

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD



SISTEMA DE TIERRA PARA PLANTAS Y SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

NRF-011-CFE-2004

P R E F A C I O

Esta **norma de referencia** ha sido elaborada de acuerdo a las Reglas de Operación del Comité de Normalización de CFE (**CONORCFE**), habiendo participado en la aprobación de la misma las áreas de CFE y organismos miembros del **CONORCFE**, indicados a continuación:

Asociación de Normalización y Certificación

Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas

Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas

Dirección General de Normas

Gerencia de Abastecimientos de CFE

Instituto de Investigaciones Eléctricas

Subdirección del Centro Nacional de Control de Energía de CFE

Subdirección de Construcción de CFE

Subdirección de Distribución de CFE

Subdirección de Generación de CFE

Subdirección Técnica de CFE

Subdirección de Transmisión de CFE

Universidad Nacional Autónoma de México



La presente **norma de referencia** será actualizada y revisada tomando como base las observaciones que se deriven de la aplicación de la misma, en el ámbito de CFE. Dichas observaciones deben enviarse a la Gerencia de LAPEM, quien por medio de su Departamento de Normalización y Metrología, coordinará la revisión.

Esta **norma de referencia** revisa y sustituye a los documentos normalizados CFE, relacionados Sistemas de Tierra para Plantas y Subestaciones Eléctricas (CFE 00J00-01), que se hayan publicado.

La entrada en vigor de esta **norma de referencia** será 60 días después de la publicación de su declaratoria de vigencia en el Diario Oficial de la Federación.

NOTA: Esta norma de referencia es vigente desde el 12 de mayo del 2005.

CONTENIDO

1	OBJETIVO _____	1
2	CAMPO DE APLICACIÓN _____	1
3	REFERENCIAS _____	1
4	DEFINICIONES _____	1
4.1	Alta Tensión _____	1
4.2	Aterrizamiento _____	1
4.3	Conductor de Puesta a Tierra _____	1
4.4	Corriente a Tierra _____	1
4.5	Electrodo Artificial _____	1
4.6	Electrodo Auxiliar para Tierra _____	1
4.7	Electrodo para Tierra _____	1
4.8	Electrodo Primario para Tierra _____	1
4.9	Elevación del Potencial de Tierra (GPR) _____	1
4.10	Media Tensión _____	1
4.11	Rejilla para tierra _____	1
4.12	Resistencia Eléctrica del Cuerpo Humano _____	1
4.13	Sistema de Tierra _____	1
4.14	Tapete para Tierra _____	2
4.15	Tensión de Contacto (V_c) _____	2
4.16	Tensión de Paso (V_p) _____	2
4.17	Tensión de Malla (V_m) _____	2
4.18	Tensión Transferida _____	2
4.19	Tierra _____	2
5	DISEÑO DEL SISTEMA DE TIERRA _____	2
5.1	Generalidades _____	2
5.2	Puesta a Tierra de Cercas Metálicas _____	2
5.3	Medición de la Resistividad del Terreno _____	3
5.4	Procedimiento de Diseño _____	3
6	MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DESPUÉS DE LA INSTALACIÓN _____	11
7	MÉTODOS DE PRUEBA _____	11
7.1	Método de Wenner o de los Cuatro Electrodo para la Medición de Resistividad del Terreno (ρ) _____	11

7.2	Método de Caída de Potencial para Medición de Resistencia Ohmica en un Sistema de Tierra _____	14
8	BIBLIOGRAFÍA _____	16
9	EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD _____	16
10	CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES _____	16
TABLA 1	Constantes de materiales _____	17
TABLA 2	Valores típicos de factor de decremento D_f _____	18
TABLA 3	Formato para la medición de la resistividad _____	18
TABLA 4	Resultados de la medición de la resistencia de la malla de Tierra _____	19
FIGURA 1	Coeficiente k_1 de la fórmula de Schwarz _____	8
FIGURA 2	Coeficiente k_2 de la fórmula de Schwarz _____	8
FIGURA 3	Método de Wenner para la medición de la resistividad _____	12
FIGURA 4	Electrodos no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger Palmer _____	12
FIGURA 5	Medición en campo _____	13
FIGURA 6	Medición de resistencia a tierra, método de caída de potencial _____	19
FIGURA 7	Curva de resultados _____	20
APÉNDICE A (INFORMATIVO)	SISTEMA DE TIERRA EN SUBESTACIONES EN SF ₆ _____	21

1 OBJETIVO

Proporcionar los criterios y requerimientos, para dar el servicio de realizar el diseño 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

2 CAMPO DE APLICACIÓN

Aplica a plantas y subestaciones de corriente alterna (en subestaciones contiguas a la planta generadora a una distancia no mayor a 100 m, subestaciones de transmisión y transformación, subestaciones de distribución) convencionales o aisladas en gas. Considerando que para los elementos y materiales a utilizar en el sistema de tierra, están referidos a la norma correspondiente.

3 REFERENCIAS

Para la correcta utilización de esta norma de referencia, es necesario consultar y aplicar las Normas Oficiales Mexicanas, Normas Mexicanas y Normas de Referencia siguientes o las que las sustituyan:

NOM-001-SEDE-1999; Instalaciones Eléctricas (Utilización).

NOM-008-SCFI-2002; Sistema General de Unidades de Medida.

4 DEFINICIONES**4.1 Alta Tensión**

- a) Nivel subtransmisión.- valores de tensión eléctrica mayores a 35 kV y menores a 230 kV.
- b) Nivel transmisión.- valores de tensión eléctrica mayores o iguales a 230 kV.

4.2 Aterrizamiento

Conector a tierra de Sistemas, circuitos o aparatos 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 para tierra.

4.4 Corriente a Tierra

Corriente que fluye hacia o fuera de la tierra o sus equivalentes que sirven como tierra.

4.5 Electrodo Artificial

Cuerpo metálico o de material conductor de fabricación especial que puede contener componentes químicos.

4.6 Electrodo Auxiliar para Tierra

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

4.7 Electrodo para Tierra

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

4.8 Electrodo Primario para Tierra

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

4.9 Elevación del Potencial de Tierra (GPR)

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

4.10 Media Tensión

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

4.11 Rejilla para tierra

Sistema de electrodos horizontales para 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 horizontalmente cerca de la superficie del suelo, son también efectivas para controlar los gradientes de potencial superficial. Una rejilla para tierra típica, usualmente se complementa con un número de electrodos verticales (varillas para tierra) y pueden ser conectadas posteriormente a los electrodos auxiliares de tierra a fin de bajar su resistencia con respecto a la tierra remota.

4.12 Resistencia Eléctrica del Cuerpo Humano

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

4.13 Sistema de Tierra

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

4.14 Tapete para Tierra

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 para tierra del sistema de tierra 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 valores elevados de tensiones 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.

4.15 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 esta parada mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura metálica aterrizada.

4.16 Tensión de Paso (Vp)

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

4.17 Tensión de Malla (Vm)

Es la máxima tensión de contacto dentro de una malla en una rejilla para tierra.

4.18 Tensión Transferida

Es un caso especial de tensión de contacto en donde una tensión es transferida hacia el interior o la parte de afuera de la subestación desde un punto externo remoto.

4.19 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 DISEÑO DEL SISTEMA DE TIERRA**5.1 Generalidades**

Las plantas y subestaciones deben contar con un sistema de tierra al cual se conecta a todos y cada uno de los elementos de la instalación que requieran ser puestos a tierra para:

- a) Proveer un medio seguro para proteger al personal que se encuentre dentro o en la proximidad del sistema de Tierra o de los equipos conectados a tierra, de los riesgos 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, 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) Rejilla para tierra enterrada, a una profundidad que usualmente varía de (0,3 – 1,5) m, sin ser esto limitativo puesto que puede depender del tipo de terreno.
- b) Electrodo verticales (varillas para tierra) conectados a la rejilla para tierra y clavados verticalmente en el terreno, se recomienda al menos una Electrodo vertical (varilla para tierra) en cada esquina de la rejilla para 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 éstos conductores no se establecen en esta norma de referencia.
- d) Conectores aprobados de acuerdo a IEEE que pueden ser soldables, mecánicos o a 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.

5.2 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 en la periferia, se deben tomar las siguientes medidas:

- a) Si la cerca se coloca dentro de la zona correspondiente a la Rejilla para tierra tierra₁, debe ser puesta a tierra, recomendando que la cerca se instale al menos a un metro del límite exterior de la Rejilla para tierra tierra₂.

- b) Si la cerca se coloca fuera de la zona correspondiente a la Rejilla para tierra tierra debe colocarse por lo menos a 2 m del límite de la Rejilla para tierra tierra.

características de cada material (véase tabla 1) Se aplican en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1

Ecuación 2

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

Se deben llevar a cabo las mediciones de la resistividad del terreno en el área donde se instalará el sistema de tierra, determinando la resistividad de la o las capas de terreno que deban aplicarse en los cálculos del sistema de tierra. Este estudio deberá debe llevarse a cabo en la época del año de menor humedad del terreno, debiéndose considerar el procedimiento descrito en el inciso 7.1.

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

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

5.4 Procedimiento de Diseño

El flujograma de la figura 6 ilustra la secuencia de los pasos a seguir para desarrollar el diseño del sistema de tierra. 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 donde se debe instalar el sistema de tierra. Obtener el valor de la resistividad del suelo, con base al procedimiento descrito en el inciso 7.1, para determinar el perfil de resistividad del suelo y el modelo de suelo necesario (suelo homogéneo o de dos capas).

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

Paso 2:

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

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

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

Para calcular la sección transversal del conductor se debe tener el valor de la corriente máxima de falla a tierra que puede estar presente en el punto de la subestación. Conocidas el coeficiente de resistividad y las constantes

Donde:

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

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

T_m = Temperatura máxima permisible en °C.

T_a = Temperatura ambiente en °C.

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

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

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

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

t_c = Tiempo de duración de la corriente en segundos.

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

K_o = 1/α_o o (1/α_r) - T_r en °C.

Determinación de la Corriente máxima de rejilla I_g

La corriente simétrica de rejilla es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la rejilla para tierra hacia el terreno que la rodea, se determina con la ecuación 3:

Ecuación 3

$$I_g = S_f * I_f$$

Ecuación 4

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

Donde:

- I_g = Corriente simétrica de rejilla en A.
- I_f = Corriente simétrica de falla a tierra en A (valor rcm y debe considerarse el incremento futuro de este valor).
- S_f = Factor de división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente de falla con la parte de esta corriente que fluye de la rejilla hacia el terreno.
- I_0 = Corriente de secuencia cero en A.

La corriente que puede circular en una rejilla para tierra en casos de falla, se conoce como "corriente máxima de rejilla", la cual se determina con la ecuación 5:

Ecuación 5

$$I_G = D_f * I_g$$

donde:

Ecuación 6

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

En donde:

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

- t_f = Duración de la falla en segundos.
- T_a = Constante de tiempo subtransitoria en segundos.

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

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

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

Se recomiendan entre 0,25 a 1,0 s. Un valor usual es 0,5 s.

Corriente máxima de rejilla en centrales termoeléctricas

Para determinar el valor correcto de la corriente máxima de rejilla I_G para el cálculo del sistema de tierra de la planta y subestación se considera lo siguiente:

- 1.- Evaluar el tipo y localización de aquellas fallas a tierra que producirán los mayores flujos de corriente entre la rejilla y el terreno circundante produciendo la mayor elevación de potencial con respecto a tierra y los mayores gradientes de potencial en el área considerada.
- 2.- Determinar el factor de división de la corriente de falla S_f ecuación 4 para cada uno de los tipos de falla seleccionados en el inciso anterior y establecer los valores correspondientes de corriente simétrica de rejilla I_g .
- 3.- Para cada uno de los tipos de falla y basado en su tiempo de duración t_p , se determina el valor del factor de decremento D_p para los efectos de asimetría de la onda de la corriente de falla
- 4.- Seleccionar el valor mas grande del producto $D_p \times I_g$ y por tanto la peor condición de falla y establecer el valor del factor de protección C_p para obtener los márgenes para crecimiento futuro del sistema.

En caso de contar con el valor de la corriente de corto circuito, éste se utilizará para determinar los demás parámetros del sistema de tierra.

Paso 3:

Determinar las tensiones de paso y de contacto máximas permisibles por el cuerpo humano. El tiempo de exposición de la falla debe ser el máximo tiempo hasta que la falla se libere, normalmente el valor se encuentra en el intervalo de 0,1 a 1,0 s.

La corriente de no-fibrilación de magnitud I_B está relacionada con la energía absorbida por cuerpo y descrita con la siguiente ecuación 7:

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

Ecuación 7

Donde:

- $K = (S_B)^{1/2}$
- $S_B = 0,0135$ Constante empírica del impacto de energía tolerado, cuando se aplica a un por ciento de la población
- $t_s =$ tiempo máximo de liberación de la falla

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

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

Ecuación 8

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

Ecuación 9

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

donde:

C_s = factor de reducción

ρ_s = resistividad de la capa superficial

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

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

Ecuación 10

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09}$$

Donde:

ρ = Resistividad del suelo en Ω -m.

h_s = Espesor de la capa superficial en m

Paso 4:

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

En la práctica las rejillas para tierra en las Subestaciones de Comisión Federal de Electricidad se construyen cuadradas o rectangulares.

Se sugiere que la separación inicial de acuerdo a los niveles de tensión del sistema (en caso de no contar con programas de calculo de red de Tierra) sea la siguiente:

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

- la cuadrícula de la rejilla para tierra será de 8 x 8 m , en toda el área del terreno y de acuerdo al

criterio adoptado para el aterrizamiento de la cerca,

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

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

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

5.4.3 Disposición física

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

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

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

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

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

En el caso de plantas hidroeléctricas, de la Rejilla para tierra de la zona del desfogue, subirán cables para conectarse al cable que rodeará 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 atornillables. 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 de subestaciones, así como las partes metálicas de y equipos, deben estar puestas a tierra conectadas a tierra para evitar accidentes por descargas eléctricas en casos de fallas.

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

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

Los parámetros físicos del sistema de tierra se basan en limitaciones tanto físicas como económicas presentes en la instalación de la propia Rejilla para tierra. Por ejemplo una limitación física se encuentra en la excavación y relleno de las cepas para enterrar el conductor, por lo que el espaciamiento de la Rejilla para tierra puede ser de 3 m en adelante, los espaciamentos típicos van de 3 a 15 m.

No existe una ecuación para determinar el número óptimo de electrodos verticales (varillas para tierra), sin embargo para que los electrodos verticales (varillas para tierra) tengan una disipación efectiva de corriente, éstos pueden 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 – 1,5 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 7.1.

En la propuesta inicial de la configuración de la rejilla para tierra se pueden considerar arreglos de sistemas de tierra en subestaciones y terrenos similares existentes; la longitud total de conductor, el arreglo de la rejilla para tierra, así como la cantidad de electrodos verticales (varillas para tierra) se verifican y en función de los resultados de los cálculos de la resistencia eléctrica máxima y de las tensiones seguras de paso y de contacto si es necesario se podrán modificar.

Para el diseño del sistema de tierra se considera únicamente el conductor enterrado con o sin electrodos verticales (varillas para tierra).

En el diseño inicial debe considerarse el colocar electrodos verticales (varillas para tierra) en los extremos de la rejilla para tierra y en algunos puntos de unión del perímetro.

Se deben también colocar electrodos verticales (varillas para tierra) en equipos como apartarrayos, interruptores y transformadores de potencia.

En suelos con alta resistividad, es conveniente utilizar electrodos verticales (varillas para tierra) de longitud apropiada instaladas en los puntos de unión de la rejilla para tierra.

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

En el caso de plantas termoeléctricas, se implementa una sistema de tierra, el cual consiste de las siguientes zonas: Subestación, transformadores, casa de máquinas, generador de vapor. De la rejilla se conectan cables a las áreas de oficina, almacenes y talleres, torres de enfriamiento, obra de la toma, tanques de almacenamiento, etc. Dejando registros a lo largo y ancho de la rejilla de tierra y se toman derivaciones y conexiones a cada equipo, así mismo se implementan registros que sirven como puntos de conexión y prueba para verificar que todas las zonas del sistema de tierra que conforman la planta están unidas entre sí.

Paso 5:

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

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

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

- a) Para profundidades de la red menores de 0,25 m. Ecuación 11

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

- R_g = Resistencia de tierra en ohms.
- ρ = Resistividad promedio del suelo en Ω-m.
- A = Área ocupada por la rejilla para tierra en m².

- L_T = longitud total de los conductores enterrados en m.

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

Ecuación 12

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

Donde:

h = profundidad de la rejilla para tierra en metros.

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

Ecuación 13

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

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

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

R_{12} = Resistencia mutua entre el grupo de conductores, R_1 y el grupo de electrodos verticales (varillas para tierra), R_2 en Ω .

Donde:

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

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

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

h = Profundidad de la rejilla para tierra en m.

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

Ecuación 14

$$h' = (d_1 h)^{1/2}$$

Para conductores enterrados a la profundidad h en m.

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

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

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

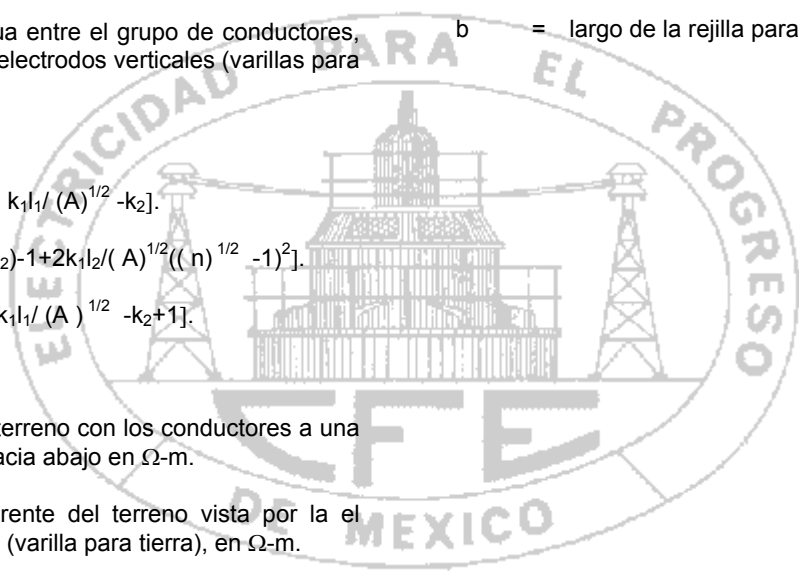
k_1, k_2 = Constantes relacionadas con la geometría del sistema de tierra (véanse figuras 1 y 2).

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

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

a = ancho de la rejilla para tierra en m.

b = largo de la rejilla para tierra en m.



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

En este caso para ρ_1/ρ_2 , la rejilla para tierra se localiza en la capa de resistividad ρ_1 , pero los electrodos verticales (varillas para tierra) están en contacto tanto con la capa de resistividad ρ_1 , como con la capa de resistividad ρ_2 , por lo que R_2 y R_{12} se calculan con una resistividad aparente ρ_a vistas por los electrodos verticales (varillas para tierra):
Ecuación 15

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

Para suelos con resistividad uniforme:

$$\rho_1 = \rho_2$$

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

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

Paso 6:

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

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

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

Paso 7:

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

Ecuación 16

$$GPR = I_G \times R_g$$

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

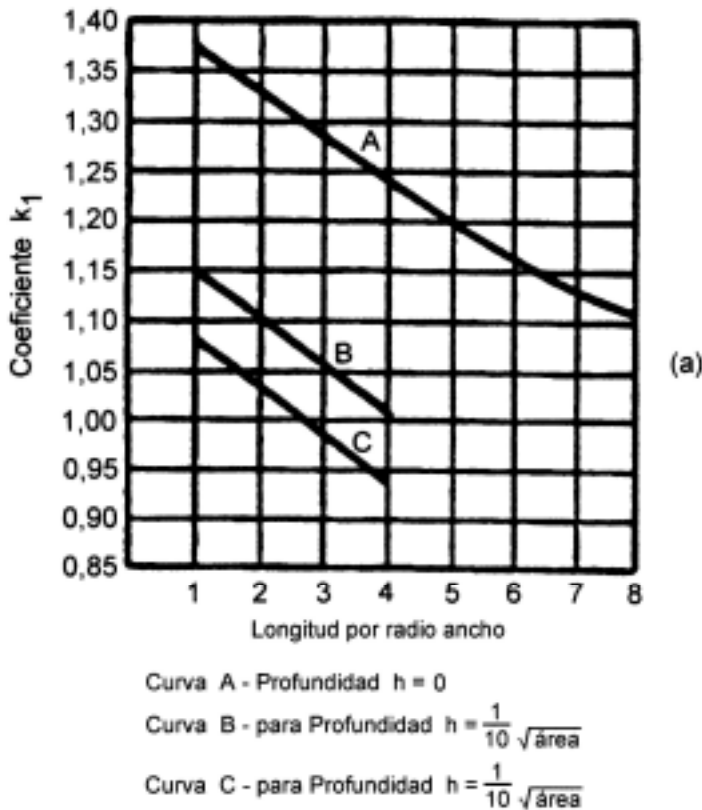


FIGURA 1 – Coeficiente k_1 de la fórmula de Schwarz

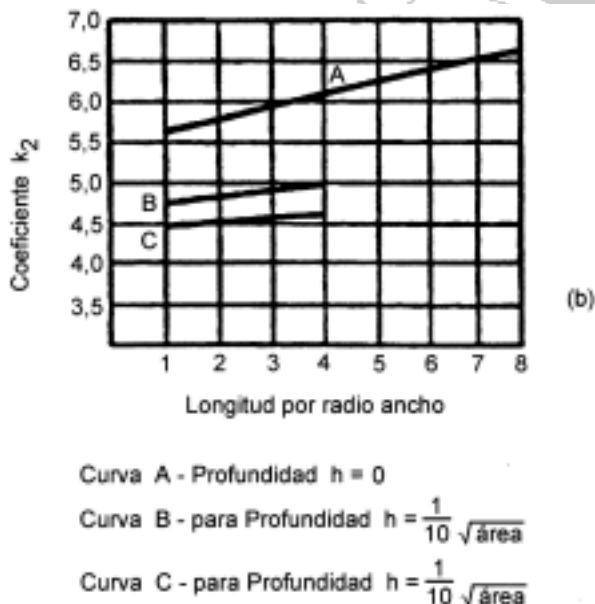


FIGURA 2 – Coeficiente k_2 de la fórmula de Schwarz

Paso 8:

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

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

Cálculo de la Tensión de Malla

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

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

Cálculo de K_h :
Ecuación 19

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

Donde:

ρ = Resistividad promedio del suelo en Ω -m.

K_m = Factor geométrico.(ecuación 18)

K_i = Factor de irregularidad (ecuación 21)

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

Donde:

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

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

Cálculo de n :
Ecuación 20

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

donde :

Fórmula para calcular K_m :
Ecuación 18

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

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

Para rejillas para tierra cuadradas y rectangulares

Donde:

Donde:

D = Espaciamiento entre conductores paralelos en metros.

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

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

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

n = Número de conductores equivalentes en cualquier dirección.

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

$n_b = 1$ Para rejillas para tierra cuadradas.

Para cualquier otro caso.

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

Donde:

A = Área de la rejilla para tierra en m^2 .

$n_c = 1$ Para rejillas cuadradas y Rectangulares.

$n_d = 1$ Para rejillas cuadradas y rectangulares

Para la forma de rejilla para tierra en CFE

$$n = n_a n_b$$

Cálculo de K_{ii} :

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

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

El factor de irregularidad K_i
Ecuación 21

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

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

Ecuación 22

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

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

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

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

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

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

Cálculo de la Tensión de Paso

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

Ecuación 23

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

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

K_s = Factor geométrico. (ecuación 25)

K_i = Factor de corrección. (ecuación 21)

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

Ecuación 24

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

Fórmula para calcular K_s :

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

Ecuación 25

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

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

Paso 9:

Si la tensión de malla calculada es menor que la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, el diseño puede darse por concluido. De no ser así el diseño tiene que ser revisado (véase paso 11).

Paso 10:

Si ambas, la tensión de paso y de malla calculadas con el diseño preliminar son menores que las tensiones de paso y contacto tolerables por el cuerpo humano, el diseño necesita únicamente proporcionar la puesta a tierra de los equipos.

Paso 11:

Si se exceden los límites de las tensiones de paso o de contacto, se requiere que el diseño del sistema de tierra se revise. Estas revisiones pueden incluir el incrementar el área para el sistema de tierra, espaciamientos adicionales más pequeños entre conductores y varillas para tierra.

Paso 12:

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

5.4.4 Sistema de Tierra en ampliación de subestaciones

Para el caso de subestaciones existentes donde la rejilla para tierra no cubre la totalidad del terreno, sino únicamente una parte del área total y además no se cuenta con información anterior de la sistema de Tierra existente. Para determinar el sistema de tierra en la ampliación se recomiendan los siguientes procedimientos:

- a) Realizar mediciones de resistividad en áreas cercanas a la rejilla para tierra existente.
- b) Realizar mediciones en áreas ubicadas en sitios alejados de la rejilla para tierra existente, pero dentro del terreno de la subestación y
- c) En caso de no ser posible el inciso b), 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 debe permitir

determinar el tipo y forma de la rejilla para tierra mas óptima a utilizar en la ampliación.

- e) Si la sección transversal del conductor de la rejilla para Tierra existente es superior al obtenido en el inciso d) debe utilizarse un calibre 4/0 AWG como máximo en la ampliación de la rejilla para tierra.

5.4.5 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 conocer la composición del mismo y seleccionar los materiales adecuados para el sistema de tierra.

Todos los materiales a utilizar en el sistema de Tierra, deberán estar certificados por un laboratorio reconocido y cumplan con la totalidad de las normas nacionales e internacionales

Las uniones de los electrodos verticales (varillas para tierra) deberán hacerse con rosca y agregarse elementos inhibidores que eliminen la corrosión.

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

6 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DESPUÉS DE LA INSTALACIÓN

El valor de la resistencia a tierra del sistema de tierra con sus electrodos verticales (varillas para tierra) se debe verificar después de su instalación, aplicando el procedimiento descrito en el punto 7.2 de esta norma; si el valor medido es mayor al calculado, se debe instalar adecuadamente más conductor y más electrodos verticales (varillas para tierra), hasta que la resistencia medida sea igual o menor a la calculada.

7 MÉTODOS DE PRUEBA

7.1 Método de Wenner o de los Cuatro Electrodo para la Medición de Resistividad del Terreno (ρ)

7.1.1 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 tantos lugares como sea necesario dentro del área por construir. En tal lugar y a una considerable profundidad El suelo raramente puede presentar resistividad uniforme.

Los suelos generalmente, tienen varias capas, cada una con diferentes resistividades. La variación de resistividad lateral es menor comparativamente con la variación de la resistividad horizontal. Las pruebas de resistividad del suelo determinarán alguna variación importante de la resistividad

con respecto a la profundidad. El número de lecturas realizadas deberán ser tan grandes como grandes sean estas variaciones. Especialmente si algunas de las lecturas tomadas son tan grandes que seguramente pueden ocasionar 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 puedan ser determinados 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 Tierra, 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, dándonos 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 tierra, generalmente se determina con pruebas de campo.

Debido a que existen variaciones en el sentido horizontal y vertical en la composición del suelo, es conveniente realizar las pruebas de campo en varios lugares del terreno. La mayor cantidad de datos obtenidos en las pruebas, nos permitirá seleccionar con mayor precisión el modelo de suelo a utilizar en el diseño de nuestro sistema de Tierra.

En caso de que se realice la medición de la resistividad del terreno se debe utilizar el siguiente método:

7.1.2 Método de Wenner o de los 4 puntos

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 medidor de rigidez dieléctrica (megger).

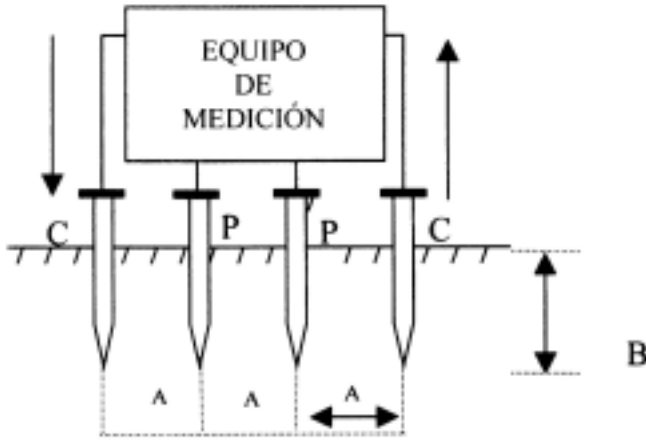
El método de las 4 puntos de Wenner, es la técnica más utilizada comúnmente. Consiste básicamente en 4 electrodos enterrados dentro del suelo a lo largo de una línea recta, a igual distancia A de separación, enterradas a una profundidad B. La tensión entre los dos electrodos interiores de potencial es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

Existen 2 variaciones de este método:

- a) Electrodo igualmente espaciados o arreglo de Wenner.

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

$$\rho = 2\pi AR$$



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 espaciamento indicándonos en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

b) Electrodos 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 espaciamento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamentos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede utilizarse el arreglo mostrado en la figura 4:

FIGURA 3 - Método de Wenner para la medición de la resistividad

Donde:

- A = Separación entre varillas adyacentes en m.
- B = Profundidad de los electrodos en m.
- C = Electrodo de corriente.
- P = Electrodo de potencial.

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

Ecuación 26

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

Donde :

- ρ = Resistividad aparente del suelo en Ω -m.
- A = Separación entre electrodos adyacentes en m o en cm.
- B = Profundidad de los electrodos en m o en cm.
- R = Resistencia medida en Ω .

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

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

Ecuación 27

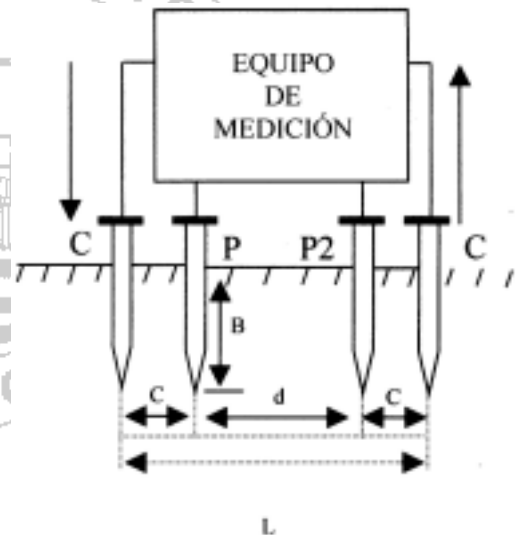


FIGURA 4 - Electrodos no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger - Palmer

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

Los conductores desnudos enterrados que se encuentren en contacto con el suelo pueden invalidar lecturas realizadas por el método descrito si están bastante juntos de manera que alteren la trayectoria del flujo de la corriente. Por ésta razón, las mediciones de resistividad del suelo son de menor valor en un área en donde una rejilla de conductores ya ha sido instalada, excepto, tal vez para mediciones poco profundas dentro o cerca del centro de una gran rejilla para tierra rectangular. En tales casos una lectura poco aproximada deberá ser tomada a corta distancia fuera de la rejilla para tierra, con los electrodos de prueba en tal posición que minimicen el efecto de la rejilla para tierra sobre las trayectorias de flujo.

Sin embargo, no es necesario hacer dichas consideraciones dentro de la rejilla para tierra, tales anotaciones pueden ser utilizadas por medio de una aproximación, especialmente si hay una razón para creer que el suelo en la totalidad del área es razonablemente homogéneo.

Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido.

La fórmula empleada en éste caso se puede determinar fácilmente. Si la profundidad de los electrodos es pequeña comparada con la separación "d" y "c", entonces la resistividad aparente puede calcularse como:
Ecuación 28

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

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.

7.1.3 Material y equipo

- a) Medidor de resistencia a tierra (óhmetro de tierra), con calibración vigente.
- 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 a 0,635cm y longitudes de 30 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 mm². 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.

7.1.4 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.

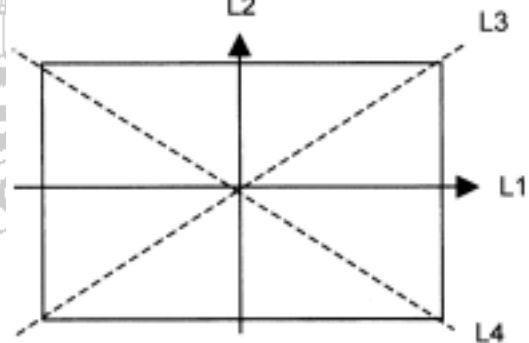


FIGURA 5 – Medición en campo

- d) Partiendo del centro de la diagonal y a lo largo de la misma colocar los cuatro electrodos de prueba (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 los electrodos de prueba (varillas) en los extremos, y las de potencial P1 y P2 a los electrodos de prueba (varillas) intermedias.

- f) Se energiza el instrumento (acorde a su instructivo) y se toman las lecturas respectivas de resistencia en Ω .
 - g) Se calcula la resistividad mediante las ecuaciones r y s 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 líneas 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 ρ vs separación A para cada sección.
 - k) El valor de la resistividad media del terreno será 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.
 - l) Para realizar pruebas de resistencia eléctrica de un sistema de tierras en una planta termoeléctrica, se consideran los siguientes puntos de prueba.
 - 1.- gabinetes del cuarto de control de la subestación
 - 2.- estructuras de la subestación
 - 3.- registros de prueba
 - 4.- casa de máquinas turbogenerador
 - 5.- neutro y tanque de los transformadores principales y de arranque
 - 6.- tanques de almacenamiento de agua y de combustible.
- 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 Tierra. 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.

7.2.2 Material y equipo

7.2 Método de Caída de Potencial para Medición de Resistencia Óhmica en un Sistema de Tierra

7.2.1 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 deslindará al contratista de la responsabilidad de sus resultados de medición:

- a) Medidor de resistencia a tierra (óhmetro de tierra), con calibración vigente.
 - b) Electrodo de prueba de fábrica que vienen con el equipo medidor de resistencia a tierra, generalmente fabricados en acero templado o acero inoxidable con diámetro de 0,475 a 0,635 cm y longitudes de 30 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 deberán 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 mm². Las terminales deberán de tener buena calidad para asegurar una baja resistencia de contacto en los electrodos y el equipo de medición. Cuando se realicen

mediciones con espaciamentos 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.

7.2.3 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 dá el valor de resistencia.

7.2.4 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 este 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 Tierra 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 (véase figura 6).
- c) Las varillas de prueba P2 , C2 deberán clavarse a una profundidad de 50 a 60 centímetros, aproximadamente.

La distancia (d) del electrodo bajo prueba de la red de Tierra al electrodo de potencial (P2) se va variando 10 metros 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:

Ecuación 29

$$A \text{ malla} = l \times a$$

Donde :

A malla = Superficie malla de tierra.

- l = Largo de la malla.
- a = Ancho de la malla.

El área o superficie de un círculo es:
Ecuación 30

$$A_c = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

Donde:

- Ac = Área o superficie del círculo.
- D = Diámetro del círculo.

Igualando : A malla = Ac

Se obtiene:
Ecuación 31

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

De donde:
Ecuación 32

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

Donde:

D = Diámetro equivalente de la superficie que cubre la red de Tierra de aquí se obtiene : $L = 4 D$.

- e) Se energiza el instrumento (acorde a su instructivo) y se toman las lecturas respectivas de resistencia en ohms.
- f) En la ultima medición se cortocircuita el electrodo de potencial (varilla de potencial) con el electrodo bajo prueba (varillas bajo prueba), el valor obtenido en ohms se resta al valor real de la resistencia.
- g) Se debe realizar esta medición en época de estiaje.

7.2.5 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 Tierra 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.

8 BIBLIOGRAFÍA

IEEE Std. 80 – 2000; IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (Guía para la puesta a tierra con seguridad en subestaciones de Corriente Alterna)

Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four – Electrode Method.
American Society for Testing & Materials G57-95

9 EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD

La evaluación de la conformidad con esta norma de referencia es responsabilidad de CFE. Los resultados de la evaluación deben ser expedidos por el LAPEM de CFE o por un organismo acreditado por la autoridad competente.

10 CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES

No puede establecerse concordancia con normas internacionales por no existir referencias al momento de la elaboración de la presente.



TABLA 1 - Constantes de materiales

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

TABLA 2 - Valores típicos de factor de decremento D_f

Duración de falla t_f		Factor de decremento D_f			
Segundos	Ciclos A 60 Hz	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0,00833	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,10	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,20	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,30	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,40	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,50	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1,00	60	1,013	1,026	1,039	1,052

TABLA 3 – Formato para la medición de la resistividad

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

SECCIÓN	Enterrado de las probetas en metros (B)	Separación entre electrodos en metros (A)	Valor de resistencia medido	Relación A/B	Resistividad calculada en ohms-metro
		0,5			
		1			
		2			
		3			
		4			
		...			
		...			
Promedio					

NOTA : Cuando las variaciones en los valores de resistividad no sean mayores del 30 % se podrá 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 mas bajo para obtener una valor de resistividad de esa sección.

TABLA 4 - Resultados de la medición de la resistencia de la malla de Tierra

Fecha:
Hora:
Lugar:
Equipo Utilizado:
Temperatura:
Humedad relativa %:

Medición número	Resistencia Medida en ohms	Distancia de la medición en metros (d)
		10
		20
		30
		..

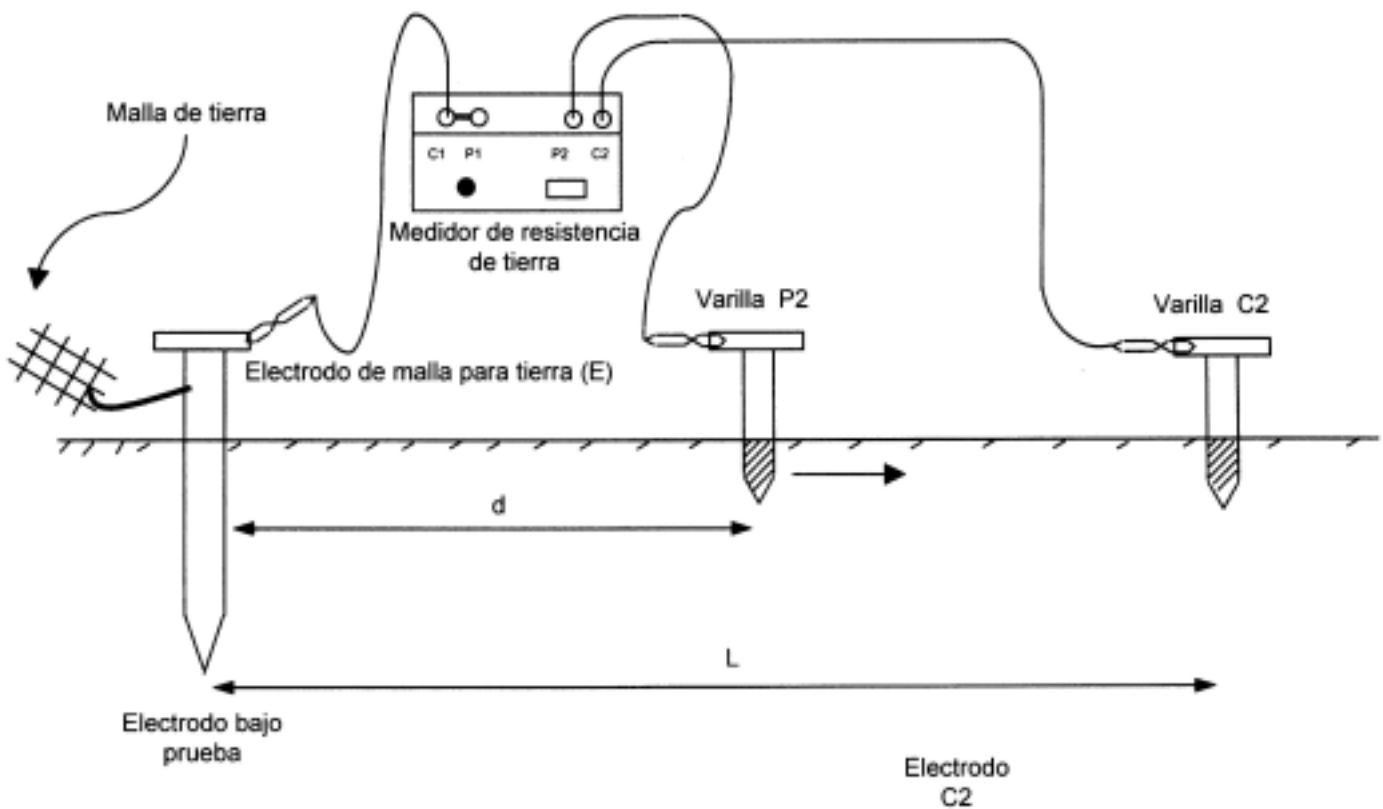


FIGURA 6 - Medición de resistencia de tierra, método de caída de potencial

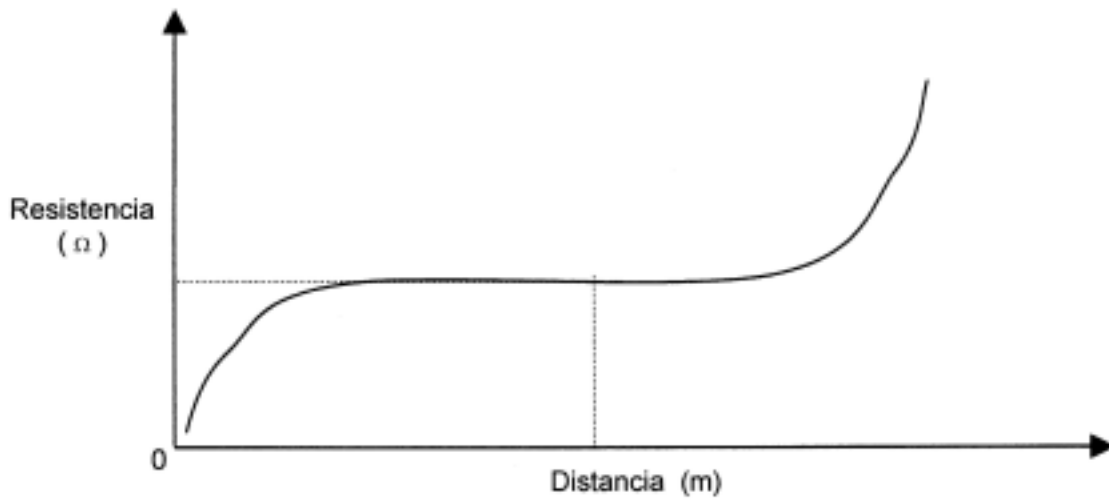


FIGURA 7 - Curva de resultados

**APÉNDICE A
(INFORMATIVO)****SISTEMA DE TIERRA EN SUBESTACIONES EN SF₆****A.1 INTRODUCCIÓN**

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 que para el equipo en una subestación convencional, y debido a esta pequeña área, puede resultar difícil obtener el sistema de Tierra adecuado únicamente mediante métodos convencionales. Debe ponerse atención a los puentes que unen las envolventes metálicas en el ensamble de la subestación en 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 DEFINICIONES**A.1.1 Envolvente continua**

Envolvente del bus, en el cual, las secciones de la cubierta a lo largo del mismo conductor de fase están enlazados a fin de proporcionar una trayectoria eléctrica continua a la corriente a lo largo de la cubierta. Por medio de uniones cruzadas se conectan las cubiertas de las otras fases, los cuales se colocan solamente en los extremos de la instalación y en algunos puntos intermedios específicos seleccionados.

A.1.2 Corriente de la envolvente

Son corrientes que resultan a partir de los voltajes inducidos en las envolventes metálicas debido a los flujos de corriente en los conductores encapsulados.

A.1.3 Subestación aislada en gas

Ensamblajes de multicomponentes compactos, encapsulados en una cubierta metálica puesta a tierra. En el cual el medio aislante primario es un gas comprimido. Normalmente consta de buses, tableros y equipo asociado (subensambles).

A.1.4 Bus principal de tierra

Conductor o sistema de conductores, previstos para conectar todos las componentes metálicas asignadas en las subestaciones aisladas en gas SF₆ al sistema de tierra.

A.1.5 Envolvente no-continua

Envolvente de bus, con las secciones consecutivas de la cubierta del mismo conductor de fase, eléctricamente aisladas (o aisladas una con respecto a otra) de tal forma que no fluye ninguna corriente mas allá de cada sección encapsulada.

A.1.6 Tensión transitoria de la envolvente ((TTR)

Fenómeno transitorio muy rápido, el cual se encuentra en la envolvente de los sistemas de tierra de la SF₆. Típicamente las terminales a tierra son muy largas (inductivas) a la frecuencia de interés para prevenir de manera efectiva la corriente transitoria de la envolvente. Al fenómeno también se conoce como "elevación del transitorio de tierra" (ETT) o elevación del potencial transitorio de tierra (EPTT).

A.1.7 Transitorios muy rápidos (TMR)

Clase de transitorios generados internamente dentro de la subestación aislada en gas SF₆. Se caracterizan por su corta duración del orden de nanosegundos y una muy alta frecuencia del orden de los 100 MHz. Los Transitorios muy rápidos (TMR) se generan por el rápido colapso de la tensión durante el rompimiento del gas aislante.

A.1.8 Sobretensiones transitorias muy rápidas (STMR)

Sobretensiones del sistema las cuales resultan de la generación de las tensiones transitorias muy rápidas (TTMR).

A.2 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 envoltura forman un par concéntrico con blindaje externo efectivo de los campos en el interior de la envoltura.

Con frecuencia los puentes y el aterrizamiento de la envoltura es la mejor solución para minimizar las tensiones de paso y de contacto peligrosas dentro del área de la Subestación aislada en gas SF₆.

Medidas adicionales incluyen el uso de plataformas conductoras tapetes de tierra que son conectadas a las estructuras de la Subestación aislada en gas SF₆ y puestas a tierra.

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

- a) Todas las envolventes metálicas normalmente deberán operar al nivel de tensión de tierra.
- b) Cuando se aterriza en varios y en puntos específicos, el diseño del bus de la envoltura debe asegurar que no existan diferencias de tensión significativas entre las secciones individuales de la envoltura y que ni la estructura de soporte ni ninguna parte de los sistemas esté adversamente influenciado por el flujo de corrientes inducidas.
- c) Para evitar la circulación de corrientes en la envoltura mas allá de las trayectorias normales de retorno dentro del ensamble de la Subestación aislada en gas SF₆. Deben colocarse cables con pantallas para conexión al sistema de tierra a través de conexiones que estén separadas de las envolventes de la Subestación aislada en gas 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 de interruptores o por fallas en la Subestación aislada en gas SF₆ pueden ocasionar flameo en estos aislamientos. En tales casos deben considerarse las consecuencias de estos flameos en la distribución de corriente dentro del sistema de tierra.
- d) No puede permitirse que las corrientes de retorno por la envoltura fluyan a través de alguno de los transformadores de corriente montados.

A.3 COOPERACIÓN ENTRE FABRICANTE Y USUARIO DE SUBESTACIONES AISLADAS EN GAS SF₆

Usualmente es el fabricante de subestaciones en SF₆ quién debe definir 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 Tierra 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 para tierra interferirá con la trayectoria requerida para la corriente de la envoltura o con alguna otra característica operacional del diseño de la SF₆.

Esto puede resultar especialmente pertinente si el bus principal de tierra consiste de un sistema de interconexiones entre las componentes del SF₆ y las estructuras y no se requiere suministrar ningún bus por separado (anillo continuo), común del bus de tierra.

El fabricante de subestaciones en SF₆ debe proporcionar 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 placas o 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 Subestación aislada en gasSF₆ 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 proporcionará información sobre las fuentes de corriente de falla, las magnitudes esperadas y los tiempos de duración que se deben considerar. Aún mas el usuario deberá asistir al fabricante de subestaciones en SF₆ para revisar todas las provisiones del aterrizamiento propuestas para asegurar una interfase 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 a todas las placas o conectores manufacturados por el fabricante de Subestaciones aisladas en gas SF₆.
- f) Tensiones de paso y de contacto seguras, bajo condiciones de operación normal externos al ensamble de la Subestación aislada en gas SF₆.
- g) Cumplimiento con las especificaciones de Tierra, 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 inducirán en marcos y estructuras para evitar así la formación de circuitos indeseables con otros equipos de la subestación. Por lo que el sistema de tierra y el arreglo físico de la subestación deberá revisarse cuidadosamente con el fabricante de Subestaciones aisladas en gas 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 Subestación aislada en gas SF₆, así como en los puntos de interfase 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:

Ecuación 33

$$(E_{i2} + (E_{to\ max})^{1/2}) \cdot E_{contacto}$$

Donde:

E_{i2} = es la tensión máxima de contacto como se determinó para el punto bajo los pies de una persona.

E_{tomax} = 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.

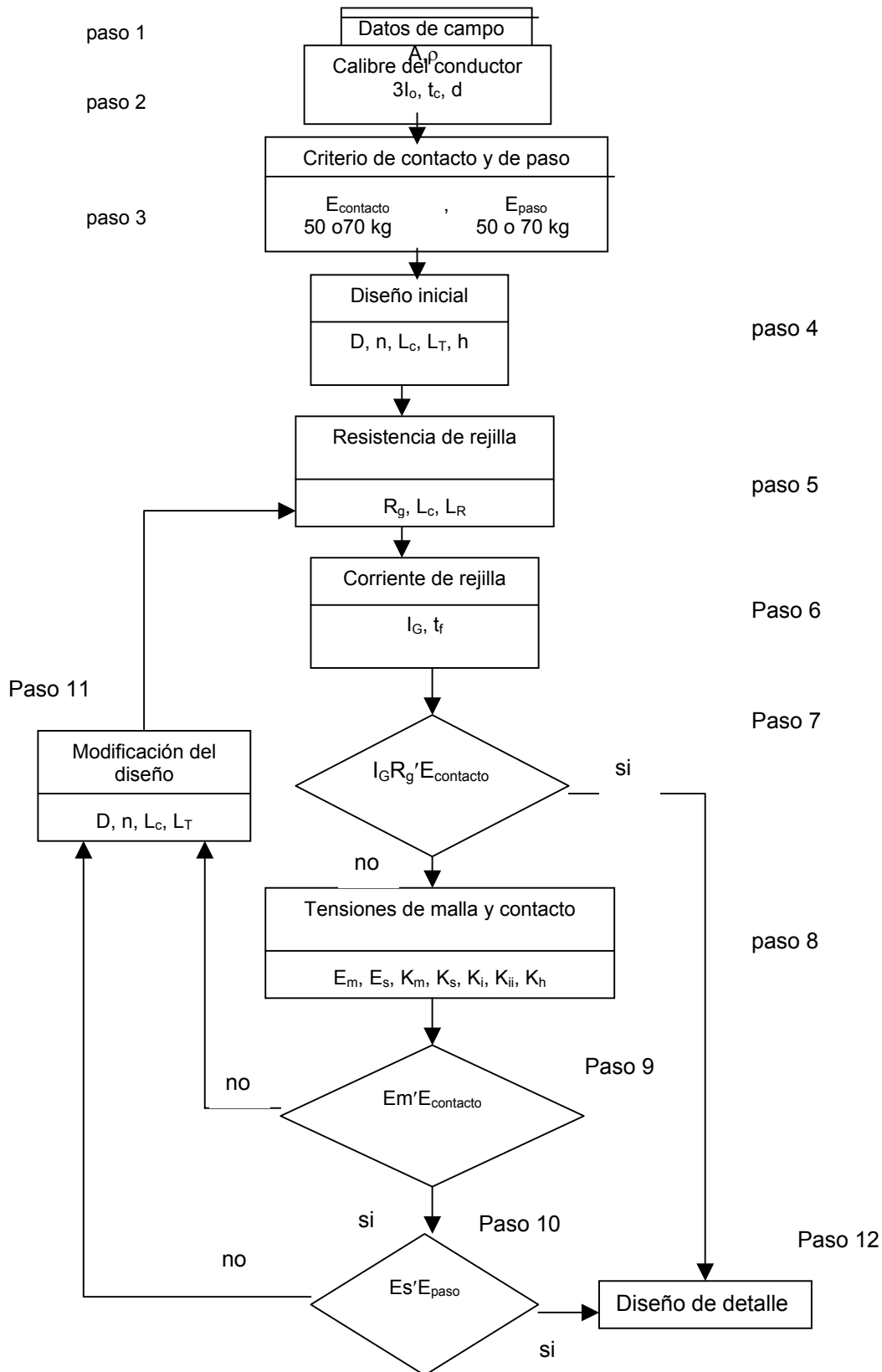


Figura A.1 Flujoograma del procedimiento de diseño