



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

**Guía para el diseño de un sistema de tierras en una
subestación de 115Kv/23Kv**

T E S I S
que para obtener el título de :
Ingeniero Eléctrico Electrónico

PRESENTAN:
Gustavo Becerril Santiago
Georgina Estephany Galicia Sánchez

Director de Tesis: Ing. Hugo Alfredo Grajales Román



noviembre 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A Dios

A mis padres por la vida misma y por qué gracias a ellos soy quien soy, los amo.

A Estela por el gran ejemplo de mujer que es, el amor y el apoyo infinito.

A Armando por todas sus enseñanzas y aprendizajes.

A mis hermanos Samantha, Kristian y Roberto por el amor, la paciencia, el apoyo, las risas, el llanto, por ser ejemplo y por toda esta vida compartida.

A Paola que es una luz en mi vida.

A mi gran familia, mi abuela, tías, tíos, primas y primos por ser, por dar y por recibir.

A mi tótem humano, Sara, Eliot y Dulce que son la fortaleza en mi vida y la guía en mi camino.

A Diana mi gran amiga con quien he aprendido y sigo aprendiendo.

A Gustavo por ser único y estar en mi vida, gracias por hacer posible esta gran aventura.

A mis amigos de la universidad Yusura, Patricia, Israel, Jorge, Raymundo, José Luis, Oscar Herrera, Oscar y Luis, por hacer de este un buen viaje.

Georgina Estephany

Agradecimientos

A mis padres, por todo el apoyo y cariño incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida, porque son y serán siempre lo más importante para mí.

A mi hermano, que con su gran ejemplo me ha motivado para alcanzar grandes metas y gracias a su ayuda este momento se hizo realidad; a mi cuñada, por su aprecio, comprensión y por traer a este mundo la alegría de nuestras vidas, mi sobrino.

A Fany y Alejandro, por su invaluable amistad y los excelentes momentos que hemos compartido estos años.

Gustavo

ÍNDICE

Introducción	5
Capítulo I	
Componentes principales y función de los mismos dentro de una subestación en el sistema de tierras.	
1.1 Sistema de tierras	6
1.2 Componentes principales del sistema de tierras	6
1.3 Características de los elementos del sistema de tierras	8
1.4 Consideraciones de diseño	8
1.5 Tipos de electrodos	9
1.6 Diseño de malla	11
1.7 Condiciones difíciles	12
Capítulo II	
Consideraciones para el diseño de un sistema de tierras.	
2.1 Seguridad y condiciones de riesgo	15
2.2 Resistencia del cuerpo humano	16
2.3 Protecciones atmosféricas	18
2.4 Libramiento de una falla	19
2.5 Situaciones típicas de choque	21
Capítulo III	
Procedimiento de diseño de una red de tierras en base a la normatividad.	
3.1 Criterios de diseño	29
3.2 Procedimiento del diseño de una red de tierras en base a la normatividad	36
3.3 Revisión del diseño	56
Capítulo IV	
Memoria de cálculo	58
Capítulo V	
Conclusiones y recomendaciones	68
Bibliografía	70

Introducción

Las subestaciones eléctricas deben contar con sistemas de protección que garanticen el óptimo funcionamiento de los equipos, la seguridad de las personas y proveer un servicio de energía eléctrica eficiente. Por esto, es fundamental un diseño correcto de la red de las tierras que se instalará en cada subestación, considerando las características eléctricas de todo el sistema en cuestión así como también los factores externos que pudieran afectar directamente a la zona considerada.

El objetivo es diseñar una guía para la elaboración de un sistema de tierras en una subestación que tome como base las normas establecidas, para facilitar el diseño de una subestación eléctrica segura, confiable y capaz de suministrar energía a los distintos procesos derivados.

Se espera obtener con la elaboración de esta tesis una guía que pueda utilizarse en el diseño de un sistema de tierras dentro de una subestación 115/23 Kv , tomando como base la normatividad establecida y poder así aplicarla de manera general en subestaciones con las mismas características.

Al basar nuestra propuesta en la NOM-SEDE-001-2005, así como el Estándar 80-2000 de la IEEE y la norma NRF-011-CFE-2004 estamos asegurando que el diseño de este sistema de tierras cumplirá en todo momento con las normas, brindando así seguridad y confiabilidad en el sistema

Capítulo 1

Componentes principales y función de los mismos dentro de una subestación en el sistema de tierras.

1.1 Sistema de tierras

Es el conjunto de elementos tales como la red o malla de conductores, electrodos, conectores y conductores de puesta a tierra de los diversos equipos, que interconectados en una forma adecuada en un determinado terreno nos permita obtener un circuito eléctrico de baja resistencia para poder conectar a tierra todos los elementos de la instalación que así lo requieran.

Los procedimientos para diseñar sistemas de tierras se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger.

1.2 Componentes principales del sistema de tierras

El sistema de tierra de una subestación se compone principalmente de los siguientes elementos:

- *Conductores.* Estos sirven para formar la retícula del sistema de tierras y para realizar la conexión a tierra de los equipos.

El conductor, si es de calibre 4/0 o mayor, no requiere de protección, excepto en casos donde esté expuesto a daño físico severo. En caso de ser calibre #6 debe fijarse a la construcción o debe correr por un tubo conduit. Los calibres menores, deben correr siempre por tuberías conduit. En el caso de las tuberías conduit, éstas deben ser eléctricamente continuas; esto es, deben estar conectadas a tierra en ambos extremos.

Estos cables no deben ser de aluminio o de cobre con aluminio porque se corroen cuando están en contacto con la tierra o con el cemento. Por ello, la Norma Oficial Mexicana sólo permite el uso de aluminio como conductor desde una altura mínima de 450 mm sobre el suelo.

- *Electrodos.* Son las varillas que se clavan en terrenos más o menos blandos y que sirven para aumentar la longitud del conductor de la red de tierra en terrenos pequeños o en terrenos secos para encontrar zonas más húmedas y, por tanto, con menor resistividad eléctrica. Son especialmente importantes en terrenos desprotegidos de vegetación y cuya superficie, al quedar expuesta a los rayos del sol, está completamente seca.
- *Conectores.* Son elementos que sirven para unir a la red de tierra los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, etc. Los conectores de conductores de puesta a tierra con los electrodos pueden ser del tipo de soldadura exotérmica, conectores a presión, abrazaderas u otros medios aprobados por la Norma Oficial Mexicana y no deben tener soldaduras con materiales de puntos de baja fusión (estaño, plomo, etc.) para evitar falsos contactos, ya que pierde características de seguridad la malla, si se llegara a abrir.

En nuestro país, se prefieren las conexiones exotérmicas (de marcas: Cadweld, Thermoweld, o Mexweld) para redes de tierras de subestaciones de alta potencia. Las abrazaderas a usarse en sistemas de puesta a tierra deben ser adecuadas para el número y tipo de conductores. Además, deben de ser compatibles con los materiales de los conductores y los electrodos de puesta a tierra, y cuando se usen enterradas, deben ser del tipo apropiado, generalmente *BURIED*.

En los sistemas de tierra se utilizan tres tipos de conectores:

- ✓ *Conectores atornillados.* Se fabrican con bronce de alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material está formado por bronce al silicio que proporciona alta resistencia mecánica y a la corrosión.
- ✓ *Conectores a presión.* Se forman por una pieza hueca, en cuyos extremos se introducen las dos terminales del cable que se va a empalmar y mediante una prensa especial, con dados intercambiables según los calibres de los conductores, se producen la unión al comprimirse el material citado. Estas conexiones pueden soportar una temperatura máxima de 350°C.
- ✓ *Conectores soldados.* Requiere de moldes de grafito de diferentes calibres en donde por medio de la combustión de cargas especiales, que producen temperaturas muy altas, se funden las puntas terminales que se van a soldar provocando una unión que soporta temperaturas de fusión del conductor. Estos conectores son económicos y seguros, por lo que se usan con mucha frecuencia.

Todos los tipos de conectores deben soportar la corriente de la red de tierra en forma continua.

1.3 Características de los elementos del sistema de tierras

- Resistencia a la corrosión, para retardar su deterioro en el ambiente donde se localiza.
- Conductividad eléctrica, de manera que no contribuya sustancialmente con las diferencias de potencial en el sistema de tierras.
- Capacidad de conducción de corriente, la superficie para soportar los esfuerzos térmicos durante las condiciones más adversas impuestas por la magnitud y duración de las corrientes de falla.
- Resistencia mecánica, que soporte los esfuerzos electromecánicos, además del daño físico que puedan causar los equipos pesados dentro de la subestación.

1.4 Consideraciones de Diseño

En el diseño de un sistema de tierras existen tres tipos de sistemas a considerar estos son:

- *Sistema radial.* Este sistema es el más económico, pero el menos seguro, ya que al producirse una falla en cualquier parte de la subestación se obtienen altos gradientes de potencial. Se utiliza para corrientes de tierra baja.
- *Sistema de anillo.* Consiste en instalar un cable de suficiente calibre (aproximadamente 100MCM) alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la subestación, conectando derivaciones a cada aparato mediante un cable más delgado(500MCM O 4/0 AWG). Es un sistema menos económico que el anterior, los potenciales peligrosos disminuyen al disiparse la corriente de falla por varios caminos, lo que origina gradientes de potencial menores. Se utiliza para corrientes de corto circuito intermedias.
- *Sistema de Malla.* Es el sistema más utilizado en los sistemas eléctricos y consiste, como su nombre lo indica, en una retícula formada por cables de cobre (aproximadamente 4/0 AWG), conectada a través de electrodos de varillas copperweld a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad. Este sistema es el más eficaz, pero también el más caro de los tres.

Otra de las consideraciones es el uso de un sistema combinado de varillas verticales y conductores horizontales, el cual tiene las siguientes ventajas:

- a) Con los conductores horizontales (malla) se reduce el peligro de los altos voltajes de paso y de contacto en la superficie de tierra, las varillas de tierra estabilizan el diseño de tal sistema combinado, ya que con la lluvia la resistividad de la capa superior del suelo puede variar mientras que la resistividad de las capas profundas del suelo permanece constante.
- b) Las varillas que penetran las capas del suelo más bajas son más efectivas para disipar la corriente de falla, cada vez que un suelo de dos capas es encontrado y la capa superior del suelo tiene resistividad más alta que la inferior.
- c) Las varillas moderarán considerablemente el incremento de los gradientes de paso en la superficie cerca del perímetro de la malla.

1.5 Tipos de Electroodos

Es muy importante tomar en cuenta que por norma, los electrodos de puesta a tierra de los sistemas eléctricos deben estar accesibles y preferiblemente en la misma zona del puente de unión principal del sistema. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana, el sistema de electrodos de puesta a tierra se forma interconectando los siguientes tipos de electrodos (siempre que existan):

- Tubería metálica de agua enterrada.
- Estructura metálica del inmueble.
- Electrodo empotrado en concreto.
- Anillo de tierra.

En caso de no disponer de alguno de los anteriores, se deben usar uno o más de los electrodos especialmente contruidos:

1. Electroodos de varilla o tubería

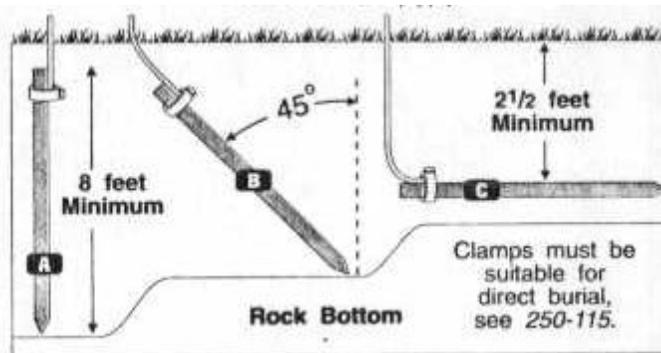
De acuerdo con la NOM los electrodos de varilla y tubo, no deben tener menos de 2,40 m de largo y deben instalarse de tal modo que por lo menos 2,40 m de su longitud esté en contacto con la tierra.

Las varillas de metales no ferrosos deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 13 mm, y las demás de por lo menos 16 mm. Las tuberías deben tener un diámetro no inferior a 19 mm, y si son de hierro, deben tener una protección contra corrosión en su superficie.

Las varillas de acero con un recubrimiento de cobre de 10 milésimas de pulgada dura un promedio de 35 años en un suelo promedio; si tiene un recubrimiento de 13 milésimas de pulgada dura hasta 45 años. En cambio, una varilla de acero galvanizado tiene una vida estimada de 15 años.

Estos electrodos se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanzan la profundidad adecuada. En caso de terrenos rocosos o de tepetate, las varillas no pueden meterse de esa manera; se doblan o solamente no pueden entrar.

Cuando la roca está a menos de 2,40 m, estos electrodos pueden meterse en diagonal hasta con un ángulo de 45 grados de la vertical. Pero, si no es este el caso, se deben enterrar horizontales en una trinchera abierta para el caso a 800 mm de profundidad por lo menos.



La alternativa al golpeado es perforar un agujero, instalar la varilla y rellenar nuevamente el agujero, aunque no se obtiene la compactación ni la baja resistencia de contacto de la varilla percutida.

2. Electrodo de Placa

Los electrodos de placa no deberán tener menos de 0,2 metros cuadrados de superficie en contacto con el suelo. Y las placas de acero o fierro deberán tener por lo menos 6,4 mm de espesor. Si son de material no ferroso deberán tener por lo menos 1,52 mm de espesor.

3. Estructuras Metálicas Enterradas

La NOM menciona la puesta a tierra mediante sistemas de tuberías o tanques enterrados. Pero, puede ser cualquier clase de estructura metálica subterránea.

4. Ademe de Pozos

Las normas americanas MIL-STD-1542B, MIL-HDBK-419 y MIL-STD-188-124 no recomiendan el uso de los ademes de pozos para lograr una baja impedancia a tierra. Las normas mencionadas hacen énfasis en que los ademes presentan muy baja resistencia a tierra en c.d., pero, no reducen la impedancia en corriente alterna, y, mencionan que si los ademes metálicos son utilizados como parte del sistema de tierras, no deben ser los únicos elementos en contacto con el suelo.

Los tipos de electrodos no permitidos por la norma oficial mexicana son:

- ❖ Tuberías de gas enterradas.
- ❖ Electrodo de aluminio.

Es importante hacer notar que en lugares donde existe congelamiento de la superficie, la profundidad de enterramiento es mayor a la convencional; además, en los cálculos debe considerarse como aislada la parte del sistema de tierras que puede estar en contacto con la tierra congelada.

1.6 Diseño de Malla

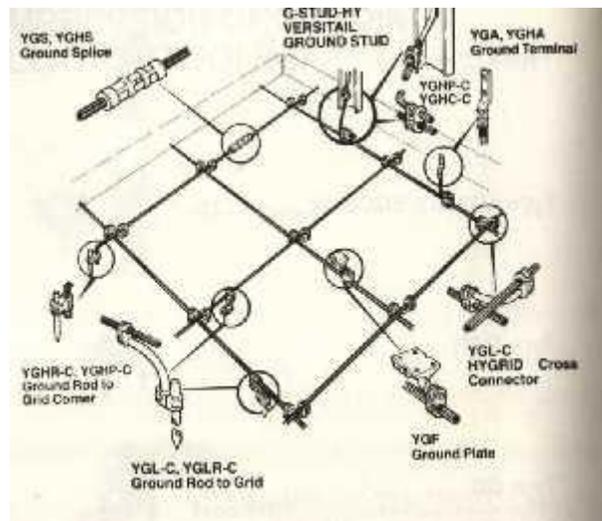
La Norma Oficial Mexicana de instalaciones eléctricas requiere de un sistema enmallado de tierra con múltiples electrodos y conductores enterrados, cuando están involucradas tensiones y corrientes eléctricas muy altas, con el fin de minimizar los riesgos al personal en función de la tensión eléctrica de paso y de contacto.

La malla consta de una red de conductores enterrados a una profundidad que usualmente varía de 0,30 a 1,0 m, colocados paralela y perpendicularmente con un espaciamiento adecuado a la resistividad del terreno y preferentemente formando retículas cuadradas.

El cable que forma el perímetro exterior de la malla debe ser continuo, de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo eléctrico de la subestación o planta generadora. Con ello, se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y terminales cercanas.

En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente con soldadura exotérmica entre sí y en los puntos donde se conectan los equipos que pudieran presentar falla o, en las esquinas de la malla, los conductores deben conectarse a electrodos de varilla o tubo de 2,4 m de longitud mínima, clavados verticalmente.

Los cables que forman la malla deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de estructuras o equipo para facilitar la conexión a los mismos, ya que es una práctica común de ingeniería aterrizar a dos cables diferentes todos los equipos.



Los cables empleados en las mallas de tierra son de: acero, acero inoxidable, acero galvanizado, y cobre. Para evitar la corrosión galvánica en terrenos de baja resistividad, algunas compañías eléctricas desde el diseño utilizan en sus mallas de tierras, cable de cobre estañado para bajar el potencial electronegativo entre los diferentes metales. El factor principal en la selección del material es la resistencia a la corrosión. El cobre es el material más utilizado porque es económico, tiene buena conductividad, es resistente a la corrosión y tiene un punto elevado de fusión.

1.7 Condiciones Difíciles

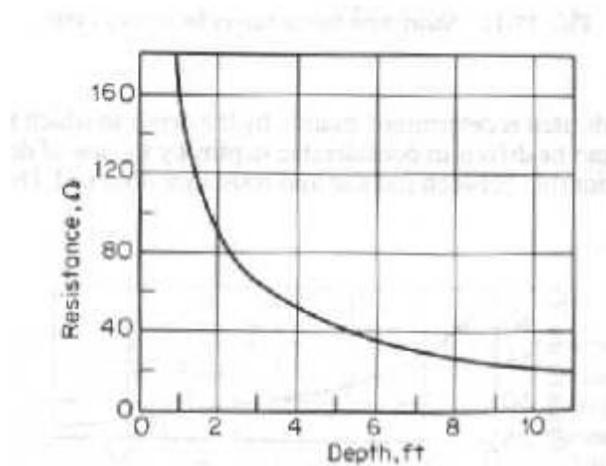
La NOM permite para los sistemas con un electrodo único que conste de una varilla, tubería o placa, que no tiene una resistencia a tierra de 25 ohms o menos, que se complemente con electrodos adicionales de los tipos mencionados anteriormente, separados por lo menos una distancia de 1,83 m entre sí. Cuando la resistencia del electrodo único mencionado, excede del valor buscado, esa resistencia se puede reducir de las siguientes maneras:

a) Varilla de mayor diámetro

Usando varillas de 19 mm en lugar de varillas de 13 mm se logra una reducción en la resistencia a tierra de hasta un 10% máximo.

b) Varillas más largas

Para los casos donde las capas superiores de la tierra son de arena y donde a gran profundidad se encuentra una capa de terreno húmedo, existen varillas que se acoplan unas a otras para lograr longitudes hasta de 15 m.



Por lo general, doblando el largo, se obtiene una reducción del 40% de resistencia a tierra. Otra ventaja es que con el uso de varillas largas, se controla el gradiente de potencial en la superficie.

c) Varillas en paralelo

El colocar varias varillas en paralelo es una manera muy efectiva de bajar la resistividad. Pero, las varillas de tierra no deben ser colocadas muy cerca una de otra, porque cada varilla afecta la impedancia del circuito, por los efectos mutuos.

La NOM establece que la distancia entre ellas o de cualquier electrodo, no debe ser menos de 1,8 m, aunque se recomienda que estén separadas más del largo de cualquiera de ellas.

d) Tratando químicamente el terreno

Cuando la resistencia a tierra no es lo suficientemente baja, y los métodos anteriores no son posibles, se tiene que mejorar el terreno mismo mediante productos químicos. Pero, tiene el inconveniente de ser una solución costosa y que bajo ciertas circunstancias se requiere de mantenimiento.

El problema de lograr una resistencia baja en la roca así como en otros suelos de alta resistividad, está asociada con el material en contacto con el electrodo y la compactación que éste recibe al rellenar el agujero.

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, no ser corrosivo y a la vez buen conductor eléctrico, los más utilizados son: la bentonita, compuestos como el sulfato de magnesio o de sulfato de cobre, compuestos químicos patentados como THOR GEL, el GEM de Erico, el GAP de Alta Conductividad 2000 S.A, etc.

Capítulo 2

Consideraciones para el diseño de un sistema de tierras.

2.1 Seguridad y condiciones de riesgo

-Seguridad

El sistema de tierras tiene como objetivos principales:

- Proporcionar un medio para drenar las corrientes eléctricas bajo condiciones normales y de falla, sin exceder alguno de los límites de operación, de equipo o bien afectar de forma adversa la continuidad del servicio.
- Asegurar que cualquier persona que se encuentre dentro del área que ocupa el sistema de tierras, no esté expuesta tan fácilmente al peligro de una descarga eléctrica.

-Condiciones de riesgo

Circunstancias que pueden producir posibles accidentes de descargas eléctricas:

- Corrientes de falla a tierra relativamente altas en relación con el área del sistema de tierras.
- Resistividad del suelo y distribución de las corrientes de tierra tales que pueden producirse elevados gradientes de potencial en la superficie de la tierra.
- Presencia de un individuo en el punto, tiempo y posición tales que el cuerpo sea en puente entre dos puntos de una elevada diferencia de potencial.
- Ausencia de suficiente resistencia de contacto u otras resistencias en serie que limite la corriente a través del cuerpo humano a un valor seguro bajo las circunstancias anteriores.
- Duración de la falla, del contacto del cuerpo y por lo tanto del flujo de corriente a través del cuerpo por un tiempo suficiente para causar daño dada la intensidad de la corriente.

2.2 Resistencia del cuerpo humano

Para la corriente directa y para la corriente alterna a frecuencia nominal, el cuerpo humano puede representarse por una resistencia. Esta resistencia está medida entre extremidades, esto es, entre mano y ambos pies o entre un pie y el otro.

En cualquiera de los casos el valor de esta resistencia es difícil de establecer. La resistencia del cuerpo interno, no incluyendo la piel es de aproximadamente 300 ohm, sin embargo cuando se incluye la piel, e incluso el factor estado de ánimo de las personas, los valores de resistencia del cuerpo humano están dentro del rango de 500 a 3000 ohms.

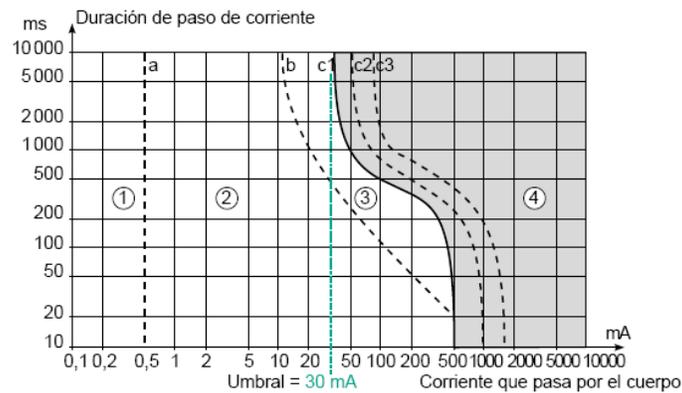
Para altos voltajes y corrientes, la resistencia disminuye por quemaduras o incluso perforaciones de la piel en el punto de contacto. Sin embargo la resistencia de contacto de una mano húmeda puede ser muy baja a cualquier voltaje.

El valor de la resistencia de los zapatos es incierto, aunque esta dependa de las condiciones, puede ser mucho más bajo que para la piel húmeda.

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

- La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero.
- Se ha seleccionado el valor de 1000 ohms para representar el valor de resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano o entre un pie y el otro.

Los efectos fisiológicos más comunes que se presentan al ir incrementando la corriente eléctrica que circula por el cuerpo se describen en la siguiente gráfica.



- | | |
|---|--|
| Zona 1: percepción | Zona 4: riesgo de fibrilación ventricular (parada cardíaca) |
| Zona 2: gran malestar y dolor | C₁: probabilidad 5% |
| Zona 3: contracciones musculares | C₃: probabilidad > 50% |

La gráfica adjunta está tomada de la norma IEC 60479

- Una corriente de 0.5 mA es conocida como la corriente del umbral de percepción, y, la persona apenas la percibe como un cosquilleo.
- Las corrientes en la zona 2 (entre 0.5 mA y la curva b) son desagradables y permiten a la persona soltar el objeto energizado sin dañar su destreza manual.
- Las corrientes en la zona 3 son dolorosas y hacen difícil para la persona soltar el objeto energizado.
- En la zona 4 la persona puede sufrir de fibrilación ventricular, o un paro cardíaco, que le pueden causar la muerte. Entre las curvas c1 y c2 la probabilidad es del 5%; entre c2 y c3 de 50%, y arriba de c3, de más del 50%.

Todos los sistemas eléctricos deben diseñarse para que la magnitud y duración de la corriente que puede circular por el cuerpo humano siempre sea menor que la que cause fibrilación.

De acuerdo con los estudios de Dalziel, la corriente permisible a través del cuerpo humano por un periodo corto de tiempo, 0.03-3s, sin causar fibrilación ventricular puede ser determinado como

$$I_b := \frac{0.116}{\sqrt{T}}$$

Donde

I_b (A) Es la corriente máxima tolerada por el corazón sin fibrilar.

T (s) Duración del tiempo de disparo de la protección

Basado en muchos estudios, la fórmula anterior puede considerarse como conservadora para corriente eléctrica a 60 Hz, y para una persona de 50 kg. (De 70 kg, la constante es 0.157).

2.3 Libramiento de una falla

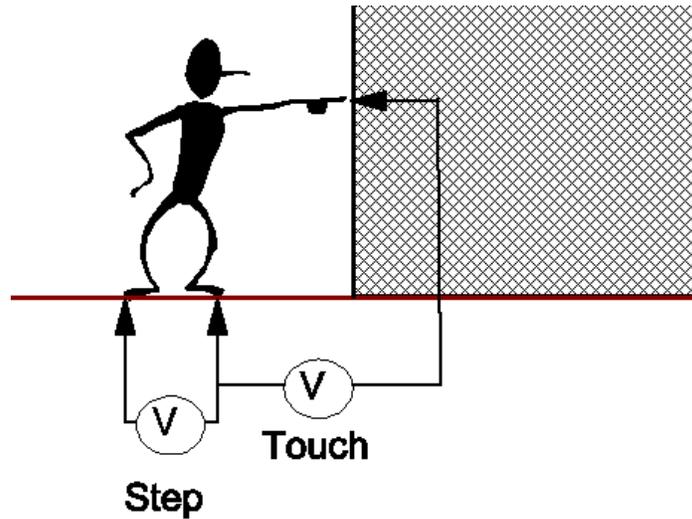
Considerando la importancia de la duración de la falla, e implícitamente el factor de exposición del accidente, la rapidez de libramiento de falla a tierra es ventajosa por dos razones:

1. La probabilidad de un choque eléctrico se reduce enormemente debido a la rapidez del libramiento de falla, en contraste con las situaciones en las cuales la corriente de falla puede persistir por algunos minutos.
2. Las pruebas y experiencias demuestran que la probabilidad de un gran daño o la muerte también se reduce si la duración de la corriente que fluye a través del cuerpo es muy corta, el valor de la corriente permisible puede sin embargo estar basado en el tiempo de libramiento de los dispositivos de protección.

2.4 Situaciones típicas de choque

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas, debidas a disturbios atmosféricos o fallas del equipo, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan peligro a los operadores o en general al personal que labora en el local de las instalaciones. Intensidades del orden de miles de amperes, producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto o puntos de contacto a tierra y si además, se da la circunstancia de que algún ser viviente se apoye en dos puntos, entre los cuales existe una diferencia de potencial debido al gradiente antes indicado, puede sufrir una descarga de tal magnitud que lo dañe severamente. En tal situación, la corriente que circula por su cuerpo aumenta y si pasa por algún órgano vital como el corazón, puede resultar en fibrilación ventricular y causar la muerte. Por esto, es necesario considerar los siguientes conceptos:

- ❖ Tensión de Paso (E_p): es la diferencia del potencial superficial que experimenta una persona parada, con los pies a 1 metro de separación y sin hacer contacto con algún objeto aterrizado.
- ❖ Elevación del potencial de tierra (GPR): Es el máximo potencial eléctrico que una rejilla 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 es igual a la corriente máxima de rejilla multiplicada por la resistencia de la misma.
- ❖ Tensión de Contacto (E_c): es la diferencia de potencial entre la elevación de potencial de tierra y el potencial superficial en el punto en donde la persona esta parada, cuando al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura metálica aterrizada.
- ❖ Tensión de Malla (E_m): es la máxima tensión de contacto dentro de una malla en una rejilla para tierra.
- ❖ Tensión Transferida: es un caso especial de tensión de contacto en donde una tensión es transferida hacia el interior o la parte de afuera de la subestación desde un punto externo remoto.



La figura muestra los peligros eléctricos que un ser humano puede sufrir debido a un potencial de toque y de paso, y sus circuitos equivalentes.

En ambos casos el cuerpo humano está en serie con la resistencia de los pies y del pie a la superficie de la tierra, y forma un circuito en paralelo a la corriente eléctrica. La resistencia entre los pies y la superficie de la tierra es aproximadamente una resistencia de $3\rho_s$, donde ρ_s es la resistividad de la superficie de la tierra en ohms-metro.

El circuito en paralelo del cuerpo humano y los pies a tierra determina la corriente que fluye por el cuerpo humano y puede ser representado como:

$$R = 1000 + 1.5 \rho_s \quad [\Omega] \quad (\text{para el caso del potencial de toque})$$

$$R = 1000 + 6 \rho_s \quad [\Omega] \quad (\text{para el caso del potencial de paso})$$

Ya que es más fácil medir potencial de paso y de potencial que la corriente, los potenciales de paso y de toque máximos tolerables son:

$$E_{\text{paso}} := (1000 + 6\rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{T}} \right)$$

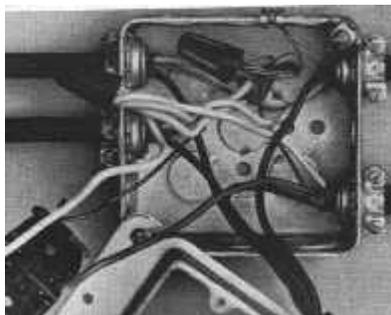
$$E_{\text{toque}} := (1000 + 1.5\rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{T}} \right)$$

2.5 Equipo que debe ser aterrizado

Los sistemas de puesta a tierra de equipos, por su importancia como medio de protección están muy normalizados a nivel mundial. En nuestro país, la norma vigente de Instalaciones Eléctricas, NOM- 001-SEDE-2005, contiene los requisitos mínimos de seguridad desde el punto de vista de la conducción de corrientes de falla.

- CANALIZACIONES Y EQUIPOS QUE DEBEN ESTAR PUESTOS A TIERRA

Deben estar aterrizadas, en general, todas las canalizaciones y cajas metálicas.

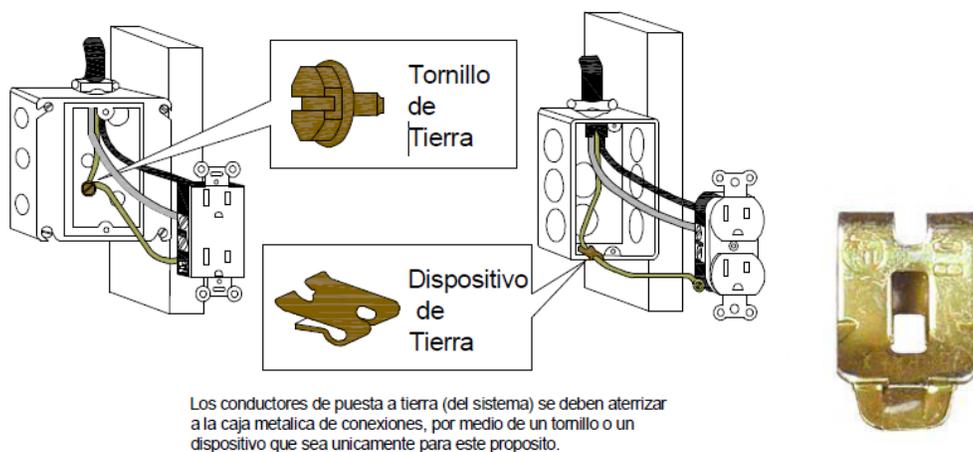


250-114. Continuidad y conexión de los conductores de puesta a tierra de equipo a cajas. Cuando entren en una caja o tablero dos o más conductores de puesta a tierra de equipo, todos esos conductores deben empalmarse o unirse dentro de la caja o a la caja, con accesorios adecuados a ese uso. No deben hacerse conexiones que dependan únicamente de soldadura. Los empalmes deben hacerse según se indica en 110-14(b), excepto el aislamiento, que no es necesario. La instalación de las conexiones de puesta a tierra debe hacerse de forma tal que la desconexión o desmontaje de una conexión, aparato eléctrico u otro dispositivo que reciba energía desde la caja, no impida ni interrumpa la continuidad de puesta a tierra.

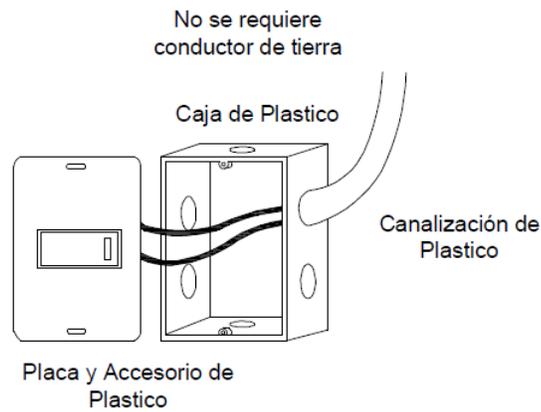
- 110-14 (b) Empalmes. Los conductores deben empalmarse con dispositivos adecuados según su uso o con soldadura de bronce, soldadura autógena, o soldadura con un metal de aleación fundible. Los empalmes soldados deben unirse primero, de forma que aseguren, antes de soldarse, una conexión firme, tanto mecánica como eléctrica. Los empalmes, uniones y extremos libres de los conductores deben cubrirse con un aislamiento equivalente al de los conductores o con un dispositivo aislante adecuado.

Excepción: No es necesario que el conductor de puesta a tierra de equipo, tal como se permite en la Excepción 4 de 250-74, esté conectado a los otros conductores de puesta a tierra de equipo ni a la caja.

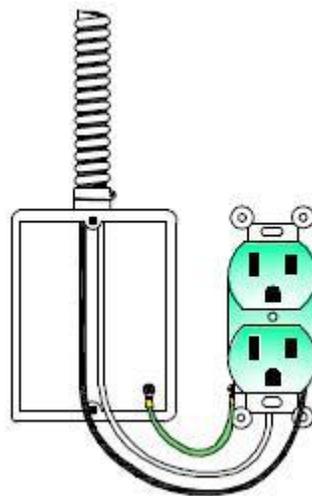
a) Cajas metálicas. Se debe hacer una conexión entre el conductor o conductores de puesta a tierra de equipo y la caja metálica, por medio de un tornillo de puesta a tierra que no debe utilizarse para otro uso o de un dispositivo aprobado y listado para puesta a tierra.



b) *Cajas no metálicas. Cuando lleguen a una caja de empalmes no metálica uno o más conductores de puesta a tierra de equipo, se deben instalar de manera que puedan conectarse a cualquier herraje o dispositivo de la caja que deba ponerse a tierra.*



Hay que hacer notar que la cinta metálica del cable tipo AC puede servir de puesta a tierra, por lo que de la caja al receptáculo debe salir el conductor de puesta a tierra.



250-74. *Conexión de la terminal de puesta a tierra de un receptáculo a la caja. Se debe realizar una conexión de la terminal de puesta a tierra de un receptáculo a la caja de conexiones efectivamente puesta a tierra.*

318-7. Puesta a tierra de los soportes para cables

a) Soporte tipo charola metálico para cables. Los soportes tipo charola metálicos para cables que soporten conductores se deben poner a tierra como lo exige el Artículo 250 para las envolventes de conductores. Para la puesta a tierra deben cumplirse los siguientes requisitos:

1) Las secciones de soporte tipo charola, los accesorios y otras canalizaciones conectadas deben empalmarse o unirse según lo establecido en 250-75, utilizando conectores mecánicos con tornillos o puentes de unión que cumplan los requisitos establecidos en 250-79.

2) Para efectuar la conexión de puesta a tierra del sistema de soporte tipo charola, se debe proveer de un cable de puesta a tierra de un material compatible con el del soporte y en toda la extensión del sistema de soporte tipo charola. El conductor de puesta a tierra debe unirse eléctricamente a los soportes tipo charola utilizando conectores metálicos con tornillos o puentes de unión de sección transversal adecuada a intervalos no mayores que 15 m. El tamaño nominal del conductor de puesta a tierra debe basarse en la capacidad o ajuste máximo del dispositivo de protección contra sobrecorriente del circuito o circuitos instalados en el soporte tipo charola.

3) El conductor de puesta a tierra puede alojarse en la parte exterior del soporte tipo charola, siempre que no quede expuesto a daño mecánico.

EQUIPO FIJO ESPECÍFICO

250-43. Equipo fijo o conectado de forma permanente-específico. Deben ser puestos a tierra, independientemente de su tensión eléctrica nominal, las partes metálicas expuestas y no conductoras de corriente eléctrica del equipo descrito a continuación ((a) a (j)), y las partes metálicas no destinadas a conducir corriente eléctrica del equipo y de envolventes descritas en (k) y (l):

a) Armazones y estructuras de tableros de distribución.

b) Órganos de tubos.

c) Armazones de motores.

d) Cubiertas de los controladores de motores.

e) Grúas y elevadores.

f) Estacionamientos públicos, teatros y estudios cinematográficos.

g) Anuncios luminosos.

- h) Equipo de proyección de películas.*
- i) Circuitos de control remoto, señalización y alarma contra incendios de energía limitada.*
- j) Luminarios.*
- k) Bombas de agua operadas por motor.*
- l) Ademes metálicos de pozos.*

EQUIPO FIJO EN GENERAL

250-42. Equipo fijo o conectado de forma permanente. Las partes metálicas expuestas y no conductoras de corriente eléctrica del equipo fijo que no estén destinadas a transportar corriente y que tengan probabilidad de energizarse, deben ser puestos a tierra si se presenta cualquiera de las circunstancias mencionadas en los siguientes incisos:

- a) Distancias horizontales y verticales. Si están a menos de 2,5 m en vertical o de 1,50 m en horizontal de tierra u objetos metálicos puestos a tierra y que puedan entrar en contacto con personas.*
- b) Lugares mojados o húmedos. Cuando estén instaladas en lugares mojados o húmedos y no estén aisladas.*
- c) Contacto eléctrico. Cuando estén en contacto eléctrico con metales.*
- d) Áreas peligrosas (clasificadas). Cuando estén en un área peligrosa (clasificada) de los cubiertos en los Artículos 500 a 517.*
- e) Método de alambrado. Cuando estén alimentados por medio de cables con forro metálico, recubiertos de metal, en canalizaciones metálicas u otro método de instalación que pueda servir de puesta a tierra del equipo,....*
- f) De más de 150 V a tierra. Cuando el equipo funcione con cualquier terminal a más de 150 V a tierra.*

CALIBRE DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS.

250-95. *Tamaño nominal de los conductores de puesta a tierra de equipo. ...*

Cuando haya conductores en paralelo en varias canalizaciones o cables, como se permite en 310-4, el conductor de puesta a tierra de equipo, cuando exista, debe estar instalado en paralelo. Cada conductor de puesta a tierra de equipo instalado en paralelo debe tener un tamaño nominal seleccionado sobre la base de la corriente eléctrica nominal del dispositivo de protección contra sobrecorriente que proteja los conductores del circuito en la canalización o cable, según la Tabla 250-95.

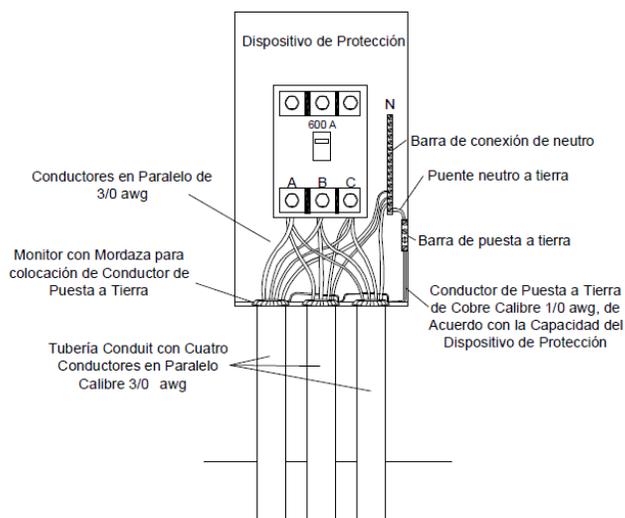


TABLA 250-95.- Tamaño nominal mínimo de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos

<p>Capacidad o ajuste del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones, etc. Sin exceder de:</p>	<p>Tamaño nominal mm² (AWG o kcmil)</p>	
	<p>(A)</p>	<p>Cable de cobre</p>
15	2,08 (14)	---
20	3,31 (12)	---
30	5,26 (10)	---
40	5,26 (10)	---
60	5,26 (10)	---
100	8,37 (8)	13,3 (6)
200	13,3 (6)	21,2 (4)
300	21,2 (4)	33,6 (2)
400	33,6 (2)	42,4 (1)
500	33,6 (2)	53,5 (1/0)
600	42,4 (1)	67,4 (2/0)
800	53,5 (1/0)	85,0 (3/0)
1 000	67,4 (2/0)	107 (4/0)
1 200	85,0 (3/0)	127 (250)
1 600	107 (4/0)	177 (350)
2 000	127 (250)	203 (400)
2 500	177 (350)	304 (600)
3 000	203 (400)	304 (600)
4 000	253 (500)	405 (800)
5 000	354,7 (700)	608 (1 200)
6 000	405 (800)	608 (1 200)

Véase limitaciones a la instalación en 250-92(a)

Nota: Para cumplir lo establecido en 250-51, los conductores de puesta a tierra de los equipos podrían ser de mayor tamaño que lo especificado en esta Tabla.

Cuando el tamaño nominal de los conductores se ajuste para compensar caídas de tensión eléctrica, los conductores de puesta a tierra de equipo, cuando deban instalarse, se deben ajustar proporcionalmente según el área en mm^2 de su sección transversal.

Capítulo 3

Procedimiento de diseño de una red de tierras en base a la normatividad

3.1 Criterios de diseño

El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del suelo mismo, por ello es requisito conocerla para calcular y diseñar la puesta a tierra de sistemas.

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina "Resistividad Aparente". La resistividad del terreno está determinada por:

a) SALES SOLUBLES

La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas.

b) COMPOSICIÓN DEL TERRENO

La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una resistividad de 40-500 ohm-m por lo que una varilla electrodo enterrada 3 m tendrá una resistencia a tierra de 15 a 200 ohms respectivamente. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 ohm-m o más alta, y tratar de conseguir una resistencia a tierra de unos 100 ohm o menos con una sola varilla electrodo es virtualmente imposible.

c) ESTRATIGRAFÍA

El terreno obviamente no es uniforme en sus capas. En los 3 m de longitud de una varilla electrodo típica, al menos se encuentran dos capas diferentes de suelos.

d) GRANULOMETRÍA

Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la

tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y ésta es mayor que la arcilla.

e) ESTADO HIGROMÉTRICO

El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Puede tenerse el caso de que en tiempo de secas, un terreno llegue a tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras.

f) TEMPERATURA

A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra

g) COMPACTACIÓN

La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación. En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno, no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica.

TELURÓMETRO

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un telurómetro de cuatro terminales llamado en algunas zonas de México como "terrómetro" o "*Megger de tierras*"



Los telurómetros inyectan una corriente de frecuencia diferente a 60 Hz para evitar se midan voltajes y corrientes de ruidos eléctricos. Los telurómetros tienen cuatro terminales: 2 de corriente (C1, C2) y 2 de potencial (P1, P2) que están marcadas en el aparato C1 P1 P2 C2.

Como la medición obtenida por un telurómetro es puntual, para obtener una lectura promedio del sitio, se deben hacer mediciones en un sentido, en otro a 90 grados del primero y en el sentido de las diagonales. En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.

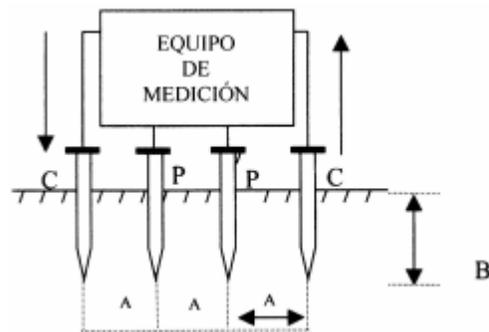
El estudio de resistividad de un terreno conlleva el obtener el perfil de resistividad del suelo en varios puntos y con esos valores se puede determinar la profundidad de nuestro sistema de puesta a tierra.

MÉTODO DE WENNER

El método de los 4 puntos de Wenner, es la técnica más utilizada comúnmente. Consiste básicamente en 4 electrodos enterrados dentro del suelo a lo largo de una línea recta, a igual distancia A de separación, enterrada a una profundidad B. La tensión entre los dos electrodos interiores de potencial es medido y dividido entre la corriente que fluye a través de los otros dos electrodos externos para dar un valor de resistencia mutua R en Ω .

Existen 2 variaciones de este método:

- a) Electrodos igualmente espaciados o arreglo de Wenner.



Donde:

A = Separación entre varillas adyacentes en m.

B = Profundidad de los electrodos en m.

C = Electrodo de corriente.

P = Electrodo de potencial.

Si la relación A/B es menor a 20 entonces se utilizará la siguiente fórmula para calcular la resistividad del terreno:

$$\rho := \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot R}{\left[1 + \frac{2 \cdot A}{(A^2 + 4B^2)^{0.5}} \right] - \frac{2 \cdot A}{(4 \cdot A^2 + 4B^2)^{0.5}}}$$

Donde

ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m

A : Distancia entre electrodos en metros.

B : Profundidad de enterrado de los electrodos en metros

R : Lectura del terrómetro en ohms.

Si "A" y "B" se miden en cm o en m y la resistencia R en Ω , la resistividad estará dada en Ω -cm o en Ω -m respectivamente.

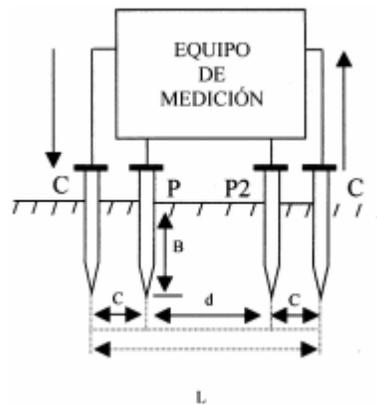
Si la longitud "B" es mucho menor que la longitud "A", es decir cuando la relación A/B sea mayor o igual a 20, puede suponerse B=0 y la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR$$

Con estas fórmulas se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistividad aparente. Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamiento indicándonos en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

b) Electrodo no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger - Palmer

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los 2 electrodos interiores cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede utilizarse el arreglo mostrado en la siguiente figura



La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pequeños espaciamientos entre los electrodos, considerando que la mayor parte de la corriente que penetra depende del espaciamiento entre los electrodos. Así se asume que la resistividad medida para un espaciamiento entre electrodos "A" representa la resistividad aparente del suelo a una profundidad "B". La información de las mediciones de resistividad puede incluir datos de temperatura e información sobre las condiciones de humedad del suelo en el tiempo en que se realizó la medición. Todos los datos válidos sobre los conductores enterrados que ya se conocen o se suponen para el estudio del área, deberán anotarse en el plano de red de Tierra.

Los conductores desnudos enterrados que se encuentren en contacto con el suelo pueden invalidar lecturas realizadas por el método descrito si están bastante juntos de manera que alteren la trayectoria del flujo de la corriente. Por ésta razón, las mediciones de resistividad del suelo son de menor valor en un área en donde una rejilla de conductores ya ha sido instalada, excepto, tal vez para mediciones poco profundas dentro o cerca del centro de una gran rejilla para tierra rectangular. En tales casos una lectura poco aproximada deberá ser tomada a corta distancia fuera de la rejilla para tierra, con los electrodos de prueba en tal posición que minimicen el efecto de la rejilla para tierra sobre las trayectorias de flujo. Sin embargo, no es necesario hacer dichas consideraciones dentro de la rejilla para tierra, tales anotaciones pueden ser utilizadas por medio

de una aproximación, especialmente si hay una razón para creer que el suelo en la totalidad del área es razonablemente homogéneo. Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido.

La fórmula empleada en éste caso se puede determinar fácilmente. Si la profundidad de los electrodos es pequeña comparada con la separación "d" y "c", entonces la resistividad aparente puede calcularse como:

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

MÉTODO DE CAÍDA DE POTENCIAL PARA MEDICIÓN DE RESISTENCIA ÓHMICA EN UN SISTEMA DE TIERRA

El método que se utiliza es el de caída de potencial; este procedimiento involucra la utilización de dos electrodos auxiliares: uno de potencial y otro de corriente. Consiste en hacer que circule una corriente de magnitud conocida (I) a través de tierra o electrodo baja prueba (E) y un electrodo de corriente (C), y medir el efecto de esta corriente en términos de la diferencia de potencial (P); la relación V / I da el valor de resistencia.

3.2 Procedimiento del diseño de una red de tierras en base a la normatividad

La normatividad actual indica que el diseño de una red de tierras de una subestación debe tener presente los potenciales de paso y de contacto que salvaguarden la vida de las personas {250-156, 921-18}. Existen métodos de cálculo de redes de tierras basados en manuales de diseño y en el estándar IEEE Std 80-2000. Las ecuaciones simplificadas de dichos manuales nos son útiles cuando la resistividad del terreno se puede representar mediante el modelo de suelo homogéneo.

VALORES ACEPTABLES DE RESISTENCIA A TIERRA DE SUBESTACIONES

Para subestaciones, la NOM menciona:

921-25

b) Resistencia a tierra del sistema. La resistencia eléctrica total del sistema de tierra incluyendo todos los elementos que lo forman, deben conservarse en un valor menor que lo indicado en la tabla siguiente:

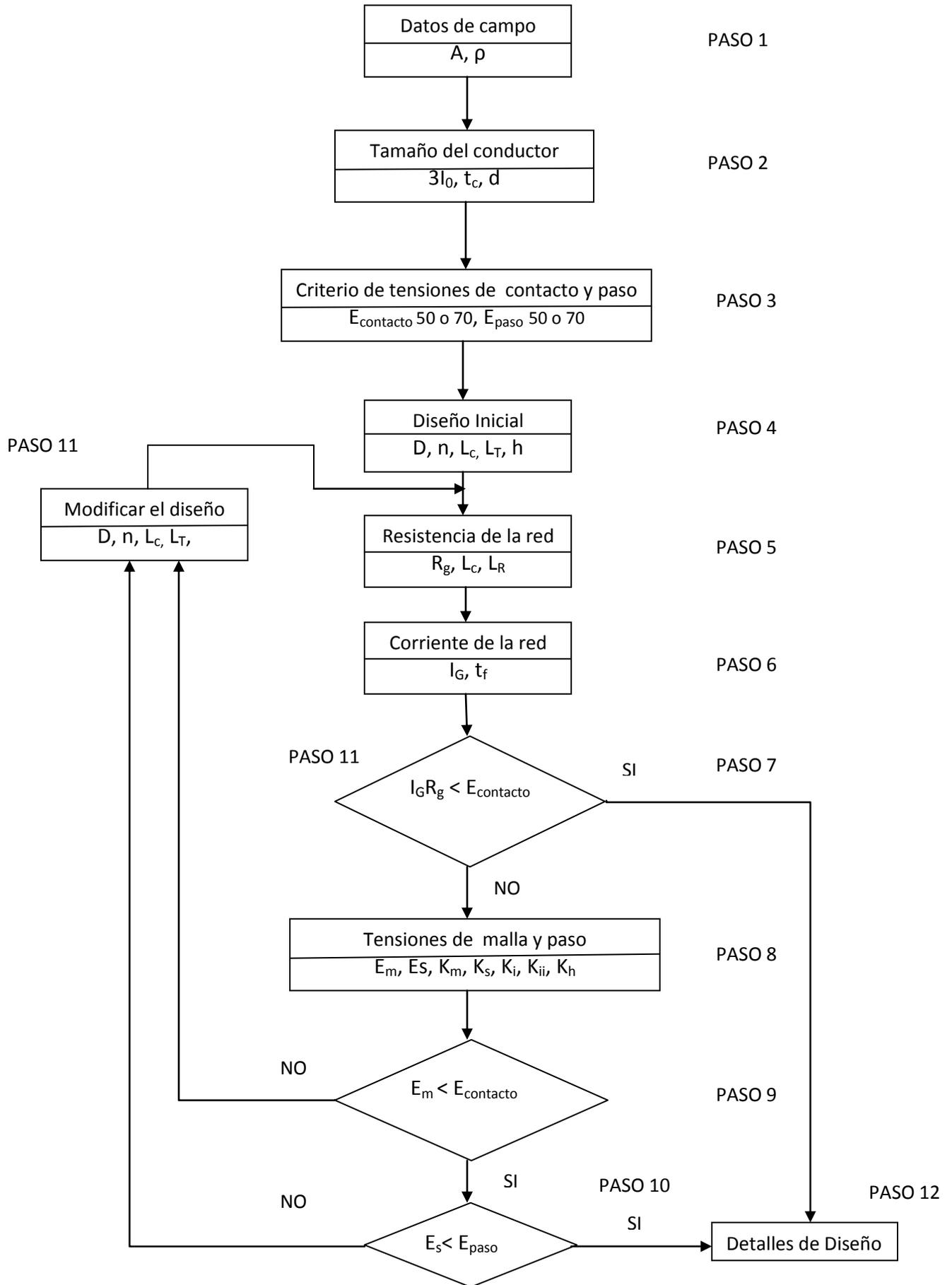
Resistencia (Ω)	Tensión eléctrica máxima (kV)	Capacidad máxima del transformador (kVA)
5	Mayor que 34.5	mayor que 250
10	34.5	mayor que 250
25	34.5	250

Hay que recordar que la resistencia a tierra del Sistema determina la relación entre la tensión de falla y la corriente a tierra, y la configuración de los electrodos determina la distribución del potencial en la superficie de la tierra, y esa distribución del potencial es de importancia ya que en el suelo puede ser tan alto que puede ser letal para una persona.

Esa distribución del potencial se controla usando las mallas de tierra, las cuales disminuyen la resistencia de tierra y las inductancias que se generan con corrientes de alta frecuencia.

Las mallas las forman normalmente conductores enterrados unidos entre sí con soldadura exotérmica o con conectores junto con varillas verticales.

Diagrama de bloques del procedimiento de diseño [IEEE std 80-2000]



OPTIMIZADO DE LA MALLA

Las mallas de tierra no regulares tienen las siguientes ventajas sobre las regulares:

- a) La densidad de corriente emanando de los conductores de la malla es mucho más uniforme.
- b) El espaciamiento desigual puede decrementar los gradientes de potencial sobre la superficie de la tierra, y mejorar el nivel de seguridad para la gente y equipos.
- c) Ahorra material

Para optimizar la malla, primeramente, se diseña una malla con cables igualmente espaciados utilizando los procedimientos del estándar IEEE Std 80-2000, haciendo los ajustes correspondientes a un terreno de dos capas. En seguida, manteniendo constante el número total y largo de los cables y varillas, se cambia el espaciamiento progresivamente minimizando la función de gradiente de voltaje.

Por último, se eliminan pares de cables del centro de la malla, siempre y cuando no se excedan los límites de seguridad de los voltajes de paso y contacto.

CERCA METÁLICA Y ESTRUCTURAS METÁLICAS DE LA SUBESTACIÓN

Se debe poner a tierra toda cerca metálica que se cruce con líneas suministradoras, a uno y otro lado del cruce, a una distancia sobre el eje de la cerca no mayor a 45m {921-29}. Las estructuras {921-28c}.

Se deberá tomar nota acerca de lo que se establece para las cercas de las subestaciones ya que pueden quedar dentro o fuera de la malla. Para ello se establece que:

- Cuando la cerca se coloca dentro del área de la malla, esta malla de tierra debe prolongarse 1.5 metros como mínimo fuera de la cerca. Conectar la cerca a la malla de tierra.
- En el caso de que la cerca se localice fuera de la zona de la malla, deberá estar como a 2 metros como mínimo del límite de dicha malla. Conectar la cerca de sus propios electrodos de tierra.

La regla general propone que la cerca metálica deberá conectarse únicamente a su propia tierra (sus propios electrodos). Excepto cuando los equipos aterrizados en la malla de tierra están a tan corta distancia que existe la posibilidad de que se toque la cerca metálica y el equipo aterrizado en la malla o la misma malla. En esta situación se deberá poner a tierra la cerca metálica con la malla de la subestación.

PARARRAYOS

Las puntas pararrayos se instalan sobre la parte más elevada de las estructuras de una subestación. Sirven para completar la red de cables de guarda que se extiende sobre la cúspide de las estructuras, para proteger a la subestación de las posibles descargas atmosféricas.

Dichos electrodos son de fierro galvanizado atornillados a la estructuras y cortados en bisel en su parte superior para producir el efecto punta.

TAREAS IDENTIFICADAS PARA CONSTRUIR LA MALLA DE UNA SUBESTACIÓN

- Comienza el trabajo de construcción en la subestación.
- Marcar físicamente en la tierra la malla.
- Excavar las trincheras de los cimientos y las especiales para enterrar los conductores de la malla de tierra.
- Enterrar los conductores de la malla de tierra.
- Hacer todas las conexiones requeridas.
- Enterrar las varillas electrodo.
- Conectar las varillas electrodo a la red.
- Rellenar y compactar todas las excavaciones.
- Unir las tuberías subterráneas y el acero estructural a la malla.
- Construir los edificios de la subestación e instalar los equipos.

- Conectar a la malla todas las estructuras metálicas, como transformadores e interruptores, los apartarrayos, marcos estructurales y la malla de la subestación.
- Aplicar una capa de alta resistividad como material de acabado.
- Medir la resistencia a tierra de la malla construida.
- Conectar los hilos de guarda a la malla

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

NORMA DE REFERENCIA NRF-011-CFE-2004

Paso 1:

Se debe de tener un plano de arreglo general de la subestación para determinar el área donde se debe instalar el sistema de tierra. Obtener el valor de la resistividad del suelo, para determinar el perfil de resistividad del suelo y el modelo de suelo necesario (suelo homogéneo o de dos capas).

Para iniciar el diseño del sistema de tierra no debe considerarse la inclusión en el terreno de sustancias químicas sino que éste sea el último recurso para mejorar los valores de resistividad en caso de requerirse.

Paso 2:

Para determinar la sección transversal del conductor de puesta a tierra y de la rejilla para tierra, la corriente de falla $3I_0$ debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo t_c deber ser el tiempo máximo de liberación de la falla, incluyendo el tiempo de la protección de respaldo.

Para calcular la sección transversal del conductor se debe considerar la corriente de falla de fase a tierra o dos fases a tierra la que resulte más severa. Ya que la corriente de falla $3I_0$ debe ser la máxima corriente futura.

Cálculo de la sección transversal del conductor de la rejilla para tierra tierra

Para calcular la sección transversal del conductor se debe tener el valor de la corriente máxima de falla a tierra que puede estar presente en el punto de la subestación. Conocidas el coeficiente de resistividad y las constantes características de cada material (véase tabla 1) Se aplican en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1

$$A_{mm}^2 = I \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}}}$$

Ecuación 2

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

Donde:

A = Sección transversal del conductor en mm². (o también kcmil).

I = Corriente rcm en kA (debe de considerarse el incremento de este valor a futuro).

T_m = Temperatura máxima permisible en °C.

T_a = Temperatura ambiente en °C.

T_r = Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.

α_o = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C en 1/°C.

α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r en 1/°C.

ρ_r = Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r en μΩ-cm.

t_c = Tiempo de duración de la corriente en segundos.

TCAP = Factor de capacidad térmica por unidad de volumen (véase tabla 1) en J/(cm³/°C).

K_o = 1/α_o o (1/α_r) - T_r en °C.

TABLA 1 - Constantes de materiales

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor α a 20 °C	K _s al 0 °C (0 °C)	Temperatura de fusión T _m (°C)	ρ _r 20 °C (μΩ·cm)	Factor de capacidad térmica por unidad de volumen (d) TCAP [J/(cm ³ ·°C)]
Cobre recocido suave – inmersión	100,0	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre comercial inmersión – dura	97,0	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Cobre revestido alambre de acero	40,0	0,00378	245	1084	4,40	3,85
Cable revestido alambre de acero	30,0	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Cable revestido barra de acero	20,0	0,00378	245	1084	8,62	3,85
Acero 1020	10,8	0,00160	605	1510	15,90	3,28
Acero revestido barra de acero	9,8	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Zinc bañado barra de acero	8,6	0,00320	293	419	20,10	3,93
Acero inoxidable 304	2,4	0,00130	749	1400	72,00	4,03

Determinación de la Corriente máxima de rejilla IG

La corriente simétrica de rejilla es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la rejilla para tierra hacia el terreno que la rodea, se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 3

$$I_g = S_f * I_f$$

Ecuación 4

$$I_f = 3I_0 \quad \therefore S_f = \frac{I_g}{3I_0}$$

Donde:

I_g := Corriente simétrica de rejilla en A.

I_f = Corriente simétrica de falla a tierra en A (valor rcm y debe considerarse el incremento futuro de este valor).

S_f = Factor de división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente de falla con la parte de esta corriente que fluye de la rejilla hacia el terreno.

I_0 = Corriente de secuencia cero en A.

La corriente que puede circular en una rejilla para tierra en casos de falla, se conoce como “corriente máxima de rejilla”, la cual se determina con la siguiente ecuación:

Ecuación 5

$$I_G = D_f * I_g$$

Ecuación 6

$$D_f = \sqrt{\frac{1 + \frac{I_a}{T_f} (1 - e^{-2t_f/T_a})}{T_f}}$$

Donde:

I_G = Corriente máxima de rejilla en A.

I_g = Corriente simétrica de rejilla (valor rcm) en A.

D_f = Factor de decremento para el tiempo de duración de la falla (t_f), que está en función del valor de la relación de reactancia (X) y de resistencia (R) en el punto de falla, véase tabla 2. Si el tiempo de duración de la corriente es mayor o igual a 1 s o la relación X/R en el punto de localización de la falla es menor que 5, el factor de decremento puede despreciarse, es decir $D_f = 1$.

t_f = Duración de la falla en segundos.

T_a = Constante de tiempo subtransitoria en segundos.

$$T_a = \frac{X''}{WR}$$

Se presenta la tabla 2 de D_f para diferentes valores de X''/R .

Del siguiente rango la selección de t_f deberá corresponder a un menor tiempo de liberación de falla en subestaciones de transmisión y para subestaciones de distribución, tiempos de liberación de falla mayores.

Valores típicos de t_f se recomienda entre 0,25 a 1,0s. Un valor usual es de 0,5s

TABLA 2 - Valores típicos de factor de decremento D_f

Duración de 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	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,10	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,20	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,30	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,40	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,50	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1,00	60	1,013	1,026	1,039	1,052

Paso 3:

Determinar las tensiones de paso y de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano.

El tiempo de exposición de la falla debe ser el máximo tiempo hasta que la falla se libere, normalmente el valor se encuentra en el intervalo de: 0,1 a 1,0 s.

La corriente de no-fibrilación de magnitud I_B está relacionada con la energía absorbida por cuerpo y descrita con la siguiente ecuación:

Ecuación 7

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_s}}$$

Donde:

$K = (S_B)^{1/2}$

$S_B = 0,0135$ Constante empírica del impacto de energía tolerado, cuando se aplica aun por ciento de la población

t_s = tiempo máximo de liberación de la falla

Cálculo de la tensión de paso y tensión de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano

Las ecuaciones para calcular la tensión de paso y la tensión de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano para personas con peso aproximado de 50 kg son las siguientes:

Ecuación 8

$$E_{paso} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{volts})$$

Ecuación 9

$$E_{contacto} = (1000 + 1,5C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{volts})$$

Donde:

C_s = factor de reducción

ρ_s = resistividad de la capa superficial

Para calcular las tensiones correspondientes a personas con un peso aproximado a 70 kg, se utilizan las mismas fórmulas con la salvedad de cambiar la constante 0,116 por 0,157. El cálculo debe considerar el peso de 50 kg, por dar resultados más conservadores.

Fórmula para determinar el factor de reducción (C_s) debido a la corrección realizada por la adición de la capa superficial con resistividad ρ_s :

Ecuación 9

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

Donde:

ρ = Resistividad del suelo en $\Omega\text{-m}$.

h_s = Espesor de la capa superficial en m

Paso 4:

El diseño preliminar debe incluir una Rejilla para tierra 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 Rejilla para tierra 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.

En la práctica las rejillas para tierra en las Subestaciones de Comisión Federal de Electricidad se construyen cuadradas o rectangulares. Se sugiere que la separación inicial de acuerdo a los niveles de tensión del sistema (en caso de no contar con programas de cálculo de red de Tierra) sea la siguiente:

Para subestaciones convencionales nuevas con tensión de 115 kV en el lado de alta tensión:

- La cuadrícula de la rejilla para tierra será de 8 x 8 m, en toda el área del terreno y de acuerdo al criterio adoptado para el aterrizamiento de la cerca.

Para subestaciones convencionales nuevas con tensiones de 230 y 400 kV en el lado de alta tensión:

- La cuadrícula de la rejilla para tierra será de 10 x 10 m, en toda el área del terreno y de acuerdo al criterio adoptado para la puesta a tierra de la cerca.

En un sistema de Tierra de una subestación, el espaciamiento típico entre conductores de la rejilla para tierra puede estar entre 3 y 7 m.

Disposición física

El cable que forma el perímetro exterior de la Rejilla para tierra debe ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo de la subestación, con ello se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y en las terminales cercanas.

La rejilla para tierra estará constituida por cables colocados paralela y perpendicularmente, con el espaciamiento requerido conforme al cálculo de su resistencia eléctrica y de las tensiones de paso y contacto considerados en el diseño del sistema de tierra.

Los cables que forman la Rejilla para tierra deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de estructuras o equipos para facilitar la puesta a tierra de los mismos.

En cada cruce de conductores de la rejilla para tierra, éstos deben conectarse rígidamente mediante conectores y en donde se haya determinado a electrodos verticales (varillas para tierra).

En subestaciones tipo pedestal, se requiere que el sistema de tierra quede confinado siempre y cuando sea parte de un sistema de distribución multiaterrizado.

Las estructuras metálicas de la planta y de subestaciones, así como las partes metálicas de y equipos, deben estar puestas a tierra conectadas a tierra para evitar accidentes por descargas eléctricas en casos de fallas.

Los diferentes niveles de la casa de máquinas deben contar con circuitos cerrados de cable conductor para interconexión a equipos, sistemas o estructuras a tierra. Dichos circuitos deben conectarse directamente al sistema de tierra principal e interconectarse entre sí y estar embebidos en el concreto.

En general la Rejilla para tierra del sistema de tierra debe estar a nivel del tubo de aspiración 0,50m bajo el concreto, en contacto directo con la roca.

Paso 5:

La estimación de la resistencia de tierra preliminar en el sistema de Tierra, debe efectuarse tomando en consideración los valores siguientes:

- Para subestaciones de potencia en alta tensión a nivel de transmisión y de subtransmisión, el valor de la resistencia de la malla de tierra debe ser alrededor de 1 Ω o menor.
- Para subestaciones de potencia de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser entre 1 a 4 Ω ,
- Para subestaciones de distribución de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser como máximo de 5 Ω -m.

El valor de la resistencia de tierra puede estimarse mediante las siguientes ecuaciones:

- a) Para profundidades de la red menores de 0,25 m.

Ecuación 11

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T}$$

R_g = Resistencia de tierra en ohms.

ρ = Resistividad promedio del suelo en Ω -m.

A = Área ocupada por la rejilla para tierra en m².

L_T = longitud total de los conductores enterrados en m.

- b) Para profundidades entre 0,25 y 2,5 m se requiere una corrección por profundidad.

Ecuación 12

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

Donde:

h = profundidad de la rejilla para tierra en metros.

- c) Considerando la rejilla para tierra con electrodos verticales (varillas para tierra). Es decir el sistema de Tierra consta de: conductores horizontales (rejilla para tierra) y electrodos verticales (varillas para tierra).

Ecuación 13

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}}$$

R_1 = Resistencia de los conductores de la rejilla para tierra en Ω .

R_2 = Resistencia de todas las electrodos verticales (varillas para tierra) en Ω .

R_{12} = Resistencia mutua entre el grupo de conductores,

R_1 y el grupo de electrodos verticales (varillas para tierra), R_2 en Ω .

Donde:

$$R_1 = \left(\frac{\rho_1}{\pi l_1} \right) [\ln(2l_1/h') + k_1 l_1 / (A)^{1/2} - k_2].$$

$$R_2 = \left(\frac{\rho_a}{2n \pi l_2} \right) [\ln(8l_2/d_2) - 1 + 2k_1 l_2 / (A)^{1/2} ((n)^{1/2} - 1)^2].$$

$$R_{12} = \left(\frac{\rho_a}{\pi l_1} \right) [\ln(2l_1/l_2) + k_1 l_1 / (A)^{1/2} - k_2 + 1].$$

Donde:

ρ_1 = Resistividad del terreno con los conductores a una profundidad h, hacia abajo en Ω -m.

ρ_a = Resistividad aparente del terreno vista por el electrodo vertical (varilla para tierra), en Ω m.

H = Espesor de la primera capa del terreno en m.

ρ_2 = Resistividad del terreno desde la profundidad H, hacia abajo en Ω -m.

l_1 = Longitud total de los conductores de la rejilla para tierra en m.

l_2 = Longitud promedio de la electrodo vertical (varilla de tierra) en m.

h = Profundidad de la rejilla para tierra en m.

h' = Coeficiente de la profundidad de la rejilla para tierra.

Ecuación 14

$$h' = (d_1 h) / 2$$

Para conductores enterrados a la profundidad h en m.

$h' = 0,5d_1$ Para conductores enterrados en $h = 0$ (en la superficie) en m.

A = Área cubierta por la rejilla para tierra con dimensiones "a x b" en metros.

n = Número de electrodos verticales (varillas para tierra) localizadas en el área A.

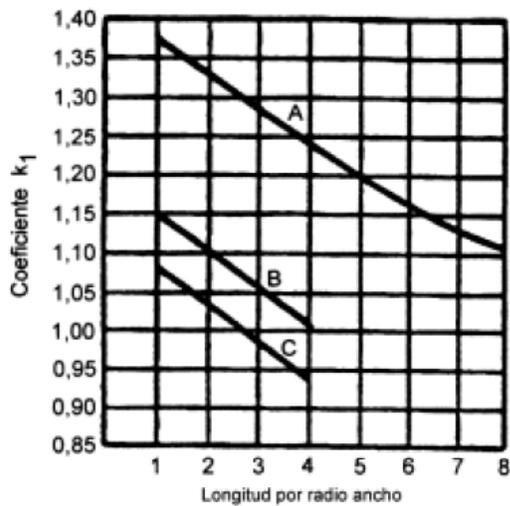
k_1, k_2 = Constantes relacionadas con la geometría del sistema de tierra (véanse figuras 1 y 2).

d_1 = diámetro del conductor de la rejilla para tierra en m.

d_2 = diámetro de la electrodos verticales (varilla de tierra) en m.

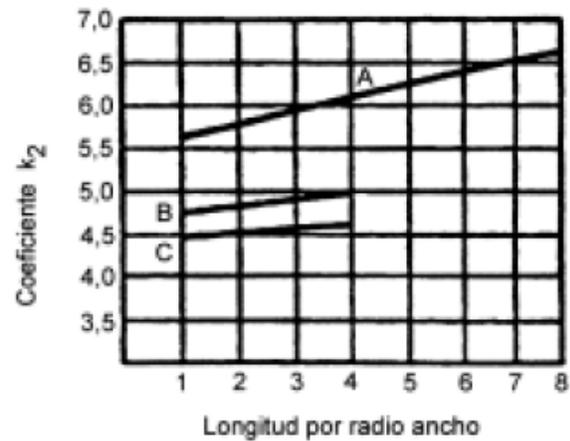
a = ancho de la rejilla para tierra en m.

b = largo de la rejilla para tierra en m.



Curva A - Profundidad $h = 0$
 Curva B - para Profundidad $h = \frac{1}{10} \sqrt{\text{área}}$
 Curva C - para Profundidad $h = \frac{1}{10} \sqrt{\text{área}}$

FIGURA 1 – Coeficiente k_1 de la fórmula de Schwarz



Curva A - Profundidad $h = 0$
 Curva B - para Profundidad $h = \frac{1}{10} \sqrt{\text{área}}$
 Curva C - para Profundidad $h = \frac{1}{10} \sqrt{\text{área}}$

FIGURA 2 – Coeficiente k_2 de la fórmula de Schwarz

Las ecuaciones anteriores son válidas para suelos de dos capas, una superior de espesor H con un cierto valor de resistividad y por donde penetran los electrodos verticales (varillas para tierra). Y una inferior de más baja resistividad con la cual los electrodos verticales (varillas para tierra) quedan en contacto.

En este caso para ρ_1 / ρ_2 , la rejilla para tierra se localiza en la capa de resistividad ρ_1 , pero los electrodos verticales (varillas para tierra) están en contacto tanto con la capa de resistividad ρ_1 , como con la capa de resistividad ρ_2 , por lo que R_2 y R_{12} se calculan con una resistividad aparente ρ_a vistas por los electrodos verticales (varillas para tierra):

Ecuación 15

$$\rho_a = l_2 \rho_1 \rho_2 / [\rho_2(H-h) + \rho_1(l_2+h-H)]$$

Para suelos con resistividad uniforme:

$$\rho_1 = \rho_2$$

Si la diferencia entre ρ_1 y ρ_2 no es muy grande, de preferencia ρ_2 no menor que $0,2 \rho_1$, y el espesor de la capa superior H es al menos $0,1b$, las ecuaciones anteriores son bastante exactas para la mayoría de los cálculos y además fáciles de aplicar.

Los análisis computacionales basados en el modelado de las componentes del sistema de tierra en detalle, permiten calcular la resistencia con un alto grado de exactitud asumiendo que el modelo del suelo se selecciona correctamente.

Paso 6:

Determinación de la corriente máxima en la rejilla para tierra I_G .

A fin de evitar un sobredimensionamiento del sistema de tierra, para el diseño de la rejilla para tierra se utiliza únicamente la porción de la corriente de falla $3I_0$ que fluye a través de la rejilla para tierra hacia la tierra remota. Sin embargo la corriente máxima de la rejilla para tierra I_G debe considerar la peor localización y tipo de falla, el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema.

El cálculo de la corriente de la rejilla para tierra I_G se indica en el paso 2.

Paso 7:

Determinación de la elevación del potencial de tierra (GPR), mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 16

$$GPR = I_G \times R_g$$

Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra en el diseño preliminar se encuentra abajo 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.

Paso 8:

Calcular las tensiones de paso y de malla para el sistema de tierra propuesto.

Cálculo de la Tensión de Malla

La fórmula para calcular la tensión de malla es la siguiente:

Ecuación 17

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_m}$$

Donde:

ρ = Resistividad promedio del suelo en $\Omega\text{-m}$.

K_m = Factor geométrico.(ecuación 18)

K_i = Factor de irregularidad (ecuación 21)

I_G/L_m = Relación de la corriente promedio por unidad de longitud de conductor efectivamente enterrado en el sistema de Tierra. (Ecuación 22)

Fórmula para calcular K_m :

Ecuación 18

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

Donde:

D = Espaciamiento entre conductores paralelos en metros.

h = Profundidad de los conductores en la rejilla para tierra en metros.

d = Diámetro del conductor de la rejilla para tierra en metros.

K_h = Factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla. (Ecuación 19)

n = Número de conductores equivalentes en cualquier dirección.

Cálculo de K_{ii} :

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

Para rejillas para tierra sin electrodos verticales (varillas para tierra), o con algunos electrodos verticales (varillas para tierra) dentro del área de la rejilla.

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

Cálculo de K_h :

Ecuación 19

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

Donde:

h = Profundidad a la cual está enterrada la rejilla para tierra dada en metros.

h_0 = Profundidad de referencia y es igual a 1 metro.

Cálculo de n:

Ecuación 20

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

Donde:

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p}$$

Para rejillas para tierra cuadradas y rectangulares.

Donde:

L_p = Longitud de conductores en la periferia de la rejilla para tierra, dada en metros.

$n_b = 1$ Para rejillas para tierra cuadradas.

Para cualquier otro caso.

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}}$$

Donde:

A = Área de la rejilla para tierra en m².

$n_c = 1$ Para rejillas cuadradas y Rectangulares.

$n_d = 1$ Para rejillas cuadradas y rectangulares

Para la forma de rejilla para tierra en CFE

$$n = n_a n_b$$

El factor de irregularidad K_i

Ecuación 21

$$K_i = 0,644 + 0,148 * n$$

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

Ecuación 22

$$L_m = L_c + (1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{(L_x^2 + L_y^2)^{1/2}} \right)) L_R$$

L_c = Longitud total de los conductores horizontales en la rejilla para tierra en metros.

L_r = Longitud de una sola electrodos verticales varilla de tierra en metros.

L_R = Longitud total de los electrodos verticales (varillas para tierra) conectados a la rejilla en metros.

L_x = Longitud máxima de la rejilla para tierra en la dirección x dada en metros.

L_y = Longitud máxima de la rejilla para tierra en la dirección y dada en metros.

Cálculo de la Tensión de Paso

La ecuación para calcular la tensión de paso es la siguiente:

Ecuación 23

$$E_{\text{paso}} = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_s}$$

Véase significado de siglas en las fórmulas de la tensión de malla, la adicional es la siguiente:

K_s = Factor geométrico. (Ecuación 25)

K_i = Factor de corrección. (Ecuación 21)

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

Ecuación 24

$$L_s = 0,75 L_c + 0,85 L_R$$

Fórmula para calcular K_s :

Para profundidades usuales de rejilla para tierra entre $0,25 < h < 2,5$ m, la constante K_s se obtiene como:

Ecuación 25

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

Véase significado de siglas en las ecuaciones del cálculo de la tensión de malla.

3.3 Revisión del diseño

Paso 9:

Si la tensión de malla calculada es menor que la tensión 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 ambas, la tensión de paso y de malla calculadas con el diseño preliminar son menores que las tensiones 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 las tensiones de paso o de contacto, 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 las tensiones de paso y 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 rejilla para tierra se agregan cuando el diseño de la rejilla para tierra no incluye conductores cercanos al equipo que será puesto a tierra. Las electrodos verticales (varillas para tierra) adicionales pueden colocarse en la base de los apartarrayos, neutro de transformadores y otros equipos principales. El diseño final debe revisarse con el propósito de eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y otros riesgos asociados.

Capítulo 4

Memoria de Cálculo

Datos para el cálculo

Datos del Terreno

ρ = Resistividad [Ω .m]	$\rho = 160$ [Ω .m]	
ρ_s = Resistividad superficial [Ω .m]	$\rho_s = 3500$ [Ω .m]	Resistividad de la grava
h_s = Grueso de la capa superficial [m]	$h_s = 0.15$ [m]	

Datos de las varillas electrodo

L = longitud [m]	L = 3 [m]
r = radio del electrodo [m]	r = 0.008 [m]

Datos del conductor enterrado

A = radio [m] 4/0 AWG	A = 0.0064 [m]	d = 0.0128 [m]
h = profundidad de la red [m]	h = 0.6 [m]	0.25 < h < 2.5 [m]
D = espaciamiento entre conductores paralelos	D = 8 [m]	

Datos de la falla

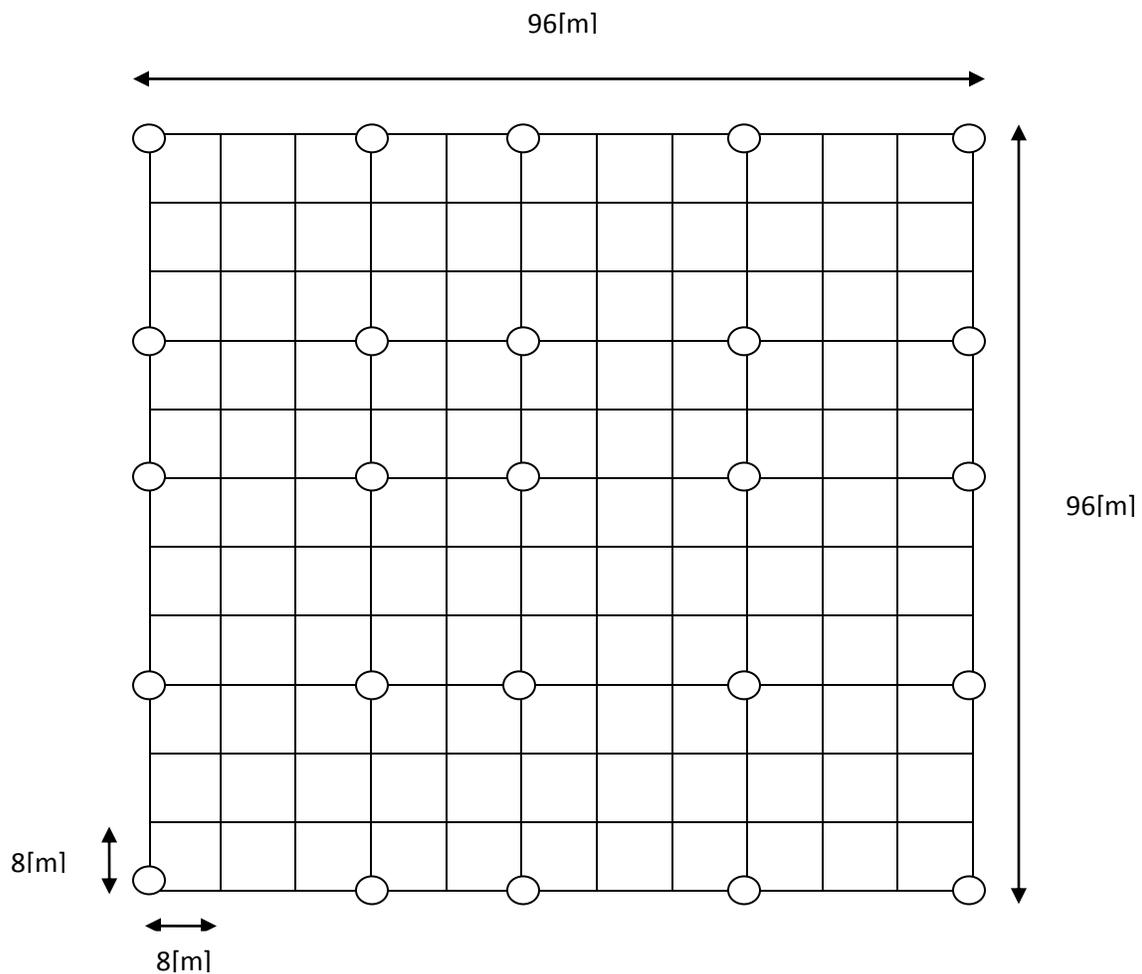
t_f = tiempo de falla [s]	$t_s = 0.5$ [s]
C_p = factor de crecimiento	$C_p = 1$
KV = voltaje del sistema	115 KV
X/R = relación X/R en el punto de falla	X/R = 10
KVA = potencia de falla	1296000 KVA
I_f = corriente simétrica de falla	

$$I_f = \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3} \text{ KV}} \quad I_f = 6506.49 \text{ [A]}$$

S_f = factor de reducción de falla	$S_f = 1$
I_g = corriente simétrica de falla [A]	
$I_g = S_f * I_f$	$I_g = 6506.49 \text{ [A]}$

Nuestro diseño propuesto de la malla de tierra incluye 12 conductores horizontales y 12 conductores transversales, con un radio de 4/0 AWG; además de 25 electrodos de 3 metros de longitud cada uno proporcionados a lo largo de toda la malla. La cuadrícula de la rejilla para tierra será de 8 x 8 m, en toda el área del terreno, de acuerdo a las especificaciones de la norma NRF-011-CFE- 2004.

La longitud total del terreno es de 96 m x 96 m, con un área total de 9216 m², como se indica en la siguiente figura:



Con estas consideraciones, procedemos a realizar los cálculos necesarios expuestos en el capítulo 3 para verificar que nuestro diseño es completamente seguro.

En base a los datos obtenidos para el cálculo, el tiempo de duración de la falla

$$t_c = 0.5 \text{ [seg]}$$

De acuerdo a la ecuación 5 :

$$I_G = D_f * I_g$$

De acuerdo a la Tabla 2, considerando $X/R = 10$, y con una duración de falla $t_f = 0.5$ segundos, el factor de decremento sería:

$$D_f = 1.026$$

Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente:

$$I_G = (1.026)(6506.49)$$

$$I_G = 6675.66 \text{ [A]}$$

Para el cálculo de la tensión de paso y tensión de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano, necesitamos obtener el valor del factor de reducción, el cual es:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left[1 - \frac{160}{3500} \right]}{2(0.15) + 0.09}$$

$$C_s = 0.7797$$

$$E_{\text{paso}} = [1000 + 6 (0.7797)(3500)] \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{paso}} = 2850.13 \text{ [V]} \quad (\text{para } 50 \text{ kg})$$

$$E_{\text{paso}} = [1000 + 6 (0.7797)(3500)] \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{paso}} = 3857.51 \text{ [V]} \quad (\text{para } 70 \text{ kg})$$

$$E_{\text{contacto}} = [1000 + 1.5(0.7797)(3500)] \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{contacto}} = 835.57 \text{ [V]} \quad (\text{para } 50 \text{ kg})$$

$$E_{\text{contacto}} = [1000 + 1.5(0.7797)(3500)] \frac{0.157}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{contacto}} = 1130.9 \text{ [V]} \quad (\text{para } 70 \text{ kg})$$

Una vez obtenidos estas tensiones, calculamos la resistencia de tierra preliminar en el sistema de Tierra, con ayuda de la ecuación 12, debido a que la rejilla propuesta se encuentra a una profundidad de 0.6 [m]:

$$R_g = 160 \left[\frac{1}{2379} + \frac{1}{\sqrt{(20)(9216)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.6 \sqrt{\frac{20}{9216}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.8024 \Omega$$

La subestación que estamos considerando de acuerdo a los 115 KV, se considera como alta tensión a nivel subtransmisión, y del lado de los 23 KV como media tensión; en base a la NRF-011-CFE-2004, el valor de la resistencia de la malla de tierra debido a las características de nuestra subestación debe ser alrededor de 1 Ω o menor, por lo que nuestro valor obtenido cumple con dicho requerimiento.

Para la determinación de la elevación del potencial de tierra, consideramos la ecuación 16:

$$GPR = I_G \times R_g$$

Al sustituir los valores:

$$GPR = (6675.66)(0.8046)$$

$$GPR = 5371.68 [V]$$

De acuerdo a la norma NRF-011-CFE-2004 y al IEEE Std 80-2000, se compara la elevación del potencial de tierra con la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, sin embargo, el GPR es mucho mayor, por lo que se debe continuar con el diseño.

$$\text{GPR} = 5371.68 \text{ [V]} > E_{\text{contacto}} = 835.57 \text{ [V]} \quad (\text{para } 50 \text{ kg})$$

$$\text{GPR} = 5371.68 \text{ [V]} > E_{\text{contacto}} = 1130.9 \text{ [V]} \quad (\text{para } 70 \text{ kg})$$

Procedemos a la obtención de la tensión de malla.

Para calcular el coeficiente K_m , hacemos uso de la ecuación 20, tomando en cuenta los siguientes parámetros:

$$L_c = 2304 \text{ [m]}$$

$$L_p = 384 \text{ [m]}$$

$$A = 9216 \text{ m}^2$$

$$n_a = \frac{2 (2304)}{384} = 12$$

$$n_b = 1 \quad (\text{por ser una rejilla cuadrada})$$

Para la forma de rejilla para tierra en CFE

$$n = (12) (1) = 12$$

Para el cálculo del coeficiente K_n usamos la ecuación 19, en donde tomamos $h_o = 1$ metro

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.6}{1}} = 1.264$$

Además se consideran los siguientes valores previamente establecidos:

$$D = 8 \text{ [m]}$$

$$d = 0.0128 \text{ [m]}$$

$$h = 0.6 \text{ [m]}$$

$$K_{ji} = 1$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(8)^2}{16(0.6)(0.0128)} + \frac{(8 + 2(0.6))^2}{8(8)(0.0128)} - \frac{0.6}{4(0.0128)} \right) + \frac{1}{1.264} \ln \left[\frac{8}{\pi((2)(12) - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.7442$$

Ahora calcularemos el factor de irregularidad K_i aplicando la ecuación 21:

$$K_i = 0.644 + (0.148)(12) = 2.42$$

Asimismo, la longitud efectiva del conductor utilizado se calcula utilizando la ecuación 22, donde:

$$L_c = 2304 \text{ [m]}$$

$$L_r = 3 \text{ [m]}$$

$$L_x = 96 \text{ [m]}$$

$$L_y = 96 \text{ [m]}$$

$$L_R = 75 \text{ [m]}$$

$$L_m = 2304 + \left(1.55 + 1.22 \left(\frac{3}{(96^2 + 96^2)^{1/2}} \right) \right) 75$$

$$L_m = 2422.27 \text{ [m]}$$

Gracias a los valores calculados anteriormente procedemos a obtener nuestra tensión de malla para nuestro diseño propuesto, de acuerdo a la ecuación 17:

$$E_m = \frac{160 (0.7442)(2.42)(6675.66)}{2422.27}$$

$$E_m = 794.13 \text{ [V]}$$

Una vez obtenido este valor, comparamos con la tensión de contacto obtenida anteriormente para 50 y 70 kg:

$$E_m = 794.13 \text{ [V]} < E_{\text{contacto}} = 835.57 \text{ [V]} \text{ (para 50 kg)}$$

$$E_m = 794.13 \text{ [V]} < E_{\text{contacto}} = 1130.9 \text{ [V]} \text{ (para 70 kg)}$$

Como la tensión de malla de nuestro diseño es menor a la tensión de contacto para ambos casos, podemos decir que el diseño es seguro y seguimos con los cálculos restantes.

Para calcular la tensión de paso, obtenemos el valor de L_s y del coeficiente K_s , de acuerdo a las ecuaciones 24 y 25 respectivamente:

$$L_s = 0.75 (2304) + 0.85 (75)$$

$$L_s = 1791.75 \text{ [m]}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.6)} + \frac{1}{8(0.6)} + \frac{1}{8} \left(1 - 0.5^{(12-2)} \right) \right]$$

$$K_s = 0.3315$$

$$K_i = 2.42 \text{ (calculado anteriormente)}$$

Se procede a sustituir en la ecuación 23 y así obtener la tensión de paso de acuerdo al diseño propuesto:

$$E_{\text{paso}} = \frac{160 (6675.66)(0.3315)(2.42)}{1791.75}$$

$$E_{\text{paso}} = 478.22 \text{ [V]}$$

Al comparar con los resultados obtenidos para 50 y 70 kg:

$$E_{\text{paso}} = 478.22 \text{ [V]} < E_{\text{paso}} = 2850.13 \text{ [V]} \text{ (para 50 kg)}$$

$$E_{\text{paso}} = 478.22 \text{ [V]} < E_{\text{paso}} = 3857.51 \text{ [V]} \text{ (para 70 kg)}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede decir que nuestro sistema de tierras es seguro, al cumplir la condición fundamental descrita en el paso 10 del capítulo 3.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo al trabajo realizado en esta tesis podemos concluir que el adecuado uso de normas para el diseño de un sistema de tierras en cualquier subestación eléctrica es fundamental ya que garantiza la seguridad de las personas involucradas en el funcionamiento de la subestación así como también el buen funcionamiento y protección de los equipos que se encuentran en dicha subestación.

Uno de los aspectos de mayor importancia a considerar en el diseño de un sistema de tierras es la corriente máxima que se pueda presentar en caso de una falla, ésta se obtiene gracias al análisis de corto circuito, que es la pauta para el inicio del diseño.

Para el diseño de la malla propuesta nos basamos en las normas mencionadas a lo largo de la tesis para determinar las dimensiones y separación que existen en la rejilla de tierra así como también la profundidad de ésta y los electrodos utilizados. Es necesario mencionar que generalmente en los sistemas de tierras se tiene una separación en la cuadrícula de la rejilla menor a 8 [m], sin embargo en la realización de esta guía seguimos al pie de la letra los parámetros que marca cada norma por consiguiente la separación propuesta en la cuadrícula de la rejilla fue de 8x8 [m].

De acuerdo a las características del terreno donde se construya el sistema de tierras es que se obtienen las tensiones de paso y contacto que nos servirán de referencia al finalizar el diseño ya que al comparar estos valores con los obtenidos de acuerdo a la propuesta, se tendrá la garantía de que el sistema es seguro o bien se tendrán que realizar modificaciones. En el diseño propuesto se obtuvieron tensiones de paso y contacto menores a las tensiones permisibles por cuerpo humano que fueron calculadas al inicio del diseño, teniendo así como resultado un sistema de tierras seguro y que cumple con los estándares que marcan las normas utilizadas. La condición antes mencionada es el punto más importante a cumplir dentro del diseño de un sistema de tierras ya que de no ser así se tendría que proponer un nuevo diseño que dé cumplimiento a esta.

Para el uso de esta guía, recomendamos seguir los pasos como se han establecido, ya que estos nos llevarán de manera eficiente al resultado deseado; esta guía aplica en el diseño de cualquier subestación diferente a la utilizada en esta tesis.

Al basar esta guía en las normas mencionadas, garantizamos seguridad como el punto más importante, pero también el funcionamiento adecuado de nuestro sistema de tierras, lo que se traduce en un óptimo desempeño de la subestación para cumplir con el principal objetivo de ésta, continuidad en el suministro de energía eléctrica y seguridad al llevar a cabo este proceso.

Bibliografía

- Raúl Martín José, Diseño de Subestaciones Eléctricas, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2ª ed., 2000.
- Norma Oficial Mexicana de Instalaciones Eléctricas NOM-001-SEDE-2005.
- IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- NRF-011-CFE-2004, Sistema de Tierra Para Plantas y Subestaciones Eléctricas.
- Ruelas Gómez Roberto, Sistemas de Puesta a Tierra. Teoría, Diseño, Medición y Mantenimiento, Versión 2009, León Guanajuato.