SISTEMA DE TIERRA PARA PLANTAS Y SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

ESPECIFICACIÓN
CFE 01J00-01

DICIEMBRE 2016
REVISA Y SUSTITUYE A LA
EDICIÓN DE DICIEMBRE 2015

MÉXICO
PREFACIO

Esta especificación ha sido elaborada de acuerdo con las Bases Generales para la Normalización en CFE. La propuesta de revisión fue preparada por la Subdirección de Transmisión.

Revisaron y aprobaron la presente especificación las áreas siguientes:

GERENCIA DE ABASTECIMIENTOS
GERENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL
GERENCIA DEL LAPEM
GERENCIA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE TRANSMISIÓN

El presente documento normalizado entra en vigor a partir de la fecha abajo indicada y será actualizado y revisado tomando como base las observaciones que se deriven de la aplicación del mismo. Dichas observaciones deben enviarse a la Gerencia de LAPIEM, cuyo Departamento de Normalización y Metrología coordinará la revisión.

Esta especificación revisa y sustituye a la de diciembre 2015 y a todos los documentos normalizados de CFE relacionados con sistema de tierra para plantas y subestaciones eléctricas que se hayan publicado.

AUTORIZO

ING. ALBERTO ALEJANDRO MONTOYA VARGAS
ENCARGADO DE LA GERENCIA DEL LAPEM

NOTA: Entra en vigor a partir de: 170215
<table>
<thead>
<tr>
<th>Contenido</th>
<th>Página</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>1 OBJETIVO</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>2 CAMPO DE APLICACIÓN</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>3 NORMAS QUE APLICAN</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>4 DEFINICIONES</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>4.1 Alta Tensión</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>4.2 Aterrizamiento</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>4.3 Conductor de Puesta a Tierra</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>4.4 Conductor de Puesta a Tierra de los Equipos</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>4.5 Corriente a Tierra</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>4.6 Electrodo Artificial</td>
<td>1</td>
</tr>
<tr>
<td>4.7 Electrodo Auxiliar para Tierra</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.8 Electrodo para Tierra</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.9 Electrodo Primario para Tierras</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.10 Elevación del Potencial de Tierra (GPR)</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.11 Media Tensión</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.12 Rejilla de Aterrizamiento</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.13 Resistencia Eléctrica del Cuerpo Humano</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.14 Sistema de Tierras</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.15 Tapete para Tierras</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>4.16 Tensión de Contacto (Vc)</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>4.17 Tensión de Paso (Vp)</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>4.18 Tensión de Malla (Vm)</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>4.19 Tensión Transferido</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>4.20 Tierra</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>5 CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES GENERALES</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>5.1 Diseño del Sistema de Tierras</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>5.1.1 Generalidades diseño del sistema de tierras</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>5.2 Medición de la Resistividad del Terreno</td>
<td>4</td>
</tr>
<tr>
<td>5.3 Procedimiento de Diseño</td>
<td>4</td>
</tr>
<tr>
<td>5.3.1 Cálculo de la sección transversal del conductor de la malla de tierra</td>
<td>5</td>
</tr>
</tbody>
</table>
5.3.2 Cálculo de la tensión de paso y tensión de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano ______ 7
5.3.3 Recomendaciones generales ___________________________________________________ 15
6 CONDICIONES DE OPERACIÓN __________________________________________________ 16
6.2 Malla de Tierra de la Subestación _______________________________________________ 16
6.2.1 Disposición física _____________________________________________________________ 16
6.3 Bajada de Puesta a Tierra para Equipos __________________________________________ 18
6.3.1 Protección contra vandalismo __________________________________...................... 19
6.4 Sistema de Tierra del Cuarto de Control __________________________________________ 19
6.5 Sistema de Tierra de Pararrayos ________________________________________________ 20
6.6 Puesta a Tierra de Cercas Metálicas ______________________________________________ 20
6.8 Recepción y Puesta en Servicio del Sistema de Tierra _______________________________ 20
6.9 Mantenimiento del Sistema de Tierra _____________________________________________ 21
7 CONDICIONES DE DESARROLLO SUSTENTABLE ____________________________________ 22
8 CONDICIONES DE SEGURIDAD INDUSTRIAL ______________________________________ 22
9 CONTROL DE CALIDAD __________________________________________________________ 22
9.1 Métodos de Prueba y Equipos de Medición _________________________________________ 22
9.1.1 Método de wenner o de los cuatro electrodos para la medición de resistividad del terreno (ρ) 22
9.1.2 Método de caída de potencial para medición de resistencia óhmica en un sistema de tierras 26
9.1.3 Método de integridad física de la red de tierra. _________________________________ 29
10 BIBLIOGRAFÍA __________________________________________________________________ 31
TABLA 1 - Constantes de Materiales __________________________________________________ 32
TABLA 2 - Valores Típicos de Factor de Decremento D_f ______________________________ 32
TABLA 3 – Formato para la Medición de la Resistividad ____________________________________ 33
TABLA 4 - Resultados de la Medición de la Resistencia de la Malla de Tierras _______________ 33
APÉNDICE A 35
APÉNDICE B 38
FLUJOGRAMA DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO ________________________________________ 38
1 OBJETIVO

Proporcionar los criterios y requerimientos, para el diseño, construcción y mantenimiento del sistema de tierra en plantas y subestaciones eléctricas de corriente alterna y establecer las bases para que la instalación guarde las condiciones de seguridad para el personal y su infraestructura.

2 CAMPO DE APLICACIÓN

Aplica a plantas y subestaciones de corriente alterna (subestaciones de plantas generadoras, de transmisión y de distribución) convencionales o aisladas en gas SF₆.

3 NORMAS QUE APLICAN

NOM-008-SCFI-2002 Sistema General de Unidades de Medida.
NOM-022-STPS-2008 Electricidad estática en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad.

NOTA: En caso de que los documentos anteriores sean revisados o modificados debe utilizarse la edición vigente en la fecha de publicación de la convocatoria al concurso abierto, salvo que la CFE indique otra cosa.

4 DEFINICIONES

4.1 Alta Tensión

a) Nivel Subtransmisión.- valores de tensión eléctrica mayores a (13.8 kV) 35 kV y menores a 230 kV.

b) Nivel Transmisión.- valores de tensión eléctrica mayores o iguales a 230 kV.

4.2 Aterrizamiento

Sistema, circuitos o aparatos previstos con una conexión a tierra con el propósito de establecer un circuito de retorno por el suelo y para mantener su potencial al potencial del suelo

4.3 Conductor de Puesta a Tierra

Conductor utilizado para conectar una estructura metálica, un equipo o el circuito puesto a tierra (que puede ser el neutro de un transformador o de un generador) al electrodo o red de tierra.

4.4 Conductor de Puesta a Tierra de los Equipos

Conductor utilizado para conectar las partes metálicas no conductoras de corriente eléctrica de los equipos, canalizaciones y otras envolventes, al conductor del sistema puesto a tierra, al conductor del electrodo de puesta a tierra o a ambos.

4.5 Corriente a Tierra

Corriente que fluye al sistema de tierra a través de un conductor eléctrico la cual es producida por una falla en el circuito eléctrico o por una descarga atmosférica.

4.6 Electrodo Artificial
Cuerpo metálico conductor de fabricación especial que puede contener componentes químicos.

4.7 Electrodo Auxiliar para Tierra

Elemento conductor cuya función primaria es conducir la corriente de falla a tierra, hacia el suelo.

4.8 Electrodo para Tierra

Conductor embebedo en el suelo y utilizado para colectar la corriente a tierra o para disipar la corriente de tierra hacia el suelo.

4.9 Electrodo Primario para Tierras

Electrodo específicamente diseñado o adaptado, para descargar las corrientes de falla a tierra, hacia el suelo, frecuentemente en patrones de descarga específicas según requiera el diseño del sistema de tierras.

4.10 Elevación del Potencial de Tierra (GPR)

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

4.11 Media Tensión

Valores de tensión eléctrica mayores a 1 kV e iguales o menores a 35 kV.

4.12 Rejilla de Aterrizamiento

Sistema de electrodos horizontales de tierra, que consiste de un número de conductores desnudos interconectados, enterrados en el suelo, proporcionando una tierra común para los dispositivos eléctricos o estructuras metálicas, usualmente ubicados en un lugar específico.

NOTA: Las rejillas enterradas horizontales cerca de la superficie del suelo, son también efectivas para controlar los gradientes de potencial superficial. Una rejilla típica, usualmente se complementa con un número de varillas de tierra y pueden ser conectadas posteriormente a los electrodos auxiliares de tierra a fin de bajar su resistencia con respecto a la tierra remota, conservando el mismo material u otro de mejor calidad.

4.13 Resistencia Electrónica del Cuerpo Humano

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

4.14 Sistema de Tierras

Comprende a todos los dispositivos de tierra interconectados dentro de un área específica.

4.15 Tapete para Tierras

Placa metálica sólida o un sistema de conductores desnudos separados a poca distancia, conectados. Y frecuentemente colocados a poca profundidad por encima de la rejilla del sistema de tierras o en otra parte en la superficie del suelo, con el propósito de obtener una medida de protección extra para minimizar el peligro de exposición a altos voltajes de paso o de contacto en un área de operación crítica o en lugares utilizados frecuentemente por la gente. Enrejados metálicos de tierra, colocado arriba de la superficie del suelo o una malla de conductores directamente bajo el material superficial.
4.16 **Tensión de Contacto (Vc)**

Es la diferencia de potencial entre la elevación del potencial de tierra (GPR) y el potencial superficial en el punto en donde una persona está parada mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura metálica no aterrizada.

4.17 **Tensión de Paso (Vp)**

Es la diferencia de potencial superficial que puede experimentar una persona con los pies separados a 1 m de distancia y sin hacer contacto con algún objeto aterrizado.

4.18 **Tensión de Malla (Vm)**

Es la máxima tensión de contacto dentro de una malla de tierras.

4.19 **Tensión Transferido**

Es un caso especial del voltaje de contacto en donde un voltaje es transferido hacia el interior o la parte de afuera de la subestación desde un punto externo remoto.

4.20 **Tierra**

Conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por la cual un circuito eléctrico o equipo está conectado al suelo o algún cuerpo conductor de gran extensión y que sirve en lugar del suelo.

5 **CARÁCTERÍSTICAS Y CONDICIONES GENERALES**

5.1 **Diseño del Sistema de Tierras**

Las unidades de medida utilizadas en esta especificación son las contenidas en la norma NOM-008-SCFI.

5.1.1 **Generalidades diseño del sistema de tierras**

Las plantas y subestaciones deben tener un adecuado sistema de tierra al cual se conectan todos los elementos de la instalación que requieran ser puestos a tierra para:

a) Proveer un medio seguro para proteger al personal que se encuentre en la proximidad del sistema de tierras o de los equipos conectados a tierra de los peligros de una descarga eléctrica debida a condiciones de falla o por descarga atmosférica.

b) Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes a tierra, ya sean debidas a una falla a tierra del sistema, o a la propia operación de algunos equipos.

c) Proveer un medio para disipar las corrientes eléctricas indeseables a tierra, sin que se excedan los límites de operación de los equipos.

d) Facilitar la operación de los dispositivos de protección adecuados para la eliminación de fallas a tierra.

e) Proveer un medio de descarga y desenergización de equipos, antes de proceder a las tareas de mantenimiento.

f) Dar mayor confiabilidad y seguridad al servicio eléctrico.
Los elementos principales del sistema de tierra son:

a) Red o malla de conductores enterrados, a una profundidad que usualmente varía de (0.3 a 0.8) m, sin ser esto limitativo puesto que depende del tipo de terreno.

b) Electrodes tipo varillas que pueden ser de diferente diámetro conectados a la malla de conductores e instalados verticalmente en el terreno, enterrados a una profundidad que considere la capa de menor resistividad, se recomienda al menos una varilla en cada esquina de la malla de tierra. La definición de las fórmulas de cálculo especificadas en esta norma, no considera electrodos artificiales.

c) Conductores de puesta a tierra, a través de los cuales se hace la conexión a tierra de las partes de la instalación y del equipo, que deban ser puestos a tierra incluyendo estructuras metálicas. Las características de estos conductores no se establecen en esta especificación.

d) Conectores apropiados que pueden ser soldables, mecánicos y de compresión. De tal forma que la temperatura de fusión en la unión no sea menor a la temperatura de fusión del conductor que se conecte y que la unión no se deteriore por el medio ambiente en que se instale o falta de mantenimiento de estos.

Considerar como prioridad la aplicación de soldadura exotérmica para unión cable - cable y conexiones a equipo, en caso de no ser posible y realizar conexiones mecánicas o de compresión, utilizar sistemas de protección anticorrosiva en la zona de la unión para incrementar el tiempo de vida útil del sistema.

Se debe verificar que la corriente de fusión de los materiales seleccionados no sea menor a la corriente de corto circuito de la zona donde se instalará la red o malla.

5.2 Medición de la Resistividad del Terreno

Se deben llevar a cabo las mediciones de la resistividad del terreno en el área donde se instalará la malla de tierra, determinando la resistividad de la o las capas de terreno que deban aplicarse en los cálculos de la malla de tierra. Este estudio debe llevarse a cabo en la época del año de menor humedad del terreno, debiéndose considerar el procedimiento descrito en el inciso 9.1.1.

Se deben realizar dos mediciones: una de resistividad cuyos resultados permitirán establecer el diseño de la red de tierras. Y otra medición de resistencia posterior a la construcción del sistema de tierras a fin de verificar si se cumplió con los parámetros de diseño esperados.

5.3 Procedimiento de Diseño

El diagrama de bloques mostrado en el anexo el cual ilustra la secuencia de los pasos a seguir para desarrollar el diseño de la malla de tierras. A continuación, se desarrolla cada paso del procedimiento.

Paso 1:

Se debe de tener un plano de arreglo general de la subestación para determinar el área que debe ser aterrizada. Obtener los valores de la resistividad del terreno, con base al procedimiento descrito en el inciso 9.1.1, para determinar el perfil de resistividad del modelo de suelo necesario (homogéneo o de dos capas).

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

Paso 2:

Determinar la sección transversal del conductor, la corriente de falla 3Io (Tres veces la corriente de falla de secuencia cero) debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del
sistema de tierra, y el tiempo \( t_c \) debe 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 bifásica a tierra la que resulte más severa. Ya que la corriente de falla 3Io debe ser la máxima corriente futura.

5.3.1 Cálculo de la sección transversal del conductor de la malla de 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 conocida la capacidad y las constantes características de cada material (véase tabla 1) y se aplican en las siguientes ecuaciones:

\[
A_{\text{kmil}} = I \times \frac{197.4}{TCAP \cdot (K_o + T_m)^{1/2} \ln \left( \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)}
\]

\[
A_{\text{mm}^2} = I \times \frac{1}{TCAP \cdot 10^{-4} \cdot K_o + T_m \left( \frac{t_c \alpha_r \rho_r}{\alpha_o} \right) \ln \left( \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)^{1/2}}
\]

Dónde:

\( A \) = Sección transversal del conductor en mm\(^2\). También kmil.

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

\( T_m \) = Temperatura máxima permitible en °C.

\( T_a \) = Temperatura ambiente en °C.

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

\( \alpha_o \) = Coeficiente térmico de resistividad a °C.

\( \alpha_r \) = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia \( T_r \).

\( \rho_r \) = Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia \( T_r \) en uU-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/cm\(^3\)/°C.

\( K_f \) = \( 1/\alpha_o \), \( 1/\alpha_r - T_r \) en °C.

Determinación de la Corriente máxima de malla \( I_G \)
La corriente simétrica de malla es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la malla de tierras hacia el terreno que la rodea, se determina con la siguiente fórmula:

\[ I_g = S_f \cdot I_f \]

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

Dónde:

- \( I_g \) = Corriente simétrica de malla en A.
- \( I_f \) = Corriente simétrica de falla a tierra en A (valor rms 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 malla hacia el terreno.
- \( I_0 \) = Corriente de secuencia cero en A.

La corriente que puede circular en una malla de tierras en casos de falla, se conoce como “corriente máxima de malla”, la cual se determina con la fórmula siguiente:

\[ I_G = D_f \cdot I_g \]

\[ D_f = (1 + \frac{T_f}{t_f} (1 - e^{-2\pi T_a/T_f}))^{1/2} \]

En donde:

- \( I_G \) = Corriente máxima de malla en A.
- \( I_g \) = Corriente simétrica de malla (valor rms) 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 seg.

\[ T_a = \frac{X''}{WR} \]

Se presenta la siguiente tabla de \( D_f \) para diferentes valores de \( X''/R \).

La selección de \( T_f \) debe reflejar un tiempo rápido de liberación de falla en subestaciones de transmisión y tiempos de liberación de falla lentos para subestaciones de distribución. Valores típicos de \( T_f \)
Se recomiendan entre 0.25 s a 1.0 s, un valor usual es 0.5 s.

**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 s a 1.0 s.

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

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

Las fórmulas 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:

- $E_{paso} = \left( 1000 + 6 C_s \rho_s \right) \frac{0.116}{\sqrt{t_x}} \text{ (volts)}$

- $E_{contacto} = \left( 1000 + 1.5 C_s \rho_s \right) \frac{0.116}{\sqrt{t_x}} \text{ (volts)}$

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 $\rho_s$:

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

Dónde:

- $\rho$ = Resistividad del suelo en $\Omega\cdot$m.

**Paso 4:**

El diseño preliminar debe incluir una cuadricula la cual debe estar formada por conductores que permitirán el acceso al aterrizamiento de los equipos y estructuras, evitando en lo posible atravesar las cimentaciones de los equipos con el fin de facilitar el mantenimiento. La separación inicial estimada de los conductores, así como la ubicación de los electrodos (varillas) de tierra, deben tener como base la corriente $I_G$ y el área de la subestación que debe ser aterrizada.

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 tierras) sea la siguiente:

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

- La cuadricula de las mallas que forman la red de tierras debe ser de 8 m x 8 m, en toda el área del terreno y de acuerdo al criterio adoptado para el aterrizamiento de la cerca.
b) Para subestaciones convencionales nuevas con tensiones de 230 kV y 400 kV en el lado de alta tensión:

- La cuadrícula de las mallas que forman la red de tierras debe ser de 10 m x 10 m, en toda el área del terreno y de acuerdo al criterio adoptado para el aterrizamiento de la cerca.

En un sistema de rejillas típico de una subestación, el espaciamiento entre conductores puede estar entre 3 m y 7 m.

En la proposición inicial de la configuración de la malla se pueden considerar arreglos de mallas de subestaciones y terrenos similares existentes, la longitud total de conductor, el arreglo de la malla, así como la cantidad de varillas de tierra se verifican y en su caso se deben modificar, en función de los resultados de los cálculos de la resistencia eléctrica máxima y de las tensiones seguras de paso y de contacto.

Para el diseño de la malla se considera únicamente conductor enterrado con o sin varillas de tierra.

En el diseño inicial debe considerarse el colocar varillas de tierra en los extremos de la rejilla y en los puntos de unión en el perímetro.

Se deben también colocar varillas de tierra en equipos como apartarrayos, interruptores y transformadores de potencia, interconectados a la red de tierra general.

En suelos con alta resistividad, es conveniente utilizar varillas largas instaladas en los puntos de unión de la rejilla, enterrados a la profundidad de la capa de menor resistividad.

Deben emplearse dos conexiones a tierra en diferentes puntos de la rejilla en donde puedan ocurrir altas concentraciones de corriente, como en la conexión del neutro de tierra de los generadores y transformadores, bancos de capacitores, interruptores y apartarrayos.

**Paso 5:**

La estimación de la resistencia de tierra preliminar en el sistema de tierras, debe proveer valores muy bajos.

a) 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.

b) Para subestaciones de potencia de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser entre 1 Ω a 4 Ω.

c) Para subestaciones de distribución de media tensión, el valor de la resistencia de tierra debe ser como máximo de 5 Ω.

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

a) Para profundidades de la red menores de 0.25 m.

\[ R_g = \frac{\rho \pi}{4A} + \frac{\rho}{L} \]

\( R_g \) = Resistencia de la tierra en ohms.

\( \rho \) = Resistividad promedio del suelo en Ω-m.
A = Área ocupada por la rejilla de tierras en m².
L = Longitud total de los conductores enterrados en m.

b) Para profundidades entre 0.25 m y 2.5 m se requiere una corrección por profundidad.

\[ R_y = \rho \left( \frac{1}{L} + \frac{1}{20A} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \frac{20}{A}} \right) \right) \]

Dónde:

h = profundidad de la rejilla (retícula) en metros.

C) Considerando la rejilla con varillas de tierra. Es decir, el sistema de tierras consta de: conductores horizontales (rejilla) y electrodos (varillas) verticales.

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

Dónde:

R₁ = Resistencia de los conductores de la rejilla (malla).
R₂ = Resistencia de todas las varillas de tierra.
R₁₂ = Resistencia mutua entre el grupo de conductores y el grupo de varillas.

\( R_1 = (\rho_1/\pi l_1)(\ln(2l_1/h') + k_1(l_1/A)-k_2). \)
\( R_2 = (\rho_a/2\pi l_2)(\ln(8l_2/d_2)-1+2k_1(l_2/A) + n^2)/(n+1) \)
\( R_{12} = (\rho_a/\pi l_1)(\ln(2l_1/l_2)+k_1(l_1/A)-k_2+1) \)

Dónde:

\( \rho_1 \) = Resistividad del terreno con los conductores a una profundidad h, hacia abajo en Ω-m.

\( \rho_a \) = Resistividad aparente del terreno vista por la varilla de tierra, en Ω-m.

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

\( \rho_2 \) = Resistividad del terreno desde la profundidad H, hacia abajo en Ω-m.

l₁ = Longitud total de los conductores de la rejilla en m.

l₂ = Longitud promedio de la varilla de tierra en m.
h = Profundidad de la rejilla en m.
h' = Coeficiente de la profundidad de la rejilla.
h' = d_1 h

Para conductores enterrados a la profundidad h.

h' = 0.5d_1 Para conductores enterrados en h = 0 (en la superficie).

A = Área cubierta por la red con dimensiones axb en metros.

n = Número de varillas de tierras localizadas en el área A.

k_1, k_2 = Constantes relacionadas con la geometría del sistema (véanse gráficas).

d_1 = diámetro del conductor de la red en m.

d_2 = diámetro de las varillas de tierra en m.

a = ancho de la rejilla en m.

b = largo de la rejilla en m.

**FIGURA 1** – Coeficiente k₁ 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}}}

**DOCUMENTO EN PERÍODO DE ENTRADA EN VIGOR**
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 las varillas. Y una inferior de más baja resistividad con la cual las varillas quedan en contacto.

En este caso para $\rho_1/\rho_2$, la malla se localiza en la capa de resistividad $\rho_1$, pero las varillas están en contacto tanto con la capa de resistividad $\rho_1$, como con la capa de resistividad $\rho_2$, por lo que $R_2$ y $R_{12}$ se calculan con una resistividad aparente $\rho_a$ vistas por las varillas de tierra:

$$\rho_a = \frac{l_2(\rho_1\rho_2)}{(\rho_2(H-h)+\rho_1(l_2+h-H)}$$

Para suelos con resistividad uniforme:

$$\rho_1 = \rho_2$$

Si la diferencia entre $\rho_1$ y $\rho_2$ no es muy grande, de preferencia $\rho_2$ no menor que 0.2 $\rho_1$, y el espesor de la capa superior $H$ es al menos 0.1 $b$, las ecuaciones anteriores son bastante exactas para la mayoría de los cálculos y además fáciles de aplicar.

El análisis computacional basado en el modelado de las componentes del sistema de tierra en detalle, permite calcular la resistencia con un alto grado de exactitud asumiendo que el modelo del suelo se selecciona correctamente.

**Paso 6:**

Determinar la corriente máxima de malla $I_G$. A fin de evitar un sobredimensionamiento del sistema de tierra, para el diseño de la rejilla se utiliza únicamente la porción de la corriente de falla $3I_0$ que fluye a través de la malla a la tierra remota. Sin embargo, la corriente máxima de malla $I_G$ 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 malla $I_G$ se indica en el paso 2.

**Paso 7:**

Determinar la elevación del potencial de tierra (GPR), mediante la fórmula siguiente:

$$GPR = I_G \times R_g$$

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

**Paso 8:**

Calcular las tensiones de paso y de malla para el sistema de tierra propuesto.
**FIGURA 2 – Coeficiente $k_2$ de la fórmula de Schwarz**

**Cálculo de la Tensión de Malla**

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

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

Dónde:

- $\rho$ = Resistividad del terreno en $\Omega\cdot m$.
- $K_m$ = Factor geométrico.
- $K_i$ = Factor de irregularidad.
- $l_G/L_m$ = Relación de la corriente promedio por unidad de longitud de conductor efectivamente enterrado en el sistema de tierras.

Fórmula para calcular $K_m$:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ Ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_v}{K_v Lm} \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$$

Dónde:

- $D$ = Espaciamiento entre conductores paralelos en metros.
- $h$ = Profundidad de los conductores en la rejilla de tierra en metros.
- $d$ = Diámetro del conductor de la rejilla en metros.
$K_h = \text{Factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla.}$

$n = \text{Número de conductores equivalentes en cualquier dirección.}$

Cálculo de $K_{ii}$:

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

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

Cálculo de $K_h$:

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

Dónde:

$h = \text{Profundidad a la cual está enterrada la malla de tierra, dada en metros.}$

$h_0 = \text{Profundidad de referencia y es igual a 1 metro.}$

Cálculo de $n$:

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d$$

$$n_a = \frac{2 \times L_C}{L_p} \quad \text{Para mallas cuadradas, rectangulares y en forma de L}$$

Dónde:

$L_p = \text{Longitud de conductores en la periferia de la rejilla, dada en metros.}$

$L_C = \text{Longitud total de los conductores en la rejilla horizontal en metros.}$

$L_r = \text{Longitud de una sola varilla de tierra en metros.}$

$L_o = \text{Longitud total de las varillas enterradas en la malla dada en metros.}$

$L_x = \text{Longitud máxima de la rejilla en la dirección x dada en metros.}$

$L_y = \text{Longitud máxima de la rejilla en la dirección y dada en metros.}$

$n_b = 1 \quad \text{Para mallas cuadradas.}$

Para cualquier otro caso.
Dónde:

\[ A = \text{Área de la rejilla de tierra en m}^2. \]

Para mallas sin varillas para tierra, o con algunas varillas dentro del área de la malla.

\[ n_c = 1 \quad \text{Para rejillas cuadradas y rectangulares.} \]

\[ n_d = 1 \quad \text{Para rejillas cuadradas, rectangulares o en forma de L} \]

Para la forma de nuestras rejillas

El factor de irregularidad \( K_i \)

\[ K_i = 0.644 + 0.14 \times n \]

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

\[ L_m = L_v + \left( 1.25 + 1.22 \left( \frac{L_r}{L_x^2 + L_y^2} \right) \right) L_R \]

\( L_v = \text{Longitud de una sola varilla de tierra en metros.} \)

**Cálculo de la Tensión de Paso**

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

\[ E_{paso} = \frac{p L_v K_s K_i}{L_s} \]

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

\( K_s = \text{Factor geométrico.} \)

\( K_i = \text{Factor de corrección.} \)

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

\[ L_s = 0.75 L_v + 0.85 L_R \]

Fórmula para calcular \( K_s \):

Para profundidades usuales de rejillas entre \( 0.25 < h < 2.5 \text{ m} \), la constante \( K_s \) se obtiene como:

\[ K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 + h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} \left( 1 - 0.5^{(h/2)} \right) \right] \]
Véase significado de siglas en las fórmulas de la tensión de malla.

**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 algunas varillas para tierra. Los conductores adicionales a la rejilla se requieren cuando el diseño de la malla no incluye conductores cercanos al equipo que debe ser aterrizado. Las varillas para tierra adicionales pueden colocarse en la base de los apartarrayos, transformadores con neutro y otros equipos principales, los cuales deben interconectarse a la malla de tierra. El diseño final debe revisarse con el propósito de eliminar peligros debido a potenciales transferidos y otros peligros asociados.

### 5.3.3 Recomendaciones generales

Donde se suponga que en el terreno pueden existir problemas de corrosión en el material del sistema de tierra, se deben realizar análisis físico-químicos del suelo a fin de tomar las medidas necesarias.

Todos los materiales a utilizar en el sistema de tierras, deben estar certificados.

Las uniones de los electrodos primarios (varillas de tierra) deben hacerse con rosca preferentemente mediante soldadura exotérmica para unión cable - cable y conexiones a equipo, en caso de no ser posible y realizar conexiones mecánicas o de compresión, y agregarse elementos inhibidores que eliminen la corrosión.

Durante la construcción del sistema de tierras, debe cuidarse que los moldes y cualquier material a utilizarse se sujeten a las instrucciones de uso que el fabricante recomiende.

Debe tener una resistencia tal, que el sistema se considere sólidamente puesto a tierra.

La variación de la resistencia, debido a cambios ambientales, debe ser despreciable de manera que la corriente de falla a tierra, en cualquier momento, sea capaz de producir el disparo de las protecciones.

Impedancia de onda de valor bajo para fácil paso de las descargas atmosféricas.

Debe conducir las corrientes de falla sin provocar gradientes de potencial peligrosos entre sus puntos vecinos.

Al pasar la corriente de falla durante el tiempo máximo establecido de falla, (es decir disparo de respaldo), no debe haber calentamientos excesivos.

Debe ser resistente a la corrosión.
6 CONDICIONES DE OPERACIÓN

6.1 Generalidades de la Construcción del Sistema de Tierras

6.1.1 Sistemas equipotenciales

La función de la unión equipotencial es reducir las diferencias de potencial generadas por una corriente de falla en el sistema eléctrico o causado por una descarga atmosférica que incide sobre alguna estructura propia del sistema eléctrico o en las cercanías de la instalación.

La diferencia de potencial puede producir la circulación de corrientes indeseables y la generación de arcos eléctricos con el riesgo de fuego y explosión en áreas peligrosas o bien algún daño físico tanto a los seres vivos como al equipo.

6.2 Malla de Tierra de la Subestación

El objetivo de todos los sistemas de tierra es limitar el efecto de los gradientes de potencial de tierra producidos en condiciones normales y condiciones de falla para no poner en peligro la seguridad de las personas o dañar la infraestructura de la subestación.

Las funciones de la malla son las siguientes:

a) Proveer un medio para disipar las corrientes eléctricas a tierra, sin que excedan los límites de operación de los equipos.

b) Proveer una conexión a tierra para el punto neutro de los equipos que así lo requieran (transformadores, reactores, etc).

c) Proveer un medio de descarga y desenergizar los equipos antes de proceder a tareas de mantenimiento.

d) Drenar corrientes de fuga o corrientes por descargas electrostáticas.

e) Estabilizar el voltaje durante operaciones normales.

f) Dar mayor confiabilidad, continuidad y confiabilidad al servicio eléctrico.

g) Proveer un medio seguro para proteger al personal en la proximidad de sistemas y equipos conectados a tierra de los peligros de una descarga eléctrica bajo condiciones de falla.

6.2.1 Disposición física

6.2.1.1 Subestaciones Abiertas

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

La malla debe estar 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 de la red de tierra.

Los cables que forman la malla deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de estructuras o equipos para facilitar la conexión a tierra de los mismos.
En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente mediante conectores (ver inciso 5.1.1) y en donde proceda a varillas para tierra.

En subestaciones tipo pedestal, se requiere que el sistema de tierra quede confinado dentro del área que proyecta el equipo sobre el suelo, para este caso se recomienda que las uniones que queden en esta área sean mediante soldadura exotérmica debido a la poca accesibilidad que se tiene para dar mantenimiento.

**6.2.1.2 Plantas Hidroeléctricas**

En el caso de plantas hidroeléctricas, de la malla principal de la zona del desfogue, deben subir cables para conectarse al cable que debe rodear cada piso de la casa de máquinas embebido en el concreto, empleando los muros, dejando los registros correspondientes a lo largo y ancho de la casa de máquinas, para de estos sacar derivaciones o conexiones a cada equipo. Las conexiones en los registros deben hacerse con conectores mecánicos. Se hace de esta manera para evitar que los cables de tierra queden expuestos a la intemperie y los mismos puedan reaccionar con el ambiente contaminado y a la vez protegerlos del vandalismo.

Las estructuras metálicas de la planta y delas subestaciones, así como las partes metálicas de y los 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 malla principal de la red de tierra debe estar a nivel del tubo de aspiración 0.50 m bajo el concreto, en contacto directo con la roca.

Los parámetros físicos de la malla de tierra se basan en limitaciones tanto físicas como económicas presentes en la instalación de la propia malla. Por ejemplo, una limitación física se encuentra en la excavación y relleno de las sepas para enterrar el conductor, por lo que el espaciamiento de la malla de tierras debe de ser de 2 m en adelante, los espaciamientos típicos van de 3 a 15 m.

No existe una fórmula para determinar el número óptimo de electrodos verticales (varillas de tierra), sin embargo, para que las varillas de tierra tengan una disipación efectiva de corriente, éstas deben instalarse con una separación mínima de 2 veces su longitud.

Como se mencionó, las fórmulas para el cálculo del sistema de tierra, contemplan profundidades que van de 0.3 a 0.8 m. Es importante enterrar la malla a la profundidad de la capa de menor resistividad y que al mismo tiempo se encuentre dentro del intervalo antes mencionado, tomando en cuenta aspectos económicos relacionados con el material, excavación y relleno. Las mediciones de resistividad del terreno deben considerar el procedimiento descrito en el inciso 9.1.1.

En la NOM-022-STPS, se describe que los sistemas de tierra deben interconectarse (Malla general de tierra, cuarto de control, sistema de pararrayos, torres de telecomunicaciones y de llegar a existir alguna otra)

**Recomendaciones:**

a) Al realizar el tendido de los conductores sobre el terreno, las líneas no se deben tensar ya que el movimiento natural del terreno puede provocar la ruptura en una de ellas, debido al exceso de tensión mecánica o debido a los esfuerzos mecánicos producidos por la intensidad de corriente durante una falla a tierra.

b) Las uniones entre conductores, así como las bajadas de puesta a tierra de los equipos, deben realizarse preferentemente con soldadura exotérmica.
c) No realizar dobleces al conductor del sistema de puesta a tierra con ángulos de 90 °.

d) Mantener la misma profundidad del sistema de tierra en todo el predio.

e) No tender una línea de la malla de tierra por la cimentación de los equipos, en esta situación se debe optar por rodear la cimentación a fin de permitir el fácil acceso al conductor para futuros mantenimientos.

f) Al instalar electrodos verticales, realizar barrenos con la herramienta adecuada para su correcta instalación, por ningún motivo se deben meter los electrodos a golpes ya que pueden dañarse debido al esfuerzo físico recibido tras dicha acción, así como perder su recubrimiento de cobre.

g) Instalar registros de tierra para medición y revisión del sistema, los cuales deben de tener las dimensiones adecuadas para poner maniobrar dentro de ellos.

6.3 Bajada de Puesta a Tierra para Equipos

Las bajadas de puesta a tierra deben de realizarse con el conductor previamente seleccionado y debe ser mediante un tramo continuo con la trayectoria más corta desde la malla de tierra hasta el elemento a proteger, así mismo debe cuidarse que los dobleces no fracturen el conductor ni tampoco se generen espacios entre los hilos del cable.

Recomendaciones:

a) Los equipos primarios deben tener dos bajadas de puesta a tierra, las cuales deben conectarse a diferentes líneas principales.

b) Para los pararrayos que cuenten con contador de eventos convencional, se debe de realizar una bajada de puesta a tierra directa que vaya conectada desde la base del equipo hasta la malla de tierra. Si la estructura del equipo es metálica, se debe de aterrizar tanto en la parte superior como en la inferior de la misma, mediante una soldadura de paso, con la finalidad de que el equipo quede aterrizado en caso de que sea robada su puesta a tierra.

c) En los transformadores se recomienda aterrizar mediante soldadura exotérmica en por lo menos dos puntos la carcasa, la puesta a tierra del neutro deben soldarse mediante soldadura exotérmica en algún punto de la parte superior de la carcasa.

d) La bajada de puesta a tierra debe ser instalada pegada a la estructura donde se encuentre instalado el equipo.

e) Fijar las bajadas de puesta a tierra a la estructura, por medio de abrazaderas, grapas, fleje o algún otro medio.

f) En caso de colocar conexiones mecánicas o ponchables se debe de limpiar el área de contacto entre la bajada de puesta a tierra y la estructura, con la finalidad de tener un contacto directo entre ambos elementos.

g) Si la base de soporte del equipo es metálica, se debe soldar el conductor de puesta a tierra en la parte superior e inferior de la base además del punto de conexión con la malla de tierra.

h) Instalar conductor trenzado plano entre la base y el maneral del accionamiento de apertura y cierre de cuchillas.

i) Utilizar un químico sellador y retardador de corrosión entre la parte de contacto de la zapata de puesta a tierra y el equipo a aterrizar.
6.3.1 Protección contra vandalismo

El conductor de puesta a tierra de los equipos queda a expensas de ser robado al verse expuesto visualmente y debido al valor del metal en el mercado, por lo cual se recomienda protegerlo de alguna de las siguientes formas:

   a) **Uso de tubo conduit:** Se coloca el conductor dentro del tubo tipo conduit de manera que el cable quede resguardado y sin ser visible. Posteriormente el tubo conduit es sujetado a la estructura donde se instaló.

   b) **Uso de ángulo:** Se coloca el ángulo metálico sobre el conductor de puesta a tierra, de manera que el cable quede resguardado y sin ser visible. Posteriormente el ángulo se fija a la estructura mediante soldadura eléctrica.

   c) **Uso de concreto:** Para ocultar el conductor se realiza una ranura un poquito mayor al grosor del cable en la base de concreto, posteriormente se coloca la bajada de puesta a tierra sobre la ranura y se procede a resanar la base.

6.4 Sistema de Tierra del Cuarto de Control

6.4.1 Sistema de tierra externo

La caseta del cuarto de control y comunicaciones debe tener un anillo perimetral con varillas verticales en las esquinas las cuales deben estar instaladas a la profundidad del estrato de menor resistividad y debe interconectarse a la malla de tierra general en al menos dos puntos.

Se deben instalar, cuando menos un registro de tierra en las contra esquinas del anillo en el punto de alojamiento de los electrodos para poder realizar mantenimientos y mediciones futuras.

Si la caseta cuenta con torre de telecomunicaciones, se debe implementar un sistema de tierra para la torre, al cual se debe interconectar el conductor de bajada del pararrayos y este a su vez a la malla general en al menos dos puntos mediante soldadura exotérmica.

Se recomienda soldar la bajante de tierra en la parte superior y en la parte inferior de la estructura metálica de la torre.

6.4.2 Sistema de tierra interno

Se debe diseñar un sistema de tierra interno en el cuarto de control y comunicaciones el cual debe contener una unión equipotencial de forma radial, es decir las barras de tierra secundarias deben estar conectadas entre sí y sin formar lazos cerrados a una barra de tierra principal la cual debe conectarse mediante un solo punto al sistema de tierra externo del cuarto de control.

La barra de puesta a tierra de los gabinetes de equipos de control y protección así como de centros de carga debe conectarse mediante un solo conductor continuo a la barra de tierra correspondiente (secundaria o principal) de forma radial evitando la generación de lazos de corriente.

Cuando se tengan charolas, ducto cuadrado, o cualquier otra canalización metálica para el soporte de los conductores se debe conectar a la barra de puesta a tierra.

La barra de tierra principal o secundaria, así como la barra de tierras de gabinetes y de centros de carga no debe utilizarse como barra de neutros.

Se recomienda la instalación de dispositivos se supresión de transitorios de línea (TVSS).
6.5 Sistema de Tierra de Pararrayos

La torre de telecomunicaciones debe contar con un sistema de tierra con un valor de resistencia menor a 10 \( \Omega \), el cual debe interconectarse a la malla de tierra general en al menos dos puntos.

El conductor de bajada del pararrayos también debe conectarse al sistema de tierra de la torre. Se recomienda soldar la bajante en la parte superior y en la parte inferior de la estructura metálica de la torre.

Se debe instalar cuando menos un registro de tierra en el electrodo de descarga del sistema de protección contra descargas atmosféricas.

6.6 Puesta a Tierra de Cercas Metálicas

Las cercas metálicas pueden ocupar una posición sobre la periferia del sistema de tierra. Debido a que los gradientes de potencial son más altos, se deben tomar las siguientes medidas:

a) Si la cerca se coloca dentro de la zona correspondiente a la malla, debe ser puesta a tierra, recomendando que la cerca se instale al menos a un metro del límite exterior de la malla.

b) Si la cerca se encuentra fuera de la zona correspondiente a la malla debe colocarse por lo menos a 2 m del límite de la malla de tierra.

6.7 Red de Tierras en Ampliación de Subestaciones

Para el caso de subestaciones donde la red de tierras existente no cubre la totalidad del terreno, sino únicamente una parte del área total y además no se cuenta con información alguna. Para determinar la red de tierra se recomiendan los siguientes pasos:

a) Realizar mediciones de resistividad en áreas cercanas a la malla existente.

b) Realizar mediciones en áreas ubicadas en sitios alejados de la malla existente, pero dentro del terreno de la subestación.

c) En caso de no ser posible el paso 2, realizar las mediciones en áreas exteriores pero colindantes con la subestación.

d) Hacer un análisis de resultados y seleccionar el valor de resistividad más alto, lo cual permite determinar el tipo y forma de la malla más óptima a utilizar en la ampliación.

e) Si el calibre de la red de tierras existente es superior al obtenido en el paso 4 debe utilizarse un calibre 4/0 en la ampliación de la red de tierras.

f) Se debe interconectar la malla de tierra nueva con la existente preferentemente siguiendo la geometría de la nueva malla de tierra, en caso de no ser posible, interconectar en al menos dos puntos la malla de tierra nueva con la existente.

6.8 Recepción y Puesta en Servicio del Sistema de Tierra

6.8.1 Criterios de aceptación.

Se establecen los criterios para la aceptación de un sistema de tierra el cual debe cumplir al menos con lo siguiente:

a) La topología de la malla de tierra debe estar instalada de acuerdo al diseño (disposición física, calibre y separación de los conductores, profundidad de instalación, colocación de electrodos verticales, etc.)
b) Los materiales utilizados deben tener las características que cumplan con las condiciones de diseño, los cuales deben contar con certificados de aprobación por LAPEM.

c) Valor de la resistencia de puesta a tierra debe ser de acuerdo a lo indicado en el capítulo 5, paso 5 de Valor de resistencia de malla calculado.

d) Cumplir con las pruebas de la integridad física de la malla de tierra. (De acuerdo con los procedimientos indicados en el capítulo 9).

e) Los sistemas de tierra existentes dentro del predio (general de la subestación, del cuarto de control y comunicaciones, torres de telecomunicaciones, etc.) deben estar interconectadas entre sí en por lo menos dos puntos.

f) Los conductores de puesta a tierra deber consistir de una sola punta soldada a la malla de tierra por la trayectoria más corta hasta el elemento a proteger.

g) Las conexiones de puesta a tierra deben ser soldables, en caso de instalarse conexiones mecánicas o ponchables, estas deben contener algún sistema de protección anticorrosiva.

Una vez cumplidos los criterios de aceptación se debe proceder a realizar la puesta en servicio el sistema.

6.9 Mantenimiento del Sistema de Tierra

Se recomienda realizar el mantenimiento general al sistema de tierras una vez al año y debe considerar al menos lo siguiente:

a) Actualizar o elaborar Plano general de planta

b) Actualizar o elaborar el plano general del sistema de tierra.

c) Actualizar o elaborar el plano del sistema de tierra del cuarto de control.

d) Realizar mediciones de resistividad, dentro del área donde se encuentra instalada la malla de tierra y fuera de esta zonas. (De acuerdo con los procedimientos indicados en el capítulo 9)

e) Realizar mediciones de resistencia al sistema general de tierra. (De acuerdo con los procedimientos indicados en el capítulo 9)

f) Realizar pruebas de integridad física de la malla de tierra. (De acuerdo con los procedimientos indicados en el capítulo 9)

g) Realizar pruebas de continuidad a la red general de tierra, sistema de tierra del cuarto de control, sistema de tierra de la torre de telecomunicaciones, verificando la continuidad entre las mismas.

h) Realizar inspección visual del estado físico de los conductores de puesta a tierra.

i) Revisar el estado actual de conexión entre el conductor de puesta a tierra y el equipo eléctrico de la subestación y cuarto de control.

j) Realizar excavaciones en puntos de cruce o unión de la malla de tierra para verificar el estado físico del conductor instalado y su conector correspondiente.

k) Al realizar las excavaciones para zanjas, separar la capa superficial de la capa de tierra, con el fin de no contaminar la capa menos resistiva.
6.9.1 Acciones correctivas

Los segmentos de la malla que se encuentren seccionados o trozados debe ser reparados agregando un tramo de conductor de las mismas características que el instalado originalmente, unido mediante soldadura exotérmica para conservar la forma geométrica y topología de la red de tierras.

Las uniones de la red general mecánicas o ponchables que se encuentren con problemas de sulfatación o corrosión, deben ser sustituidas por soldadura exotérmica.

Los conductores y componentes de puesta a tierra que no cumplan con lo establecido en la sección de puesta a tierra de equipos deben ser sustituidos por un solo conductor desde el punto más cercano de la red de tierra unido mediante soldadura exotérmica hasta el elemento a proteger.

Se deben limpiar las conexiones del conductor de puesta a tierra del equipo eléctrico primario agregando un químico inhibidor a la corrosión a las partes en contacto.

En caso de no estarlo se deben interconectar todos los sistemas de tierra que se encuentren alojados dentro de un mismo predio.

Verificar que el sistema de tierra cumpla con los criterios de aceptación y puesta en servicio.

7 CONDICIONES DE DESARROLLO SUSTENTABLE

No aplica.

8 CONDICIONES DE SEGURIDAD INDUSTRIAL

No aplica.

9 CONTROL DE CALIDAD

9.1 Métodos de Prueba y Equipos de Medición

9.1.1 Método de wenner o de los cuatro electrodos para la medición de resistividad del terreno (ρ)

9.1.1.1 Generalidades

Las estimaciones basadas en la clasificación del suelo dan únicamente una aproximación de la resistividad. La prueba de resistividad actual es obligada. Esta debe realizarse en un número de lugares dentro del sitio. Los lugares en donde el suelo puede tener resistividad uniforme a través de área entera a una considerable profundidad, debe ser raramente encontrado.

Generalmente, tienen varias capas, cada una con diferentes resistividades. La variación de resistividad lateral es menor en comparación con la variación de la resistividad horizontal. Las pruebas de resistividad del suelo deben de determinar alguna variación importante de la resistividad con respecto a la profundidad. Como regla el número de lecturas realizadas deben de ser tan grandes como las variaciones sean tan grandes, especialmente si algunas de las lecturas tomadas son tan altas que pueden ocasionar posiblemente problemas de seguridad.

Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, es deseable el incremento en el intervalo de los espaciamientos de prueba. La idea es que una estimación bastante exacta para grandes espaciamientos fijos pueda ser determinada por extrapolación. Esto es posible porque, así como el espaciamiento de la prueba es incrementado, la fuente de corriente de la prueba penetra más y más a áreas distantes, en las direcciones horizontal y vertical, a
pesar de la cantidad de trayectorias de corriente que se distorsionan debido a las variaciones de las condiciones del suelo.

La investigación en campo del lugar en que se va a ubicar el sistema de tierras, es esencial para determinar la composición general del suelo y obtener algunas ideas básicas acerca de su homogeneidad. Las muestras de campo para los estudios de Mecánica de Suelos son muy útiles, ya que proporcionan información sobre las diferentes capas del subsuelo y los materiales que las componen, deben de dar una idea del intervalo de su resistividad.

El valor de la resistividad del suelo que se debe utilizar en el diseño de la red de tierras, generalmente se determina con pruebas de campo.

Para efectuar la medición de resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, el método más usual es el de Frank-Wenner denominado también método de los 4 electrodos, el equipo de medición utilizado es el Megger de tierra.

El método de los 4 electrodos de Wenner, es la técnica más utilizada comúnmente. Consiste básicamente en 4 electrodos enterrados dentro de la tierra a lo largo de una línea recta, a igual distancia A de separación, enterradas a una profundidad B. El voltaje 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 ohms.

Existen 2 variaciones de este método:

a) Electrodos igualmente espaciados o arreglo de Wenner.

Con este arreglo, los electrodos están igualmente espaciados como se muestra en la figura 3.

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 debe utilizar la siguiente fórmula para calcular la resistividad del terreno.

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}}$$

Donde:

\(\rho\) = Resistividad en \(\Omega\)-m.
A = Separación entre electrodos adyacentes en m o bien en cm.
B = Profundidad de los electrodos en m o en cm.
R = Lectura del equipo de medición de resistencia Megger en \(\Omega\).

Si “A” y “B” se miden en cm o en m y la resistencia R en Ohms, la resistividad debe estar dada en \(\Omega\)-cm o en \(\Omega\)-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) Electrods 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 figura 4:

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, deben anotarse.

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 esta razón, las mediciones de resistividad del suelo son de menor valor en un área en donde una malla de conductores ya ha sido instalada, excepto, tal vez para mediciones poco profundas dentro o cerca del centro de una gran malla rectangular. En tales casos una lectura poco aproximada debe ser tomada a corta distancia fuera de la malla, con los electrodos en tal posición que minimicen el efecto de la malla sobre las trayectorias de flujo.

Sin embargo, no es necesario hacer dichas consideraciones dentro de la malla, 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:

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

Además, con valores grandes de d/L, las variaciones de los valores medidos debidas a irregularidades en la superficie, se reducen dando mediciones más exactas.

Material y equipo

a) Medidor de resistencia a tierra (óhmetro de tierra), con calibración vigente de acuerdo con la LFMN (Ley Federal sobre Metrología y Normalización)

b) Electrodos de prueba originales que vienen con el equipo medidor de resistencia a tierra, generalmente fabricados en acero templado o acero inoxidable con diámetro de 0.475 cm a 0.635 cm y longitudes de 30 cm a 60 cm son adecuadas para la mayoría de las mediciones de campo. Ambos materiales pueden requerir tratamientos térmicos para que sean lo suficientemente rígidos para ser insertados en suelos secos o rocosos. Los electrodos deben de estar construidos con una manija y una terminal para conectar el cable.

c) Cable de cobre con aislamiento para 600 volts, de 0.8236-0.3259 mm

Las terminales deben de tener buena calidad para asegurar una baja resistencia de puesta a tierra en los electrodos y el equipo de medición. Cuando se realicen mediciones con espaciamientos fijos de electrodos puede fabricarse un cable multiconductor con terminales permanentemente localizada en las distancias requeridas.

d) Marro para clavar los electrodos.

e) Guantes de cuero.

Procedimiento de medición en campo

Se recomienda realizar las mediciones en la época de menor humedad anual.

a) Como primer paso se debe de dividir el terreno en cuadros de 10 por 10 m, cada cuadro va a formar una sección, se deben de enumerar en un plano las secciones que resulten.

b) Seleccionar aleatoriamente las secciones en donde se van a realizar las mediciones, de preferencia la mayor parte de los cuadros seleccionados deben estar en la periferia del terreno.

c) Trazar diagonales en cada sección que va a ser muestreada como se indica en la figura 5, seleccionar una diagonal para que sobre esta se realicen las mediciones.
FIGURA 4 – Medición en campo

d) Partiendo del centro de la diagonal colocar las cuatro varillas en el suelo a una profundidad mínima de 20 cm formando una línea recta entre ellas, evitando la existencia de huecos alrededor de las varillas.

e) Las terminales de corriente del instrumento C1 y C2 se conectan a las varillas de los extremos, y las de potencial P1 y P2 a las varillas intermedias.

f) Se energiza el instrumento (acorde a su instructivo) y se toman las lecturas respectivas de resistencia en $\Omega$.

g) Se calcula la resistividad mediante las fórmulas antes mencionadas. Antes de utilizar el instrumento se debe de comprobar su ajuste con dos o tres resistencias de diferentes valores conocidos. Se pueden aceptar diferencias entre el valor de la resistencia y el valor indicado por el instrumento del orden del 10 %.

h) Se traza una línea de prueba en diagonal al área bajo análisis, y comenzando al centro de la línea se procede a variar la separación de las puntas de prueba a 0.5, 1, 2 y 3 metros como mínimo.

i) Las lecturas obtenidas se reportan en el formato para la medición de resistividad, según tabla 3.

j) Se trazan las gráficas $\rho$ vs separación $A$ para cada sección.

k) El valor de la resistividad media del terreno debe ser el promedio del valor promedio de resistividad obtenido en cada sección, si la resistividad promedio entre secciones no tiene una variación de más del 30 %, en caso contrario se debe de realizar un promedio con los valores más alto y más bajo de las resistividades promedio de las secciones.

9.1.2 Método de caída de potencial para medición de resistencia óhmica en un sistema de tierras

9.1.2.1 Generalidades

a) Para realizar la medición de la resistencia de la malla de tierra se debe emplear el siguiente método.

En caso de que el contratista proponga un método diferente, debe ser aprobado por CFE, lo cual no debe deslindar al contratista de la responsabilidad de sus resultados de medición.

b) Las mediciones de resistencia tienen por objeto conocer el valor real de la resistencia de tierra de la red y así determinar la elevación de potencial durante una falla a tierra.
c) Los sistemas de tierra como elementos de una subestación deben inspeccionarse y recibir mantenimiento.

d) Se recomienda que durante la vida operativa de las instalaciones se lleven a cabo mediciones periódicas de resistencia de la malla de tierra, para comprobar que los valores del sistema de tierra los valores de diseño y que se conservan las condiciones originales a través del tiempo.

e) Las características de una conexión a tierra, varían con la composición y el estado físico del terreno, así como de la extensión y configuración de la malla de tierras. El terreno puede estar formado por combinaciones de materiales naturales de diferente resistividad, puede ser homogéneo y en algunos casos estar formado por granito, arena o roca, materiales de alta resistividad. Consecuentemente, las características de una conexión a tierra (resistencia óhmica) varía con las estaciones del año, las cuales se producen por cambios en la temperatura, contenido de humedad y composición del terreno. Debido a que el grado de humedad del terreno influye en forma importante en el valor de su resistividad, las mediciones deben efectuarse dentro del periodo del año de menor humedad, a efecto de considerar las condiciones menos favorables de resistencia que se refleje en una medición confiable.

9.1.2.2 Material y equipo

a) Medidor de resistencia a tierra (óhmeter de tierra), con calibración vigente de acuerdo con la LFMN (Ley Federal sobre Metrología y Normalización).

b) Electrods de prueba originales que vienen con el equipo medidor de resistencia a tierra, generalmente fabricados en acero templado o acero inoxidable con diámetro de 0.475 cm a 0.635 cm y longitudes de 30 cm a 60 cm. Ambos materiales pueden requerir tratamientos térmicos para que sean lo suficientemente rígidos para ser insertados en suelos secos o rocosos.

Los electrodos deben de estar construidos con una manija y una terminal para conectar el cable.

c) Cable de cobre con aislamiento para 600 V, calibre 0.8236 – 0.3259 mm^2. Las terminales deben de tener buena calidad para asegurar una baja resistencia de contacto en los electrodos y el equipo de medición. Cuando se realicen mediciones con espaciamientos fijos de electrodos puede fabricarse un cable multiconductor con terminales permanentemente localizadas en las distancias requeridas.

d) Marro para clavar los electrodos.

e) Guantes de cuero.

9.1.2.3 Procedimiento de medición en campo

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 debe dar el valor de resistencia.

Pasos para la medición:

a) Seleccionar la dirección en que se van a realizar las mediciones, evitando la influencia de líneas de transmisión, es decir que la línea de acción sobre la cual vamos a realizar las mediciones no esté debajo de líneas de transmisión.

b) Las dos terminales (P1 y C1) del aparato de prueba se puentean para conectarse directamente al electrodo de la red de tierras que se pretende probar (este cable debe ser de longitud corta). La
terminal de potencial (P2) se conecta al electrodo de potencial (P2) y la terminal de corriente (C2) al electrodo de corriente (ver figura 6).

c) Las varillas de prueba P2, C2 deben clavarse a una profundidad de 50 cm a 60 cm, aproximadamente.

La distancia (d) del electrodo bajo prueba de la red de tierras al electrodo de potencial (P2) se va variando 10 m y en cada punto se toma la lectura de resistencia (R de acuerdo con el criterio de la persona que efectúa la prueba), considerando siempre obtener los valores (d, R) en los puntos suficientes para poder trazar su curva adecuadamente.

d) La distancia (L) a la que se debe clavar el electrodo de corriente C2 debe ser igual a 4 veces el diámetro equivalente de la superficie de la malla de tierra (4D) y se calcula partiendo del círculo equivalente de la superficie que cubre la red de tierra, generalmente la superficie es rectangular, por lo que se tiene:

Dónde:

A malla = Superficie malla de tierra.

l = Largo de la malla.

a = Ancho de la malla.

El área o superficie de un círculo es:

\[ A_{c} = \pi \times \frac{D^{2}}{4} \]

Dónde:

\( A_{c} \) = Área o superficie del círculo.

D = Diámetro del círculo.

Igualando: A malla = A\( _{c} \)

Se obtiene:

\[ l \times a = \pi \times \frac{D^{2}}{4} \]

De donde:

\[ D = 2 \sqrt{\frac{l \times a}{\pi}} \]

Dónde:
D = Diámetro equivalente de la superficie que cubre la red de tierras de aquí se obtiene:  
\[ L = 4D. \]

**e)** Se energiza el instrumento (acorde a su instructivo) y se toman las lecturas respectivas de resistencia en ohms.

**f)** En la última medición se cortocircuita la varilla de potencial con la varilla bajo prueba, el valor obtenido en ohms se resta al valor real de la resistencia.

Se debe realizar esta medición en época de estiaje.

**9.1.2.4 Interpretación de resultados**

Los valores obtenidos de resistencia se grafican contra la distancia, como se muestra en la figura 7. En esta curva, la parte plana u horizontal, nos indica la resistencia real (Rt) de la red de tierras que se ha probado (por experiencia, la resistencia ohmica real obtenida mediante este método, se aproxima al 62 % de la distancia total L).

El valor obtenido se checa contra el valor en ohms de la red de tierra que debe tener la planta o subestación.

Es importante antes de realizar la medición de la malla de tierra, realizar un barrido dentro de la planta o subestación para verificar que haya continuidad y no se encuentre fracturada la malla o red.

**9.1.3 Método de integridad física de la red de tierra.**

**9.1.3.1 Generalidades**

Para garantizar un camino de baja impedancia para drenar las corrientes de falla, periódicamente, todos los elementos y conexiones del sistema de tierra deben ser inspeccionados y los que están enterrados bajo la superficie de la tierra deben someterse a prueba.

La prueba de integridad física consiste en la inyección gradual de corriente alterna a los conductores de puesta a tierra de los equipos eléctricos verificando si la corriente es drenada de forma eficiente hacia la malla de tierra.

Esta prueba nos permite conocer la caída de tensión que existe entre el equipo eléctrico y la malla de tierra, por lo indirectamente nos permite obtener el valor de resistencia entre estos puntos.

Se recomienda que la prueba no dure más de 3 min pues la inyección de corriente de manera continua podría dañar algún elemento del equipo bajo prueba.

En una buena conexión la caída de tensión deseada debe ser de aproximadamente 1.5 Volts por cada 15 m de distancia en línea recta de la red de tierra al punto de prueba. Este valor de tensión se obtiene restando la caída de tensión en los conductores de prueba a la caída de tensión registrada durante la prueba.

En subestaciones de potencia muy grandes (es decir, las grandes redes de tierra), por lo menos la mitad de la corriente de prueba debe volver a la fuente a través de la rejilla de tierra y la conexión bajo prueba. Si la corriente es menor de la mitad (independentemente de que se cumpla con el criterio de la caída de 1.5 Volts), indica una mala conexión a tierra.

**9.1.3.2 Material y equipo**

**a)** Equipo reóstato de inyección de corriente alterna variable con capacidad de hasta 300 amperes en forma continua y accesorios.

**b)** Fuente de energía de al menos 10.5 kVA.

**c)** Dos o más amperímetros de gancho
9.1.3.3 Procedimiento de la prueba.

a) Establecer un punto de referencia en la red de tierra, para conectar el neutro del transformador.

b) Desde el equipo de prueba de alta-corriente, conecte las pinzas del conductor de prueba a la red de tierra de referencia y el segundo conductor a la estructura o equipo de prueba por encima de la conexión a tierra, pero por debajo de cualquier vinculación o conexión a las partes vivas como se muestra en el diagrama siguiente.

d) Usar amperímetros de gancho para medir durante la prueba la corriente que circula hacia la tierra de referencia por debajo de la conexión de prueba (es decir, en la red y en la puesta a tierra de los equipos aledaños) y la corriente que fluye por encima (es decir, en el equipo, estructura, gabinete, etc.). En el instante en que más del 30 % de la corriente inyectada fluya hacia el equipo o circule por la puesta a tierra de algún equipo aledaño, registre los valores de caída de tensión y corriente del equipo de prueba y regrese a la posición original el variac, asegurándose que la corriente circulante es de 0 amperes, apague el equipo de prueba. Desconecte los conductores de prueba.

FIGURA 5 – Conexión de Puesta a Tierra (ilustrativa)
Realizar los registros de las lecturas de caída de potencial y de las corrientes medidas en el inciso d.

Después de que la prueba ha finalizado, regrese el variac a la posición de 0 A, apague el equipo de prueba y desconecte los conductores de prueba.

10 BIBLIOGRAFÍA


<table>
<thead>
<tr>
<th>Descripción</th>
<th>Conductividad del material (%)</th>
<th>Factor $\alpha$ a 20 °C</th>
<th>$K_s$ al 0 °C (0 °C)</th>
<th>Temperatura de fusión $T_m$ (°C)</th>
<th>$\rho_r$ 20 °C ($\mu\Omega \cdot$ cm)</th>
<th>TCAP [J/(cm$^3\cdot$°C)]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Cobre recocido suave – inmersión</td>
<td>100.0</td>
<td>0.00393</td>
<td>234</td>
<td>1083</td>
<td>1.2</td>
<td>3.42</td>
</tr>
<tr>
<td>Cobre comercial inmersión – dura</td>
<td>97.0</td>
<td>0.00381</td>
<td>242</td>
<td>1084</td>
<td>1.78</td>
<td>3.42</td>
</tr>
<tr>
<td>Cobre revestido alambre de acero</td>
<td>40.0</td>
<td>0.00378</td>
<td>245</td>
<td>1084</td>
<td>4.40</td>
<td>3.85</td>
</tr>
<tr>
<td>Cable revestido alambre de acero</td>
<td>30.0</td>
<td>0.00378</td>
<td>245</td>
<td>1084</td>
<td>5.86</td>
<td>3.85</td>
</tr>
<tr>
<td>Cable revestido barra de acero</td>
<td>20.0</td>
<td>0.00378</td>
<td>245</td>
<td>1084</td>
<td>8.62</td>
<td>3.85</td>
</tr>
<tr>
<td>Aluminio grado EC</td>
<td>61.0</td>
<td>0.00403</td>
<td>228</td>
<td>657</td>
<td>2.86</td>
<td>2.56</td>
</tr>
<tr>
<td>Aluminio aleación 5005</td>
<td>53.5</td>
<td>0.00353</td>
<td>262</td>
<td>652</td>
<td>3.22</td>
<td>2.60</td>
</tr>
<tr>
<td>Aluminio aleación 6201</td>
<td>52.5</td>
<td>0.00347</td>
<td>262</td>
<td>654</td>
<td>3.28</td>
<td>2.60</td>
</tr>
<tr>
<td>Aluminio revestido alambre de acero</td>
<td>20.3</td>
<td>0.00366</td>
<td>258</td>
<td>657</td>
<td>8.48</td>
<td>3.58</td>
</tr>
<tr>
<td>Acero 1020</td>
<td>10.8</td>
<td>0.00360</td>
<td>605</td>
<td>1510</td>
<td>15.90</td>
<td>3.28</td>
</tr>
<tr>
<td>Acero revestido barra de acero</td>
<td>9.8</td>
<td>0.00160</td>
<td>605</td>
<td>1400</td>
<td>17.50</td>
<td>4.44</td>
</tr>
<tr>
<td>Zinc bañado barra de acero</td>
<td>8.6</td>
<td>0.00320</td>
<td>293</td>
<td>419</td>
<td>20.10</td>
<td>3.93</td>
</tr>
<tr>
<td>Acero inoxidable 304</td>
<td>2.4</td>
<td>0.00130</td>
<td>749</td>
<td>1400</td>
<td>72.00</td>
<td>4.03</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**TABLA 2 - Valores Típicos de Factor de Decremento $D_t$**

<table>
<thead>
<tr>
<th>Segundos</th>
<th>Cíclos A 60 Hz</th>
<th>$X/R = 10$</th>
<th>$X/R = 20$</th>
<th>$X/R = 30$</th>
<th>$X/R = 40$</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>0.00833</td>
<td>0.5</td>
<td>1.576</td>
<td>1.648</td>
<td>1.675</td>
<td>1.688</td>
</tr>
<tr>
<td>0.05</td>
<td>3</td>
<td>1.232</td>
<td>1.378</td>
<td>1.462</td>
<td>1.515</td>
</tr>
<tr>
<td>0.10</td>
<td>6</td>
<td>1.125</td>
<td>1.232</td>
<td>1.316</td>
<td>1.378</td>
</tr>
<tr>
<td>0.20</td>
<td>12</td>
<td>1.064</td>
<td>1.125</td>
<td>1.181</td>
<td>1.232</td>
</tr>
<tr>
<td>0.30</td>
<td>18</td>
<td>1.043</td>
<td>1.085</td>
<td>1.125</td>
<td>1.163</td>
</tr>
<tr>
<td>0.40</td>
<td>24</td>
<td>1.033</td>
<td>1.064</td>
<td>1.095</td>
<td>1.125</td>
</tr>
<tr>
<td>0.50</td>
<td>30</td>
<td>1.026</td>
<td>1.052</td>
<td>1.077</td>
<td>1.101</td>
</tr>
<tr>
<td>0.75</td>
<td>45</td>
<td>1.018</td>
<td>1.035</td>
<td>1.052</td>
<td>1.068</td>
</tr>
<tr>
<td>1.00</td>
<td>60</td>
<td>1.013</td>
<td>1.026</td>
<td>1.039</td>
<td>1.052</td>
</tr>
</tbody>
</table>
TABLA 3 – Formato para la Medición de la Resistividad

<table>
<thead>
<tr>
<th>SECCIÓN</th>
<th>Enterrado de las probetas en metros (B)</th>
<th>Separación entre electrodos en metros (A)</th>
<th>Valor de resistencia medido</th>
<th>Relación A/B</th>
<th>Resistividad calculada en ohms-metro</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td>0.5</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>1</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>2</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>3</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>4</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>…</td>
<td>…</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Promedio</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

Proyecto:
Número de Secciones:
Área las secciones:
Fecha:
Hora:
Responsable:
Equipo utilizado:
Temperatura ambiente:
Humedad Relativa %:

NOTA: Cuando las variaciones en los valores de resistividad no sean mayores del 30 % se debe realizar un promedio de todas las mediciones, sin embargo, cuando exista una variación significativa entre los valores, se promediaran el valor más alto y el más bajo para obtener una valor de resistividad de esa sección.

TABLA 4 - Resultados de la Medición de la Resistencia de la Malla de Tierras

<table>
<thead>
<tr>
<th>Medición número</th>
<th>Resistencia Medida en ohms</th>
<th>Distancia de la medición en metros (d)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>10</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>20</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>30</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>..</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Fecha:
Hora:
Lugar:
Equipo Utilizado:
Temperatura:
Humedad relativa %:
FIGURA 6 - Medición de Resistencia de Tierra, Método de Caida de Potencial

FIGURA 7 - Curva de Resultados
Las Subestaciones en SF6 están sujetas a la misma magnitud de las corrientes de falla y requiere también de valores bajos de impedancia de tierra como en las subestaciones convencionales.

La condición de que la subestación SF6 requiere de 10 a 25 % menos del terreno para el equipo que en una subestación convencional y debido a esta pequeña área, puede resultar difícil obtener el sistema de tierras adecuado únicamente mediante métodos convencionales. Debe ponerse atención particular a los puentes que unen las envolventes metálicas en el ensamble de la subestación SF6, los cuales conducen corrientes inducidas de magnitudes significativas, las cuales deben confinarse a trayectorias específicas. A este respecto para aterrizarlas requieren seguirse estrictamente las recomendaciones del fabricante.

### A.1  Aterrizamiento de las Envolventes

Las envolventes del tipo continuo proporcionan un camino de retorno a las corrientes inducidas de tal forma que el conductor y la envolvente forman un par concéntrico con blindaje externo efectivo de los campos en el interior de la envolvente.

Con frecuencia los puentes y el aterrizamiento de la envolvente es la mejor solución para minimizar los riesgos de las tensiones de paso y de contacto dentro del área de la SF6.

Medidas adicionales incluyen el uso de plataformas conductoras (plataformas de tierra) a las que se aterrizan las estructuras de la subestación SF6.

Para limitar los efectos indeseables causados por la circulación de corrientes, deben observarse los siguientes requerimientos:

- **a)** Todas las envolventes metálicas normalmente deben operar al nivel de tensión de tierra.
- **b)** Cuando se aterrizan en varios y específicos puntos, el diseño del bus de la envolvente debe asegurar que no existan diferencias de tensión significativas entre las secciones individuales de la envolvente y que ni la estructura de soporte ni ninguna parte de los sistemas esté adversamente influenciada por el flujo de corrientes inducidas.
- **c)** Para evitar la circulación de corrientes en la envolvente por fuera de las trayectorias regulares de retorno dentro del ensamble de la SF6. Deben colocarse cables con cubierta para conexión al sistema de tierra a través de conexiones que debe estar separadas de las envolventes desde la SF6. Para facilitar este aislamiento, el diseño de las terminales del cable debe estar provisto de aislamientos en aire o un aislamiento apropiado. Los transitorios muy rápidos generados por la maniobra o por fallas en la SF6 pueden ocasionar flameo en estos aislamientos. En tales casos deben considerarse las consecuencias en la distribución de corriente de estos flameos dentro del sistema de tierras.
- **d)** Cualquier número puede permitirse que las corrientes de retorno de la envolvente fluyan a través de montaje en el transformador de corriente.

### A.2  Cooperación entre Fabricante y Usuario de Subestaciones en SF6

Usualmente es el fabricante de subestaciones en SF6 quién define con claridad de que consta el bus principal de tierra y especificar que requiere del usuario para conectar el ensamble de la SF6 al sistema de tierras de la subestación. Se requiere de una mayor información para asegurar que ninguna de las conexiones propuestas desde el bus principal de tierra hacia la rejilla de tierras interfiera con la trayectoria requerida para la corriente de la envolvente o con alguna otra característica operacional del diseño de la SF6.
Éste puede resultar especialmente pertinente si el bus principal de tierra consiste de un sistema de interconexiones entre las componentes de la SF6 y las estructuras y no se requiere suministrar ningún bus por separado (anillo continuo), común del bus de tierras.

A.3 El fabricante de Subestaciones en SF6 Proporciona y es Responsable de:

a) Proporcionar puentes (enlaces) subensamble-subensamble a fin de que se aseguren gradientes de tensión seguros en todas las partes del ensamble de la SF6 intencionalmente aterrizadas y entre esas partes y el bus principal de tierra.

b) Fabricar conectores accesibles de suficiente rigidez mecánica para soportar las fuerzas electromecánicas, los abusos normales y que además sean capaces de conducir la anticipada corriente máxima de falla en alguna parte del circuito sin sobrecalentarse.

c) Proporcionar lugares y conectores de tierra o ambos permitiendo al menos dos caminos a tierra ya sea desde el bus principal de tierra o desde cada envolvente metálica y las piezas del equipo auxiliar de la SF6 destinado a conectarse a la tierra de la subestación si el bus principal de conexión a tierra del ensamble de la subestación no existe en el momento.

d) Recomendar procedimientos apropiados para hacer las conexiones entre metales no similares, típicamente entre un cable de cobre o un conductor similar de tierra y las envolventes de aluminio.

El usuario normalmente debe proporcionar información sobre las fuentes de corriente de falla, las magnitudes esperadas y los tiempos de duración que se deben considerar. Aún más el usuario debe asistir al fabricante de subestaciones en SF6 para revisar todas las provisiones del autorizamiento propuestas para asegurar una interface apropiada de:

a) Las conexiones para las corrientes al neutro de los equipos o aparatos y para disipar los disturbios causados en el interior de la SF6 debidos a descarga atmosférica o maniobra.

b) Dispositivos para disipar disturbios de corriente externos, debidos a descargas atmosféricas o maniobra en el ensamble de la SF6.

c) Requerimientos de relés de protección y satisfacer las previsiones necesarias en los dispositivos telefónicos y de comunicación.

d) Conexiones a tierra de todos los marcos y estructuras de soporte de la SF6, cubiertas (forros) metálicos y la instalación del blindaje para terminales del cable donde resulte aplicable.

e) Conexiones de todos los aditamentos o conectores manufacturados por el fabricante de SF6.

f) Tensiones de paso y de contacto seguras, bajo condiciones de operación normal externos al ensamble de la SF6.

g) Cumplimiento con las especificaciones de tierras, las cuales tienden a corregir prácticas de aterrizamiento cuando existen discrepancias entre el fabricante y el usuario.

A.4 Recomendaciones Generales

Deben tomarse precauciones para prevenir corrientes excesivas que se induce en marcos y estructuras para evitar la formación de circuitos indeseables con otros equipos de la subestación. Por lo que el esquema de aterrizamiento y el arreglo físico de la subestación debe revisarse cuidadosamente con el fabricante de subestaciones en SF6.

En la proximidad de discontinuidades, debe tenerse cuidado con las trayectorias a tierra de la envolvente como son entre las conexiones del transformador y la SF6, así como en los puntos de interface con los dispositivos de
desconexión convencionales a fin de prevenir corrientes circulantes en el interruptor y en el tanque de acero del transformador.

El criterio para la tensión de contacto de la subestación SF6 es:

\[ E_{i2} + (E_{omax})^{1/2}E_{contacto} \]

Dónde:

- \( E_{i2} \) = Es la tensión máxima de contacto como se determinó para el punto bajo los pies de una persona.

- \( E_{omax} \) = Es el valor máximo (predominantemente inductivo) de la tensión metal-metal diferenciando sobre y entre las envolventes de la SF6 o entre esas envolventes y las estructuras de soporte incluyendo cualquier elemento horizontal o vertical para el cual está diseñada la SF6.

Definiciones como:

a) Envolvente continua
b) Corriente de la envolvente
c) Subestación aislada en gas
d) Bus principal de tierra
e) Envolvente no-continua
f) Tensión transitoria de la envolvente
g) Transitorios muy rápidos
h) Sobretensiones transitorias muy rápidas
i) Se deben incluir en el presente documento.
APENDICE B
(Informativo)

FLUJOGRAMA DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Figura B1- Flujograma del Procedimiento de Diseño