



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“Propuesta en servicio de redes de tierra para
subestaciones eléctricas”

TESIS

Que para obtener el título de Ingeniero Eléctrico
Electrónico.

PRESENTA:

Raúl Victorino Rivera.

Director de tesis:

Ing. Augusto O. Hintze Valdez



México D.F.

2006

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo incondicional, paciencia y confianza que me brindaron al comenzar esta carrera.

A la UNAM y la Facultad de Ingeniería por permitirme formar parte de una gran institución, además de proporcionarme todo el material de consulta como libros, revistas, etc. necesarios para mi formación profesional.

Detrás de todo Adiós se oculta, en gran
Parte, el saludo de un comienzo nuevo.
Para mí, el Desarrollo, la Continuidad, la
Inmortalidad, la Transformación, constituyen
los temas y las significaciones capitales
de la naturaleza y de la Humanidad.

WALT WHITMAN

Índice

Objetivos.....	i
Introducción.....	i
Definiciones.....	ii
Capítulo 1. Principios fundamentales del sistema de puesta a tierra.....	1
1.1 Funciones de un sistema de puesta a tierra.....	1
1.2 Seguridad.....	3
1.2.1 Condiciones de peligro.....	3
1.2.2 Efectos de la corriente.....	4
1.2.3 Fibrilación ventricular.....	6
1.2.4 Efectos de la frecuencia.....	7
1.2.5 Importancia de la eliminación rápida de las fallas.....	7
1.2.6 La resistencia del cuerpo humano.....	7
1.2.7 Circuito equivalente accidental.....	8
1.2.8 Corriente de corto circuito en la red de tierra.....	12
1.2.9 Máxima corriente en la red de tierra.....	13
1.2.10 Potencial de paso.....	14
1.2.11 Potencial de contacto.....	16
Capítulo 2. Caracterización del suelo y mediciones de resistividad aparente del terreno.....	17
2.1 Definición de resistividad.....	17
2.2 Valores de resistividad de algunos materiales.....	18
2.2.1 Valores de resistividad de materiales metálicos.....	18
2.2.2 Valores de resistividad de materiales aislantes.....	19
2.3 Factores que afectan la resistividad del terreno.....	20
2.3.1 Composición propia del terreno.....	20
2.3.2 Estratigrafía.....	21
2.3.3 Granulometría.....	21
2.3.4 Concentración de sales solubles.....	21
2.3.5 Estado higrométrico.....	23
2.3.6 Temperatura.....	23
2.3.7 Compacidad.....	24
2.4 Mediciones de resistividad.....	25
2.5 Consideraciones sobre las medidas de resistividad.....	26
2.6 Medición de resistividad del suelo.....	26
2.6.1 Método de los cuatro puntos (Wenner).....	27
2.6.2 Método Schlumberger-Palmer.....	28
Capítulo 3. Método de cálculo de redes de tierra para subestaciones eléctricas.....	30
3.1 Datos iniciales.....	30
3.2 Procedimiento de diseño de IEEE STD. 80.....	33
3.3 Ejemplo de cálculo.....	42

Capítulo 4.- Verificación en campo de los valores calculados.....	51
4.1 Procedimientos para la medición de redes de tierra.....	51
4.2 Medición de la tensión de contacto y paso.....	52
4.2.1 Método electrodo huella del pie.....	52
4.2.2 Método de simulación de personal.....	54
 Conclusiones.....	 58
 Bibliografía.....	 59
 Anexo A: Mantenimiento de los sistemas de tierra.....	 60

Objetivos

- ✓ Revisar los métodos de puesta a tierra en subestaciones eléctricas para determinar y acondicionar la resistencia de tierra, de tal manera que se obtengan valores tales que el personal no este expuesto al peligro de descargas eléctricas críticas así como proporcionar los medios para transportar las corrientes eléctricas hacia tierra bajo condiciones normales y de falla sin exceder algún límite de operación del equipo de potencia y control continuando con el servicio de manera satisfactoria.

Introducción

Los sistemas de conexión a tierra bien diseñados son de especial importancia para el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia y para la seguridad del personal, lo cual se ha reconocido desde la existencia de los sistemas de potencia. Desafortunadamente, los procedimientos de diseño se dificultan por un número de factores difíciles de cuantificar. La primera guía para el diseño de sistemas de conexión a tierra de subestaciones, basada principalmente en la experiencia y en modelos analíticos simples, apareció en 1961 como el estándar 80 de la ANSI/IEEE. Este documento, junto con sus tres revisiones principales en 1976, 1986 y 2000, ha sido la herramienta principal para el análisis y diseño de los sistemas de conexión a tierra para subestaciones.

El estándar 80 proporciona los criterios de diseño y una guía de lo que se debe considerar en el proceso de diseño de los sistemas de conexión a tierra. Además de esto, proporciona las ecuaciones de diseño aplicables a sistemas de conexión a tierra simples. La creciente complejidad y las elevadas capacidades de cortocircuito de los actuales sistemas de potencia requieren de mejores métodos de análisis y procedimientos de diseño para los sistemas de conexión a tierra.

Los procedimientos de diseño existentes, buscan las mejores condiciones de seguridad y eficiencia, involucran la interacción de una serie de elementos complejos y probabilísticos, por lo que es necesario el uso de métodos de análisis asistidos por computadora con el fin de lograr métodos de diseño efectivos y económicos.

Es importante señalar que aún contando con las mejores herramientas computacionales y el conocimiento actualizado sobre la materia, el diseño de un sistema de conexión a tierra no resulta un procedimiento exacto, ya que pueden existir discrepancias entre los valores calculados y los valores medidos de la red, debido principalmente a: errores de medición, heterogeneidad del terreno, la interacción con otros elementos metálicos enterrados en la vecindad de los electrodos y conductores de la red. Por lo que es necesario que el diseñador tenga conocimiento profundo en la teoría relacionada, a fin de conocer el efecto que el sistema aporta sobre cada una de sus componentes y complementarlo con la experiencia adquirida en el trabajo de campo.

Definiciones

Con el objeto de entender más fácilmente los conceptos, a continuación se definen algunos términos esenciales de los cuales se hablarán en este trabajo.

A tierra

Conexión conductora, intencionada o accidental, entre un circuito o equipo eléctrico y el terreno natural o algún cuerpo conductor que sirva como tal.

Alta tensión.

Diferencia de potencial (comúnmente llamado voltaje) entre dos puntos, con un valor de 34.5 kV hasta 400 kV.

Aterrizado.

Conexión intencional o accidental a la tierra o a algún cuerpo conductor extendido que sustituye a ésta.

Apartarrayo

Elemento de protección de equipos y materiales eléctricos contra sobretensiones.

Barra, bus o colector a tierra.

Conductor común para interconexión de los conductores de tierra y diferentes sistemas de tierra.

Carga eléctrica.

Son todos aquellos dispositivos que transforman la energía eléctrica en otro tipo de energía como: luminosa, mecánica, calorífica, química, sonido, etc. Expresado por lo general en Watts.

Cable.

Conductor metálico formado por varios hilos de sección transversal circular.

Conductor desnudo.

Conductor que no tiene ningún tipo de cobertura o aislamiento eléctrico.

Conductor de puesta a tierra.

Conductor que se usa para conectar a tierra en el punto requerido las cubiertas metálicas de los equipos, las canalizaciones metálicas y otras partes metálicas que pudieran transportar corrientes indeseables a través de ellas. Esto es, se

trata de un conductor que garantiza la conexión física entre las partes metálicas expuestas a falla y la tierra.

Conductor neutro.

Conductor del sistema o circuito que está puesto a tierra intencionalmente.

Corriente a tierra.

Es la corriente que se inyecta a la tierra, ya sea en el conductor de puesta a tierra o en la malla, red o electrodo de tierra.

Corriente de falla a tierra.

Es el valor máximo de la corriente de cortocircuito que fluye durante una falla de línea o fase a tierra.

Elevación del Potencial de Tierra (GPR)

Es el máximo potencial eléctrico que una malla para tierra en una subestación puede alcanzar con relación a un punto de tierra distante, asumiendo que esté al potencial de la tierra remota. Este potencial GPR es igual a la corriente máxima de la malla multiplicada por la resistencia de la malla

Malla.

Interconexión de conductores longitudinales y transversales.

Potencial de tierra.

Es el potencial de referencia que la tierra mantiene en ausencia de influencias eléctricas externas.

Red de tierra.

Porción metálica subterránea de un sistema aterrizado que disipa hacia la tierra todo flujo de corriente. La red se compone en general de varias mallas interconectadas.

Resistencia de tierra.

Resistencia ofrecida al paso de la corriente eléctrica hacia el sistema de tierra existente que está en función de la resistividad del terreno, longitud y área de los conductores, así como de las características físicas del electrodo de tierra. Es la resistencia óhmica entre el sistema de tierra y un electrodo de tierra remoto de resistencia cero.

Resistividad del terreno.

Propiedad del terreno que consiste en oponerse al paso de la corriente eléctrica; está en función de las características del suelo (composición química, compactación, homogeneidad, humedad y temperatura).

Resistencia eléctrica del cuerpo Humano.

Es la resistencia eléctrica medida entre extremidades, esto es, entre una mano y ambos pies, entre ambos pies o entre ambas manos

Sistema aterrizado.

Sistema de conductores en el cual al menos uno (normalmente el neutro de un transformador o generador) está intencionalmente puesto a tierra (aterrizado), ya sea sólidamente o a través de una impedancia.

Sistema de tierra.

Conjunto de conductores desnudos y aislados en su caso, que se interconectan con una o varias mallas y/o electrodos desnudos.

Sobrecarga.

Funcionamiento de un equipo que ha excedido su capacidad nominal, de plena carga, o de conductor que excede su capacidad de conducción de corriente nominal, cuando tal funcionamiento, al persistir por suficiente tiempo, puede causar daños por sobre calentamiento peligroso.

Sobrecorriente.

Cualquier corriente eléctrica que excede del valor nominal de los equipos o de la capacidad de conducción de corriente de un conductor.

Sólidamente aterrizado.

Conexión a tierra en la cual no se inserta una impedancia en forma intencional.

Tensión de contacto.

Es la tensión a la que puede verse sometido el cuerpo humano como consecuencia del contacto con los gabinetes, tanques o estructuras metálicas de la instalación que normalmente no conduce corriente, pero que, eventualmente, pueden estarlo como consecuencia de alguna falla de aislamiento.

Tensión eléctrica (voltaje).

Es la mayor diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos cualesquiera.

Tensión de paso.

Tensión que, durante el funcionamiento de una instalación de tierra, puede resultar aplicada entre los pies de una persona situados a la distancia de un paso (1 metro). Se aplica básicamente a instalaciones de media y alta tensión.

Tierra.

Cuerpo capaz de mantener estable su potencial, sin importar la cantidad de cargas eléctricas que se le inyecten, absorbiendo y disipando las corrientes indeseables, brindando protección, adicionalmente sirve de referencia eléctrica con potencial cero.

Tierra física.

Equivalente al sistema de tierra.

Tierra independiente.

Es el sistema o electrodo que está separado física y electrónicamente de otro.

Tierra separada.

Sistema o electrodo de tierra que está físicamente de otro equivalente, sin que exista ninguna conexión o unión física común entre conductores, pero sin una posible unión eléctrica no física.

P

rincipios fundamentales del sistema de puesta a tierra

1.1 Funciones de un sistema de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra debe garantizar que, en el evento de una falla a tierra, toda la corriente de falla que se origine, pueda retornar a la fuente de una forma controlada. Por una forma controlada se entiende que la trayectoria de retorno está predeterminada, de tal modo que no ocurra daño al equipo o lesión a las personas. La conexión a tierra no es de capacidad infinita e impedancia nula. Sin embargo, la impedancia del sistema de tierra debiera ser lo bastante baja de modo que pueda fluir suficiente corriente de falla a tierra para que operen correctamente los dispositivos de protección, los cuales a su vez provocarán la operación de interruptores o fusibles para interrumpir el flujo de corriente. El diseñador de la protección calcula normalmente el valor requerido de impedancia a través de programas de análisis de fallas y este valor debe comunicarse a los responsables del diseño del sistema de puesta a tierra. Además, la elevación de potencial que experimentará el sistema de puesta a tierra mientras ocurre la falla, debiera ser limitada a un valor pre-establecido.

El sistema de puesta a tierra se usa también como un medio para obtener condiciones seguras de trabajo durante algunas faenas de mantenimiento o construcción. Antes de iniciar cualquier trabajo, las plantas que estaban energizadas tienen que ser desconectadas y sus componentes previamente activos tienen que ser conectados a tierra. Esto permite que cualquier energía almacenada sea descargada en forma segura a tierra y ayuda a prevenir la aparición de voltajes peligrosos en el equipo en que se está trabajando (esto podría ocurrir de otra manera debido a inducción, error o falla en el sistema de potencia). En algunas instalaciones industriales, el sistema de puesta a tierra se solicita para descargar continuamente la formación de estática, y así prevenir un riesgo de fuego o explosión. Como ejemplos están las plantas manufactureras de papel o ambientes donde están presentes explosivos o elementos químicos volátiles.

Las principales funciones de un sistema de puesta a tierra son:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.
- Asegurar que seres vivos presentes en la vecindad de las subestaciones no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.
- Mantener los voltajes del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de voltaje mayor), y asegurar que no se excedan los voltajes de ruptura dieléctrica de los aisladores.
- Limitar el voltaje a tierra sobre materiales conductivos que circundan conductores o equipos eléctricos.

Otras razones citadas menos frecuentemente, incluyen:

- Estabilizar los voltajes fase a tierra en líneas eléctricas bajo condiciones de régimen permanente, por ejemplo, disipando cargas electrostáticas que se han generado debido a nubes, polvo, agua, nieve, etc.
- Una forma de monitorear el aislamiento del sistema de suministro de potencia. Para eliminar fallas a tierra con arco eléctrico persistente.
- Para asegurar que una falla que se desarrolla entre los enrollados de alto y bajo voltaje de un transformador pueda ser manejada por la protección primaria.
- Proporcionar una trayectoria alternativa para las corrientes inducidas y de tal modo minimizar el «ruido» eléctrico en cables.
- Proporcionar una plataforma equipotencial sobre la cual pueda operar equipo electrónico.

Claramente, el sistema de puesta a tierra realiza un amplio rango de funciones similares a través de todas las etapas de suministro de electricidad, es decir, en la central generadora, en las subestaciones eléctricas (en las cuales se modifica el voltaje de alimentación), hasta la instalación eléctrica residencial, oficinas e industrias.

1.2 Seguridad

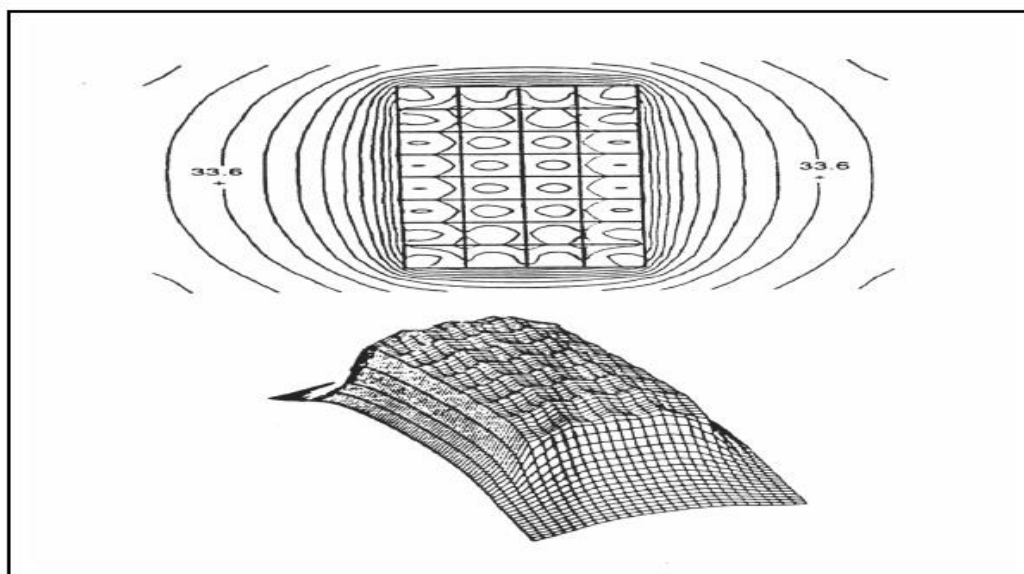
Una Aproximación práctica al diseño seguro de un sistema de puesta a tierra se debe controlar la interacción de 2 sistemas de tierra:

- ✓ La tierra intencional, consistente en electrodos de tierra enterrados en el suelo
- ✓ La tierra accidental, temporal que se establece a través de una persona expuesta a un gradiente de potencial en las cercanías de la instalación puesta a tierra.

La gente generalmente asume que cualquier objeto puesto a tierra puede ser tocado seguramente. Una resistencia baja a tierra no es en si una garantía de seguridad, no existe una relación simple entre la resistencia del sistema de puesta a tierra en conjunto y el potencial máximo de choque que pueda sufrirse. Una subestación de baja resistencia a tierra puede en ocasiones hacerse peligrosa, por lo contrario, subestaciones de alta resistencia pueden hacerse seguras por medio de diseños elaborados cuidadosamente.

1.2.1. Condiciones de peligro

Durante condiciones típicas de falla a tierra, el flujo de corriente a tierra producirá gradientes de potencial dentro y alrededor de una subestación o instalación eléctrica. A menos que se tomen precauciones apropiadas en el diseño, los gradientes de potencial máximo a lo largo de la superficie del terreno pueden ser de suficiente magnitud durante las condiciones de falla a tierra como para poner en peligro a una persona que se encuentre en el área. Además, se pueden desarrollar diferencias de potenciales peligrosos entre las estructuras de equipos que están aterrizados y alguna tierra cercana. En la siguiente figura se muestra la circulación de corriente hacia tierra en una subestación rectangular sencilla en un suelo homogéneo.



Las circunstancias que hacen posibles los accidentes por electrocución son:

- 1) Corrientes de falla a tierra relativamente altas en el área del sistema de tierra y su resistencia con respecto a una tierra remota.
- 2) La resistividad del suelo y la distribución de las corrientes que hacen posibles altos gradientes de potencial en los puntos de la superficie del terreno.
- 3) La presencia de un individuo en un punto, tiempo y posición determinados en los cuales el cuerpo haga un puente entre dos puntos con una diferencia de potencial alto.
- 4) La ausencia de una resistencia de contacto suficiente u otra resistencia en serie para limitar la corriente a través del cuerpo a un valor seguro bajo las circunstancias anteriores.
- 5) La duración de la falla y el contacto con el cuerpo, y por lo tanto, el flujo de corriente a través del cuerpo humano durante un tiempo suficiente para ocasionar daño al nivel de corriente dado.

1.2.2 Efectos de la corriente

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas debidas a disturbios atmosféricos o a fallas del equipo, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan peligro al personal que labora en el área. Intensidades del orden de miles de amperes producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto de contacto a tierra, y si además se da la circunstancia de que algún ser vivo se apoye en dos puntos entre los cuales exista una diferencia de potencial debida al gradiente arriba indicado, puede sufrir una descarga eléctrica que sobrepase el límite de su contractilidad muscular y provoque su caída. En tal situación la corriente que circula por el cuerpo aumenta, y si por desgracia ésta pasa por algún órgano vital como el corazón, puede originar fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte.

Los efectos fisiológicos más comunes de la corriente eléctrica en el cuerpo, establecidos en orden ascendente en cuanto a la magnitud de la corriente, son la percepción, contracción muscular, inconsciencia, fibrilación del corazón, paro respiratorio, y quemaduras.

Una corriente de 1 mA generalmente se reconoce como el umbral de la percepción, esto es, la magnitud de una corriente a la cual una persona es capaz de detectar una ligera sensación de cosquilleo en sus manos o dedos debido al paso de la corriente.

Las corrientes de 1 a 6 mA, conocidas generalmente como corrientes de soltar, aunque sea desagradable tolerarlas, por lo regular no impiden la capacidad de una persona que sostiene un objeto energizado el controlar sus músculos y soltarse.

Un nivel promedio para la corriente de soltar, proporcionada por Dalziel, es de 10.5 mA para mujeres y 16 mA para hombres, adicionalmente los niveles de 6 y 9 mA como los valores respectivos de la corriente de umbral.

En un rango de 9 a 25 mA, las corrientes pueden llegar a ser dolorosas y pueden hacer difícil o imposible soltar los objetos energizados asidos con las manos. Para corrientes aún mayores las contracciones musculares podrían dificultar la respiración. A excepción de los casos de inhibición respiratoria debida a corrientes mucho más grandes, estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando la corriente es interrumpida – a menos de que la contracción sea muy severa y la respiración se detenga por varios minutos –. Aún en esos casos generalmente responden a la resucitación (RCP).

No es hasta magnitudes de corriente en el rango de 60 a 100 mA en que la fibrilación ventricular, un paro cardiaco, o la inhibición de la respiración, pueden provocar daños severos e incluso la muerte. Una persona entrenada en resucitación cardiopulmonar (RCP) tendría que administrar RCP hasta que la víctima pudiera ser atendida en una instalación médica.

Se pueden tolerar intensidades altas de corriente sin originar fibrilación, si la duración es muy corta y las frecuencias menores de 25 Hz o de corriente directa. La ecuación Empírica que liga la intensidad de corriente tolerable y el tiempo que un organismo puede soportarla está dada por la fórmula de Charles Dalziel.

$$I_B^2 t = 0.0135$$

Despejando I

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots(1)$$

Donde

I: valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo en amperes.

t: duración del choque eléctrico en segundos.

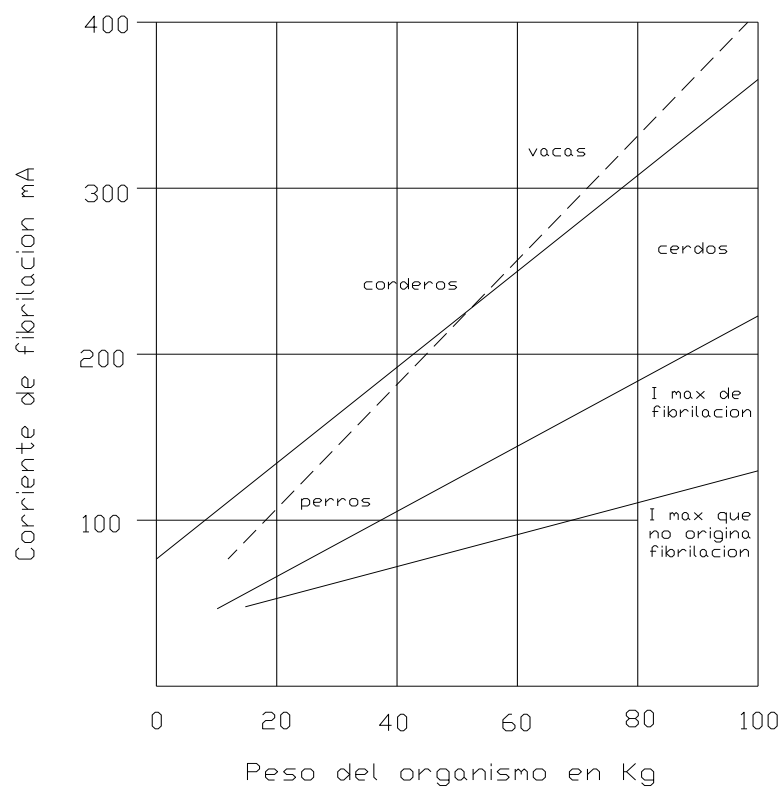
0.0135: constante empírica que representa los watts x segundo absorbidos por un cuerpo durante un choque eléctrico, para personas del orden de 50 Kg de peso.

0.0246: constante empírica que representa los watts x segundo absorbidos por un cuerpo durante un choque eléctrico, para personas del orden de 70 Kg de peso.

1.2.3 Fibrilación ventricular

Esta situación está caracterizada por una contracción anárquica y asíncrona de cada una de las fibras del miocardio, lo que se traduce, velozmente en una parada circulatoria y una anoxia que alcanza, primero, al cerebro y después, al mismo corazón.

En la siguiente tabla se muestra la extrapolación al hombre de experiencias realizadas sobre animales y también, deducciones sobre accidentes eléctricos particularmente bien estudiados. Las dos rectas inferiores son aplicables al ser humano, se observa una proporcionalidad entre el peso corporal y la intensidad necesaria para la fibrilación.



1.2.4 Efectos de la frecuencia

Los seres humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica a frecuencias de 50 o 60 Hz. Las corrientes de aproximadamente 0.1 A pueden ser letales. Los reglamentos generalmente establecen que el cuerpo humano puede tolerar una corriente ligeramente mayor a 25 Hz y aproximadamente 5 veces más grande en corriente directa. A frecuencias de 3000 a 10000 Hz, se pueden tolerar corrientes aún mayores. En algunos casos el cuerpo humano es capaz de tolerar corrientes muy elevadas debidas a descargas atmosféricas.

1.2.5 Importancia de la eliminación rápida de las fallas

Considerando la importancia de la duración de la falla implícita como un factor de exposición a los accidentes, la eliminación rápida de fallas a tierra es aconsejable por dos razones:

- 1) La probabilidad de electrocución se reduce grandemente al eliminar rápidamente la falla, en comparación a las situaciones en las cuales las corrientes de falla pueden persistir por varios minutos o posiblemente horas.
- 2) Pruebas efectuadas y la experiencia han demostrado que la posibilidad de daño severo o la muerte se reduce grandemente si la duración de un flujo de corriente a través del cuerpo es muy breve; el valor de corriente permitido se puede basar por lo tanto en el tiempo de activación de los dispositivos primarios de protección, o de los de la protección de respaldo.

Un incentivo adicional para usar los tiempos de interrupción menores a 0.5 s se deriva de la investigación de Biegelmeier y Lee. Su investigación proporciona evidencia de que el corazón de un ser humano se vuelve más susceptible a la fibrilación ventricular cuando el tiempo de exposición a la corriente se aproxima al latido del corazón, pero el peligro es mucho menor si el tiempo de exposición está en el intervalo de 0.06 a 0.3 s.

1.2.6 La resistencia del cuerpo humano

En frecuencias de 50 Hz o 60 Hz, el cuerpo humano se puede tomar como una resistencia. Típicamente, la trayectoria de corriente se considera desde una mano a los pies ò de un pié hacia el otro. La resistencia interna del cuerpo es aproximadamente 300 Ω , en donde los valores de la resistencia del cuerpo incluyen los rangos de la piel desde 500 Ω a 3000 Ω .

Para altos voltajes y corrientes (arriba de 1 KV y 5 A), la resistencia disminuye por daño o perforación de la piel en el punto de contacto.

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

1. La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero
2. se ha seleccionado el valor de 1000Ω para representar el valor de la resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano o entre un pie y el otro:

$$R_B = 1000 \Omega$$

1.2.7 Circuito equivalente accidental

Usando el valor de la corriente tolerable por el cuerpo humano y las constantes apropiadas del circuito, es posible determinar el voltaje tolerable entre dos puntos críticos de contacto.

Para el análisis del circuito equivalente se aplicara la siguiente notación:

I_B = Corriente en el cuerpo (el cuerpo es parte del circuito accidental) (A)

R_A = Resistencia efectiva total del circuito accidental (Ω)

V_A = Tensión total efectiva en el circuito accidental (paso o contacto) (V)

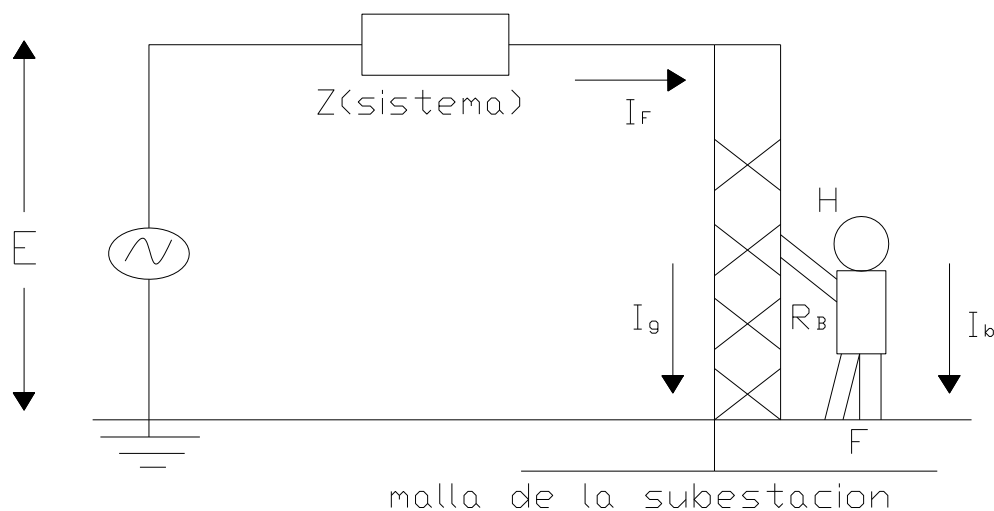


Fig. 1 exposición a la Tensión de contacto

La corriente tolerable por el cuerpo humano I_B esta definida por la ecuación (1), esta ecuación es usada para definir la tensión total efectiva del circuito accidental (tensión de paso o de contacto). La tensión total efectiva tolerable del circuito accidental es aquella que producirá el flujo de corriente en el cuerpo, I_b , igual a la corriente tolerable por el cuerpo humano I_B .

La figura 1 muestra la corriente de falla I_F , la cual será descargada a tierra a través del sistema de puesta a tierra de la subestación y una persona tocando la estructura metálica H. Varias impedancias son mostradas en el circuito de la figura 1.2. La terminal H es un punto en el sistema que está al mismo potencial de la red y por el cual la corriente de falla fluye y la Terminal F es un área pequeña sobre la superficie de la tierra, donde se encuentra la persona haciendo contacto con ambos pies. La corriente I_b fluye desde H, a través del cuerpo de la persona hacia la tierra en F. El teorema de Thevenin permite representar estas dos terminales (H,F), en una red como la mostrada en la figura 1.2 y el circuito eléctrico mostrado en la figura 1.3.

La tensión de Thevenin V_{TH} , es la tensión entre las terminales H y F cuando una persona no está presente en ese punto. La impedancia de Thevenin Z_{TH} , es la impedancia del sistema vista desde los puntos H y F, con una fuente de tensión del sistema cortocircuitada. La corriente I_b a través del cuerpo de una persona, la cual está en la situación mencionada y haciendo contacto en la posición H y F está dada por:

$$I_b = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + R_B} \dots\dots\dots(2)$$

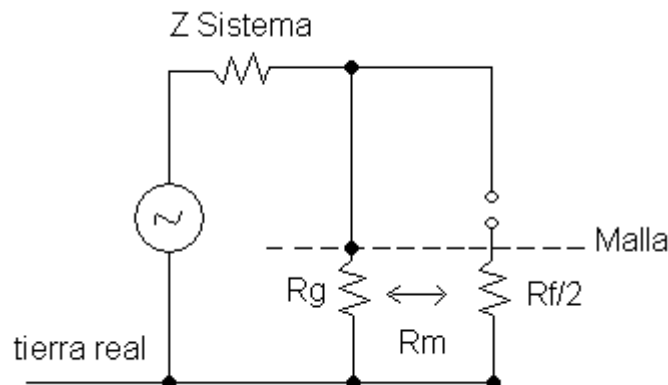


Fig. 1.2 Impedancia para el circuito de la Tensión de contacto.

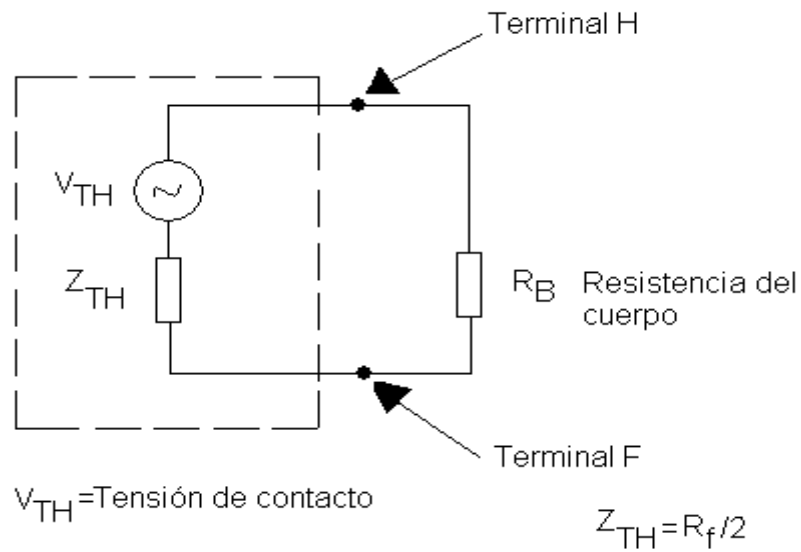


Fig. 1.3 Circuito de la tensión de Contacto.

Donde:

R_B es la resistencia del cuerpo humano en Ω .

La Figura 1.4 muestra la corriente de falla I_f , cual será descargada a través del sistema de tierra de la subestación. La corriente I_b fluye desde un pie F1 a través del cuerpo de una persona hacia F2. Las terminales F1 y F2 son las áreas sobre la superficie de la tierra donde los pies están haciendo contacto con la tierra respectivamente. La tensión de Thevenin V_{TH} es la tensión entre las terminales F1 y F2 Cuando la persona no esta presente en ese punto (Fig. 1.5). La impedancia de Thevenin Z_{TH} es la impedancia del sistema, vista desde los puntos F1 y F2, con la fuente de tensión del sistema cortocircuitada. La corriente I_b a través del cuerpo de una persona esta dada por la expresión (2).

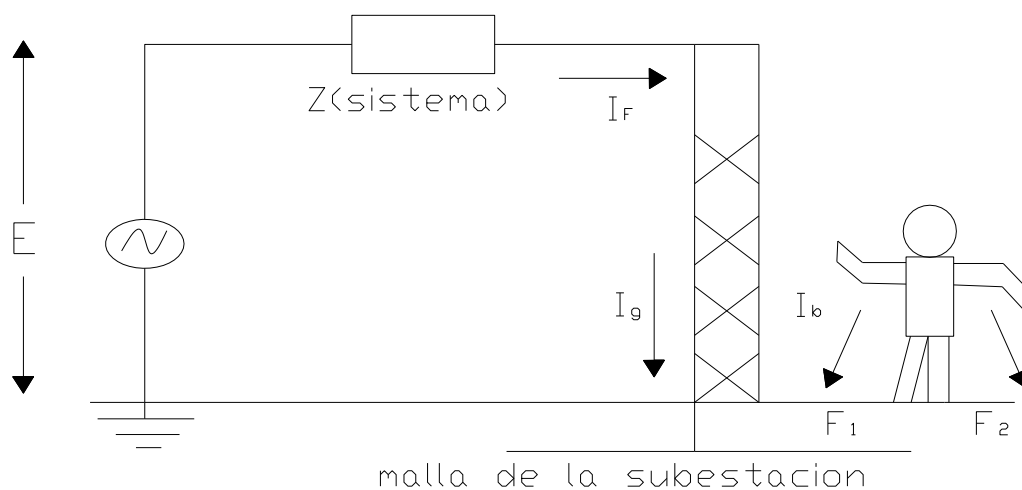


Fig. 1.4 Exposición a la Tensión de paso

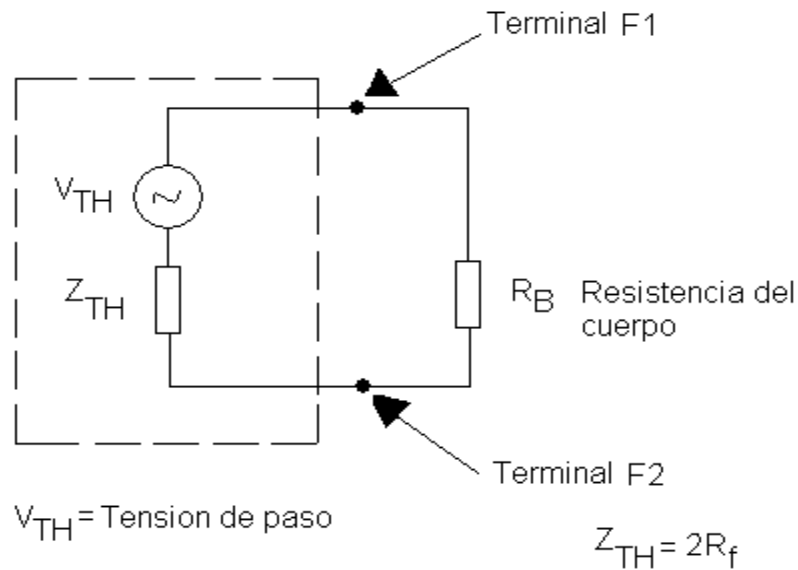


Fig. 1.5 Circuito de la Tensión de Paso.

La impedancia equivalente de Thevenin Z_{TH} para la tensión de contacto del circuito accidental será:

$$Z_{TH} = \frac{R_f}{2} \dots\dots\dots(3)$$

Y para la tensión de paso del circuito accidental:

$$Z_{TH} = 2R_f \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

R_f es la resistencia de un pie en Ω .

Para propósito de análisis de circuitos, el pie del cuerpo humano se considera como una placa metálica conductiva circular, y la resistencia de contacto de los calcetines y zapatos, etc. son despreciables. La resistencia a tierra de un disco metálico de radio b (m) sobre la superficie de un terreno homogéneo, de resistividad ρ en Ω/m esta dada por Laurent, siendo esta:

$$R_F = \frac{\rho}{4b} \dots\dots\dots(5)$$

Tradicionalmente, el disco metálico representando al pie es tomado como una placa circular de radio 0.08m. Con solo una ligera aproximación, la ecuación para Z_{TH} puede ser representada en forma numérica y expresarla en términos de ρ como sigue:

Para la tensión de contacto del circuito accidental:

$$Z_{TH} = 1.5\rho \dots\dots\dots(6)$$

Para la tensión de paso del circuito accidental

$$Z_{TH} = 6.0\rho \dots\dots\dots(7)$$

Basados en las investigaciones, las ecuaciones 6 y 7 son conservadoras.

La tensión total equivalente permisible (tensión de contacto y tensión de paso), usando las ecuaciones 6 y 7 son:

$$E_{contacto} = I_B(R_B + 1.5\rho) \dots\dots\dots(8)$$

Y:

$$E_{paso} = I_B(R_B + 6.0\rho) \dots\dots\dots(9)$$

1.2.8 Corriente de corto circuito en la red de tierra

En el sistema pueden ocurrir diferentes tipos fallas, pero es difícil determinar cual tipo de falla y su localización es la que proporciona el mayor flujo de corriente entre una red de tierra y el terreno que la rodea, debido a que no existe un método simple para aplicar.

Para el diseño de un sistema de tierra se consideran las fallas de una fase a tierra y la de dos fases a tierra. De estos dos tipos de falla la de mayor ocurrencia y mayor magnitud de corriente es la de una fase a tierra, por lo que es el tipo de falla que normalmente se utiliza. La corriente de secuencia cero para una falla de fase a tierra esta determinada por la siguiente ecuación:

$$I_o = \frac{E}{3R_f + (R_1 + R_2 + R_o) + j(X_1 + X_2 + X_o)}$$

Donde:

I_0 = valor simétrico eficaz de la corriente de secuencia cero (A)
 E = tensión de fase a neutro en el punto de falla (V)
 R_f = resistencia de falla estimada (Ω)
 R_1 = resistencia de secuencia positiva equivalente del sistema (Ω)
 R_2 = resistencia de secuencia negativa equivalente del sistema (Ω)
 R_0 = resistencia de secuencia cero equivalente del sistema (Ω)
 X_1 = reactancia de secuencia positiva equivalente del sistema (Ω)
 X_2 = reactancia de secuencia negativa equivalente del sistema (Ω)
 X_0 = reactancia de secuencia cero equivalente del sistema (Ω)

En el cálculo de I_0 normalmente se considera la condición más desfavorable, por lo que:

$$R_f=0$$

La magnitud de la corriente simétrica eficaz para una falla de fase a tierra está definida por la siguiente expresión:

$$I_f=3I_0$$

En el diseño de un sistema de tierra, es necesario tomar en cuenta el incremento de la corriente de falla en la subestación, provocado por los cambios futuros en la topología o en el aumento en la capacidad del sistema. Debido a que modificaciones posteriores a la red de tierra resultan impracticables y costosas, por lo cual generalmente no se realizan, dando motivo a que el sistema de tierra sea inseguro.

Al realizar estudios de cortocircuito se tiene que considerar la expansión del sistema con períodos de diez años. Para tener un sistema de tierra seguro durante la vida de la subestación, se debe considerar el caso más desfavorable de la magnitud de corriente de falla en el mismo período.

1.2.9 Máxima corriente de la red de tierra

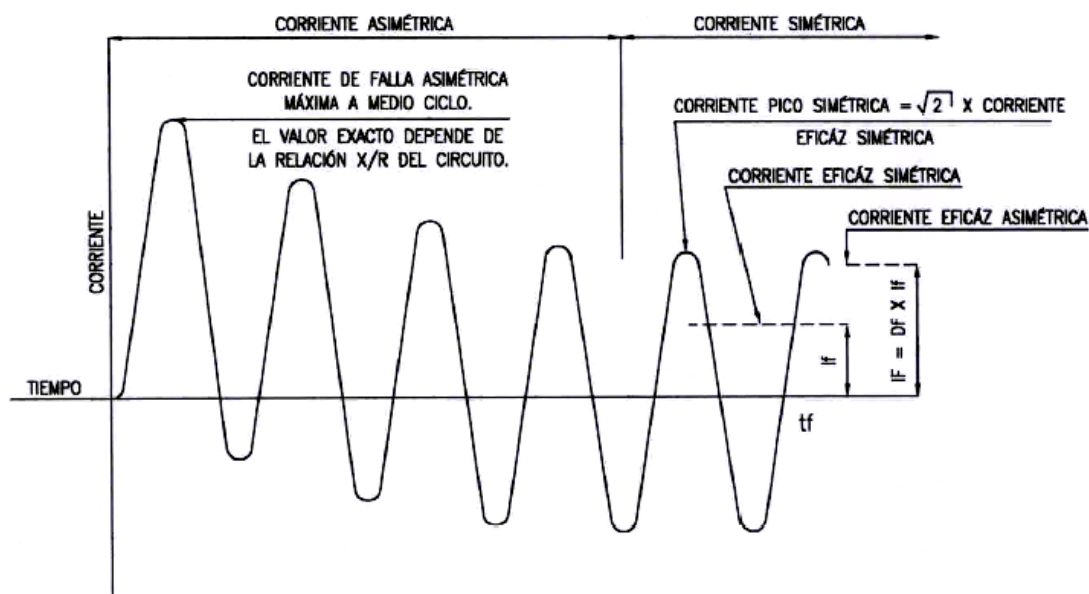
La máxima corriente de falla que pueda circular entre una red del sistema de tierra y el terreno que la rodea, queda determinada por la corriente de falla asimétrica eficaz calculada tomando en cuenta los cambios futuros del sistema de potencia, es decir:

$$I_G=I_F$$

Donde:

I_G = corriente de la red de tierra (A)
 I_F = corriente de falla asimétrica eficaz (A)

En la siguiente figura se muestra la relación entre el valor real de la corriente de falla y los valores de I_F , I_f , D_f para el tiempo de liberación de la falla t_f .



Relación entre valores reales de corriente de falla y los valores de I_F , I_f , D_f para un tiempo de duración de la falla t_f

Duración de la falla t_f		Factor de decremento D_f			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	$X/R = 10$	$X/R = 20$	$X/R = 30$	$X/R = 40$
0.00833	0.5	1.576	1.628	1.675	1.688
0.05	3.0	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6.0	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12.0	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18.0	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24.0	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30.0	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45.0	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60.0	1.013	1.026	1.039	1.052

Valores típicos del factor de decremento D_f

1.2.10 Potencial de paso

El potencial entre el neutro de un sistema eléctrico trifásico de corriente alterna y la tierra (suelo) debería ser cero. Bajo estas condiciones, las personas y los animales que accidental o intencionalmente establecen contacto con las estructuras metálicas directamente unidas al sistema de conexión a tierra estarían en condiciones de absoluta seguridad. Desafortunadamente, en la práctica la impedancia de un sistema de conexión a tierra es siempre un valor finito, lo que origina que siempre exista una diferencia de potencial entre las estructuras directamente unidas al sistema al sistema de conexión a tierra y el

suelo, particularmente en condiciones anormales o transitorias de operación del sistema eléctrico como las fallas a tierra o el desbalanceo excesivo de corrientes en las fases, los cuales pueden originar condiciones peligrosas para las personas o animales en función de la magnitud de la diferencia de potencial entre las estructuras y el suelo.

El potencial de paso esta definido como:

El potencial máximo que se aplicará a una persona entre sus pies, cuando en el instante de una falla se encuentre caminando en un área con una diferencia de potencial en la superficie. Prácticamente, el potencial de paso es aquel que existe entre dos puntos separados un metro sobre la superficie del suelo.

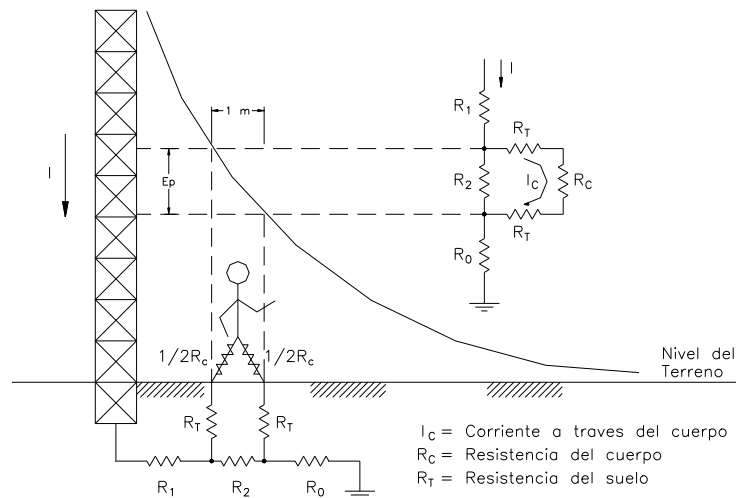
La ecuación que define el valor límite esta definida como:

$$V_{\text{paso}} = \frac{(1000 + 6\rho_s)0.116}{\sqrt{t}}$$

Donde:

ρ_s = resistividad del terreno (se toma como 3000 $\Omega\cdot\text{m}$ cuando se usa roca triturada)

t = tiempo de liberación de la falla (0.5 s es un valor conservador)



Tensión de paso y circuito equivalente

1.2.11 Potencial de contacto

El potencial de contacto esta definido como:

El potencial máximo que experimentará una persona que se encuentra de pie dentro del área de la instalación puesta a tierra y que durante la ocurrencia de una falla esté tocando con una o ambas manos una estructura metálica o cualquier elemento conductor directamente unido a la red de tierra.

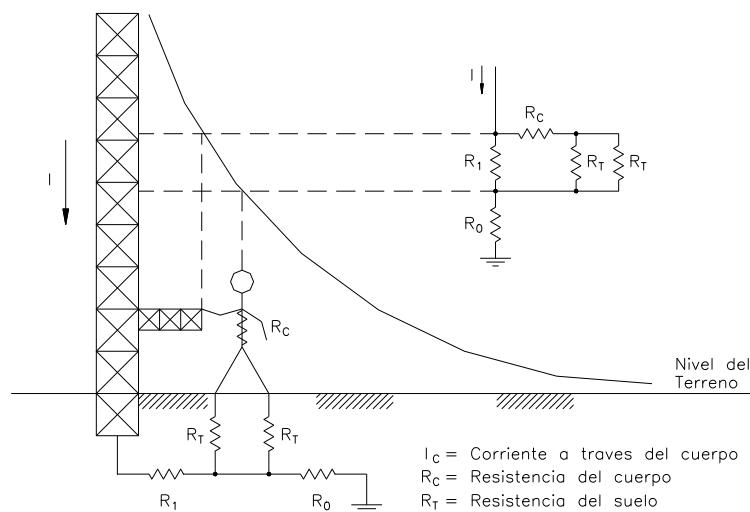
La ecuación que define el valor límite esta definida como:

$$V_{\text{contacto}} = \frac{(1000 + 1.5\rho_s)0.116}{\sqrt{t}}$$

Donde:

ρ_s = resistividad del terreno (se toma como 3000 $\Omega\cdot\text{m}$ cuando se usa roca triturada)

t = tiempo de liberación de la falla (0.5 s es un valor conservador)



Tensión de contacto y circuito equivalente

C a racterización del suelo y mediciones de resistividad aparente del terreno

2.1 Definición de resistividad

La resistividad es una propiedad del material, en este caso el terreno o el suelo, de oponerse al paso o circulación de la corriente eléctrica, que es independiente de las dimensiones físicas, cuyas características dependen de la constitución química que es afectada por la humedad, compactación, temperatura y otros. Se identifica con el símbolo (ρ) y sus unidades son el $\Omega \cdot m$.

Como ejemplo, la resistividad de la plata es de $1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ a $20^\circ C$, independientemente de ser un gramo, una moneda, una barra o un hilo; sin embargo no hay que confundirlo con el concepto de resistencia que depende además de las dimensiones del objeto, ya que un cm. de hilo de plata tendrá menor resistencia que un metro de hilo del mismo material.

Decir que los materiales o sustancias tienen resistividades grandes equivale a decir que son malos conductores y a su vez buenos aislantes o aisladores. Inversamente, las sustancias de resistividad pequeña son buenos conductores. En condiciones naturales no existen ni un aislador perfecto ($\rho = \infty$) ni un conductor perfecto ($\rho = 0$); por lo cual se pueden clasificar los materiales en dos clases, conductores y aisladores.

La resistividad de un material puro es una característica del mismo y depende de si su estado es cristalino y de si se encuentra a una temperatura determinada.

Las variaciones de estructura cristalina debida a tratamientos térmicos, deformaciones mecánicas o impurezas aleadas con un metal aún en cantidades mínimas, pueden afectar en forma considerable su resistividad; por ejemplo, la resistividad del cobre comercial reconocido a $20^\circ C$, es $1.72 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$ y la del cobre estirado es $1.77 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$.

En los sistemas con neutro a tierra el suelo se comporta como un conductor, más aún, en los sistemas denominados con retorno a tierra, el suelo es un conductor.

Las características del suelo son tan diferentes en este aspecto, que hay suelos que no conducen la electricidad, es decir, son aislantes, por otro lado hay suelos que son muy buenos conductores de la electricidad como los suelos húmedos.

Para conocer que tan buen conductor de la electricidad es el suelo, es necesario conocer su resistividad y resistencia específica, las rocas, la arena y suelos secos tienen alta resistividad, es decir, no conducen la electricidad, los suelos con alto contenido de humedad tienen baja resistividad. Por lo tanto, es necesario conocer la resistividad del terreno para poder efectuar un diseño adecuado del sistema de puesta a tierra.

2.2 Valores de resistividad de algunos materiales

A manera de referencia se presentan a continuación los valores de resistividad de algunos materiales a temperatura ambiente de 20°C, los cuales se afectan por la temperatura.

2.2.1 Valores de resistividad de materiales metálicos

Se enlistan sólo algunos materiales metálicos que son utilizados con más frecuencia como componentes de los equipos y materiales eléctricos:

Material	Resistividad (ρ) a 20°C ($\Omega \cdot m$)	Punto de fusión (°C)
Acero	18×10^{-8}	1,510
Aluminio	2.8×10^{-8}	659
Bronce	7×10^{-8}	
Cobre	1.7×10^{-8}	1,080
Carbono	3.5×10^{-8}	3,500
Hierro	10×10^{-8}	1,530
Latón	68×10^{-8}	900
Manganina	44×10^{-8}	910
Mercurio	95×10^{-8}	
Nicrom	100×10^{-8}	
Níquel	7.8×10^{-8}	1,450
Oro	2.4×10^{-8}	1,065
Plata	1.6×10^{-8}	960
Plomo	22×10^{-8}	330
Tungsteno	5.6×10^{-8}	3,400

Resistividad de algunos materiales metálicos

Sus unidades se especifican en ohm·metro ($\Omega\cdot m$), de acuerdo con la expresión general de la resistencia:

$$R = \rho \frac{L}{A} (\Omega)$$

de donde $\rho = R \times A/L \quad (\Omega\cdot m^2/m = \Omega\cdot m)$

Donde: R= resistencia en ohm

L= longitud en m

A= área en m^2

ρ = resistividad del material a temperatura ambiente de 20°C

En ocasiones, también se llega a utilizar como unidad $\Omega\cdot cm$, siendo la equivalencia entre ambas $1 \Omega\cdot m = 100 \Omega\cdot cm$.

En el caso particular del cobre, a menor temperatura se reduce su resistividad, de tal manera que su valor sería teóricamente igual a cero para una temperatura de -234.5 °C, fenómeno conocido como superconductividad. Esto es, una vez iniciada la corriente en el conductor, continuará por sí misma durante horas y aún días.

La temperatura crítica más alta de un metal puro es la correspondiente al Niobio, para el cual la temperatura crítica $T_c = 8.9$ K (grados Kelvin). Se han encontrado aplicaciones importantes de los superconductores en la manufactura de electroimanes de alta intensidad de campo y podrán utilizarse muy pronto en la transmisión de energía eléctrica para grandes distancias y para las memorias de las computadoras.

2.2.2 Valores de resistividad de materiales aislantes

A continuación se enlistan diferentes materiales aislantes, para que puedan ser comparados con los materiales conductores.

Material	Resistividad (ρ) a 20°C ($\Omega\cdot m$)
Ámbar	5×10^{14}
Azufre	1×10^{14}
Baquelita	de 2×10^5 a 2×10^{14}
Cuarzo (fundido)	75×10^{16}
Ebonita	de 1×10^{13} a 2×10^{16}
Madera	de 1×10^8 a 2×10^{11}
Mica	de 1×10^{11} a 2×10^{15}
Vidrio	De 1×10^{10} a 2×10^{14}

Valores de resistividad de materiales aislantes

2.3 Factores que afectan la resistividad del terreno

La tierra está formada por diferentes elementos como el óxido de aluminio, sílice, etc., con capas muy heterogéneas, huecos, ríos subterráneos en algunos casos; su estado es afectado frecuentemente por las condiciones climatológicas como la lluvia, las heladas, la variación de la temperatura, etc. Por lo anterior, la resistividad del terreno puede ser muy diferente de un lugar a otro y puede afectarse según la época de año en función de los siguientes factores:

- a) La composición propia del terreno.
- b) La estratigrafía.
- c) La granulometría.
- d) La concentración de las sales solubles.
- e) El estado higrométrico.
- f) La temperatura.
- g) La compacidad.

2.3.1 Composición propia del terreno

La variación de la resistividad según la composición del terreno es muy acusada, tropezándose con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para saber, de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra.

Sucede, incluso, que para una misma clase de terreno, situada en distintos parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente.

A continuación se presentan algunos valores promedio de resistividad:

Tipo de terreno	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Terreno pantanoso	Hasta 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arena arcillosa	50 a 500
Arena de sílice	200 a 3,000
Suelo pedregoso cubierto con pasto	300 a 500
Suelo pedregoso	1,500 a 3,000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1,000 a 5,000
Calizas agrietadas	500 a 1,000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos	1,500 a 10,000
Hormigón	2,000 a 3,000
Grava	3,000 a 5,000

Valores de resistividad de diferentes tipos de terreno

La tabla anterior nos da una idea de cuál es el valor de la resistividad en función del tipo del terreno, sin embargo, debido a que por lo general no se es experto en geología y además en otros documentos se presentan diferentes valores para terrenos semejantes, es muy necesario e importante conocer el valor directamente, a través de un medidor de resistencia de tierra. Las mediciones deben efectuarse en varios puntos del predio.

2.3.2 Estratigrafía

La resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes a las diversas capas que lo constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como cuando se alcanzan zonas de agua o el nivel freático.

Queda, pues, justificado que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presenten variaciones estacionales bajo el efecto del hielo y de la sequedad (que la aumentan) o de la humedad (que la disminuye). Esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas.

Puede concluirse en que claramente se ve que la resistividad del terreno es una magnitud variable y que el único camino aceptable para conocer su valor consistirá en medirla, lo que permitirá establecer su magnitud en las condiciones existentes en cada caso.

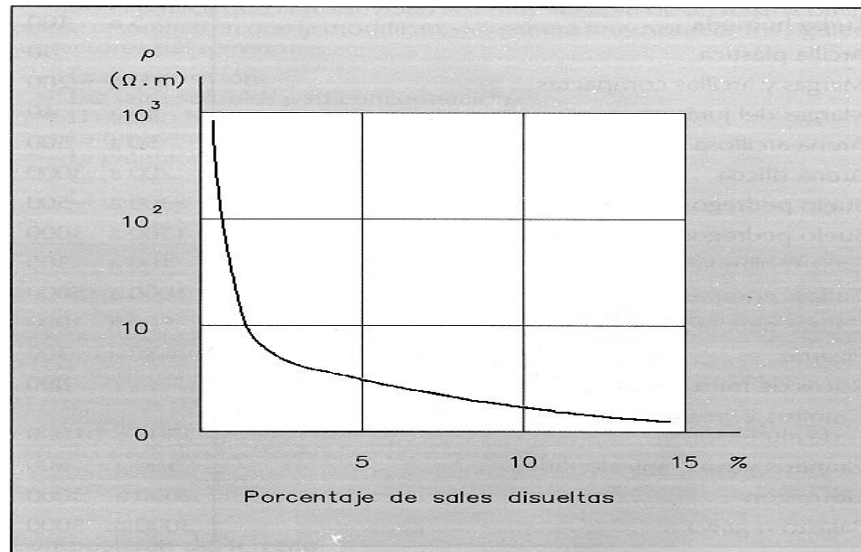
2.3.3 Granulometría

Es un elemento importante que influye, a la vez, sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos. Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente a la arena y que el de ésta supere al de la arcilla.

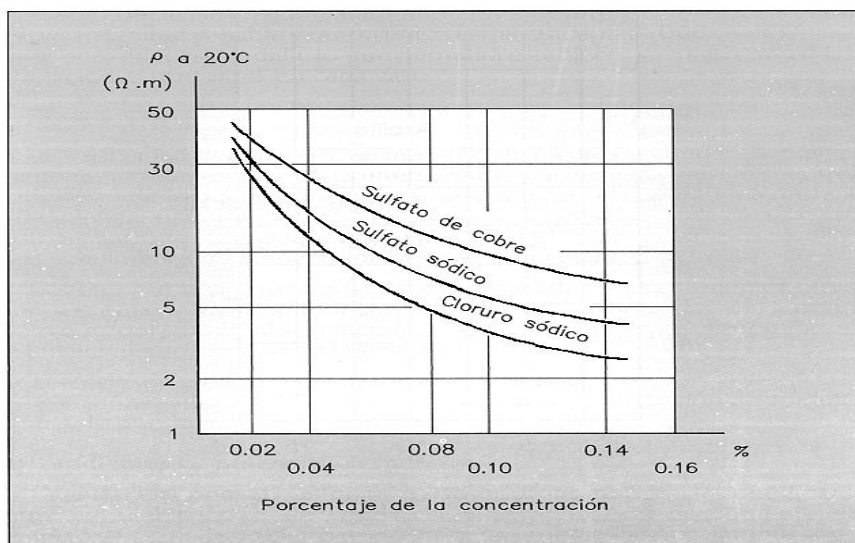
Los suelos de grano grueso (gravas, guijarros, etc.) se prestan mal al establecimiento de buenas redes de tierra, circunstancia que se puede atenuar rodeando la superficie de los electrodos de un cierto espesor de tierra fina o de otro material relativamente conductor.

2.3.4 Concentración de sales solubles

La concentración de sales solubles en el terreno es de gran importancia, ya que la circulación de corriente se realiza a través del electrolito formado por las sales y el agua que están contenidos en el terreno.



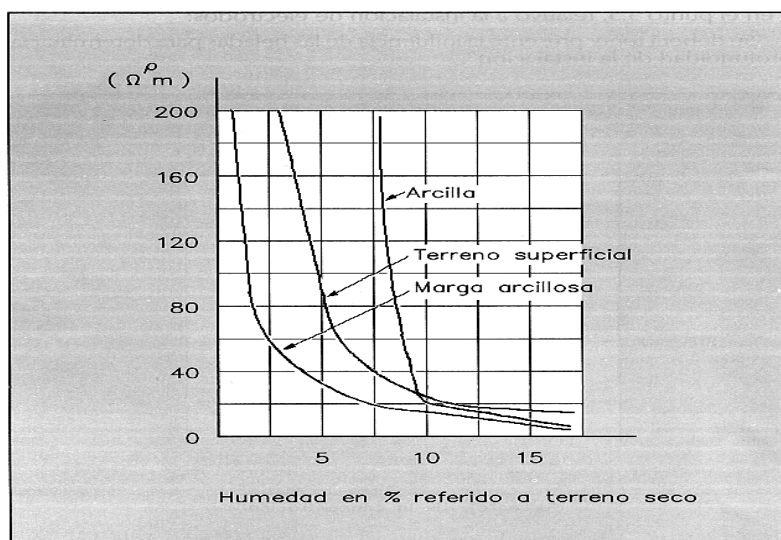
Resistividad del suelo en función de la concentración de sales disueltas



Resistividad del suelo en función del tipo de sales

2.3.5 Estado higrométrico

La reducción o aumento de la resistividad depende del grado de humedad o contenido de agua que tenga el terreno (al aumentar la humedad se disuelven las sales solubles), variando de acuerdo al nivel freático, la temperatura y la época del año.



Resistividad del suelo en función de la humedad

2.3.6 Temperatura

La temperatura es un factor importante para la resistividad, ya que en temperaturas calurosas se produce resequead por la evaporación de la humedad en el estrato superior del terreno, incrementando con ello el valor de la resistividad; las temperaturas debajo de $0^{\circ}C$ también aumentan la resistividad debido a la congelación del agua que trae como consecuencia la reducción del flujo de los electrolitos.

Variación de la resistividad con respecto a la temperatura

La resistividad de todas las sustancias o materiales varía con la temperatura. En el caso particular de los materiales metálicos, dicha variación esta representada por una curva que sigue la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

Donde:

ρ es la resistividad del material a cierta temperatura en $\Omega \cdot m$

ρ_0 es la resistividad del material a $0^{\circ}C$ en $\Omega \cdot m$

α es el coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura en $1/^{\circ}C$

t es la temperatura del material en $^{\circ}C$

Debido a que la resistencia de cualquier conductor es proporcional a su resistividad, la resistencia se puede expresar en función de la temperatura como se indica:

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

Donde:

R es la resistencia del material a cierta temperatura en Ω

R_0 es la resistencia del material a 0°C en Ω

α es el coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura en $1/^\circ\text{C}$

t es la temperatura del material en $^\circ\text{C}$

En general las resistividades de los materiales metálicos se incrementan al aumentar la temperatura y en los materiales no metálicos disminuye al incrementarse la temperatura. Los coeficientes de variación α son positivos para los primeros y negativos para los últimos. Esto quiere decir que para el primer caso los materiales conducen en temperaturas bajas debido a que existe una menor oposición al transporte de iones a través de ellos.

A continuación se muestran los valores de los coeficientes α de algunos materiales a 20°C :

Material	α (en $^\circ\text{C}^{-1}$)
Aluminio	+ 0.0039
Carbón	- 0.0005
Constantán	+ 0.000002
Cobre (comercial Recocido)	+0.00393
Hierro	+ 0.0050
Latón	+ 0.0020
Mercurio	+ 0.00088
Nicrom	+ 0.0004
Plata	+ 0.0038
Plomo	+ 0.0043
Wolframio	+ 0.0045

Valores de coeficiente de variación de resistividad con la temperatura.

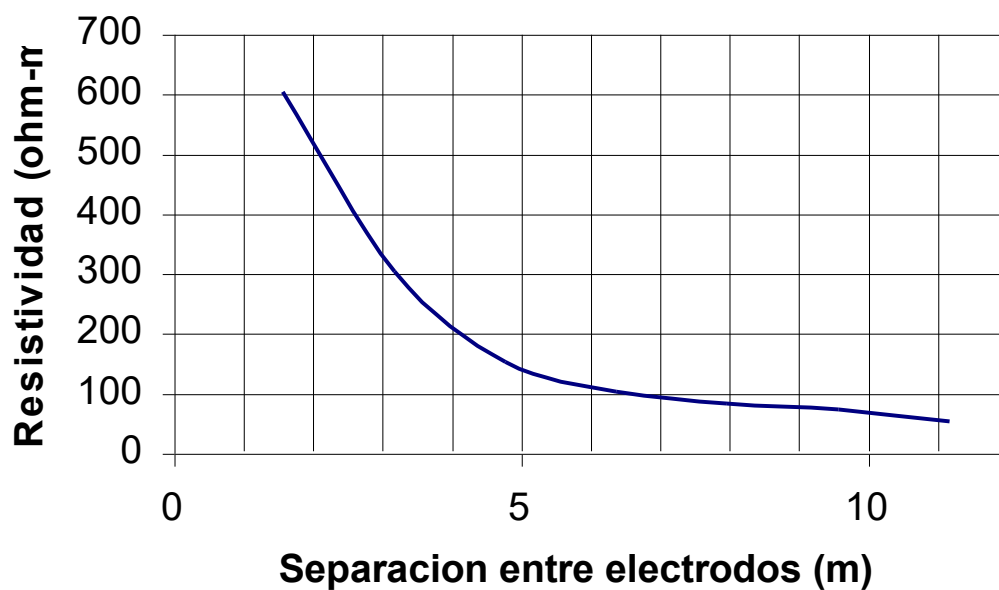
2.3.7 Compacidad

La compacidad del terreno redundará en una mayor o menor afectación de la resistividad. Teniendo un efecto inverso, ya que a mayor compactación existe menos resistividad, debido a la eliminación de los espacios de aire que se comportan como elementos aislantes o no conductores.

Se procurará utilizar las capas de tierra más conductoras, haciéndose la colocación de electrodos con el mayor cuidado posible en cuanto a la compactación del terreno.

2.4 Mediciones de resistividad

La interpretación de las mediciones de la resistividad del terreno obtenidas en campo, constituye uno de los problemas importantes dentro del conocimiento de los sistemas de puesta a tierra. En la práctica es difícil encontrar un comportamiento lineal de la resistividad en función de la separación entre electrodos, debido a la gran diversidad de materiales y profundidades que conforman el suelo y por consecuencia una gran diversidad de los valores de resistividad a ciertas profundidades del suelo. Con base en este comportamiento físico de las características del terreno, es practica común, para la representación de la variación de la resistividad con la distancia entre electrodos de prueba, el concepto de resistividad aparente del suelo, teniendo como resultado, una curva de la resistividad en función de la separación entre electrodos de prueba.



Estimaciones que se basan en la clasificación de los suelos proporcionan una aproximación general de la resistividad. Por lo tanto, es imprescindible hacer pruebas de resistividad. Estas se deben hacer en diferentes lugares dentro del sitio. Raramente se encuentran suelos con resistividad uniforme y a una profundidad considerable dentro de la zona de la subestación. Normalmente, se encuentran diferentes capas, cada una con diferente resistividad. A menudo suelen ocurrir cambios laterales, pero en comparación con los verticales, los cambios suelen ser aún más graduales. Se pueden hacer pruebas de resistividad en el suelo para determinar si existe alguna variación importante de resistividad con la profundidad. Cuando las variaciones son grandes se deben

tomar aun más lecturas, especialmente si las lecturas son tan altas que indican problemas de seguridad.

Si la resistividad varia apreciablemente con la profundidad, a menudo es deseable hacer pruebas a diferentes distancias para obtener un estimado de la resistividad de las capas mas profundas. Esto es posible ya que a medida que se incrementa la distancia de las pruebas, la corriente de prueba penetra más en las distintas áreas, en direcciones verticales y horizontales, sin importar cuanto se desvíe la trayectoria de la corriente debido a la variación de las condiciones del suelo.

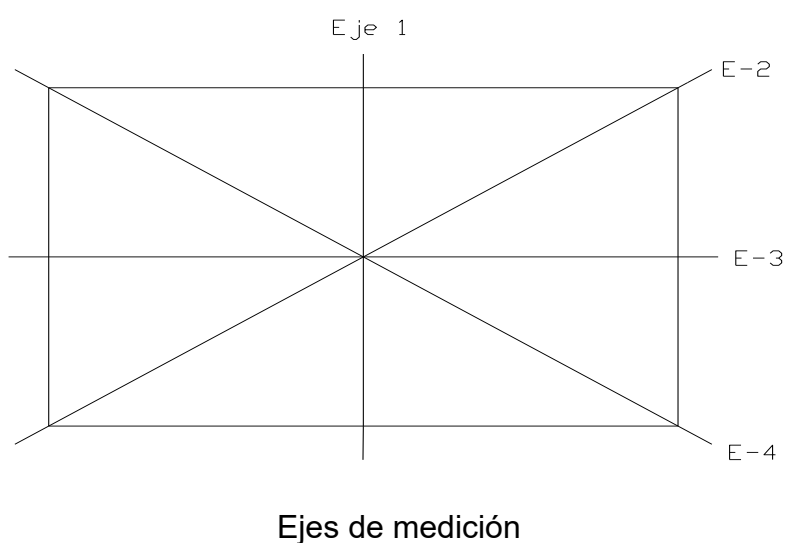
2.5 Consideraciones sobre las medidas de resistividad

Ya se ha indicado que las variaciones climáticas estacionales influyen sobre la resistividad de las capas superficiales de un terreno. Es por ello que las lecturas de resistividad deben incluir anotaciones sobre las condiciones dominantes durante las mediciones (temperatura y condiciones de humedad del suelo) y si es posible, contrastarlas con las que se repitan en épocas diferentes del año.

La presencia en la zona de exploración de cuerpos metálicos (por ejemplo, canalizaciones desnudas) o de yacimientos de terreno muy resistentes o muy conductores, que acaben aflorando a la superficie, puede perturbar las mediciones de resistividad, ya que para pasar tales obstáculos, se originan modificaciones de las trayectorias de los franjas de corriente en el suelo y en consecuencia del campo eléctrico sobre el punto de medición.

2.6 Medición de la resistividad del suelo

La resistividad de un terreno se obtiene con el promedio de varias mediciones efectuadas a lo largo de los cuatro ejes indicados en la siguiente figura, que representa la superficie de un terreno.



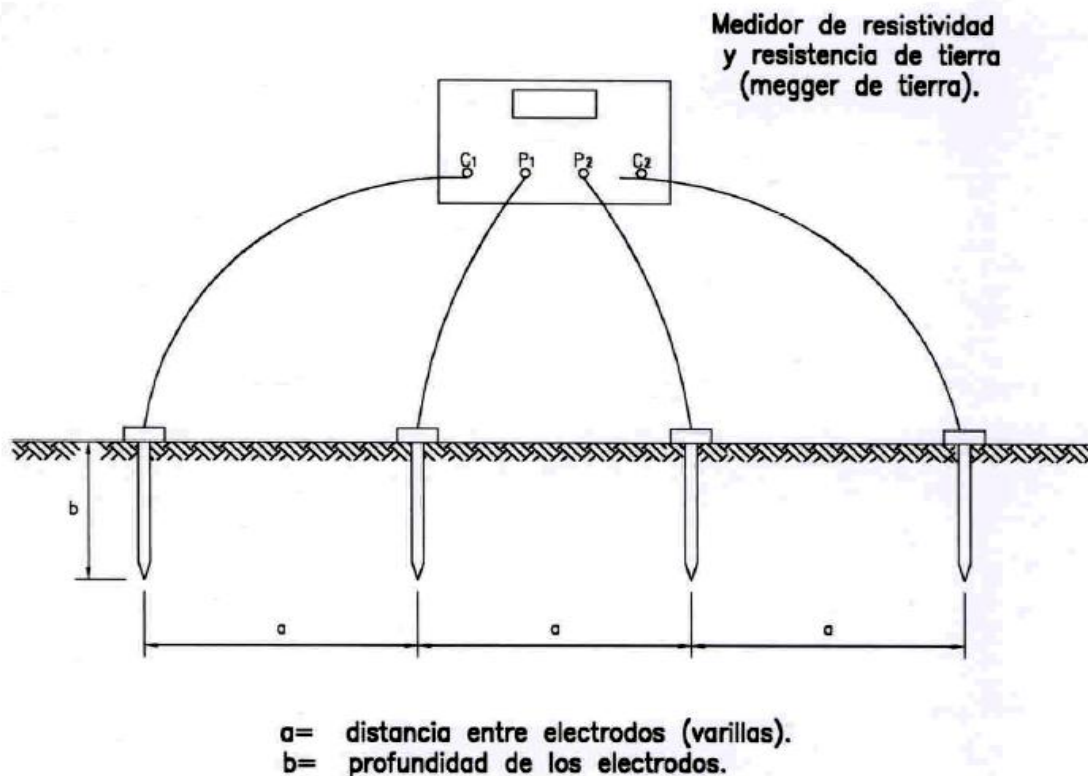
Si en los valores obtenidos las dos lecturas de resistividad más separadas varían menos de un 50%, se considera que la resistividad es uniforme y se utiliza el método censillo, llamado método Wenner o de una capa. Si por el

contrario los valores varían en más de un 50%, entonces se consideran dos resistividades diferentes, es decir, se utiliza el método de dos capas que lleva a un cálculo más complicado de resistencia de la red de tierra, lo cual requiere calcular la resistividad de cada una de los estratos. La medición de la resistividad en cada eje se acostumbra efectuar tomando las lecturas con separaciones de los electrodos variables y profundidades constantes.

2.6.1 Método de los cuatro puntos (Wenner)

Este método se utiliza cuando se tiene por lo general suelo homogéneo, el cual es de una sola capa y se pueden realizar mediciones de resistividad con diferentes separaciones de electrodos, obteniéndose un valor de resistividad constante, en cambio para un suelo heterogéneo las mediciones serán diferentes al cambiar la separación de los electrodos. Este método es el mayormente utilizado para medir la resistividad promedio del terreno.

El método fue desarrollado por Frank Wenner y para realizar las mediciones se requiere de cuatro pequeñas varillas localizadas sobre una línea recta, las cuales se entierran a una profundidad (b) y espaciadas a una misma distancia entre ellas (a). Se hace circular una corriente de prueba de baja frecuencia entre los dos electrodos extremos (electrodos de corriente C_1 , C_2) y se mide la caída de potencial con un voltmetro de alta impedancia entre los dos electrodos interiores (electrodos de tensión P_1 , P_2). Por lo tanto la relación entre la tensión y la corriente determina la lectura de la resistencia R , la cual permite calcular la resistividad del terreno.



Medición de la resistividad del terreno por el método Wenner

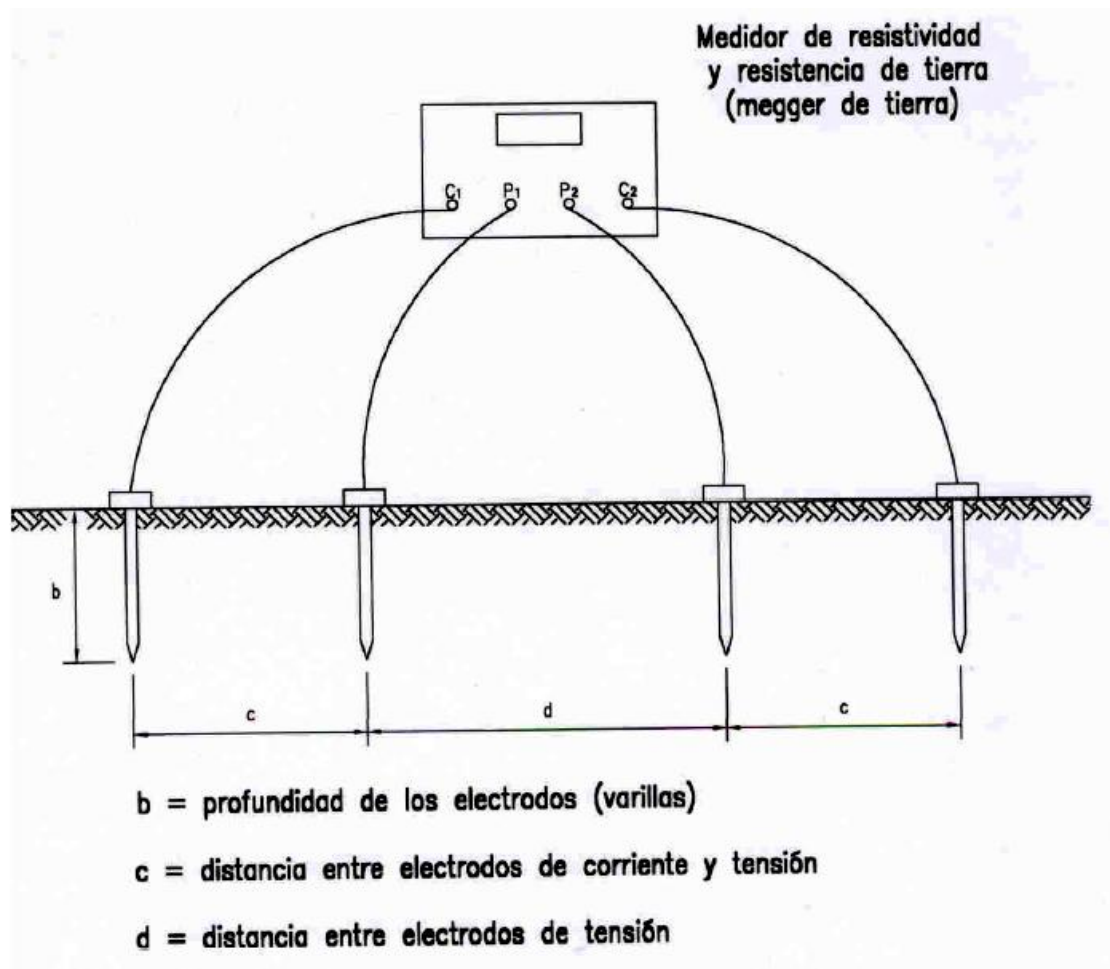
La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pruebas en espacios pequeños, mientras que la mayoría de la corriente penetra más adentro del suelo para distancias más grandes. Se puede asumir, con aproximaciones razonables una resistividad aparente que se toman de las pruebas de medida de resistividad a una distancia dada, a una profundidad “b” cuando los contrastes de la resistividad de las capas de los suelos no son excesivas.

2.6.2 Método Schlumberger-Palmer

Este método es una versión modificada del método de Wenner; este método nos da una mejor sensibilidad para pruebas a distancias mayores.

Se considera el espaciamiento de los electrodos interiores de tensión (d) mayor al de los de corriente (c). Esta disposición permite medir la resistividad con espaciamientos entre varillas mayores que el espaciamiento utilizado en el método Wenner, el cual tiene la desventaja del decremento rápido en la magnitud de la tensión medida entre los electrodos interiores, cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes.

En la siguiente figura se aprecia que los electrodos de tensión se localizan lo más cercano a los electrodos de corriente, lo cual incrementa la tensión medida.



Considerando que la profundidad de los electrodos (b), es pequeña comparada con la separación entre ellos, la resistividad se determina de la siguiente ecuación:

$$\rho_s = \frac{\pi c(c+d)R}{d}$$

donde:

ρ_s = resistividad aparente del suelo (Ω -m)

c= distancia entre electrodos de corriente y tensión (m)

d= distancia entre electrodos de tensión (m)

R= resistencia medida del terreno (Ω)

Las variaciones de las resistividades medidas debidas a irregularidades en la superficie, se reducen considerablemente y se obtiene mayor precisión en longitudes de medición grandes.

Método de cálculo de redes de tierra para subestaciones eléctricas

3.1 Datos iniciales

El plano general de arreglo de la subestación proporciona la información del área donde se instalará la malla de puesta a tierra [A]. La resistividad del terreno [Ω] se determina por el método de Wenner o de los cuatro electrodos y el modelo del suelo, para los casos en que se tenga un suelo heterogéneo, por medio de un programa de computadora. Del estudio de corto circuito, utilizando los factores de repartición de corriente homopolar indicados, se obtienen el valor de la corriente de falla [I_g] y el tiempo de liberación [t_f]. La guía 80 del IEEE proporciona las expresiones para el cálculo del calibre del conductor. En la práctica y debido a los tiempos de apertura utilizados en los sistemas de potencia modernos, la sección transversal de los conductores de la red se determina por razones mecánicas. Los calibres de conductores 4/0 AWG y 250 MCM son aceptables en la generalidad de las situaciones.

En general, la limitación de los parámetros de una malla de tierra está basada en aspectos físicos y económicos de la instalación de la malla. La limitación económica es la instalación de una placa de cobre para el sistema de tierra, mientras que una limitación física es por ejemplo la reducción del espacio entre conductores el cual debe de ser aproximadamente de 5 metros o más.

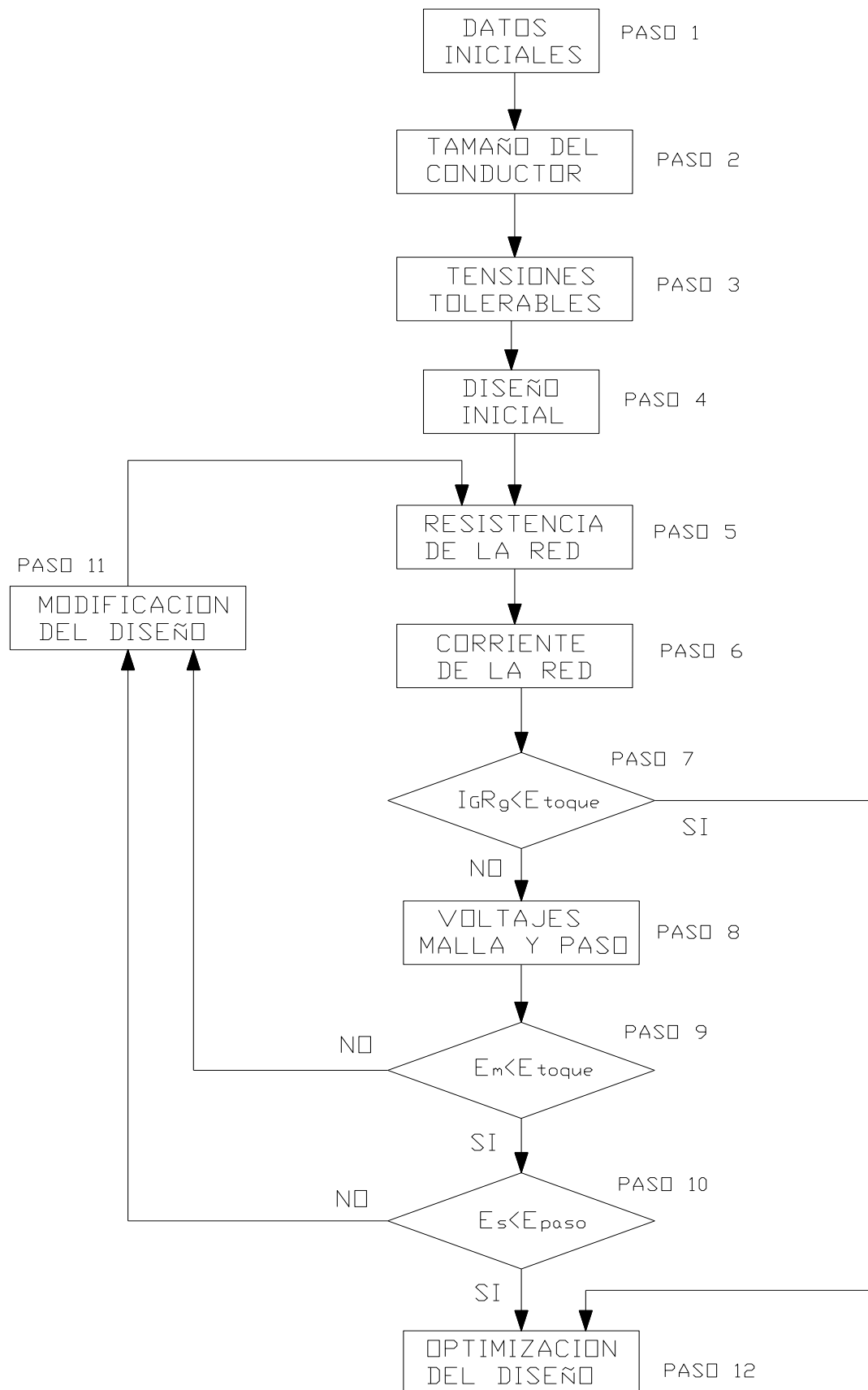


Diagrama de flujo del procedimiento de diseño

El diagrama de flujo, ilustra la secuencia de pasos que se deben realizar para el diseño de un sistema de tierra. Los parámetros indicados en el diagrama de flujo se describen en la siguiente tabla.

Símbolo	Descripción	Unidad
ρ	Resistividad del terreno	$\Omega\text{-m}$
ρ_s	Resistividad de la capa sobre la superficie del terreno	$\Omega\text{-m}$
ρ_1, ρ_2	Resistividad de la primera y segunda capa de terreno	$\Omega\text{-m}$
$3I_0$	Corriente de falla simétrica en la subestación	A
A	Área total ocupada por la red del sistema de tierra	m^2
C_s	Factor que relaciona el valor al nominal de la resistividad de la capa superficial ρ_s con el valor de la resistividad del terreno ρ	
d_r	Diámetro del conductor de la red	m
A_r	Área de la sección transversal del conductor de la red	mm^2
D	Separación entre conductores paralelos	m
D_f	Factor de decremento para determinar la corriente de falla asimétrica eficaz	
D_m	Distancia máxima entre dos puntos den la red	m
E_m	Tensión de malla en el centro de la malla de una de la red	V
E_{step50}	Tensión de paso tolerable por un cuerpo humano de 50 kg de peso	V
E_{step70}	Tensión de paso tolerable por un cuerpo humano de 70 kg de peso	V
$E_{touch50}$	Tensión de toque tolerable por un cuerpo humano de 50 kg de peso	V
$E_{touch70}$	Tensión de toque tolerable por un cuerpo humano de 70 kg de peso	V
h	Profundidad de los conductores horizontales del red del sistema de tierra	m
h_{c1}	Profundidad de la primer capa de terreno	m
h_s	Espesor de la capa de material de alta resistividad sobre la superficie	m
I_G	Corriente de tierra máxima que circula entre una red del sistema de tierras y el terreno que la rodea	A
I_g	Corriente de tierra simétrica	A
K	Factor de reflexión entre diferentes resistividades	m
K_h	Factor que enfatiza los efectos de la profundidad de la red	
K_s	Factor de corrección para la geometría de la red	

Símbolo	Descripción	Unidad
K_{ii}	Factor de ajuste para los efectos de los interiores en la malla de una de las esquinas de la red	
K_m	Factor de espaciamento para la tensión de malla	
K_s	Factor de espaciamento para la tensión de paso	
L_C	Longitud total del conductor horizontal de la red del sistema de tierra	m
L_E	Longitud del electrodo bajo prueba (método caída de tensión)	m
L_M	Longitud efectiva en función de L_C y L_R para determinar la tensión de malla	m
L_R	Longitud total de electrodos de tierra	m
L_r	Longitud de cada electrodo de tierra	m
L_S	Longitud efectiva en función de L_C y L_R para determinar la tensión de paso	m
L_T	Longitud efectiva total del conductor del sistema de tierra, incluyendo el de la red y los electrodos de tierra	m
L_x	Longitud máxima de conductor de la red en dirección del eje x	m
L_y	Longitud máxima de conductor de la red en dirección del eje y	m
n	Factor geométrico compuesto por los factores n_a, n_b, n_c y n_d	
n_R	Número total de electrodos de tierra localizados dentro del área A	
R_g	Resistencia del sistema de tierra	Ω
r_E	Radio de la sección transversal del electrodo bajo prueba (método caída de tensión)	m
t_f	Tiempo de liberación de la falla	s

3.2 Procedimiento de diseño de IEEE STD. 80

PASO 1: Un apropiado mapa y un plano de localización general de la subestación debe proveer buenas estimaciones del área a ser conectada a tierra. Una prueba de resistividad del terreno, determinara el perfil de resistividad del suelo y el modelo de suelo necesario (suelo homogéneo o de dos capas).

PASO 2: Para determinar la sección transversal del conductor de puesta a tierra y de la malla para tierra, la corriente de falla I_{fo} debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que pueda ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo t_f debe ser el tiempo máximo de liberación de la falla, incluyendo el tiempo de la protección de respaldo.

La corriente da falla a tierra simétrica $I_f = 3I_{fo}$, la cual es calculada a partir de la ecuación 1 (No se considera la resistencia).

$$I_o = \frac{E}{3R_f + (R_1 + R_2 + R_o) + j(X_1 + X_2 + X_o)} \dots\dots\dots [1]$$

donde:

- I_o corriente rms simétrica de secuencia cero en A
- E voltaje fase-neutro en V
- R_f resistencia estimada de falla en Ω (normalmente se asume que $R_f=0$)
- R_1 resistencia equivalente de secuencia positiva en Ω
- R_2 resistencia equivalente de secuencia negativa en Ω
- R_0 resistencia equivalente de secuencia cero en Ω
- X_1 reactancia equivalente de secuencia positiva en Ω
- X_2 reactancia equivalente de secuencia negativa en Ω
- X_0 reactancia equivalente de secuencia cero en Ω

Una vez que se calcula la corriente $3I_o$, se usa para calcular el calibre del conductor:

$$A_{kcmil} = I \frac{197.4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}}} \dots\dots\dots [2]$$

Donde:

- A : es la Sección transversal del conductor en Kcmils
- I : es Corriente rms en Ka (debe considerarse el incremento de este valor a futuro).
- T_m : es la temperatura máxima permisible en $^{\circ}\text{C}$
- T_a : es la temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$
- α_r : Es el coeficiente térmico de resistividad en la temperatura de referencia T_r en $1/^{\circ}\text{C}$
- ρ_r : Es la resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r en $\mu\Omega\text{-cm}$
- K_o : $1/\alpha_0$ o $(1/\alpha_r) - T_r$ en $^{\circ}\text{C}$
- t_c : Es el tiempo de duración de la corriente de falla en segundos
- $TCAP$ factor de capacidad térmica por unidad de volumen (Tabla 1), $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$.
- α_0 : Es el coeficiente térmico de resistividad a 0°C en $1/^{\circ}\text{C}$

Descripción	Conductividad del material (%)	factor α a 20 °C) (1/°C)	Ko a 0 °C (0 °C)	Temp de fusión Tm (°C)	ρ a 20 °C ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	factor de capacidad térmica por unidad de volumen TCAP [J/(cm ³ ·°C)]
<i>Cobre recocido suave-inmersión</i>	100	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
<i>Cobre comercial, estirado en frío</i>	97	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
<i>alambre de acero revestido de Cobre</i>	40	0.003 78	245	1084	4.4	3.85
<i>alambre de acero revestido de Cobre</i>	30	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
<i>Varilla de acero con recubrimiento de cobre</i>	20	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
<i>Aluminio grado EC</i>	61	0.004 03	228	657	2.86	2.56
<i>Aluminio aleación 5005</i>	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.6
<i>Aluminio aleación 6201</i>	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.6
<i>Alambre de acero con recubrimiento de aluminio</i>	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
<i>Acero, 1020</i>	10.8	0.001 60	605	1510	15.9	3.28
<i>Varilla de acero inoxidable</i>	9.8	0.001 60	605	1400	17.5	4.44
<i>Varilla de acero con recubrimiento de Zinc</i>	8.6	0.003 20	293	419	20.1	3.93
<i>Acero inoxidable</i>	2.4	0.001 30	749	1400	72	4.03

TABLA 1: constantes de materiales

Descripción	Conductividad del material (%)	Tm (°C)	Kf
<i>Cobre recocido suave-inmersión</i>	100	1083	7
<i>Cobre comercial, estirado en frío</i>	97	1084	7.06
<i>Cobre comercial, estirado en frío</i>	97	250	11.78
<i>alambre de acero revestido de Cobre</i>	40	1084	10.45
<i>alambre de acero revestido de Cobre</i>	30	1084	12.06
<i>Varilla de acero con recubrimiento de cobre</i>	20	1084	14.64
<i>Aluminio grado EC</i>	61	657	12.12
<i>Aluminio aleación 5005</i>	53.5	652	12.41
<i>Aluminio aleación 6201</i>	52.5	654	12.47
<i>Alambre de acero con recubrimiento de aluminio</i>	20.3	657	17.2
<i>Acero, 1020</i>	10.8	1510	15.95
<i>Varilla de acero inoxidable</i>	9.8	1400	14.72
<i>Varilla de acero con recubrimiento de Zinc</i>	8.6	419	28.96
<i>Acero inoxidable</i>	2.4	1400	30.05

Tabla 2. Constantes de materiales

PASO 3: Determinar las tensiones de paso y de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano. El tiempo de exposición de la falla de ser el máximo tiempo hasta que la falla se libere. (los subíndices 70 y 50 se refieren al peso del hombre)

$$E_{paso_{70}} = (1000 + 6Cs\rho s)0.157 / \sqrt{ts} \dots\dots\dots [3]$$

$$E_{paso_{50}} = (1000 + 6Cs\rho s)0.116 / \sqrt{ts} \dots\dots\dots [4]$$

$$E_{contacto_{70}} = (1000 + 1.5Cs\rho s)0.157 / \sqrt{ts} \dots\dots\dots [5]$$

$$E_{contacto_{50}} = (1000 + 1.5Cs\rho s)0.116 / \sqrt{ts} \dots\dots\dots [6]$$

Cs es el factor de reducción debido al uso de una capa superficial
ps es la resistividad de la capa superficial
ts es el tiempo de duración de la falla.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \dots\dots\dots [7]$$

ρ_s es la resistividad aparente del terreno

h_s es el espesor de la capa superficial

PASO 4: El diseño preliminar debe incluir una red de tierras la cual esta formada por conductores que permitan el acceso a los conductores de puesta a tierra de los equipos y estructuras. La separación inicial estimada de los conductores de la malla para tierra, así como la ubicación de los electrodos verticales (varillas para tierra), deben tener como base la corriente I_G y el área de la subestación que será puesta a tierra.

PASO 5:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{LT} + \frac{1}{20\sqrt{A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h(\sqrt{20/A})} \right) \right] \dots\dots\dots [8]$$

R_g es la resistencia a tierra (Ω)

LT es la longitud total de los conductores enterrados (m)

h Es la profundidad del sistema de puesta a tierra (m)

A es el área ocupada por la red de tierra (m)

PASO 6: A fin de evitar un sobredimensionamiento del sistema de tierra, para el diseño de la malla para tierra, se utiliza únicamente la porción de la corriente de falla $3I_o$ que fluye a través de la malla para tierra hacia la tierra remota. Sin embargo la corriente máxima de la malla para tierra I_G debe considerar la peor localización y tipo de falla, el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema.

$$I_g = S_f \cdot I_f$$

$$I_f = 3I_o \quad \text{por lo tanto: } S_f = I_g / 3I_o$$

I_g : es la corriente simétrica de la malla en A

I_f : es la corriente simétrica de falla a tierra en A (valor rms y debe considerarse el incremento a futuro de este valor).

S_f : es el factor de división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente

de falla que circula a través de la red de tierra con la parte de esta corriente que fluye hacia la tierra remota

I_0 : es la corriente de secuencia cero en A.

La corriente que puede circular en una malla para tierra en casos de falla, se conoce como “corriente máxima de malla”, la cual se determina como sigue:

$$I_G = D_f \cdot I_g \dots\dots\dots [9]$$

I_G : Es la corriente máxima de la red de tierra en A

I_g es la corriente simétrica de la malla (valor rms) en A

D_f es un factor de decremento para el tiempo de duración de la falla (t_c) que esta en función de la relación X/R en el punto de la falla

PASO 7: Si el valor de la máxima elevación de potencial de la tierra en el diseño preliminar se encuentra debajo de la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario análisis alguno. Únicamente se requieren conductores adicionales para la puesta a tierra de los equipos.

$$GPR = I_G \times R_g \dots\dots\dots [10]$$

I_G : Es la corriente máxima de la red de tierra en A

R_g es la resistencia a tierra (Ω)

PASO 8: Calculo del potencial de la malla.

$$E_m = \frac{\rho I_g K_m K_i}{L_m} \dots\dots\dots [11]$$

donde:

ρ resistividad aparente del suelo (Ω/m)

K_m factor geométrico (ec. [12])

K_i factor de irregularidad (ec. [15])

I_g/L_m relación de la corriente promedio por unidad de longitud del conductor efectivamente enterrado en el sistema de puesta a tierra

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{6hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{Kh} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \dots\dots\dots [12]$$

D es el espaciamiento entre conductores paralelos (m)

h es la profundidad de los conductores en la malla para tierra (m)

d es el diámetro del conductor de malla para tierra (m)

Kh es el factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla (ec. [13])

n es numero de conductores equivalentes en cualquier dirección.

Para K_{ii} :

$K_{ii}=1$ para mallas de para tierra con electrodos verticales (varillas para tierra) a lo largo de su perímetro y/o en las esquinas, así como para las mallas con los electrodos verticales (varillas para tierra) a lo largo del perímetro y dentro del área de la malla para tierra.

Para mallas de tierra sin electrodos verticales (varillas para tierra), o con algunos electrodos verticales (varillas para tierra) dentro del área de la malla:

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

calculo de Kh

$$Kh = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \dots\dots\dots [13]$$

h profundidad a la cual esta enterrada la malla para tierra (m)

h_o profundidad de referencia y es igual a 1m

Calculo de n :

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \dots\dots\dots [14]$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p} \quad \text{para mallas de tierra cuadradas y rectangulares}$$

Donde:

L_p = longitud del conductores en la periferia de la malla para tierra en m

$nb=1$ para mallas para tierra cuadradas

Para cualquier otro caso:

$$nb = \sqrt{\frac{lp}{4 * \sqrt{A}}}$$

Donde:

A es el área de de la red de tierras en m²

$nc=1$

$nd=1$

Para el cálculo del factor de irregularidad k_i :

$$k_i=0.644+0.148(n).....[15]$$

Para redes de tierra con electrodos verticales (varillas para tierra) en las esquinas, así como a lo largo del perímetro y distribuidas en la malla para tierra, la longitud efectiva del conductor L_m es:

$$L_m = L_c + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R.....[16]$$

donde:

L_c longitud total de los conductores horizontales es en la red de tierra en m

L_r longitud de un solo electrodo vertical (varilla para tierra) en m

L_R longitud total de los electrodos verticales (varillas para tierra) en m

L_x longitud máxima de la red de tierra en la dirección X en m

L_y longitud máxima de la red de tierra en la dirección Y en m

Cálculo de la diferencia de potencial de paso:

$$E_s = \frac{\rho I_g K_s K_i}{L_s} \dots\dots\dots [17]$$

ρ resistividad promedio del suelo (Ω/m)

K_s factor geométrico (ec. [17])

K_i factor de irregularidad (ec. [15])

Para mallas con o sin varillas para tierra, la longitud efectiva L_s de conductores enterrados es:

$$L_s = 0.75L_c + 0.85LR \dots\dots\dots [18]$$

Para el cálculo de K_s :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \dots\dots\dots [19]$$

D es el espaciamiento entre conductores paralelos (m)

h es la profundidad de los conductores en la red de tierra (m)

d es el diámetro del conductor de la red de tierra (m)

Kh es el factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla (ec. [13])

n es numero de conductores equivalentes en cualquier dirección.

PASO 9: Si el potencial de malla calculado es menor que el potencial de contacto tolerable por el cuerpo humano, el diseño puede darse por concluido. De no ser así el diseño tiene que ser revisado (véase paso 11)

PASO 10: Si ambos, la diferencia de potencial de paso y el potencial de la malla calculados con la tensión preeliminar son menores que los potenciales de paso y contacto tolerables por el cuerpo humano, el diseño necesita únicamente proporcionar la puesta a tierra de los equipos.

PASO 11: Si se exceden los límites de los potenciales de seguridad, se requiere que el diseño del sistema de tierra se revise. Estas revisiones pueden incluir el incrementar el área para el sistema de tierra, espaciamientos adicionales más pequeños entre conductores y varillas para tierra.

PASO 12: Después de satisfacer los requerimientos de diferencia de potencial de paso y potencial de malla, se pueden requerir conductores adicionales de puesta a tierra para los equipos y algunos electrodos verticales (varillas para

tierra). Los conductores adicionales a la malla para tierra se agregan cuando el diseño de la malla para tierra no incluye conductores cercanos al equipo que será puesto a tierra. Los electrodos verticales (varillas para tierra) adicionales pueden colocarse en la base de los apartarrayos, neutro de los transformadores y otros equipos principales. El diseño final debe revisarse con el propósito de eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y otros riesgos asociados.

3.3 Ejemplo de cálculo

En el presente ejemplo de cálculo se intenta mostrar la aplicación de tablas y graficas para el diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación. Los objetivos que se persiguen son los siguientes:

- a) Mostrar la aplicación de las ecuaciones principales y el refinamiento en los conceptos para lograr un diseño final de manera satisfactoria.
- b) Mostrar que las condiciones del diseño usando métodos de cálculo simplificado podrían no ser apropiadas para lograr un diseño seguro y que las ecuaciones aquí empleadas deberán ser usadas con precaución.

Tomando en cuenta los objetivos anteriores, el siguiente ejemplo no intenta ser un diseño de cálculo exhaustivo ni el mejor y más eficiente diseño encaminado a obtener un sistema de tierra totalmente satisfactorio.

Los datos que se describen a continuación servirán de base para el desarrollo del ejemplo:

CONCEPTO	PARAMETRO
Duración de la corriente de falla (tf)	0.5 seg.
Resistividad del suelo (ρ)	400 Ω /m
Espesor de roca triturada (h_s)	0.102 m
Resistividad de roca triturada (ρ_s)	2500 Ω /m
Profundidad de enterramiento de la red (h)	0.5 m
Área disponible para la red (A)	50302 m ²
Impedancia de secuencia positiva	4+j10 Ω
Impedancia de secuencia cero	10+j40 Ω
Factor de división de corriente S_f	0.6
Voltaje de fase a fase en la peor situación	115000 V

La resistividad de la roca triturada es supuesta y se considera un valor conservador basado en mediciones de roca típica. Las impedancias de falla equivalentes y el divisor de corriente están basados en la peor condición de falla posible del sistema, incluyen cualquier crecimiento futuro para los próximos 25 años. Por lo que ningún otro factor de crecimiento será considerado. También se considera que la corriente de falla en la subestación no será liberada por los interruptores con recierre automático. Así que la duración de la corriente de falla y la duración del evento son iguales.

Siguiendo el procedimiento paso a paso de la figura 1 se tiene:

PASO 1. Datos de campo. El área disponible en la subestación es de

$$A=4900 \text{ m}^2.$$

Se supone una resistividad promedio de suelo de $400 \Omega/\text{m}$, obtenida a partir de mediciones de resistividad del suelo, efectuadas en el sitio.

PASO 2: Calculo de la sección transversal del conductor: La corriente de falla simétrica $I_f=3I_o$, esta corriente es usada para dimensionar el conductor.

$$3I_o = \frac{3(115000/\sqrt{3})}{3(0) + (4+4+10) + j(10+10+40)}$$

$$|3I_o| = 3180A$$

Suponiendo el uso de alambre de cobre con 97% de conductividad y una temperatura ambiente de 40°C , la ecuación (1a) y la tabla 2 son usados para obtener la sección transversal, para 0.5 seg. y una temperatura de fusión de 1080°C , para cobre estirado en frío, la sección transversal en Kcmils es:

$$A_{kcmil} = I * K_f * \sqrt{tc} \dots\dots\dots(1a)$$

$K_f=7.06$ Para un cobre con las características anteriores

$$A_{kcmil} = 35 * 7.06 * \sqrt{0.5} = 174.72 \text{ Kcmil}.$$

Tomando en cuenta que $1\text{mm}^2 = 1.974 \text{ Kcmil}$, entonces el área en mm^2 correspondiente es:

$$174.72 \text{ Kcmil} \left(\frac{1\text{mm}^2}{1.974 \text{ Kcmil}} \right) = 88.5\text{mm}^2$$

El área correspondiente a este calibre es 88.50 mm², por lo tanto de tablas le corresponde un calibre 4/0 AWG (107.2mm²), el diámetro es:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(107.2)}{\pi}} = 11.68\text{mm} = 0.01168\text{m}$$

Consecuentemente, en esta etapa, el diseñador puede optar por verificar si el uso de un material menos conductivo (30%) como es el de alambre de acero con recubrimiento de cobre con la imposición de un límite de temperatura mas conservador (700°C), lo cual permitiría el uso de un conductor con un diámetro de 0.01168 m.

Usando la ecuación 2 y la tabla 1 tenemos que:

$$A_{kcmil} = I \frac{197.4}{\sqrt{\frac{TCAP}{tc ar pr} \ln \frac{K0 + Tm}{K0 + Ta}}}$$

$$A_{kcmil} = 35 \frac{197.4}{\sqrt{\frac{3.85}{(0.5)(.00378)(5.86)} \ln \frac{242 + 700}{242 + 40}}} = 337.42 \text{ kcmil}$$

El área correspondiente a este calibre es 170.59 mm², por lo tanto le corresponde un calibre.

350 kcmils (177.3mm²), el diámetro es de 0.01173 m.

En este caso d_{min} =14.73mm, o 0.01473 m de conductor sólido

Por lo tanto y como conclusión, en esta ocasión no es viable el uso del alambre de acero con 30% de recubrimiento de cobre, el cual tiene un diámetro mayor al deseado d =0.01060 m.

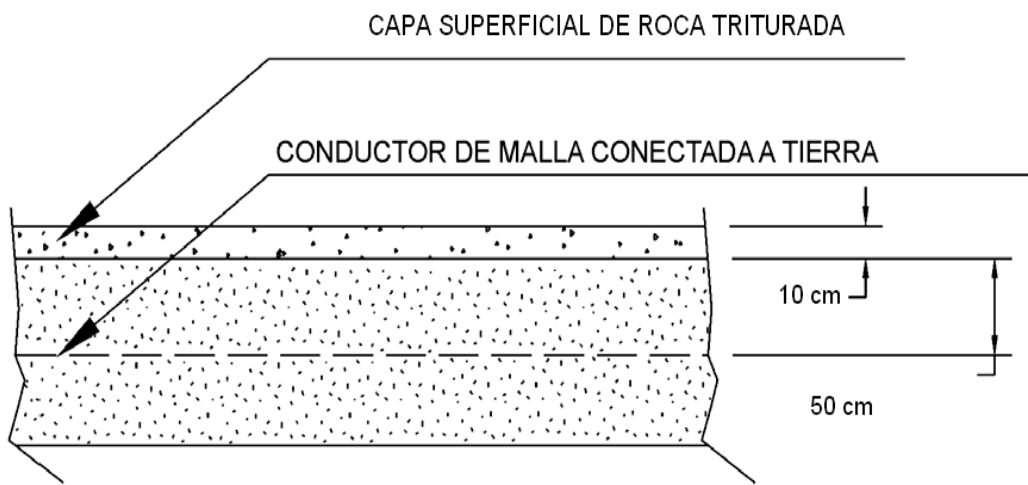
PASO 3: Criterio de potenciales de seguridad. Para la capa superficial de 0.102 m, con una resistividad de 2500 Ω/m, (roca triturada) el factor de reflexión K es:

$$K = \rho_- \rho_+ / \rho_+ \rho_- = 400 \cdot 2500 / 400 + 2500 = -0.72$$

El factor de reducción se obtiene, de acuerdo a la formula 5 como:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09}$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{400}{2500} \right)}{2(0.102) + 0.09} = 0.74$$



Suponiendo que el peso de una persona sea al menos 50 y 70 Kg, se pueden utilizar las fórmulas 3 y 4 para calcular los potenciales de paso y contacto como se muestra a continuación:

$$E_{paso_{70}} = (1000 + 6C_s\rho_s)0.157 / \sqrt{ts}$$

$$E_{paso_{70}} = [(1000 + 6(0.74)(2500))0.157 / \sqrt{0.5}] = 2686 \text{ V}$$

$$E_{paso_{50}} = (1000 + 6C_s\rho_s)0.116 / \sqrt{ts}$$

$$E_{paso_{50}} = [(1000 + 6(0.74)(2500))0.116 / \sqrt{0.5}] = 1985 \text{ V}$$

$$E_{contacto_{70}} = (1000 + 1.5C_s\rho_s)0.157 / \sqrt{ts}$$

$$E_{contacto_{70}} = [(1000 + 1.5(0.74)(2500))0.157 / \sqrt{0.5}] = 838.2 \text{ V}$$

$$E_{contacto_{50}} = (1000 + 1.5C_s\rho_s)0.116 / \sqrt{ts}$$

$$E_{contacto_{50}} = [(1000 + 1.5(0.74)(2500))0.116 / \sqrt{0.5}] = 619.3 \text{ V}$$

PASO 4: Diseño inicial. Para que el sistema de tierra sea seguro se parte de que:

$$V_m = E_{\text{contacto}}$$

No. de conductores horizontales = 16

No. de conductores verticales = 11

No. de varillas propuestas = 24

A = área de la malla = 4900 m²

Longitud total de conductores (L_c) = 1575 m. (solo considerando el área de los equipos mayores)

Longitud total de varillas (L_r) = 10 m.

Longitud de la periferia (L_P) = 350 m.

La malla es en forma de "L", es decir, son dos rectángulos.

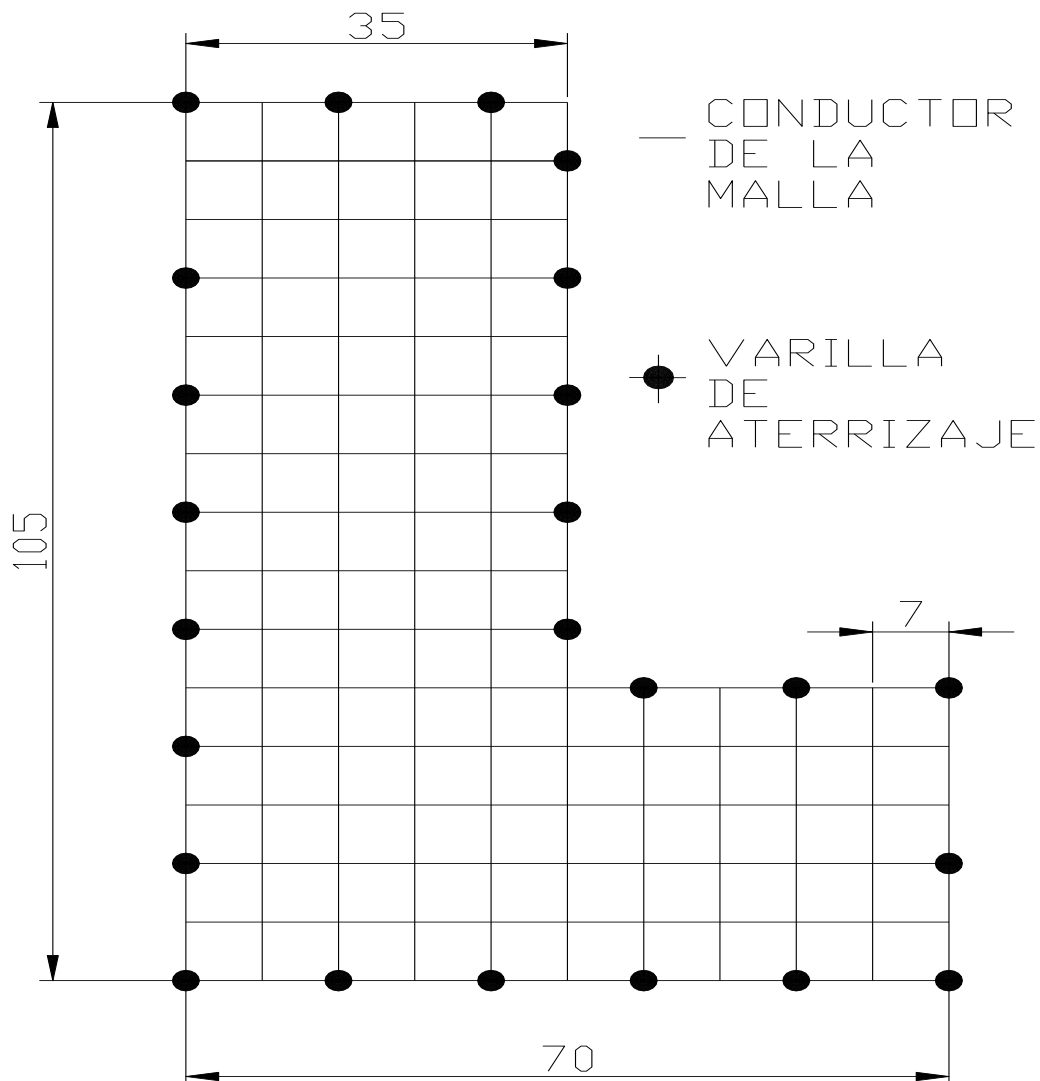


Figura 2: Arreglo inicial propuesto

PASO 5: Determinación de la resistencia de la red. Utilizando la ecuación 8 se puede calcular R_g . Partiendo de los datos de $LT=1755$ m y un área cubierta de 4900 m².

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

$$R_g = 400 \left[\frac{1}{1755} + \frac{1}{\sqrt{20 * 4900}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5(\sqrt{20/4900})} \right) \right] = 2.74 \, \Omega$$

PASO 6: Corriente máxima de inyección a la red, se obtiene con las siguientes ecuaciones.

$$D_f = 1$$

$$S_f = 0.6$$

$$I_G = D_f * S_f * 3 * I_0$$

$$I_G = (1)(0.6)(3180) = 1908 \, A$$

PASO 7: La elevación de potencial de la tierra. Ahora es necesario comparar el GPR con el potencial de contacto tolerable calculado en el paso 3.

$GPR = I_G * R_g = 1908 * 2.74 = 5228$ V, el cual es superior al valor de 838.2 V, calculado como tensión segura y por esta razón deberán efectuarse cálculos adicionales.

PASO 8: Potencial de malla. Antes de calcular el potencial de malla es necesario calcular K_m y K_i usando las ecuaciones correspondientes, se tiene que:

Para el número efectivo de conductores en paralelo:

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d$$

$$L_x = 70 \, m$$

$$L_y = 105 \, m$$

$$na = \frac{2Lc}{Lp}$$

$$na = \frac{2(1575)}{350} = 9$$

$$nb = \sqrt{\frac{Lp}{4\sqrt{A}}}$$

$$nb = \sqrt{\frac{350}{4\sqrt{4900}}} = 1.12$$

$$nc = \left[\frac{(70)(105)}{4900} \right]^{\frac{(0.7)(4900)}{(70)(105)}}$$

$$nc = 1.21$$

$$nd = 1$$

$$n = (na)(nb)(nc)(nd) = 9 \cdot 1.12 \cdot 1.21 \cdot 1 = 12.2$$

$$D = 7$$

$$D = 0.01$$

Es necesario calcular Km, Ki y Kh.

$$Kii = 1$$

$$Kh = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1.0}} = 1.225$$

$$Km = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{Kii}{Kh} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right]$$

$$Km = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{7^2}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.01} + \frac{(7+2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 7 \cdot 0.01} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.01} \right] + \frac{1}{1.225} \ln \left[\frac{8}{\pi(2(12.2)-1)} \right] \right] = 0.76$$

$$Ki = 0.644 + 0.144n = 0.644 + 0.148(12.2) = 2.45$$

Por lo tanto Em:

$$Em = \frac{\rho I G K m K i}{Lc + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{Lr}{\sqrt{Lx^2 + Ly^2}} \right) \right] LR}$$

$$Em = \frac{(400)(1908)(0.76)(2.45)}{1575 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{(70)^2 + (105)^2}{\sqrt{}} \right) \right] 180} = 761.1V$$

Para el cálculo de la diferencia de potencial de paso se tiene que calcular Ks.

$$Ks = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

$$Ks = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{7+0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{12.2-2}) \right] = 0.41$$

$$Es = \frac{\rho I G K s K i}{0.75 Lc + 0.85 LR}$$

$$Es = \frac{400 * 1908 * 0.41 * 2.45}{0.75(1575) + 0.85(180)} = 574.6 V$$

PASO 9: Em contra Vcontacto. El potencial de malla es menor al potencial de contacto tolerable

Esto es 761.1 V contra 838.2 V

Por lo tanto no debe modificarse el diseño de la red.

PASO 10: Es contra Epaso. La diferencia de potencial es calculada y es menor a la diferencia de potencial de paso tolerable por el cuerpo humano

Esto es, 574.6 V es menor que 2686 V

PASO 11: No Se necesitan modificaciones para esta red de tierra, por lo que este paso no se utiliza en este ejemplo.

PASO 12: Se ha podido obtener un diseño seguro. En este punto se adicionan varillas para tierra de apartarrayos cuchillas etc. para completar el diseño de la red de tierras a detalle.

Verificación en campo de los valores calculados

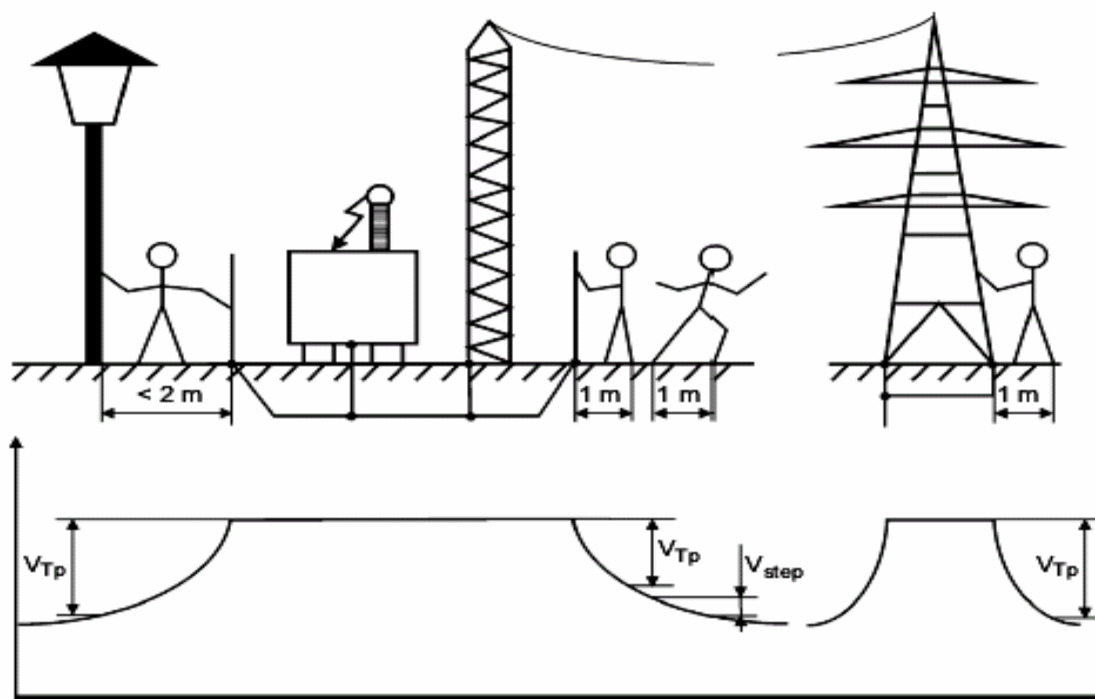
4.1 Procedimiento para la medición de redes de tierra

Una vez que se ha construido la puesta a tierra, se deben hacer las comprobaciones y verificaciones precisas en el sitio, efectuando los cambios necesarios que permitan alcanzar los valores de tensión de paso y de contacto inferiores o iguales a los máximos admitidos. El montaje para la medición debe aproximarse a la situación real.

Los sitios de medición deben tomarse al azar, tanto en la parte externa como interna y en tantos puntos como lo permita la instalación. Se da prioridad a los sitios cercanos a las mallas de cerramiento, puesto que en estos sitios perimetrales existe mayor probabilidad de tensiones altas, en especial los soportes mecánicos de equipo, vallas metálicas de cerramiento, puertas metálicas de acceso, rejillas de ventilación accesibles a personas, carriles para el desplazamiento de transformadores y en general, cualquier otro tipo de elemento que en un momento dado, pueda estar en contacto con las personas, referenciando todos los lugares con una clara identificación (por ejemplo en el interruptor de la desconexión de los operadores, equipo de la subestación, puertas de la cerca del perímetro, bombas de gas y los oleoductos de diesel o aceite, las torres próximas conectadas con la red, a través de los conductores que se extienden y son conectados a la red, y cualquier parte del perímetro cerque donde el público sea probable que entre en contacto). Para efectuar esto se utilizara un voltímetro de resistencia interna de 1000 Ω .

4.2 Medición de tensión de contacto y paso.

"Escenarios peligrosos acerca del voltaje de toque y paso" abajo se muestran los posibles escenarios de riesgo del voltaje de toque y de paso.

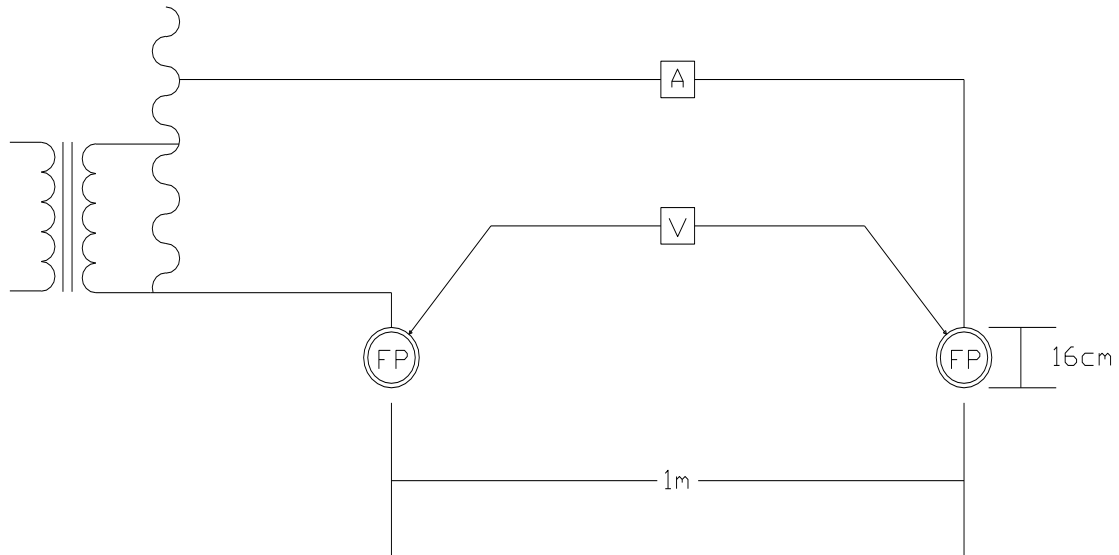


4.2.1 Método Electrodo huella del pie

IEEE Std 80-2000 ha establecido que el pie del adulto promedio tiene un área de 200 cm^2 y puede ser representado por un disco circular de metal con un radio de 8 cm (diámetro de 16 cm). Los electrodos de la huella del pie son necesarios cuando las medidas se hacen para determinar resistencias, R_{fp} (resistencia de toque mano a pie) y R_{fs} (resistencia pie a pie), usadas en las fórmulas tolerancia de potencial o para comprobar cualquier deterioración de las sub-interferencias atmosféricas secundarias, n capas superficiales aislantes

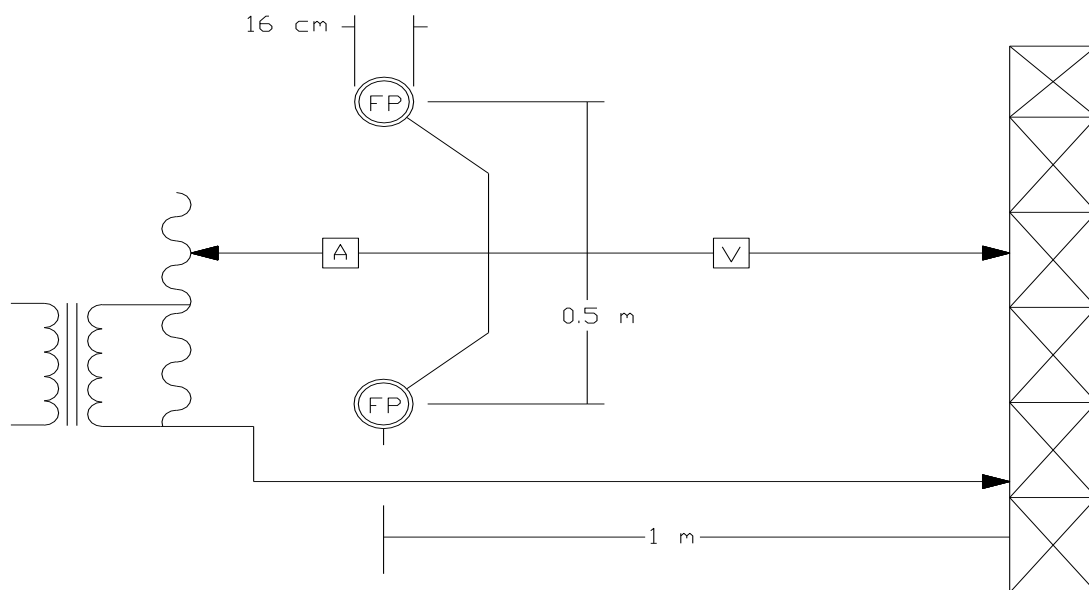
El uso de los electrodos de la huella del pie debe considerar varios factores. El primer factor debe ser la influencia del peso corporal en contacto con el electrodo. El segundo factor debe ser el tratamiento de la superficie de contacto del electrodo de la huella del pie para asegurar una conexión razonablemente corta entre contacto y resistencia. Por ejemplo, el uso de un medio que conduce entre cada electrodo y el terreno, tal como un cojín de goma conductor, una esponja sujeta al electrodo del pie y mojado con una solución de sal, o las lanas de acero soldadas al metal se recomienda el disco. Tercero, la grava aislante o la otra superficie bajo prueba deba empaparse con agua antes de la prueba para simular el tiempo en las peores condiciones.

La resistencia serie, R_{fs} , entre la huella de los dos electrodos se espaciaron 1 m de separación y cargados con por lo menos 20 kg puede ser medido con una fuente, el voltímetro, y el miliamperímetro de 60 Hz. Como se muestra en la siguiente figura.



PASO

Semejantemente, la resistencia, R_{fp} , entre los electrodos de la huella, conectados en paralelo y espaciados 1 m del equipo eléctrico o de estructuras puestas a tierra a la red, puede ser medida con una fuente, el voltímetro, y el miliamperímetro de 60 Hz.



CONTACTO

Típicamente, para un buen grado de roca triturada (mojada) $R_{fp}= 4500 \, \Omega$ (para toque) y $R_{fs}=18\,000 \, \Omega$ (para paso).

4.2.2 Método de simulación de personal

El método de simulación de personal utiliza el electrodo de pie, tomando en cuenta la influencia de la resistencia del cuerpo, R_b , y la resistencia de tierra, R_f , (entre el pie y el suelo) en los valores medidos. Esto es alcanzado usando dos electrodos para representar la influencia de los pies, con un peso de 20 kg para que cada electrodo del pie asegure un buen contacto con un aislador cubierto, y una resistencia para representar la resistencia del cuerpo humano.

El voltaje estimado a través del cuerpo durante la falla de línea a tierra es calculada por:

$$V_b = V_k * \frac{\text{flujo de la corriente de falla al poner a tierra el sistema}}{\text{flujo de la corriente de prueba al poner a tierra el sistema}} \dots\dots\dots(a)$$

El potencial tolerable a través del cuerpo es calculado como:

$$V_b \leq 1000 \frac{I_b}{\sqrt{t}}, en. V \dots\dots\dots(b)$$

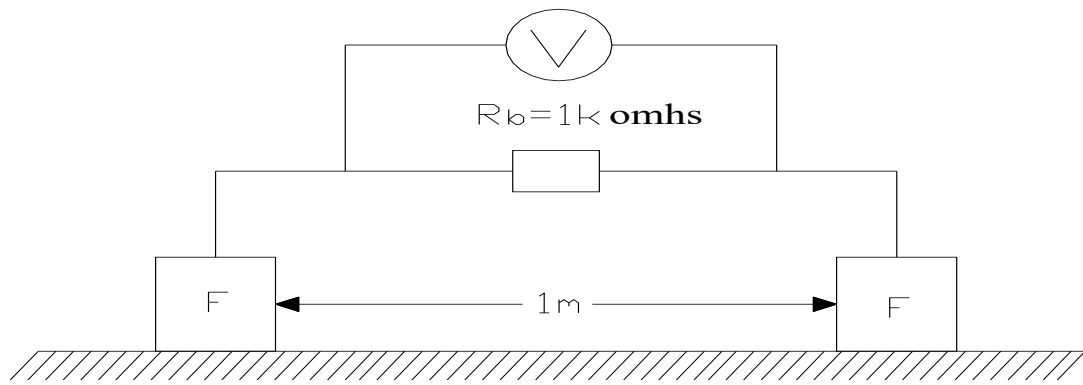
Donde:

V_k = voltaje de paso o toque a través de la resistencia de $1000 \, \Omega$ medido durante la prueba de puesta a tierra del sistema en V

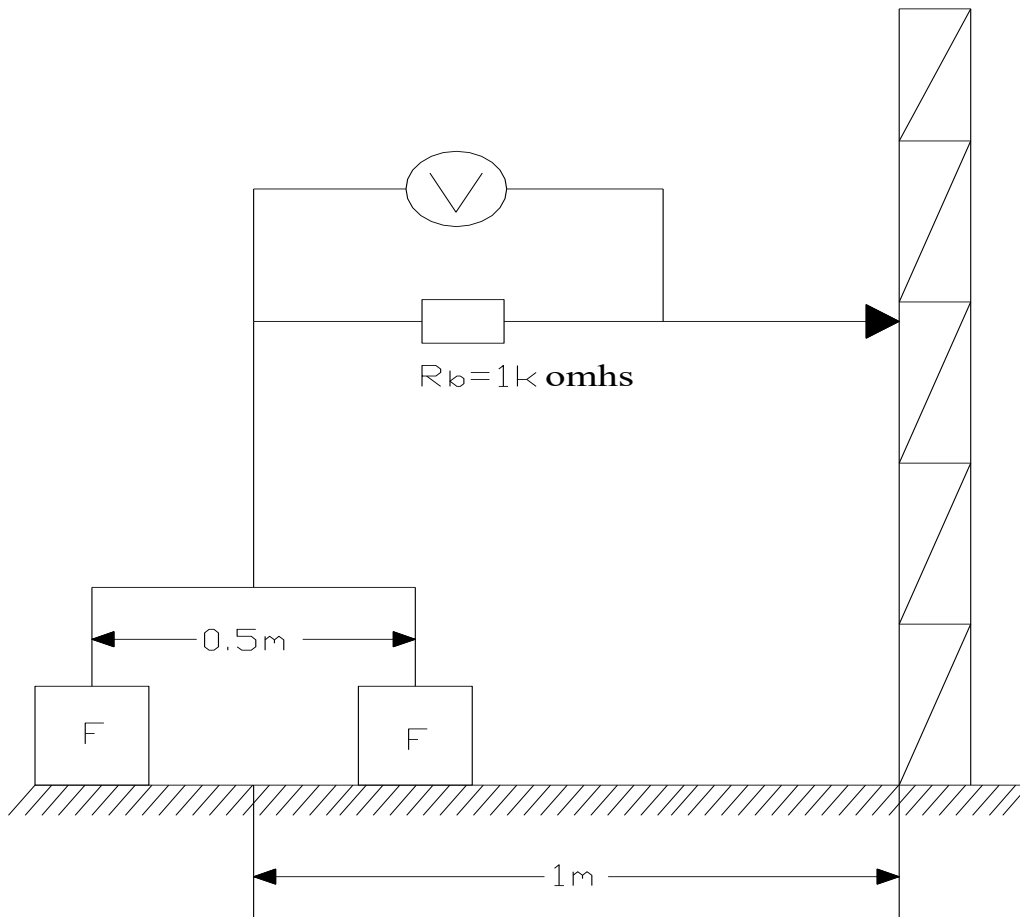
I_b = corriente tolerable por el cuerpo especificada por IEEE Std 80-2000
0.116 A para una persona de 50 Kg.

t = duración de la corriente de falla, en s

Las disposiciones estándar para los voltajes que miden toque y paso se resuelven sobre las medidas específicas y se muestran en la figura de la siguiente pagina. La resistencia convencional del cuerpo humano es representado por una resistencia de $1 \, k\Omega$; ver IEEE Std 80-2000. El voltímetro debe tener una impedancia interna de $100 \, k\Omega$ o más para no influir en las mediciones. Pues la corriente inyectada para la prueba es mucho más pequeña que la corriente de falla máxima prevista, los valores del voltaje de paso y toque registrados usan las disposiciones de prueba de la figura que abajo se muestra se puede extrapolar al máximo los valores, ver Eq (a), y entonces comparar con los valores permitidos, ver Eq (b). El potencial tolerable por el cuerpo se basa en las corrientes no fibriladas del cuerpo ver IEEE Std 80-2000.



PASO



TOQUE

Figura: Medición de los voltajes de paso y toque durante una prueba de bajo voltaje con personal simulado

La resistencia de la roca triturada dentro de la subestación o de la tierra fuera de la subestación que está en contacto con los electrodos del pie se puede estimar del método de simulación de personal.

Durante la inyección de corriente, los potenciales de toque y paso son medidos con y sin conexión de R_b

Entonces, del circuito equivalente de Thevenin para los electrodos del pie son:

$$V_t = \frac{V_{tk}}{R_b}(R_{fp} + R_b)$$

$$V_s = \frac{V_{sk}}{R_b}(R_{fs} + R_b)$$

Donde.

V_{tk}, V_t =voltaje de toque con y sin R_b , en V

V_{sk}, V_s =voltaje de paso con y sin R_b , en V

$R_b=1 \text{ k}\Omega$ resistencia del cuerpo, en Ω (ver IEEE Std 80-2000)

$R_{fp}=1.5 \rho_s$ resistencia de la tierra dos los pies en paralelo, en Ω (véase IEEE Std 80-2000)

$R_{fs}=6.0 \rho_s$ resistencia de la tierra en medio pie, en Ω

ρ_s =resistencia de la capa superficial de tierra, en $\Omega\text{-m}$

Entonces:

$$\rho_s = \frac{10^3 \left(\frac{V_t}{V_{tk}} - 1 \right)}{1.5}$$

O

$$\rho_s = \frac{10^3 \left(\frac{V_t}{V_{sk}} - 1 \right)}{6.0}$$

La ventaja de aplicar el método simulación de personal con y sin resistencia del cuerpo R_b , son que todas las variables (V_t , $V_{t'}$, V_{tk} , V_s , y V_{sk}) están directamente medidas sin algunas suposiciones o medidas de ρ_s y R_f

Se comprende la facilidad que este ensayo puede implicar riesgos para el personal operador y para las personas en general, si los valores de corriente son elevados, y como desconocemos si van a aparecer gradientes de potencial elevados. Las mediciones deben realizarse por personal especializado y extremando las condiciones de seguridad.

Es importante delimitar la zona donde se efectúan las mediciones mediante cintas, carteles de señalización, señales luminosas si fuera necesario, etc. Principalmente en los alrededores de los electrodos que se emplean como toma de tierra auxiliar, que puede estar constituida por varios electrodos de barra.

C Conclusiones

Con este trabajo se espera que se comprenda que un sistema de puesta a tierra sirve para proteger los aparatos eléctricos y electrónicos, pero el objetivo principal de este sistema es proteger la vida de las personas que se encuentren en la vecindad de la instalaciones de la subestación, ya que la corriente eléctrica puede tener efectos parciales o totales, e incluso la muerte.

Se comprobó que ningún método de medición de la resistividad es 100% efectivo, esto no quiere decir que sean malos, sino que hay que realizar varias mediciones con cualquiera de los métodos mencionados para poder obtener un promedio de las mediciones, es decir, un valor más exacto, esto debido a las condiciones del terreno ya que la resistividad puede variar considerablemente en distancias muy pequeñas.

Se ha tratado de presentar una metodología muy práctica para el diseño de puesta a tierra de una subestación eléctrica apoyándose en la norma 80 de la IEEE, pretendiendo que esta tesis sirva como apoyo de trabajo para el ingeniero de campo.

Mientras que el precio puede representar una limitación importante, la confiabilidad debe ser la preocupación primaria, lo que se pretende al diseñar una red de tierra es evitar caer en dos situaciones extremas, la primera es realizar un diseño limitado y por tanto peligroso, la segunda es evitar sobre diseños que resultan costosos.

Una limitación importante que tuve al realizar este trabajo es la falta de información respecto a la medición en campo de la tensión de paso y la tensión de contacto, únicamente pude encontrar información en la norma 81.2 de la IEEE. Debido a que estas dos mediciones (tensión de paso y contacto) son muy importantes para el diseño de la subestación eléctrica yo esperaba encontrar como hacer las mediciones en campo en la NRF 011 de CFE o en el libro 5 de LyFC pero la mención que se hace a las tensiones es teórica.

Bibliografía

- IEEE Std. 80 – 2000; “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, New York.
- IEEE Std 81.2 – 1991, “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System”, New York.
- A. Juárez T., Sistemas de Puesta a Tierra, Editado y distribuido por el autor, México, 2001.
- NRF – 011 – CFE – 2004.
- Luz y Fuerza del Centro, manual de diseño de subestaciones, 2003.

El personal de mantenimiento trata con dos tipos de sistemas de tierra: permanentes y temporales.

a. Sistemas de tierra permanentes. Las tierras permanentes se proporcionan para la operación eficiente, efectiva y segura de los sistemas de potencia eléctrica.

1) *Seguridad*. La conexión a tierra del equipo, que es tierra de todas las partes expuestas o accesibles que no llevan corriente de los dispositivos y equipos eléctricos, reduce los riesgos de contacto del personal.

2) Operación del sistema. La conexión a tierra del sistema, que es la conexión de un punto de un conductor en un circuito eléctrico, estabiliza los voltajes para proteger el equipo y proporciona una base para una adecuada protección con relevadores.

b. Tierra temporal. Una tierra temporal es la tierra de protección personal, que se proporciona para proteger a las personas involucradas en el mantenimiento de la línea eléctrica des-energizada

Mantenimiento seguro al sistema de puesta a tierra

Se debe ejercer un cuidado extremo al inspeccionar y probar la tierra y los sistemas de tierra. Nunca abrir una conexión de tierra a menos que el equipo conectado esté des-energizado. Siempre use guantes de hule y siga los procedimientos del manual de seguridad de la instalación. Esto aplica a los sistemas de tierras instalados al igual que en tramos estructurales o de soporte, a las conexiones de tierra a las cajas de los equipos, y a la tierra que va al neutro de los sistemas primarios y secundarios. La vida y seguridad de todos aquellos que se encuentran en la vecindad de las instalaciones eléctricas depende de que tan cuidadosas y completas sean hechas las inspecciones y el mantenimiento a la tierra y sistemas de tierra.

Inspección visual de las conexiones a tierra

La inspección visual de las conexiones a tierra, a los equipos, a sus carcasas, miembros estructurales, cercas, y neutros de los sistemas se debe hacer cuando menos cada 2 años. Se deben hacer inspecciones más frecuentes donde el tamaño y la importancia del sistema así lo requiera. Las conexiones flojas, rotas, o perdidas se deben reparar o ser reemplazadas como sea necesario. Las conexiones o conectores que muestren signos de sobrecalentamiento, evidenciados por decoloraciones, deben ser reportadas, ya que esto puede ser resultado de una aplicación o instalación mal hecha. Si se encuentran conexiones corroídas o deshilachadas, se deben limpiar y tomar medidas correctivas para evitar la recurrencia de esta situación. Cantidades excesivas de corrosión se debe reportar, ya que ello puede indicar la necesidad de protección catódica en el área.

Corrosión galvánica de la tierra

El uso de metales no similares enterrados en el piso y en los alrededores de plantas generadoras y subestaciones resulta en la formación de grandes celdas galvánicas. Las estructuras de acero o galvanizadas, incluyendo las corazas de los cables, tuberías, y pies de las estructuras, cuando se usan ya sea a propósito o en forma inadvertida en el sistema de tierra, están sujetas a corrosión. Se debe prestar atención a la necesidad de proporcionar medidas para mitigar la corrosión en tales circunstancias.

- a. Varillas de tierra de acero inoxidable. No use varillas de tierra de acero inoxidable. Su desempeño puede ser impredecible debido a su tendencia hacia la corrosión localizada.
- b. Tuberías de agua enterradas. La unión de tuberías metálicas enterradas a las provisiones de un sistema de tierras eléctrico de cobre (que se requiere por código) si se hace en forma incorrecta, puede resultar en corrosión galvánica de la tubería enterrada. La instalación de un arreglo aislado di-eléctricamente en la tubería por arriba del suelo, y antes de la conexión a la tierra de cobre, eliminará el acoplamiento electrolítico de la tierra entre el cable enterrado y el hilo de tierra.

Además de las inspecciones visuales de los sistemas y conexiones de tierra, la medición de la resistencia de tierra se debe hacer periódicamente para determinar si existe tendencia hacia un incremento en la resistencia de tierra de una instalación.

Se deben hacer las siguientes mediciones de la resistencia de tierra para asegurar las prácticas de operación seguras.

- a. Medir la resistencia de la trayectoria de tierra de todas las ramas del sistema de tierra desde el punto de conexión, en la estructura, cubierta del equipo, o conductor neutro, a la conexión de tierra. La conexión de tierra puede ser la parte superior de una varilla de tierra, una tubería de agua o una red de tierra.
- b. Siempre que la resistencia total del circuito de tierra sea en exceso a los valores establecidos, medir la resistencia de las partes individuales del circuito para determinar el punto o los puntos donde la resistencia es excesiva y poder tomar acciones correctivas.
- c. Medir la resistencia entre las puertas y sus postes para asegurar que las conexiones flexibles a tierra son adecuadas.
- d. Medir la resistencia entre las varillas operativas y las manijas de los interruptores operados en grupo para determinar que las conexiones flexibles son adecuadas.

- e. Medir la resistencia de todas las uniones entre las cubiertas metálicas de los cables y su trayectoria hacia tierra.
- f. La prueba de la tierra puede crear condiciones de riesgo si no se tiene el cuidado adecuado. Las corrientes de falla o las ondas de corriente pueden crear voltajes peligrosos entre el punto de la conexión a tierra del equipo y el punto de la conexión a tierra. Guantes de hule, cubiertas, y cosas por el estilo se recomienda para la protección de personal. Las mediciones de resistencia de tierra nunca deben ser intentadas durante tormentas de rayos.

Métodos para reducir la resistencia de la tierra

Las pruebas de tierra pueden indicar que la resistencia de tierra excede los límites de seguridad. Puede ser necesario agregar varillas, incrementar la longitud de las varillas, darle tratamiento al suelo, o hacer una combinación de estos métodos.

- a. Agregar varillas. Un método fácil y preferido de reducir la resistencia de tierra es proporcionar mas varillas. Por ejemplo, dos varillas de tierra, espaciadas apropiadamente y conectadas en paralelo, deben tener una resistencia combinada del orden de 60% de la resistencia de una sola: para tres varillas, 40% de esa resistencia. En general, un espaciamiento apropiado de las varillas significa colocar las varillas cuando menos el largo de una de las varillas.
- b. Incrementar la longitud de la varilla. Proporcionar varillas mas largas es particularmente efectivo donde los suelos de baja resistencia están muy por debajo de la superficie para ser alcanzados con las varillas de longitud estándar de 8 a 10 pies (2.5 a 3 metros). La cantidad de mejora con varillas mas largas depende de la profundidad de los suelos con baja resistencia. Se observa un decremento de la resistencia más bien brusco cuando la varilla ha sido enterrada al nivel del suelo de baja resistencia. La resistividad del suelo generalmente (pero no siempre) con la profundidad porque normalmente se tiene un incremento en el contenido de humedad.
- c. Tratamiento del suelo. Tradicionalmente se han utilizado varios métodos para tratar el suelo alrededor de las varillas de tierra.
 - 1) Cloruro de sodio, Cloruro de calcio, magnesio, y sulfato de cobre se usan como tratamiento. La bentonita, una arcilla natural, trabaja bien, excepto en entornos muy secos. Se recomienda una mezcla pre-empacada de 75% de yeso, 20% de bentonita, y 5% de sulfato de sodio. Las varillas de tierra pueden también estar encapsuladas en concreto en lugar de usar tratamiento del suelo.

- 2) El tratamiento del suelo es un método confiable y efectivo para reducir la resistencia del suelo y es particularmente adecuado para mejorar un suelo con alta resistencia. El tratamiento tiene ventajas donde es impracticable instalar varillas largas debido a los estratos rocosos u otras obstrucciones para seguir perforando. Cuando el espacio es limitado, se entierra en el suelo una tubería tile a una profundidad de unos pocas pulgadas (milímetros) alejada de la varilla de tierra y se llena con aproximadamente 1 pie (0.3 metros) del nivel de tierra con tratamiento químico. El segundo método es aplicable cuando se puede perforar una trinchera circular o semicircular alrededor de la varilla de tierra para que soporte los químicos. Los químicos se deben mantener varias pulgadas alejados del contacto directo con la varilla de tierra para evitar la corrosión. El primer tratamiento requiere generalmente, 50 a 100 libras (22 1 45 kilogramos) de material y retendrá su efectividad por 2 a 3 años. Cada relleno de químicos amplía su efectividad por periodos más largos, incrementando así los intervalos de tratamiento. Para iniciar la acción rápidamente, el primer tratamiento de químicos debe ser inundada.
- d. Varillas especialidades. En lugar de agregar varillas adicionales o varillas más largas, se puede usar un sistema de tierra con tubos de cobre. Existe una lista de sistemas de tierra que usa un tubo de cobre lleno de sales metálicas y esta disponible en varias longitudes. Como este método usa sales metálicas no es recomendado normalmente excepto como última posibilidad. El tubo también esta disponible como una unidad recta o en forma de L que permite instalar el tubo en una trinchera poco profunda. Cambios en la presión atmosférica “bombean” el aire a través de agujeros para respirar en la cabeza del tubo. La humedad en el aire condensa dentro del tubo para moverse lentamente dentro de la cama de sales metálicas, proporcionando un sistema de baja resistencia auto mantenido con una vida útil esperada mucho mayor que las varillas de tierra convencionales.
- e. Combinados convencionales. Una combinación de métodos puede tener ventajas y ser necesario para proporcionar la resistencia de tierra deseada. El agregar varillas especiales o una combinación de varias varillas y tratamiento del suelo puede ser efectiva. Varias varillas mas largas son efectivas donde las combinaciones permiten este tipo de instalación.