrodos, se van a obtener varios valores de resistividad, que sí se grafica la resistividad versus separación de electrodos, se podrá obtener una indicación de la composición del terreno y da una idea de su correspondiente resistividad. Para una mayor exactitud en la determinación de la resistividad del terreno la ecuación mas recomendada es la que se muestra a continuación, la cual no asume el valor de b como cero, sino que por el contrario lo toma como influyente en el resultado de la prueba.

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times a \times R}{1 + \frac{2 \times a}{\sqrt{a^2 + 4 \times b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

La determinación de la resistividad utilizando el método de Wenner resulta en una resistividad aparente que es función de la separación entre electrodos a y de la profundidad de

enterramiento de los mismos b, sin embargo para un resultado mucho mas preciso y expresado en términos de otros parámetros relacionados, la resistividad aparente del terreno vendrá dada por la expresión que sigue a continuación:

$$\rho(a) = \rho_1 \times \left[1 + 4 \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2 \times n \times \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2 \times n \times \frac{h}{a}\right)^2}} \right]$$

y además:

$$K = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)}$$

2) Configuración Schlumberger–Palmer o Separación Desigual Entre Electrodo Adyacentes

Con el método de Wenner, la caída de potencial entre los electrodos de tensión disminuye rápidamente cuando su separación se aumenta a valores relativamente grandes, y los instrumentos comerciales resultan inadecuados para medir esos valores bajos de tensión. Por ello, cuando es necesario realizar mediciones de resistividad en donde se requieren grandes separaciones entre los electrodos de corriente, se utiliza la configuración de Schlumberger–Palmer, el cual consiste en colocar los electrodos en línea recta simétricamente con respecto a un centro de medición elegido. Los electrodos de potencial permanecen fijos con una distancia de 1 a 3 metros trasladándose solo los de corriente, en este caso:

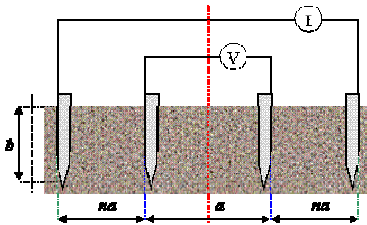


Fig. 19. Configuración Schlumberger $\rho = \pi \times R \times n \times (n + 1) \times a$

En esta configuración se toma generalmente a = 1m, siempre y cuando el valor del voltaje sea lo suficientemente grande para no producir errores en la medición.

3) Configuración Participación de Lee

Este es un método complementario a los métodos Wenner, Schlumberger para determinar posibles variaciones laterales en el terreno a medir. En el empleo de cualquiera de los dos (2) métodos antes descritos, se adiciona un electrodo auxiliar intermedio entre los dos (2) electrodos de potencial, tal como se muestra en la Fig 20.

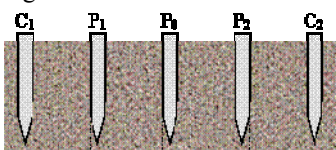


Fig. 20. Configuración Participación de Lee

XI. MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

A. Método de los Tres Electrodo

Este método consiste en medir la resistencia serie que ofrecen dos electrodos a la vez al paso de una corriente alterna, de un conjunto de tres electrodos donde uno esta bajo medida y los otros dos son auxiliares, utilizando cualquiera de las formas conocidas para medir resistencias (amperímetro, voltímetro, ohmmetro, puente de Wheatstone, etc); este arreglo se muestra en la Fig. 21 a cual se permite calcular la resistencia de puesta a tierra.

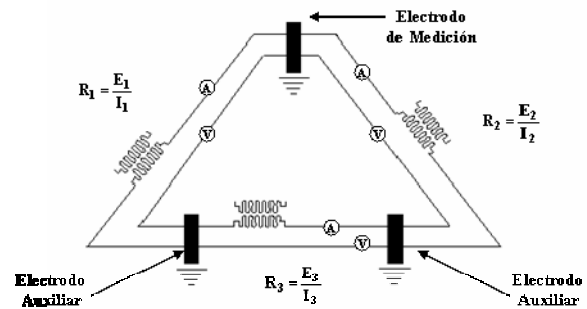


Fig. 21. Medida de Resistencia de Puesta a Tierra por Método de Tres Puntas

$$R_x = \frac{1}{2} (R_1 + R_2 + R_3)$$

B. Método de Caída de Potencial

Este método consiste en la colocación de dos electrodos auxiliares en línea recta con el electrodo que se desea medir, a una distancia entre los electrodos extremos con tal de que no se solapen sus interfases, tal como se muestra en la Fig. 22.

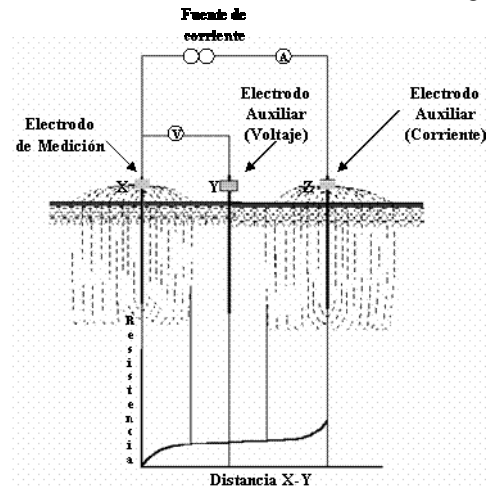


Fig. 22. Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra por el Método de Caída de Potencial

Si se inyecta una corriente por los electrodos extremos y medimos la caída de potencial entre el electrodo central y el que se desea medir, se obtiene una resistencia; ahora si se desplaza el electrodo central en esta línea recta se observa como varía la resistencia; en el punto donde la variación es mínima la cual ocurre aproximadamente a 63% del electrodo

de medición se encuentra el valor de resistencia del sistema de puesta a tierra.

Para el calculo de la resistividad de un SPAT existen diferentes ecuaciones o combinaciones de ellas que se encuentran ya tabuladas para los diferentes tipos de electrodos, estas ecuaciones se encuentran definidas por el estándar 142-1991 de la IEEE y se pueden observar en la Tabla 12.

TABLA 12
FORMULAS PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE ELECTRODOS

Hemisferio de radio a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
Una barra de tierra de longitud L , radio a .	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
Dos barras de tierra $s < L$, espaciadas s .	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^3} + \frac{2L^4}{5s^4} \right)$
Dos barras de tierra $s < L$, espaciadas s .	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right)$
Alambre enterrado horizontalmente de Longitud $2L$, profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right)$
Alambre en ángulo recto de brazo L , profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0,2373 + 0,2146 \frac{s}{L} + 0,1035 \frac{s^2}{L^2} - 0,0424 \frac{s^4}{L^4} \right)$
Estrella de tres brazos de longitud L , profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1,071 - 0,209 \frac{s}{L} + 0,238 \frac{s^2}{L^2} - 0,054 \frac{s^4}{L^4} \right)$
Estrella de cuatro brazos de longitudes L , profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2,912 - 1,071 \frac{s}{L} + 0,645 \frac{s^2}{L^2} - 0,145 \frac{s^4}{L^4} \right)$
Estrella de seis brazos de longitudes L , profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 6,851 - 3,128 \frac{s}{L} + 1,758 \frac{s^2}{L^2} - 0,490 \frac{s^4}{L^4} \right)$
Estrella de ocho brazos de longitudes L , profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10,98 - 5,51 \frac{s}{L} + 3,26 \frac{s^2}{L^2} - 1,17 \frac{s^4}{L^4} \right)$
Alambre en forma de anillo de diámetro D , diámetro de alambre d , profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
Placa horizontal enterrada de longitud $2L$, sección a, b y \vec{a}, \vec{b} , profundidad $s/2$, $b < a/8$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left[\ln \left(\frac{4L}{a} \right) + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \left(\frac{4L}{s} \right) - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^2}{512L^4} \right]$
Plato sólido redondo enterrado horizontalmente, radio (a) , profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \right)$
Plato sólido redondo enterrado verticalmente, radio (a) , profundidad $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 + \frac{7a^2}{24s^2} + \frac{99a^4}{320s^4} \right)$

- Inspección de la disposición de equipos y estructuras en el plano.
- El perímetro de la malla debe estar formado por un cable continuo de modo de encerrar la mayor cantidad de equipos posibles y para evitar concentraciones de corriente y de aquí altos gradientes de potencial en terminales salientes de cables de tierra.
- Los cables deben disponerse en líneas paralelas y preferiblemente a un espaciamiento uniforme. Deberán localizarse a lo largo de las filas, estructuras y/o equipos para facilitar las conexiones a tierra.
- Existe una longitud de conductor mínimo, necesario para mantener los voltajes de toque dentro del perímetro de la malla en los límites de seguridad. Luego el diseño preliminar debe ajustarse de manera que la longitud del conductor a utilizarse sea al menos igual a la calculada.
- La malla de tierra puede extenderse sobre el patio entero de la subestación y algunas veces incluye la cerca que la rodea.
- Las áreas de gran concentración de corrientes de fallas tales como conexiones a tierra de neutro de transformadores deben tener cables de mayor sección.

Cada uno de los elementos del sistema de tierra (incluso la rejilla misma, los alambres de conexión a tierra y electrodos) deben estar diseñados de manera que cumplan por lo menos con las condiciones que se indican a continuación para lo cual también se muestra como ejemplo la tabla que sigue en este punto:

- Resistan la fusión y deterioro de juntas eléctricas bajo la combinación más adversa de magnitud de corriente de falla y duración de falla a la que pudiera someterse.
- Ser mecánicamente robustos en alto grado, especialmente en lugares expuestos a averías físicas.
- Tener suficiente conductividad de modo que no contribuya en forma importante a diferencias locales de potenciales peligrosos.

TABLA 13
MEDIDAS MÍNIMAS DE CONDUCTORES DE COBRE PARA EVITAR FUSIÓN

Duración De La Falla (Seg.)	Mils Circulares Por Ampere		
	Solo Cable	Con Juntas Soldadas Con Bronce	Con Juntas Atornilladas
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0,5	5	6,5	8,5

Los métodos de medición más utilizados actualmente para medir la resistencia de la malla de tierra de las subestaciones de transmisión o de gran potencia. Existen varios métodos de medición para la resistencia de la malla de tierra que ya fueron comentados, estos son el método de los dos electrodos y el de los tres electrodos o caída de potencial. Pero existen otras dos formas de conocer los parámetros de la malla de tierra, las cuales son el Método de Inyección de Altas Corrientes y el de Inyección de Bajas corrientes, estas maneras de realizar las

C. Métodos para Medir y Calcular los Parámetros de una Malla de Tierra

Antes de comenzar con los métodos para medir la resistencia de tierra de la malla se nombraran algunos pasos principales que contempla el diseño de una malla de tierra, estos son:

mediciones no son nombradas y por ende no son especificadas por las normas de CADAPE, Estas formas de realizar la comprobación de la malla de tierra son poco conocidas por estas empresas, pero la Electricidad de Caracas a utilizado mucho mas estos métodos, por lo que los recomiendan ampliamente.

En 1982 en las III Jornadas Nacionales de Potencia, los ingenieros German García y Pedro Maninat M., en su papel denominado “*Medición de Resistividad del Suelo y Resistencia de Puesta A Tierra en Subestaciones*” nombraron y explicaron estos dos métodos, y comentaron que siempre existirá la necesidad de conocer métodos de medición que proporcionen resultados suficientemente exactos que permitan tomar decisiones rápidas y acertadas sobre las acciones a tomar. También dicen que la base de todos los métodos de medición de una resistencia de puesta a tierra consiste en inyectar una corriente conocida y al mismo tiempo medir la elevación del potencial de la malla. Sin embargo, estas mediciones son difíciles de llevar a cabo en el campo.

Después en las IV Jornadas Nacionales de Potencia realizadas en 1986, los ingenieros Joffre Carmona S. y Beatriz González P., pertenecientes a las empresas ERIPE.C.A y E. de C., respectivamente, en su papel denominado “*Mediciones en Campo del Gradiente de Potencial en Mallas de Tierra de Subestaciones*”, utilizaron el método de inyección de altas corrientes para comprobar los parámetros de la malla de tierra de varias subestaciones que pertenecen a la Electricidad de Caracas, y especifican muy claramente los materiales y equipos utilizados para estas pruebas.

A continuación se especificaran muy claramente estos dos métodos de medición:

1) *Método de Inyección de Altas Corrientes*

Este método es el más confiable para determinar la resistencia (impedancia) de puesta a tierra de subestaciones grandes. También es útil en el caso de los apoyos de líneas de transmisión y de distribución. Sirve de igual manera para medir los posibles voltajes peligrosos dentro y fuera de esos sistemas. Consiste en inyectar una corriente de prueba al sistema de tierra de la subestación, teniendo una línea aérea conectada a un electrodo auxiliar ubicado en una tierra remota la cual cierra el circuito. El alza de potencial de la subestación se mide por medio de un voltímetro, utilizando un electrodo auxiliar de potencial suficientemente alejado de la subestación. Algunos autores recomiendan alejarse una distancia no menor de 12 veces el radio equivalente del área de la subestación. Otros recomiendan 5 a 10 veces la máxima dimensión de la subestación.

La subestación mas cercana suele escogerse como electrodo auxiliar de corriente, y si esta se encuentra muy cercana o muy lejana de la subestación bajo prueba puede utilizarse una torre con baja impedancia a tierra ubicada a una distancia adecuada. En este método se inyectarán corrientes del orden de decenas de amperes. La inyección de altas corrientes se recomienda para la medición de resistencia de puesta a tierra de subestaciones ubicadas fuera de áreas urbanas donde existen probabilidades menores de que potenciales transferidos

afecten personas o equipos en áreas vecinas. Es prácticamente el único método que puede utilizarse en grandes subestaciones que no tengan en sus vecindades hilos telefónicos, ya que se utilizan subestaciones remotas, como electrodos auxiliares de corriente conectadas mediante las líneas de transmisión.

En general el método proporciona, de manera directa, los potenciales de paso y toque en él área de interés, así como también el porcentaje de corriente de falla que realmente circula en la malla y el valor propio de la resistencia de la malla que no es obtenido en los métodos de bajas corrientes debido a que con estos se determina la impedancia Thevenin equivalente del sistema de puesta a tierra.

Descripción del Método de Inyección de Altas Corrientes

- Como fuente de corriente se utilizará preferiblemente el lado de baja de un transformador monofásico de distribución. En serie con éste se puede colocar un condensador cuyo valor se calcula para estar en resonancia con la parte reactiva de la línea; adicionalmente este condensador filtra la componente continua del sistema, la cual puede causar saturación del transformador.
- El amperímetro y el voltímetro a utilizar deben estar sintonizados a la frecuencia de 60 Hz y proporcionar lecturas directas en valores RMS.
- Como electrodo de corriente se utilizará la malla de tierra de una subestación remota y la sonda de corriente serán las tres (3) fases colocadas en paralelo de la línea que interconecta la subestaciones.
- El electrodo de tensión se ubicará a una distancia mínima de 12 veces el radio equivalente del área de la subestación y luego se harán 2 ó 3 medidas adicionales a distancias mayores para comprobar la estabilización de los valores obtenidos.
- Para eliminar la interferencia que puede tenerse por la presencia de campos magnéticos actuando sobre las sondas de tensión y corriente debe determinarse la corriente inicial “ I_0 ” y la tensión inicial “ V_0 ” sin conectar la fuente de alimentación. Luego se realizan dos medidas de voltaje y corriente, conectando la fuente con polaridades que se invierten en cada ocasión. En la Fig. 23 se puede observar como quedan conectados todos los equipos. La corriente y el voltaje de la malla de tierra se obtienen a través de las ecuaciones:

$$I_m = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2}{2} - I_0^2}$$

$$V_m = \sqrt{\frac{V_a^2 + V_b^2}{2} - V_0^2}$$

Donde:

$$R_{eq} = \frac{V_m}{I_m}$$

- El ángulo de la impedancia de puesta a tierra puede determinarse directamente, mediante la medición de defasaje entre V_m y I_m .
- Si se desea conocer realmente el porcentaje de corriente dispersa en la malla se deben medir las corrientes en los cables de guarda de todas las líneas conectadas a la

subestación.

Entonces:

$$I_{\text{malla}} = I_m - \sum_1^n I_{\text{cable de guarda}}$$

Este valor debe ser muy cercano al calculado durante el diseño de la malla de tierra.

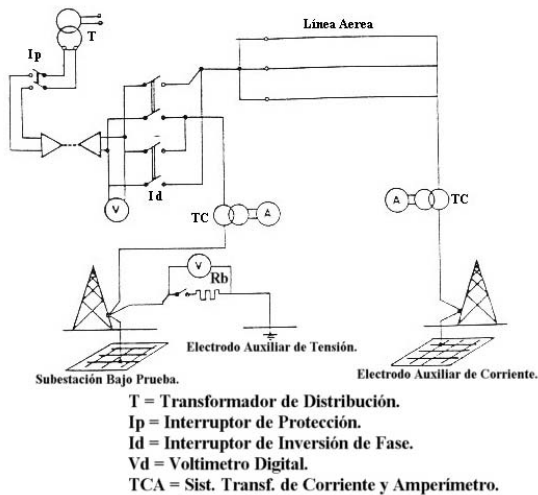


Fig. 23. Método de Inyección de Altas Corrientes

- Si se desean efectuar las mediciones de potenciales de paso y de toque, al mismo tiempo que se realizan la mediciones de la resistencia se deben efectuar medidas como las indicadas en la Fig. 24. Siendo los electrodos auxiliares de tensión placas de cobre con el peso equivalente de un operador sobre ellas. Las mediciones deben ser efectuadas utilizando la resistencia R_c , en caso de no ser así, se estará midiendo la caída total entre la resistencia de contacto y el cuerpo humano.

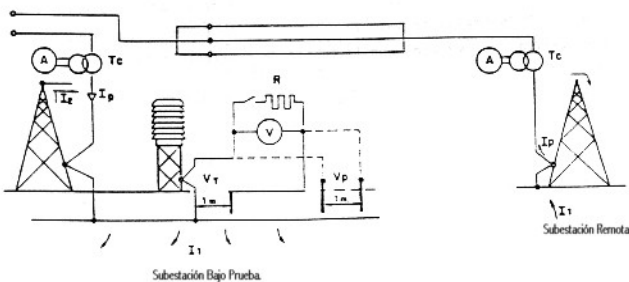


Fig. 24. Medición de Potencial de Toque y Paso

- Para determinar los valores reales de potenciales de toque y paso se multiplican los valores obtenidos por la razón entre

$$I_{\text{max}}/I_m$$

Los ingenieros Joffre Carmona S. y Beatriz González P., en la aplicación de este método para determinar el gradiente de potencial utilizaron un esquema de conexión un tanto diferente, como se puede ver en la figura XX. En este tipo de conexión los equipos utilizados fueron: Un (1) transformador de distribución, Un interruptor, Un seccionador de puesta a tierra, Un amperímetro convencional tipo teneza, Un voltímetro de alta impedancia, Disco de cobre de 10 cm. de diámetro, Disco aislador convencional, Materiales varios;

cables, conectores, herrajes, herramientas, etc.

En las pruebas realizadas por los ingenieros nombrados en el párrafo anterior en algunas subestaciones pertenecientes a la Electricidad de Caracas, se ha puesto en evidencia que las razones principales por las cuales este tipo de prueba no ha sido adoptada como procedimiento rutinario en la comprobación de la malla de tierra, podrían ser atribuidas a los siguientes factores:

- Desconocimiento del método.
- Complejidad en la logística previa a la medición.
- Dificultades de disponer de líneas de transmisión o distribución en sistemas en operación, para el caso de instalaciones en servicio.
- Costo elevado con respecto a al practica de solo medir resistencias a tierra.
- Es recomendable que en toda instalación nueva o en servicio, en la cual se sospeche que pudiesen existir condiciones peligrosas de transferencias de potenciales, voltaje de toque y de paso, se realicen mediciones similares a las antes descritas.

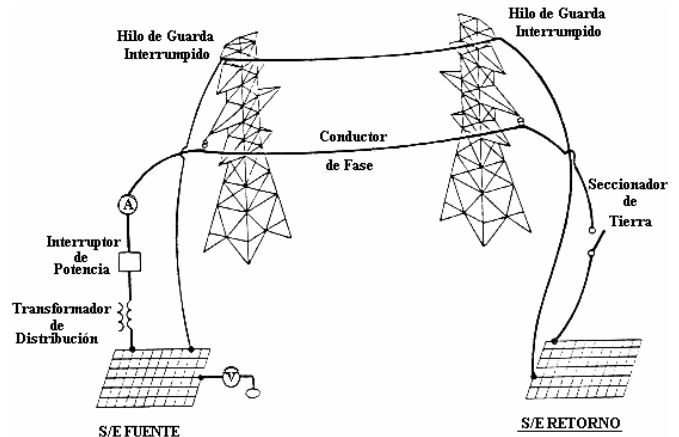


Fig. 25. Método de Inyección de Altas Corrientes

2) Método de Inyección de Bajas Corrientes

Se aplica cuando la componente reactiva de la corriente en la impedancia de tierra o incremento de la resistencia a.c. sobre la resistencia d.c. se torne significativa (ocurre cuando la impedancia de tierra es menor que 0,5 m), o cuando existe un alto voltaje residual del sistema de tierra respecto a una tierra remota, producido por corrientes del sistema de potencia en desbalance. Para solventar estas dificultades se han desarrollado técnicas medición usando corriente de prueba en a.c. a frecuencias diferentes de la del sistema de potencia y/o de sus armónicas, además de un detector selectivo de frecuencias; esto permite hacer las mediciones confiables en las situaciones expuestas.

En este método se inyectan corrientes que van desde los pocos miliamperios, hasta los cientos de miliamperios, dependiendo del tipo de instrumento utilizado. En general se recomienda usar dicho método en las mediciones de resistencia a tierra de mallas en subestaciones construidas en el área urbana, a fin de evitar posibles potenciales transferidos, los cuales son peligrosos para las personas cercanas al área de la subestación.

XII. DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA

A. *Calculo de la Resistencia de la Malla*

Para el calculo de la resistencia de la malla a tierra existen diversos métodos que dependiendo de ciertas condiciones pueden dar de una manera aproximada un valor cercano al real de la malla de tierra de una subestación eléctrica. Un método simple empleado por Laurent y Nieman, el cual es recomendado por el estándar 80 de la IEEE, utiliza para este calculo una modificación de la ecuación del electrodo en forma de plato circular, sumándole un segundo termino, quedando la expresión de la resistencia de la malla de la siguiente manera:

$$R = \frac{\rho}{4 \times r} + \frac{\rho}{L}$$

R = Resistencia de la malla, en Ω . ρ = Resistividad promedio del suelo, en $\Omega.m$. L = Longitud total del conductor enterrado, en m. r = Radio de un circulo con igual área que es ocupada por la instalación de puesta a tierra El segundo término de la expresión indica que la resistencia de una malla es mayor que la de un plato sólido, y que esta diferencia decrece cuando la longitud del conductor aumenta. Sin embargo, la resistencia de la malla de tierra determinada mediante la ecuación anterior es una aproximación bastante general puesto que no toma en cuenta factores como por ejemplo la longitud efectiva del conductor de la malla de tierra que esta en existencia actualmente, por tanto para la determinación de la resistencia de la malla de tierra de una subestación cuando no se conoce de la existencia de electrodos o varillas de tierra y para mallas enterradas a una profundidad de entre 0,25 y 2,5 m; es necesario que se tome en cuenta un factor por la profundidad de enterramiento de la malla lo cual influirá directamente en su resistencia de tierra, la utilización de este factor y de otros parámetros que influyen directamente sobre la resistencia de la malla lleva a la utilización de la aproximación de Sverak's para la determinación de la resistencia de la malla de tierra de una subestación (recomendada por la IEEE) y la ecuación a utilizar es entonces la que sigue a continuación:

$$R_G = \rho \times \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 \times A}} \times \left(1 + \frac{1}{1 + h \times \sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Otro método para determinar y evaluar el estado de una malla de tierra, cuando se conoce la presencia de electrodos o varillas de tierra es empleando el método de Schwarz, que se basa en la expresión siguiente:

$$R = \frac{R_{11} \times R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2 \times R_{12}}$$

Donde:

R = Resistencia de la malla de tierra. R_{11} = Resistencia de los conductores de la malla de tierra. R_{21} = Resistencia de todas las barras enterradas. R_{22} = Resistencia mutua entre el grupo de electrodos y los conductores de la malla. De la ecuación anterior se tiene que cada uno de los parámetros involucrados se calculan de la siguiente manera:

$$R_{11} = \frac{\rho}{\pi \times L_{cond.}} \times \left[\text{Ln} \left(2 \times \frac{L_{cond.}}{\sqrt{d \times h}} \right) + \left(K_1 \times \frac{L_{cond.}}{\sqrt{A}} \right) - (K_2) \right]$$

$$R_{22} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times nb \times Lb} \times \left[\text{Ln} \left(8 \times \frac{Lb}{db} \right) - 1 + \left(\frac{2 \times K_1 \times Lb}{\sqrt{A}} \right) \times (\sqrt{nb} - 1)^2 \right]$$

$$R_{12} = \frac{\rho}{\pi \times L_{cond.}} \times \left[\text{Ln} \left(2 \times \frac{L_{cond.}}{Lb} \right) + \left(K_1 \times \frac{L_{cond.}}{\sqrt{A}} \right) - (K_2) + 1 \right]$$

K_1 y K_2 Son constantes que dependen de la relación largo y ancho de la malla, de la profundidad h , y en general puede asumirse que sus valores son aproximadamente $K_1 = 1,4$ y $K_2 = 5,6$.

B. *Calculo para la Sección del Conductor de la Malla de Tierra*

Los conductores de la malla de tierra deben diseñarse de manera que:

- Resistan la fusión y el deterioro de las juntas eléctricas bajo las más adversas combinaciones de magnitud y duración de las corrientes de falla.
- Sean mecánicamente resistentes, especialmente en aquellos sitios expuestos a grandes esfuerzos físicos.
- Tengan suficiente conductividad, de manera que no contribuyan substancialmente a diferencias locales de potenciales peligrosos.

El conductor de cobre adecuado para la malla de tierra, puede ser obtenido de la siguiente ecuación desarrollada por Onderdonk y recomendada por la IEEE en su publicación Std. 80 de 1986:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{1}{33 \times S} \right) \times \text{Log}_{10} \left(1 + \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} \right)}}$$

Donde: A = Sección del conductor, en circular mil. I = Corriente RMS de cortocircuito, en amperios. S = Tiempo en segundos, durante el cual la corriente I es aplicada. Es el mismo tiempo de despeje de la falla. T_a = Temperatura ambiente en grados centígrados (usualmente se usa 40 °C). T_m = Temperatura máxima permisible, en grados centígrados (usualmente se usa 450 °C para uniones de fusión y 250 °C para uniones apernadas). En donde:

$$S = T_{or} + T_{oi}$$

Donde: T_{or} = Tiempo de operación del relé de tierra, en seg. T_{oi} = Tiempo de operación del interruptor en seg. Generalmente, la resistencia mecánica fija una sección mínima para los usos prácticos, utilizándose un conductor 4/0 de cobre como mínimo para la malla de tierra y un conductor 2/0 de cobre como mínimo para la puesta a tierra de los equipos y estructuras a la malla a tierra.

C. *Calculo de las Tensiones de Toque y Paso Tolerables*

En primer lugar se da las definiciones de tensión de toque tolerable y tensión de paso tolerable:

1) *Voltaje de Toque Tolerable:*

Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona en contacto con un equipo aterrado, en el momento de ocurrir una falla. La distancia máxima para tocar un equipo supone que es máximo alcance horizontal, la cual se asume a un metro. (Ver Figura 25).

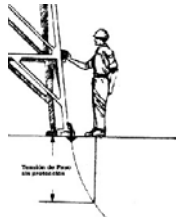


Fig. 25. Voltaje de Paso

2) *Voltaje de Paso Tolerable:*

Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona caminando en la superficie de la subestación en sus alrededores al momento de ocurrir una falla, esta diferencia de potencial se toma entre dos puntos separados a una distancia de un (1) metro. (Ver Figura 26).

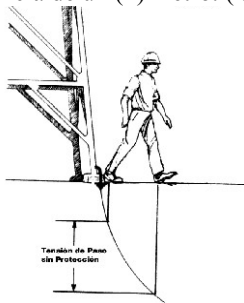


Fig. 26. Voltaje de Toque

Uno de los factores a tomar en cuenta en el diseño y evaluación de un sistema de puesta a tierra es el referente a los voltajes de seguridad, ya que lo que está en juego es la seguridad de las personas, siendo necesaria en este caso la utilización de la puesta a tierra como un medio de protección, de aquellas diferencias de potencial que pueden aparecer durante las condiciones de falla a tierra.

Los voltajes de toque y de paso dependen directamente de varios parámetros entre los que podemos encontrar: la corriente que circula a través del cuerpo, su camino y duración, la condición de la piel, la impedancia interna del cuerpo, etc. siendo éstos parámetros estadísticos asociados con distribución de probabilidades, las cuales definen una distribución probable de voltajes.

Los estudios referidos en la IEEE-80 Capítulo 4, realizados en animales cuyo tamaño del cuerpo y peso del corazón son comparables a los del cuerpo de una persona normal, revelan que el 99,5 % de las personas saludables pueden tolerar una corriente a través de la zona del corazón definida por Dalziel como:

$$I_c = K/\sqrt{t}$$

Donde I_c = Corriente Máxima RMS (A). K = Constante (0,116 ó 0,157 para una persona de 50 ó 70 Kg. respectivamente). t = Duración de la Corriente (seg.).

La norma recomienda el uso de $K = 0,157$, asumiendo un peso promedio de 70 kilogramos y un tiempo máximo de eliminación de fallas de 3 segundos. En todo caso, prevalece el juicio del evaluador para determinar el valor correcto a utilizar dependiendo de las características del sitio de ubicación de la subestación o el uso de dispositivos de protección de alta velocidad. Adicionalmente, las pruebas indican que el corazón

requiere unos 5 minutos para retornar a su condición normal después de experimentar un choque severo. Esto indica que aquellos sistemas de potencia con mecanismos de cierre automático tendrán un efecto acumulativo sobre la operación inadecuada del corazón. Se considera usualmente que para dos cierres consecutivos, el tiempo a considerar será el equivalente al de un choque eléctrico cuya duración sea la suma de los intervalos de choque individuales.

Considerando los valores definidos por la ecuación los valores de voltaje V_{TT} y V_{PT} son:

$$V_{TT} = (R_c + \frac{R_T}{2}) \times I_c$$

$$V_{TT} = [1000 + (1,5 \times C_s \times \rho_s)] \times \frac{K}{\sqrt{t}}$$

$$V_{PT} = (R_c + 2R_T) \times I_c$$

$$V_{PT} = [1000 + (6 \times C_s \times \rho_s)] \times \frac{K}{\sqrt{t}}$$

Donde: t = Tiempo total de ocurrencia de falla, incluyendo efectos acumulativos por recierres. Este tiempo debe ser menor a 0,5 segundo, según la Norma de CADAPE, NS-P-360 "Especificaciones Técnicas para el Sistema de Puesta a Tierra". K = Constante basada en el peso del cuerpo (0,116 ó 0,157). R_c = Resistencia típica del cuerpo en ohms (1000). $R_T/2 = 1,5C_s\rho_s$ = Resistencia de contacto de dos pies en paralelo. $2R_T = 6 C_s\rho_s$ = Resistencia de contacto de dos pies en serie.

En los valores de resistencia de contacto definidos arriba ρ_s es el valor de resistividad del material superficial en la subestación. Según la Norma de CADAPE, NS-P-360 "Especificación Técnica para el Sistema de Puesta a Tierra" define ρ_s como el valor de la piedra picada que se encuentra en la superficie de la subestación el cual es de 3000 Ω -m. Y C_s es el factor de reducción que variara según el tipo de material de la superficie referida. En el estándar IEEE-80, se presenta la ecuación detallada para definir los valores de C_s , la cual es:

$$C_s = \frac{1}{0,96} \times \left[1 + 2 \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \times n \times h}{0,08} \right)^2}} \right]$$

Donde: h = Profundidad de la capa superficial de la piedra picada. K = Factor de reflexión.

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

Donde ρ = Resistividad del suelo, en Ω .m. ρ_s , ya se explico anteriormente.

a) *Voltajes Transferidos*

Puede ser considerado como un caso especial del voltaje de toque, tal como sucedería en el caso de que una persona parada dentro del área de la subestación, toca un conductor colocado a tierra a una malla de tierra, bajo condiciones de falla a tierra. Aquí el voltaje de shock es igual al máximo valor de elevación de la malla y no una fracción de ésta.

3) *Calculo de la Tensión de Toque de la Malla de Tierra*

Los voltajes de toque y paso de la malla, se pueden reducir a cualquier valor deseado, reduciendo el espaciamiento entre conductores, o sea, añadiéndole mas cantidad de conductor. Esta situación es totalmente diferente en la zona inmediatamente exterior al perímetro de la malla, donde el problema puede existir aun con una placa sólida. Este problema puede ser serio en pequeñas subestaciones, donde de la malla cubriría únicamente un área limitada. Para este calculo se utiliza el potencial que puede existir, durante la falla a tierra, entre una estructura puesta a tierra y el centro de un rectángulo de una retícula mallada, esto se conoce con el nombre de voltaje de malla, y se puede calcular haciendo uso de la ecuación que sigue a continuación:

$$E_{\text{malla}} = E_{\text{toque}} = K_m \times K_i \times \rho \times \left(\frac{I_G}{L} \right)$$

K_m = Es un coeficiente que toma en cuenta el número (n), espaciamiento (D), diámetro (d), y la profundidad de enterramiento (h), de los conductores de la malla, excluyendo las conexiones cruzadas.

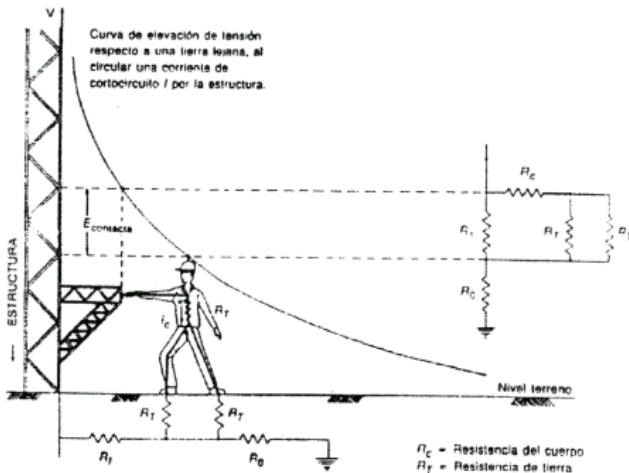


Fig. 27. Tensión de Toque Cerca de una Estructura Conectada a Tierra

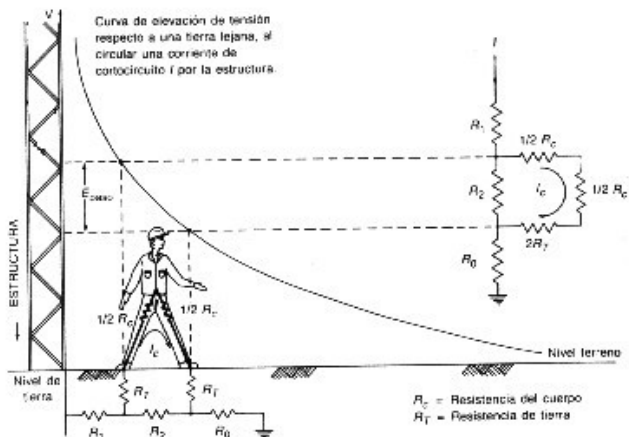


Fig. 28. Tensión de Paso Cerca de una Estructura Conectada a Tierra

Su valor real viene dado por la ecuación que se presenta a continuación:

$$K_m = \frac{1}{2 \times \pi} \times \text{Ln} \frac{D^2}{16 \times h \times d} + \frac{1}{\pi} \text{Ln} \left[\left(\frac{3}{4} \right) \times \left(\frac{5}{6} \right) \times \left(\frac{7}{8} \right) \times \dots \times \left(\frac{2 \times n - 3}{2 \times n - 2} \right) \right]$$

Existe sin embargo, otra manera de determinar el factor de corrección de malla definido por el número de conductores paralelos y que es considerada mas exacta por organismos internacionales especializados puesto que toma en cuenta otros factores como por ejemplo la profundidad de enterramiento de la malla y el diámetro del conductor de la malla de tierra y la cual se presenta a continuación:

$$K_m = \frac{1}{2 \pi} \times \left[\text{Ln} \left(\frac{D^2}{16 \times h \times d} + \frac{(D + 2h)^2}{8 \times D \times d} - \frac{h}{4 \times d} \right) + \left(\frac{K_{ii}}{K_h} \times \text{Ln} \frac{8}{\pi \times (2 \times n - 1)} \right) \right]$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{2/n}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + h}$$

K_i = Factor de corrección de irregularidad, que toma en cuenta la no uniformidad del flujo de corriente en diferentes partes de la malla, su determinación se basa normalmente en modelos prácticos desarrollados por Koch. Para cuadrículas uniformes su valor viene dado por la siguiente expresión:

$$K_i = 0,656 + (0,172 \times n)$$

$$n = \frac{\text{Longitud Mayor del Área}}{D} + 1$$

I_G es el valor RMS de la corriente de falla simétrica que puede circular a través de la malla de tierra hacia la superficie del terreno, y se calcula como se indica a continuación:

$$I_G = D_f \times C_p \times I_f$$

Donde: D_f = Factor de decremento, C_p = Factor de corrección por efecto de futuras ampliaciones. I_G = Corriente simétrica de malla, y se calcula como se indica a continuación:

$$I_g = S_f \times I_f$$

S_f = Factor de corrección. Según "IEEE TUTORIAL COURSE, Practical Applications of ANSI/IEEE standard 80-1986, IEEE Guide for Safety" este valor es igual al porcentaje de corriente que circula a través de toda la malla de tierra de la S/E. ($S_f = \% I_{GT}$). I_f = Corriente máxima de cortocircuito o de falla a tierra de la subestación.

D. *Calculo de la Tensión de Paso de la Malla de Tierra*

Las subestaciones pueden ser diseñadas para eliminar la posibilidad de "voltajes de toque" mas allá del perímetro del área de las mismas, esto limita el estudio a los voltajes de paso, y debido a que estos son menos dañinos que otros tipos, una precisión extrema en su cálculo no es tan importante, por lo tanto el estándar 80 de la IEEE recomienda la siguiente ecuación:

$$E_{pm} = K_s \times K_i \times \rho \times \left(\frac{I_G}{L} \right)$$

Donde: E_{pm} = Tensión de paso de la malla, en V, K_s = Es un coeficiente que toma en cuenta el efecto de la cantidad de conductores paralelos en una dirección de la malla (n), el espaciamiento (D) y la profundidad (h), de los conductores de la malla. Su valor viene dado por la ecuación que se muestra a continuación:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \times \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} \times (1 - 0,5^{n-2}) \right]$$

Donde:

$$n = \sqrt{n_L \times n_T}$$

n_L = Número de conductores longitudinales de la malla de tierra. n_T = Número de conductores transversales de la malla de tierra.

Cuando los voltajes de toque y paso son mantenidos entre los límites tolerables, y si la resistividad superficial es comparable tanto dentro como fuera del cerca, entonces los potenciales de paso en la periferia de la subestación, es raro que estos causen algún problema.

E. Longitud Mínima que Debe Poseer el Conductor de Tierra

La longitud mínima, requerida para mantener el voltaje de malla en el límite seguro, puede ser obtenida igualando los segundos dos miembros de las siguientes ecuaciones ya mencionadas, tales son:

$$V_{\text{malla}} = V_{TT}$$

Según el estándar 80 de la IEEE, el voltaje de toque tolerable (V_{TT}) que se utiliza, es el voltaje que puede soportar una persona que pesa aproximadamente 70 kg.

$$E_{\text{malla}} = E_T = K_m \times K_i \times \rho \times \left(\frac{I_G}{L} \right)$$

$$E_{tt} = \frac{(157 + 0,235 \times C_s \times \rho_s)}{t^{1/2}}$$

Entonces:

$$\frac{(157 + 0,235 \times C_s \times \rho_s)}{t^{1/2}} = K_m \times K_i \times \rho \times \left(\frac{I_G}{L} \right)$$

Finalmente:

$$L_m = \frac{K_m \times K_i \times \rho \times I_G \times \sqrt{t}}{157 + 0,235 \times C_s \times \rho_s}$$

Donde: L_m = Longitud mínima requerida del conductor que conforma la malla de tierra, en m. ρ_s = Resistividad superficial del terreno, en $\Omega.m$. t = Tiempo de despeje de la falla, en seg.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALCALA, Quintero.(1993). El Problema de Puesta a Tierra de Equipos de Potencia en Sistemas Eléctricos. Universidad de Carabobo. Trabajo Especial de Grado. Valencia.
- [2] BALLESTRINI, Miriam. (1980). Cómo hacer una Tesis. Segunda Edición. Valencia. Vadell Hermanos Editores.
- [3] C.A.D.A.F.E. Planos de Mallas de Tierras en Subestaciones. Caracas.
- [4] C.A.D.A.F.E. Guía para el Diseño de Malla de Tierra para Subestaciones. Caracas.
- [5] C.A.D.A.F.E. (1984). NS-P-102. Especificaciones Técnicas Sobre las Subestaciones Normalizadas
- [6] C.A.D.A.F.E. (1984). NS-P-360. Especificaciones Técnicas para el Sistema de Puesta a Tierra. Caracas.
- [7] C.A.D.A.F.E. (1988). Presentación de Proyectos de Subestaciones de Transmisión. Subestaciones Normalizadas por C.A.D.A.F.E. Caracas.
- [8] C.A.D.A.F.E. (1991). Presentación de Proyectos de Subestaciones de Transmisión. Nomenclatura de Equipos. Caracas.
- [9] C.A.D.A.F.E. (1992). Presentación de Proyectos de Subestaciones de Transmisión. Sistemas de Puesta a Tierra. Caracas.
- [10] C.A.D.A.F.E. (1996). Manual de Mantenimiento de Líneas y Operación de Subestaciones. Caracas.
- [11] CARMONA, Joffre. Valores Básicos de Cálculos para Sistemas de Alta Tensión. AEG-TELEFUNKEN.
- [12] CARMONA, Joffre y FUENTES, Julian. (1989). Optimización de Costos de Construcción de Mallas de Tierra de Subestaciones. V Congreso de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica. ERIPE C.A.
- [13] CARMONA, Joffre y GONZALES, Beatriz. (1986). Mediciones en Campo de Gradientes de Potencial en Mallas de Tierras de Subestaciones. IV Jornadas Nacionales de Potencia.
- [14] CAVALLOTTI, Jorge. (1968). Disposiciones Constructivas en Subestaciones a la Interperie en Altas y Muy Altas Tensiones. Caracas. Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico.
- [15] CÓDIGO ELÉCTRICO NACIONAL (1990). Venezuela.
- [16] DI CECCO, D.(1992). Sistemas de Puesta a Tierra. Universidad Simón Bolívar.
- [17] EATON, Robert. (1973). Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica. Editorial Prentice/Hall Internacional.
- [18] ENCICLOPEDIA CEAC. (1998). Estaciones de Transmisión y Distribución. Protecciones de Sistemas Eléctricos. 2da Edición. Editorial CEAC. Barcelona, España.
- [19] ENRIQUEZ, Gilberto. (1992). Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas. Editorial Limusa
- [20] FEBRES, F.(1996). Propuesta de un Sistema de Aterramiento en los Tramos Críticos Debido a las Descargas Atmosféricas en las Líneas de Transmisión a 115kv Pijiguaos – Pto. ayacucho de C.A.D.A.F.E. Ubicada en Puerto Ayacucho e Instalada en una Zona Pétreo de Muy Alta Resistividad. Universidad Bicentenario de Aragua. Trabajo Especial de Grado. Maracay.
- [21] FINK, D. (1996). Manual de Ingeniería Eléctrica. Editorial MAC GRAW-HILL.
- [22] GARCIA, German y MANINAT, Pedro. (1982). Medición de Resistividad de Suelos y Resistencia de Puesta a Tierra de Subestaciones. III Jornadas de Potencia. Maracaibo.
- [23] GONZALEZ, Adams. (1992). La Seguridad en el Aterramiento de Subestaciones. Universidad de Carabobo.. Trabajo Especial de Grado. Valencia.
- [24] HUNG, Torrealba. (1991). Puesta a Tierra. Universidad Simón Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Caracas.
- [25] I.E.E.E. (1962). I.E.E.E. Guide for Measuring Ground Resistance and Potential Gradients in the Earth. Standard 81. New York.
- [26] I.E.E.E. (1976). I.E.E.E. Guide for Safety in Substation Grounding. Standard 80. New York.
- [27] I.E.E.E. (1986). I.E.E.E. Guide for Safety in Substation Grounding. Standard 80. New York.
- [28] I.E.E.E. Tutorial Course. (1986). Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986, IEEE Guide for Safety. New York.
- [29] MUKHEDKAR, D. y SARMIENTO, H. Mediciones de Campo de la Resistividad de Terreno y la Resistencia de Electrodo de Tierra. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos. y Ecole Poly Technique. Montreal. Canadá.
- [30] RAÚLL, M. (1992). Diseño de Subestaciones Eléctricas. Primera Edición. Editorial MAC GRAW-HILL.
- [31] ROQUE, Víctor. (1999). Puesta a Tierra en Equipos y Módulos de Medición y Sistemas de Transformación. Representaciones Toffoli C.A.
- [32] STEVENSON, William. (1988). Análisis de Sistemas Eléctricos. 2da Edición. Editorial MAC GRAW-HILL.