

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 red 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 dispersarse 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 Electrodo

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. Electrodo de varilla o tubería

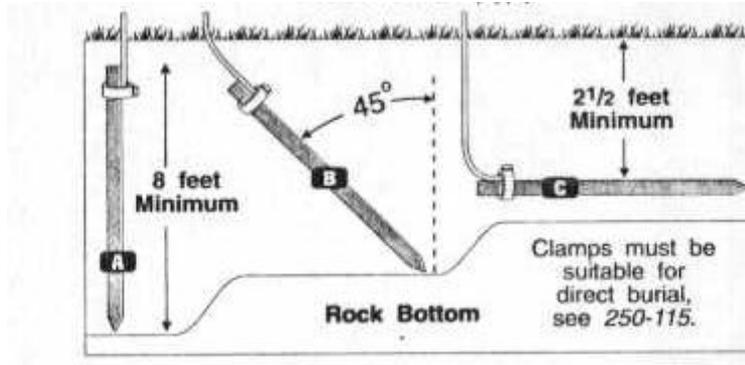
De acuerdo con la NOM los electrodos de varilla y tubo, no deben tener menos de 2,40 m de largo y deben instalarse de tal modo que por lo menos 2,40 m de su longitud esté en contacto con la tierra.

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 dura un promedio de 35 años en un suelo promedio; si tiene un recubrimiento de 13 milésimas 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 hierro 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

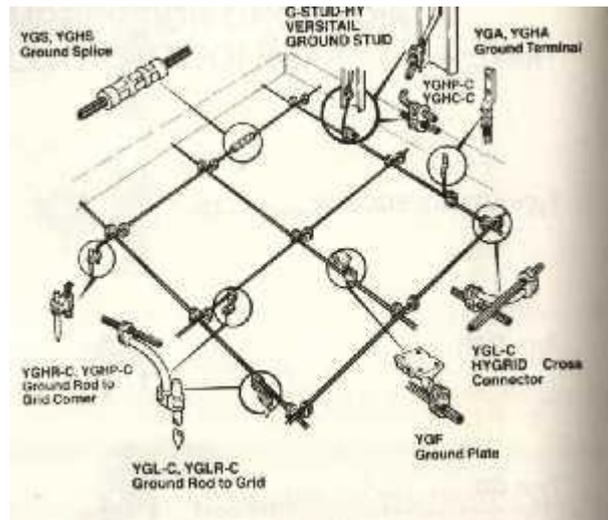
La Norma Oficial Mexicana de instalaciones eléctricas requiere de un sistema enmallado de tierra con múltiples electrodos y conductores enterrados, cuando están involucradas tensiones y corrientes eléctricas muy altas, con el fin de minimizar los riesgos al personal en función de la tensión eléctrica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

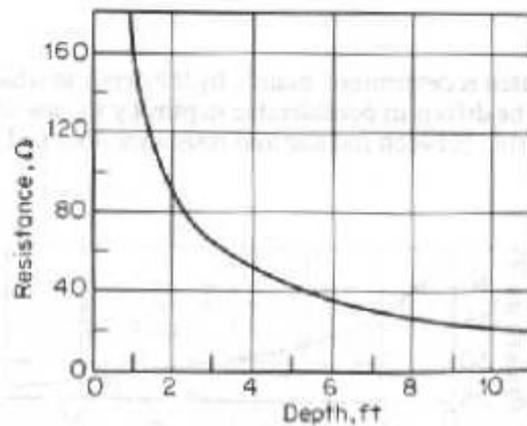
La NOM permite para los sistemas con un electrodo único que conste de una varilla, tubería o placa, que no tiene una resistencia a tierra de 25 ohms o menos, que se complemente con electrodos adicionales de los tipos mencionados anteriormente, separados por lo menos una distancia de 1,83 m entre sí. 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.