



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CAMPUS ARAGÓN**

“SISTEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA”

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO
(ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO)**

P R E S E N T A

DANIEL FLORES RAMOS



ASESOR: ING. J. JUAN RAMÓN MEJÍA ROLDAN

MÉXICO

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatorias

A mis padres. Por toda una vida de sacrificio, esfuerzo, paciencia y apoyo incondicional.

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a mis padres Melquiades y Leticia, por su esfuerzo, enseñanzas, regaños, consejos, amor durante todas las etapas de mi vida, sabiendo que no existirá una forma de agradecer toda una vida de sacrificios y esfuerzos, quiero que sientan que el objetivo logrado también es suyo.

A mi asesor Ing. J. Juan Ramón Mejía Roldan, por el valioso tiempo que dedicó para guiarme en el desarrollo de este trabajo.

A mis revisores por sus consejos y valioso tiempo.

A mis hermanos Iván, Liseth y Rogelio, por su gran apoyo y cariño brindado.
Con amor, respeto y admiración.

Índice General

1. Generalidades	1
1.1. La tierra.....	1
1.2. El sistema de tierras.....	2
1.2.1. La conexión a tierra para protección contra incendios.....	4
1.2.2. La conexión a tierra para evitar electrocución.....	5
1.2.3. La conexión a tierra para la protección de falla a tierra del equipo.....	6
1.2.4. La conexión a tierra para protección contra electricidad estática.....	7
1.2.5. La conexión a tierra para protección contra descargas atmosféricas.....	8
1.2.6. La conexión a tierra contra sobrevoltajes.....	10
1.2.7. La conexión a tierra para el control del ruido eléctrico.....	10
1.3. Tipos de sistemas de conexión a tierra.....	11
1.3.1. Conexión a tierra del sistema eléctrico.....	11
1.3.1.1. Sistemas que funcionan con menos de 50 volts.....	13
1.3.1.2. Sistemas que funcionan de 50 a 1000 volts.....	17
1.3.1.3. Sistemas que funcionan de 1000 volts en adelante.....	20
1.3.1.4. Sistemas derivados separadamente.....	21
1.3.2. Conexión a tierra para equipo.....	22
1.3.2.1. Consideraciones que permiten no aterrizar los equipos.....	26
1.3.2.2. Consideraciones que obligan a aterrizar los equipos.....	26
1.3.2.3. Características de la trayectoria a tierra.....	27
1.3.3. Conexión a tierra para equipo electrónico.....	29
1.3.3.1. Introducción.....	29

1.3.3.2.	Interferencia.....	30
1.3.3.3.	Formas de ruido.....	32
1.3.3.4.	Diferentes esquemas y disposiciones de conexión a tierra.....	35
1.3.4.	Conexión a tierra para protección atmosférica.....	38
1.3.4.1.	Principios fundamentales de protección contra descargas atmosféricas.....	38
1.3.4.2.	Sistemas de protección contra descargas atmosféricas.....	39
1.3.4.3.	Características de los sistemas de protección.....	40
1.3.4.3.1.	Terminales aéreas.....	40
1.3.4.3.2.	Sistemas de conductores.....	42
1.3.4.3.3.	Terminales de tierra.....	47
1.3.4.3.4.	Principios acerca de los puentes de unión (bonding).....	52
1.3.5.	Conexión a tierra para subestaciones.....	54
1.3.5.1.	Problemas básicos de conexión a tierra para subestaciones.....	58
2.	Diseño y Construcción de un sistema de tierras	61
2.1.	Generalidades.....	61
2.2.	Valor de la resistencia de conexión a tierra.....	63
2.2.1.	Naturaleza de la resistencia de conexión a tierra.....	63
2.2.2.	Valores recomendados de resistencia a tierra.....	69
2.2.2.1.	Recomendaciones del Código Nacional Eléctrico (NEC).....	71
2.2.2.2.	Requerimientos de la Norma Oficial Mexicana (NOM).....	74
2.3.	La resistividad del suelo y sus modelos matemáticos.....	77
2.3.1.	Resistividad del suelo.....	77
2.3.2.	Factores que afectan la resistividad del suelo.....	78

2.3.3.	Cálculo de la resistencia de conexión a tierra.....	86
2.3.3.1.	Aproximación general.....	86
2.3.3.2.	Fórmula de Laurent y Newman.....	87
2.3.3.3.	Fórmula de Sverak.....	88
2.3.3.4.	Fórmula para una sola varilla o varias de éstas.....	88
2.3.3.5.	Contra-antena (Electrodo Horizontal).....	90
2.3.4.	Reducción de los Valores de Resistencia de Conexión a Tierra.....	92
2.3.4.1.	Métodos de Mejoramiento.....	92
2.4.	Métodos para medir la resistividad del suelo.....	96
2.4.1.	Método de cuatro puntos (Wenner).....	96
2.4.2.	Método de Schlumberger – Palmer.....	98
2.5.	Medición de la Resistencia Eléctrica de la Red de Tierras.....	100
2.5.1.	Método de Caída de Potencial.....	100
2.5.2.	Pasos a seguir para la medición de la resistencia de un electrodo.....	101
3.	Materiales y equipo para puesta a tierra	104
3.1.	Electrodos de puesta a tierra.....	104
3.1.1.	Tipos y configuraciones de electrodos de tierra.....	104
3.1.1.1.	Tipos de electrodos.....	105
3.1.2.	Naturaleza de los electrodos.....	113
3.1.2.1.	Constitución de los electrodos artificiales.....	114
3.1.2.2.	Constitución de los electrodos naturales.....	115
3.1.3.	Configuraciones de electrodos.....	116
3.1.3.1.	Anillo de tierra.....	117

3.1.3.2. Mallas.....	118
3.2. Conectores y sus accesorios.....	119
3.2.2. Conectores atornillados.....	119
3.2.1. Conectores a presión.....	120
3.2.3. Conectores soldados.....	121
3.2.3.1. Soldadura exotérmica.....	121
3.2.4. Registros.....	123
3.3. Determinación del calibre del conductor del sistema de tierras.....	125
4. Ejemplo de Puesta a Tierra	132
4.1. Equipo Propuesto.....	132
4.1.1. Intensificador de Tierras.....	132
4.2. Red equipotencial de puesta a tierra.....	134
4.3. Sistema de Puesta a Tierra Física.....	135
4.4. Conexiones soldables.....	137
4.5. Diagrama de Instalación Pararrayos en el Edificio.....	138
4.6. Sistema de Pararrayos.....	139
4.7. Diagrama de Instalación en la Red.....	140
4.8. Esquema del Foso de Tierra Física.....	141
4.9. Especificaciones Técnicas del Pararrayos.....	142
Conclusiones	143
Glosario	145
Bibliografía	149

Índice de Figuras

1.1	Elementos principales de una instalación de puesta a tierra.....	3
1.2	Sistemas de menos de 50 volts, 1ª situación.....	14
1.3	Sistemas de menos de 50 volts, 2ª situación.....	15
1.4	Sistemas de menos de 50 volts, 3ª situación.....	16
1.5	Sistemas de 50 a 1000 volts, 1ª situación.....	17
1.6	Sistemas de 50 a 1000 volts, 2ª situación.....	18
1.7	Sistemas de 50 a 1000 volts, 3ª situación.....	19
1.8	Sistemas que funcionan de 1000 Volts en adelante.....	21
1.9	Elevación de potencial de partes metálicas no aterrizadas.....	23
1.10	Trayectoria a tierra para las corrientes de falla.....	25
1.11	Material electrónico.....	30
1.12	Interferencias.....	31
1.13	Formas de ruido.....	34
1.14	Pararrayos.....	39
1.15	Terminal aérea.....	41
1.16	Doble trayectoria para conductores en elevación.....	43
1.17	Número de conductores de bajada a tierra.....	44
1.18	Separación mínima de los conductores de bajada de pararrayos.....	47
1.19	Interconexión de electrodos de pararrayos y otros sistemas de electrodos.....	48
1.20	Conexión a tierra en terreno arenoso o con grava.....	50
1.21	Conexión a tierra en terrenos con profundidades menores a 0.3 m.....	51
1.22	El campo magnético alrededor de un conductor.....	53
1.23	Conexión a tierra para subestaciones.....	55
1.24	Objetivos de una subestación.....	59

2.1	Naturaleza de un electrodo a tierra.....	64
2.2	Conformación de la resistencia de un electrodo.....	67
2.3	Resistencia de un electrodo.....	69
2.4	Conexión de electrodos múltiples.....	70
2.5	Electrodo electrolítico.....	72
2.6	Resistividad del suelo en función de la concentración de sales disueltas.....	80
2.7	Resistividad del suelo en función del tipo de sales.....	81
2.8	Resistividad del suelo en función de la humedad.....	82
2.9	Resistividad del suelo en función de la temperatura.....	83
2.10	Variación de la distribución de corriente en un suelo estratificado.....	84
2.11	Gráficas cualitativas para diferentes perfiles de terreno.....	85
2.12	Esquema de un electrodo de puesta a tierra tipo vertical.....	89
2.13	Esquema de un electrodo tipo contra-antena.....	91
2.14	Agregado de sales simples en zanja alrededor del electrodo de tierra.....	94
2.15	Medición de la resistividad del terreno por el método de Wenner.....	98
2.16	Medición de la resistividad del terreno por el método Schlumberger-Palmer.....	100
2.17	Método de medición de resistencia por caída de potencial.....	101
3.1	Electrodo de tierra tipo varilla Copperweld.....	106
3.2	Picas o Jabalinas.....	107
3.3	Electrodo rehilete.....	107
3.4	Electrodo placa.....	108
3.5	Electrodo en estrella.....	109
3.6	Electrodo de anillos.....	110
3.7	Malla.....	110
3.8	Electrodo empotrado en concreto.....	112
3.9	Instalación de un electrodo.....	116

3.10 Conectores atornillados.....	120
3.11 Conectores a presión.....	121
3.12 Tipos de soldaduras.....	123
3.13 Registro.....	124
4.1 Intensificador de tierras.....	133
4.2 Varilla Copperweld.....	134
4.3 Anillo de tierras tradicional.....	135
4.4 Soldadura exotérmica.....	137

Prefacio

La conexión a tierra es un asunto que tiene que ver con establecer una conexión física a tierra o a un punto común de referencia de potencial cero. Pero además tiene importancia primordial en la seguridad de las personas y en el funcionamiento correcto del sistema eléctrico y de los equipos conectados a éste. Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos necesitan estar conectados a una red de tierra.

La red de puesta a tierra debe ser capaz de tolerar corrientes de cortocircuito durante el tiempo transcurrido entre la producción del fallo y la actuación de las protecciones e interruptores que eliminan la falla, sin deteriorar sus propiedades mecánicas ni eléctricas. También debe ser capaz de drenar corrientes inyectadas a tierra, provenientes de descargas atmosféricas o por actuación de los pararrayos frente a sobretensiones, sin producir diferencias de potencial significativas que puedan ocasionar el deterioro prematuro de equipos importantes.

El diseño de los sistemas de conexión a tierra ha evolucionado en forma importante en los últimos años. El presente trabajo tiene el propósito de proporcionar los conocimientos básicos de la aplicación de la metodología que se utiliza actualmente para diseñar y evaluar los sistemas de conexión a tierra en el ámbito mundial.

Se abordaran los principales esquemas de conexión a tierra, como lo son: la conexión a tierra del sistema eléctrico, conexión a tierra para equipo, conexión a tierra para equipo electrónico, conexión a tierra para protección atmosférica y conexión a tierra para subestaciones.

Es importante mencionar que toda práctica de conexión a tierra, además de cumplir con criterios técnicos de funcionalidad, también debe apegarse a la normatividad existente en cada situación específica. Por lo tanto el trabajo se basa en las indicaciones y restricciones que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM) para el caso particular de México, el Código Nacional Eléctrico (NEC) que es el documento que sirvió de base para la elaboración de la NOM, y algunas especificaciones de CFE; tomando en cuenta además las necesidades particulares de funcionamiento y de servicio.

Las consideraciones, esquemas y criterios que se desarrollan en el presente trabajo intentan dar los conocimientos fundamentales sobre el diseño de los sistemas de conexión a tierra así como la filosofía empleada para el diseño de estos sistemas.

También se dará un ejemplo práctico de puesta a tierra para protección atmosférica, el cual consiste en la implementación de un pararrayos en un edificio, detallando paso a paso su instalación, basándose en las normas que rigen este tipo de puesta a tierra que serán abordadas previamente durante el trabajo.

CAPITULO I

Generalidades

1.1. La tierra

La tierra se considera como una masa gigantesca con propiedades prácticamente ilimitadas para absorber cantidades de electricidad estática o carga sin cambiar su potencial, es decir, una masa que debido a sus dimensiones tiene muy baja impedancia o muy alta capacitancia. Por lo tanto, la tierra se define normalmente como aquella masa conductiva con tales propiedades eléctricas que el potencial promedio es considerado como igual a cero en cualquier punto.

Sin embargo, esta definición involucra una tierra ideal, la cual en la práctica, para zonas delimitadas de la superficie de la tierra, se comporta de manera diferente. Debe tenerse mucho cuidado al considerar la tierra a un potencial nulo o cero. Si un punto se define como cero potencial, entonces la aseveración de que un punto cercano está también a cero potencial generalmente es incorrecta.

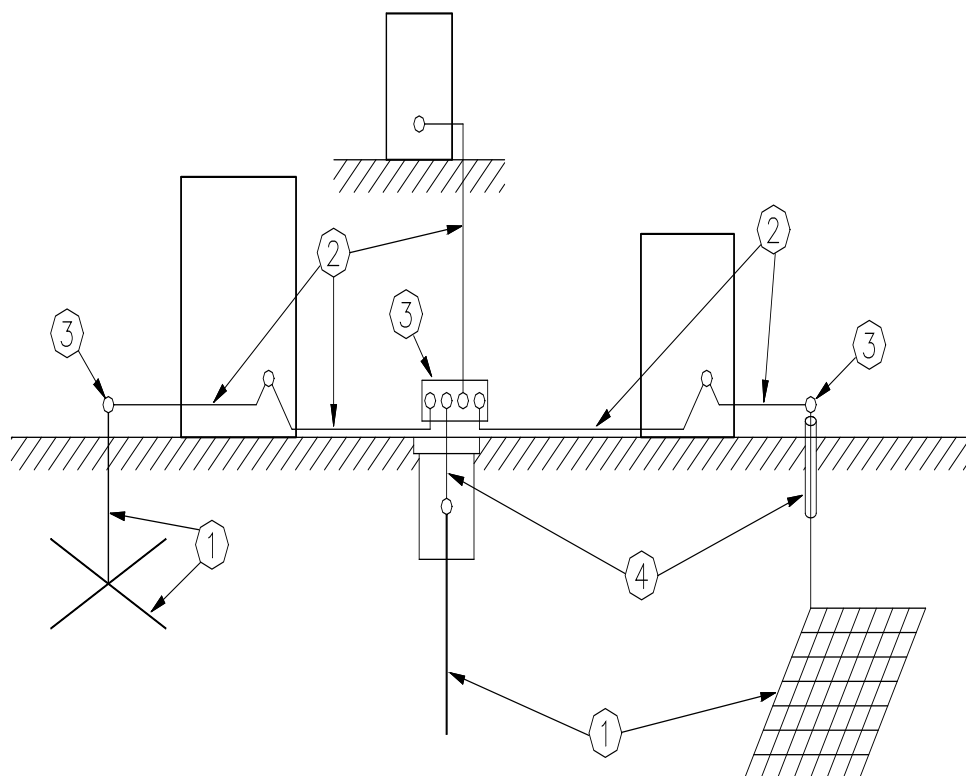
Existen dos propiedades que se considera tiene la tierra bajo el concepto de tierra ideal: la tierra es un “receptor” o “fuente” perfecta de corriente y la tierra puede proporcionar un plano equipotencial dentro de una zona delimitada de la superficie de la misma, plano que sirve como referencia ideal para circuitos.

Estas propiedades sugieren que la diferencia de potencial entre dos puntos en la tierra es cero sin importar el tipo, magnitud y frecuencia de la corriente inyectada a la tierra; concepto que es normalmente violado en la práctica.

Pero, ¿cuál es el elemento que evita tener una tierra ideal, desde el punto de vista eléctrico?, este elemento lo constituye la resistividad del suelo, la cual define en forma práctica las propiedades eléctricas de la tierra. De hecho, la tierra es un conductor con propiedades conductivas muy inferiores a las propiedades conductivas de un elemento metálico.

1.2. El sistema de tierras

La forma de mejorar las propiedades eléctricas de la tierra como elemento disipador de corrientes anormales que se presentan en un sistema eléctrico conectado a él y obtener un plano lo más equipotencial posible, se logra instalando un sistema de tierras, generalmente constituido por conductores enterrados horizontal y verticalmente, en un arreglo que puede ser desde muy sencillo (un solo electrodo horizontal o vertical) hasta muy complejo (un arreglo de conductores horizontales y verticales dispuestos de tal forma que formen una malla de tierra).



1. Electrodo de puesta a tierra
2. Conductor de puesta a tierra
3. Punto de puesta a tierra
4. Conductor del electrodo de puesta a tierra

Figura 1.1
Elementos principales de una instalación de puesta a tierra

El sistema de tierras se diseña para ofrecer una trayectoria o camino definido a tierra para las corrientes anormales producidas tanto por fuentes hechas por el hombre (fallas a tierra del sistema de potencia o fuentes parásitas que crean interferencia de alta o baja frecuencia) como por fuentes naturales (rayo y fuentes externas de interferencia de baja o alta frecuencia).

El objetivo principal de la conexión a tierra es el de la seguridad de las personas, aunque existen otros motivos, no menos importantes. En general los sistemas se conectan a tierra para:

- 1.- Protección contra incendios
- 2.- Evitar electrocuciones
- 3.- Protección del equipo contra falla a tierra
- 4.- Protección contra electricidad estática
- 5.- Protección contra descargas atmosféricas
- 6.- Límite de altos voltajes
- 7.- Control del ruido eléctrico o interferencia

En resumen, un sistema o red de tierras debe ofrecer una trayectoria segura para disipar corrientes anormales y reducir voltajes peligrosos a niveles seguros, tanto para el personal y animales como para el equipo eléctrico o electrónico sensible.

1.2.1. La conexión a tierra para protección contra incendios

El calor se genera por el flujo de corriente en conductores mal seleccionados, en mal estado o en conexiones de mala calidad. El calor es simplemente I^2R es decir, 100 A que fluyen a través de una resistencia de 0.1 ohm generan 1 kW. Esta cantidad de calor podría fundir un conductor de cobre e iniciar un incendio.

Las conexiones entre los conductores tienden a ser un punto débil en una trayectoria conductora. Se puede generar calor en equipo defectuoso o en equipo operado inadecuadamente, este calor puede ocasionar que se incendie cualquier material combustible cercano.

Si los circuitos están localizados en envolventes metálicas adecuadas, cualquier incendio que se pueda iniciar no se propagará.

Las fuentes de incendio más comunes son las uniones o empalmes deficientes o inadecuados entre conductores que llevan corriente. El calentamiento de una unión por sí misma no provoca un disparo en un dispositivo de protección, pero si el calor daña el aislamiento se puede producir una falla que ocasione la apertura del circuito.

1.2.2. La conexión a tierra para evitar electrocución

La forma más simple de evitar electrocuciones es aislar todos los conductores energizados. Esto se puede lograr con el uso de forros aislantes y de una mejor forma, colocando todos los conductores en envolventes metálicos aterrizados efectivamente.

Cuando un conductor entra en contacto con su envolvente metálico existe un riesgo de electrocución. En este momento la envolvente se encuentra al potencial del conductor y es momentáneamente inseguro. Si el envolvente no constituye una trayectoria de regreso de baja impedancia al dispositivo de sobrecorriente, éste permanece inseguro, y permanece así hasta que el detector de sobrecorriente abra el circuito.

Esto puede llevar ciclos, segundos, o minutos dependiendo en la magnitud de la corriente de falla y en la resistencia que se presente en el punto de falla. Cualquier persona que toque la envolvente y al mismo tiempo otro conductor aterrizado puede ser electrocutado.

Para evitar esta posibilidad, todas las superficies metálicas que puedan estar en contacto con un conductor de energía son unidas y conectadas de regreso a la tierra de servicio y de ahí a tierra o al suelo a través de una trayectoria de baja impedancia. Bajo ninguna circunstancia estos elementos metálicos conductores deben conducir corriente de carga.

Se puede utilizar aislamiento para reducir el riesgo de electrocución, sin embargo, el calor excesivo ocasiona que el aislamiento se vuelva quebradizo y se rompa, de ésta manera un cable desgastado puede ser un objeto letal.

1.2.3. La conexión a tierra para la protección de falla a tierra del equipo

No es deseable permitir que las fallas de los equipos persistan. Si la envolvente de un equipo se encuentra conectada a tierra (localmente) pero no aterrizada por un conductor separado, y este equipo se somete a una falla, la envolvente del equipo se puede convertir en una parte eléctricamente “viva” o energizada.

Si un detector de sobrecorriente no se dispara, el exceso de flujo de corriente que resulta de esta condición puede dañar el equipo. La conexión a tierra de la envolvente en forma adecuada, obliga a que el equipo sea desconectado para que no se dañe ni se produzca un riesgo de incendio.

1.2.4. La conexión a tierra para protección contra electricidad estática

Las plantas industriales que manejan solventes, materiales que producen polvos excesivos, u otros productos inflamables tienen condiciones de operación potencialmente peligrosas debido a la electricidad estática acumulada sobre los equipos, materiales o el propio personal. La descarga a tierra o hacia algún equipo de una carga estática en presencia de materiales explosivos o inflamables es la principal causa de incendios y explosiones, las cuales provocan la pérdida de muchas vidas y de instalaciones.

La protección de la vida humana es un objetivo primordial en el control de las cargas electrostáticas. Además del peligro que representa a la vida humana un incendio creado por descargas electrostáticas, existe la posibilidad de una descarga eléctrica hacia el cuerpo humano.

Otro objetivo en el control de la electricidad estática, es evitar lo siguiente:

- 1) Pérdidas económicas, daños a instalaciones, al equipo, y a materiales almacenados
- 2) Pérdida de la producción

La generación de electricidad estática en ocasiones no se puede prevenir, pero se puede mitigar o controlar por medio de una recombinación de cargas separadas tan rápido como estas se produzcan y antes de que se produzcan chispas.

Muchos de los problemas de estática se pueden solucionar uniendo las partes de los equipos y aterrizando el sistema completo. La unión (conexión de dos objetos) minimiza las diferencias de potencial entre objetos conductores, previniendo el chisporroteo entre dos cuerpos.

1.2.5. La conexión a tierra para protección contra descargas atmosféricas

Los pulsos producidos por las descargas atmosféricas pueden producir corrientes de más de 100,000 A. Corrientes de esta magnitud pueden destruir el equipo eléctrico, dañar estructuras, y electrocutar seres humanos y animales.

Es claro que debería colocarse alguna forma de protección contra descargas atmosféricas en la mayoría de las instalaciones, particularmente donde se opera equipo electrónico crítico o sensible. La mejor protección consiste en proporcionar una trayectoria conveniente y directa de baja impedancia para que la corriente fluya a tierra.

La corriente no necesita fluir en un circuito para hacer daño. El campo magnético cerca de la trayectoria del flujo de corriente es muy intenso. Este campo cambiante puede inducir grandes voltajes en circuitos sensibles.

Si el pulso de una descarga entrara a una red de conexión a tierra, la impedancia tendría que ser lo suficientemente baja para evitar diferencias de potencial.

Si las corrientes de las descargas entran a una instalación a través de los conductores de energía, un circuito de relativa alta impedancia puede ocasionar que la corriente produzca un arco o que siga una trayectoria a través del aire, madera o concreto.

Sin embargo, las descargas atmosféricas no necesitan incidir directamente para ocasionar daños a equipo electrónico. Las diferencias de potencial del terreno en la vecindad de una descarga pueden exceder los 10,000 V. Si el alambrado de fuerza o de señal no se maneja correctamente entonces la energía puede entrar en una instalación a través de estos conductores y dañar el equipo.

Los intentos por proporcionar protección contra descargas generalmente son muy pocos. Aún con una buena protección, la trayectoria de las descargas es muy impredecible y pueden ocurrir daños. Es muy difícil determinar la seguridad de un sistema de protección contra descargas atmosféricas. Las instalaciones que parecen ser muy seguras pueden fallar en el momento de la verdad.

1.2.6. La conexión a tierra contra sobrevoltajes

Existen muchas configuraciones de distribución de energía. Es deseable aterrizar uno de los conductores de energía de tal manera que el voltaje máximo a tierra en los otros conductores esté limitado. El Código (NEC) establece que este voltaje se limite a 150 V.

Un sistema aterrizado limita el voltaje y la cantidad de energía que puede ser transportada entre la línea de transmisión o distribución y tierra. Históricamente los sistemas no aterrizados junto con un aislamiento de baja calidad y algunas condiciones resonantes inusuales han causado daños severos a algunos equipos.

1.2.7. La conexión a tierra para el control del ruido eléctrico

La puesta a tierra incluye conductores de fuerza, conductores de seguridad, acero estructural de edificios, o conductos metálicos. Estos conductores tienen muchas conexiones a tierra, de tal manera que las corrientes que fluyen en estas conexiones hacen posible que existan diferencias de potencial entre los puntos de conexión a tierra. Esta multiplicidad de conexiones a tierra origina muchos de los problemas de ruido en equipo electrónico.

En general, estas diferencias de potencial no pueden ser eliminadas agregando conductores, particularmente a frecuencias superiores a unos cuantos kHz. La necesidad de eliminar los problemas de ruido, comúnmente lleva a un ingeniero a realizar prácticas que contravienen las normas de seguridad. Afortunadamente existen técnicas para contrarrestar los problemas de ruido que no necesariamente están en conflicto con la seguridad.

Los diseñadores que no están familiarizados con los procesos de instrumentación sanos por lo regular buscan soluciones que crean riesgos. Se necesita entender bien ambos aspectos: primero, diseñar sistemas eléctricos seguros siguiendo las normas establecidas para tal objeto, y segundo, construir sistemas libres de ruido que además continúen siendo seguros.

1.3. Tipos de sistemas de conexión a tierra

1.3.1. Conexión a tierra del sistema eléctrico

La conexión a tierra del sistema, o la conexión intencional de una fase o un conductor neutro, tiene el propósito de controlar el voltaje a tierra dentro de límites predecibles. El control del voltaje a tierra limita el efecto del voltaje en el aislamiento de los conductores de tal forma que el desempeño de los aisladores se puede predecir más fácilmente. El control del voltaje también permite la reducción de los riesgos de electrocución hacia las personas que puedan entrar en contacto con conductores vivos.

Por otro lado, la conexión a tierra también facilita un flujo de corriente que permite la detección de una conexión no deseada entre los conductores del sistema y tierra y el cual puede provocar la operación de dispositivos automáticos que remuevan la fuente de voltaje de los conductores con tales conexiones indeseables a tierra.

En resumen, los objetivos por los cuales los sistemas deben conectarse a tierra según el NEC son los siguientes:

1. Limitar las sobretensiones, que pueden ser provocadas por:
 - a) Descargas atmosféricas
 - b) Fenómenos transitorios
 - c) Contactos accidentales con líneas de mayor tensión
2. Estabilizar la tensión a tierra en condiciones normales de operación
3. Facilitar la acción de los dispositivos de sobrecorriente en caso de fallas a tierra

En forma práctica, la conexión a tierra de los sistemas de distribución de energía eléctrica tiene que ver con la naturaleza y localización de una conexión eléctrica intencional entre los conductores del sistema eléctrico y tierra (física).

Los esquemas comunes de conexión a tierra que se encuentran en los sistemas de distribución son:

- (1) No aterrizado
- (2) Aterrizado a través de resistencia
- (3) Aterrizado a través de reactancia
- (4) Sólidamente aterrizado

El Código Nacional Eléctrico (Sección 250-20) establece los criterios para la conexión a tierra de los circuitos y sistemas eléctricos de corriente alterna que deben ser sólidamente aterrizados, para lo cual hace una clasificación de los mismos en 4 grupos:

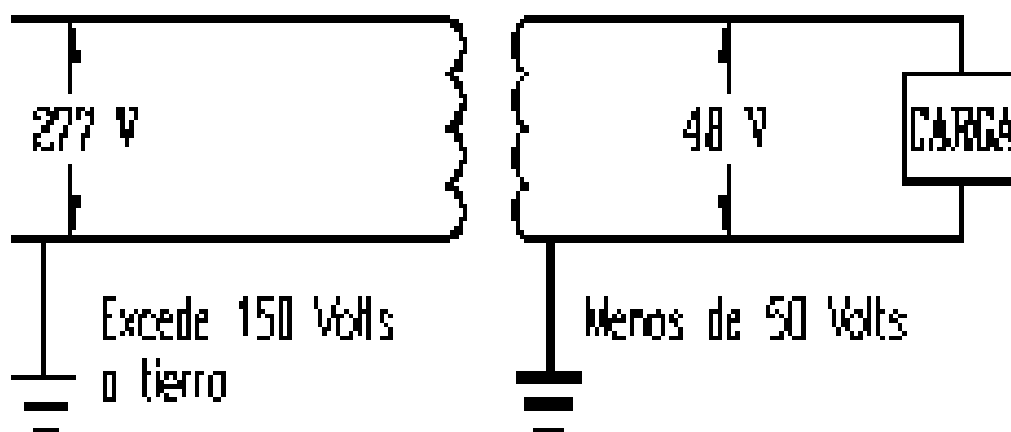
1. Sistemas que funcionan con menos de 50 volts
2. Sistemas que funcionan de 50 a 1000 volts
3. Sistemas que funcionan de 1000 volts en adelante
4. Sistemas derivados separadamente

1.3.1.1. Sistemas que funcionan con menos de 50 volts

Existen tres situaciones bajo las cuales los sistemas de corriente alterna que funcionan a menos de 50 volts deben ser aterrizados.

- I. La primera se presenta cuando un sistema se alimenta por medio de un transformador y la alimentación de ese transformador sobrepasa 150 volts a tierra, en este caso, el sistema debe ser aterrizado (en el secundario) como se ve en la figura 1.2 (Sección 250-20 (a) (1)). Un ejemplo de esto es un sistema de 480/227 volts utilizado como alimentación del primario de un transformador, y el secundario del mismo transformador es utilizado para alimentar, en 48 volts, pequeñas válvulas solenoides o algunos otros circuitos de control de baja tensión. El secundario está a menos de 50 volts y el primario está a más de 150 volts. Por lo tanto, el secundario en 48 volts debe ser aterrizado.

Fuente de Alimentación aterrizada

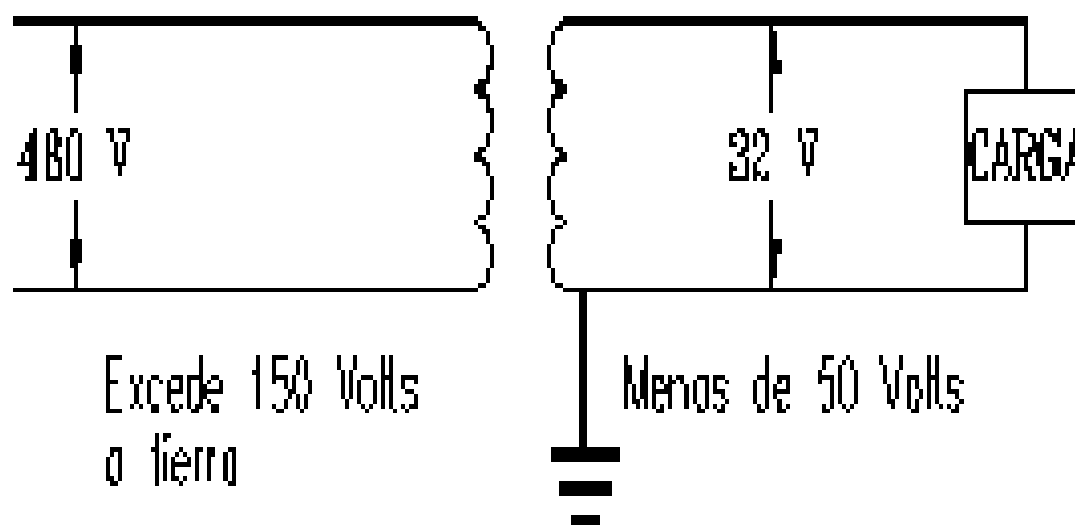


SECCION 250-20 (a) (1)

Figura 1.2
Sistemas de menos de 50 volts, 1ª situación

- II. La segunda situación se presenta cuando un sistema se alimenta por medio de un transformador conectado a un sistema no aterrizado. En este caso, el sistema debe ser aterrizado (en el secundario), como se ve en la figura 1.3 (Sección 250-20 (a) (2)). Un ejemplo de esto se observa cuando una fase de un sistema trifásico no aterrizado a 480 V, se utiliza para alimentar el primario de un transformador, y el secundario del transformador está a menos de 50 volts.

Fuente de Alimentación
no aterrizada

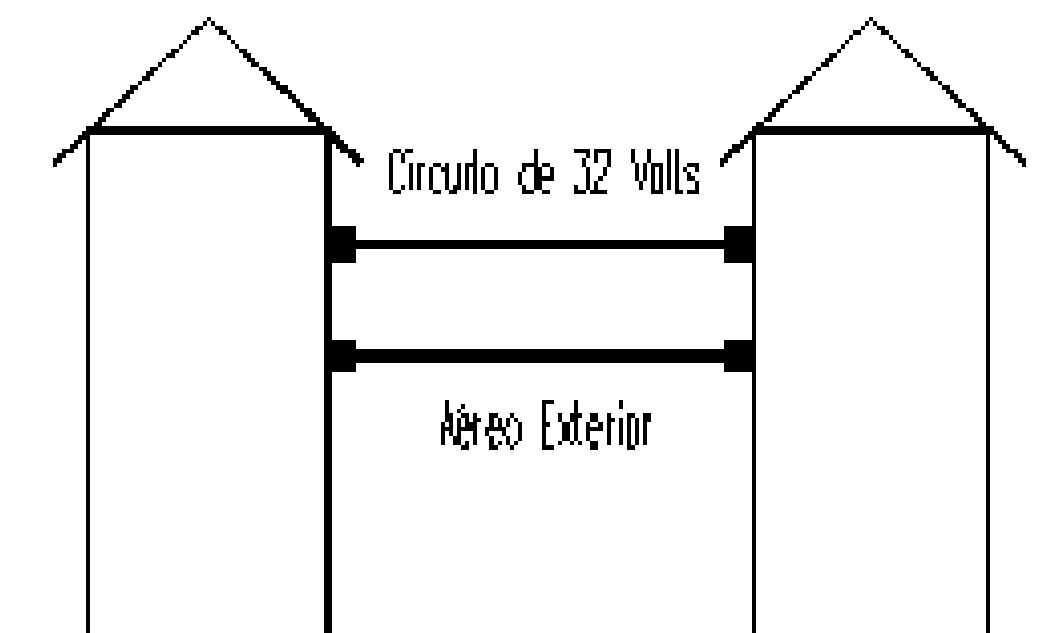


SECCION 250-20 (a) (2)⁺

Figura 1.3
Sistemas de menos de 50 volts, 2ª situación

- III. La tercera situación requiere que los sistemas que operan a menos de 50 volts sean aterrizados cuando los conductores del mismo sistema estén instalados como conductores aéreos en los exteriores de los edificios. Esta situación se puede observar en la figura 1.4 (Sección 250-20 (a) (3)).

Existen otros sistemas que operan a menos de 50 volts y no se requiere que sean aterrizados, sin embargo se permite que lo estén. Un ejemplo de esto es un sistema alimentado con un transformador con un primario alimentado a menos de 150 V, y el secundario a menos de 50 volts.



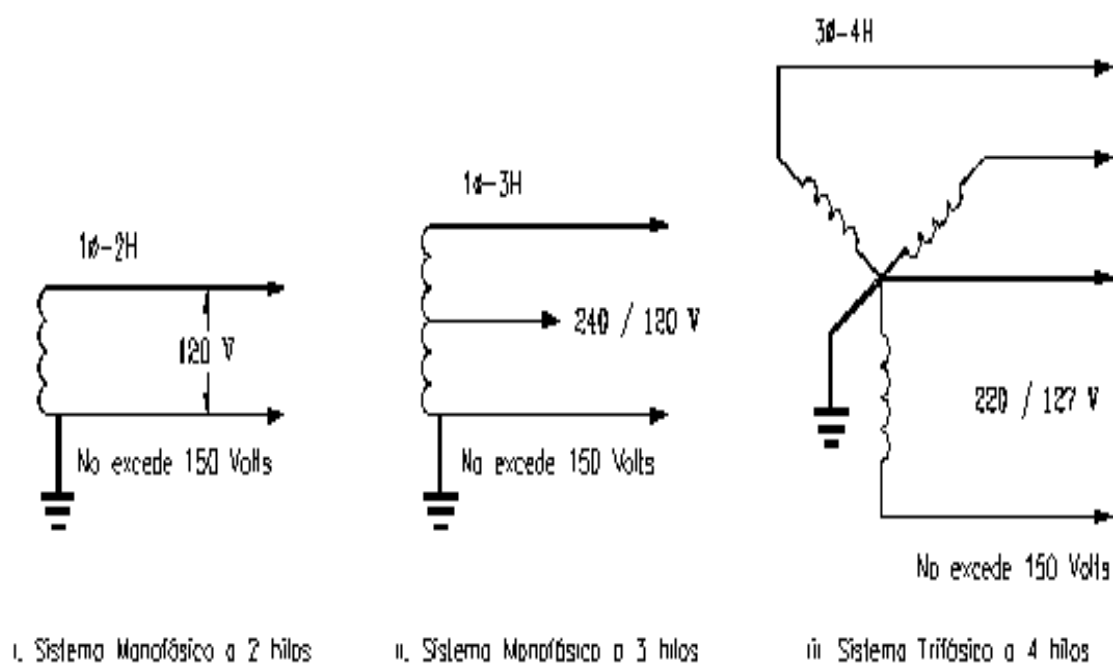
SECCION 250-20 (a) (3)†

Figura 1.4
Sistemas de menos de 50 volts, 3ª situación

1.3.1.2. Sistemas que funcionan de 50 a 1000 volts

Dentro de éste grupo existen tres situaciones bajo las cuales los sistemas entre 50 y 1000 volts deben ser aterrizados.

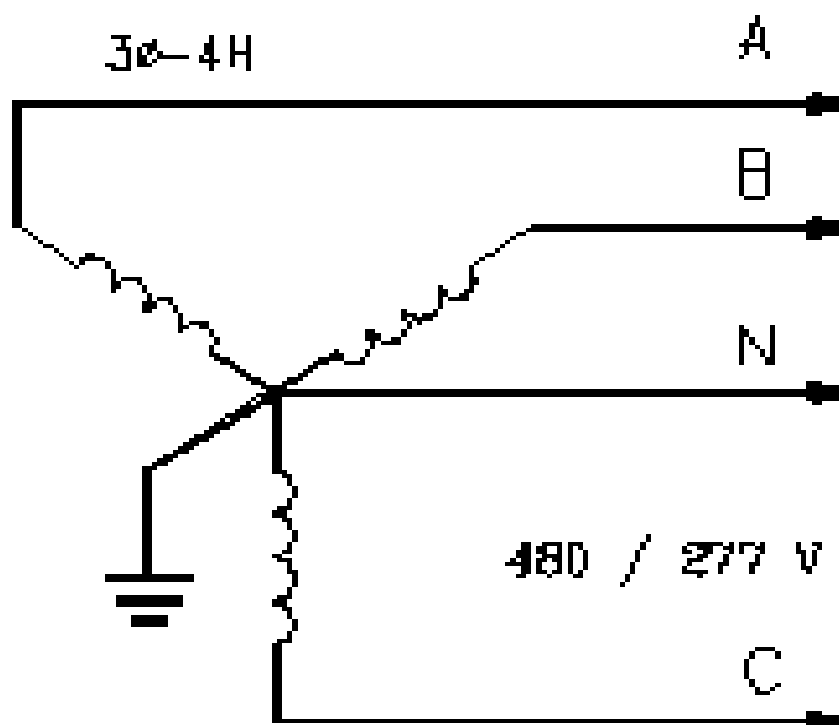
- I. La primer situación establece que un sistema debe ser aterrizado, si el voltaje a tierra de los conductores no aterrizados no sobrepasa 150 V, para esta situación existen tres sistemas de distribución que la satisfacen (i, ii y iii), y que son los de uso más común, la figura 1.5 muestra estos sistemas (Sección 250-20 (b) (1)).



SECCION 250-20 (b) (1)*

Figura 1.5
Sistemas de 50 a 1000 volts, 1ª situación

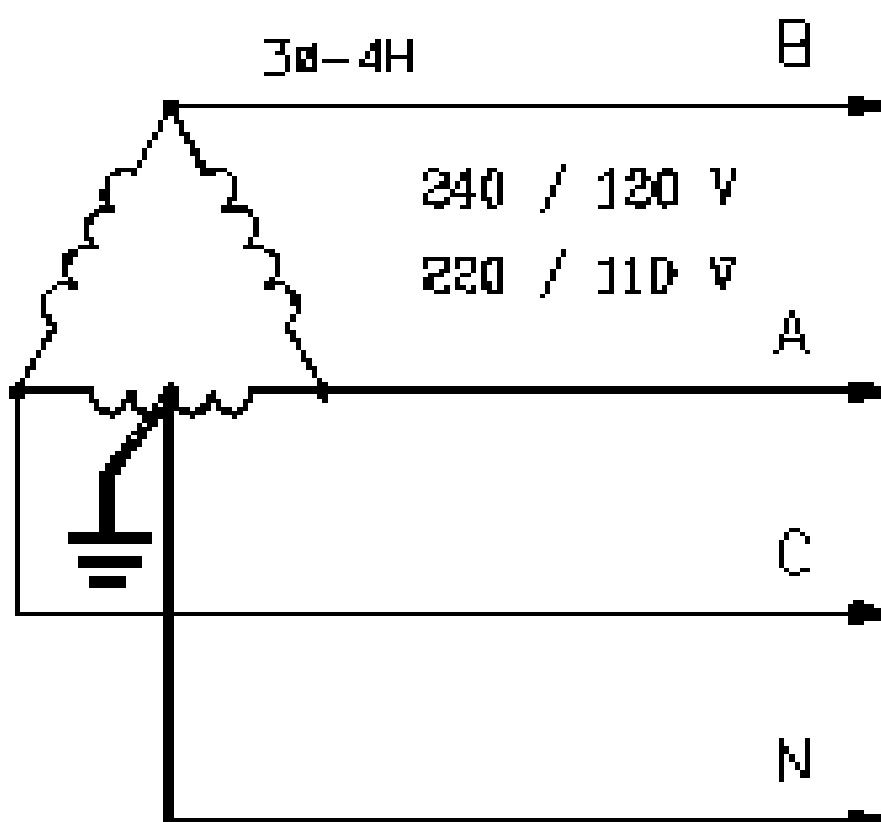
- II. La segunda situación establece que los sistemas trifásicos a cuatro hilos (3f-4H), donde el neutro se utilice como conductor para un circuito, deben ser aterrizados. Esta situación incluye a los sistemas en 480/277 V, que no están circunscritos por la primer situación por no ser el voltaje de línea a tierra menor a 150 volts. Este sistema se utiliza extensamente en la iluminación de escuelas, oficinas en grandes edificios y en áreas industriales. Los sistemas en 440/254 V también están incluidos. La figura 1.6 muestra este sistema (Sección 250-20 (b) (2)).



SECCION 250-20 (b) (2)+

Figura 1.6
Sistemas de 50 a 1000 volts, 2ª situación

- III. La tercera situación establece que los sistemas trifásicos en configuración delta a 4 hilos (3f-4H), en los cuales el punto medio de una fase de la delta sea utilizado como conductor para un circuito, deben ser aterrizados en este punto medio. Estos sistemas encuentran aplicación ante la necesidad de tener circuitos de potencia y de alumbrado. Los sistemas más comunes para ésta configuración son: 240/120 V y 220/110 V como puede verse en la figura 1.7 (Sección 250-20 (b) (3)).



SECCION 250-20 (b) (3)+

Figura 1.7
Sistemas de 50 a 1000 volts, 3ª situación

1.3.1.3. Sistemas que funcionan de 1000 volts en adelante

Dentro de éste grupo se establecen tres puntos especiales para la conexión a tierra de estos sistemas:

- (1) Deben aterrizarse los sistemas de alimentación desde 1 kV y mayores, cuando éstos alimentan a equipo móvil o portátil (Sección 250-20 (c) y 250-154).
- (2) Se permite que los sistemas de alimentación desde 1 kV y mayores, que no alimenten a equipo móvil o portátil, sean aterrizados.
- (3) Cuando los sistemas desde 1000 Volts y mayores sean instalados con el conductor neutro aterrizado, estos deben ajustarse a los requerimientos que establece el NEC (Artículo 250).

Los requisitos que establece el NEC para estos sistemas, delimitan las opciones de alimentación a los siguientes sistemas:

- i) Sistemas aterrizados con un transformador de puesta a tierra (Sección 250-182)
- ii) Sistemas con el neutro sólidamente aterrizado (Sección 250-184)
- iii) Sistemas aterrizados en el neutro a través de una impedancia (Sección 250-186).

Los sistemas anteriores se ejemplifican en la figura 1.8.

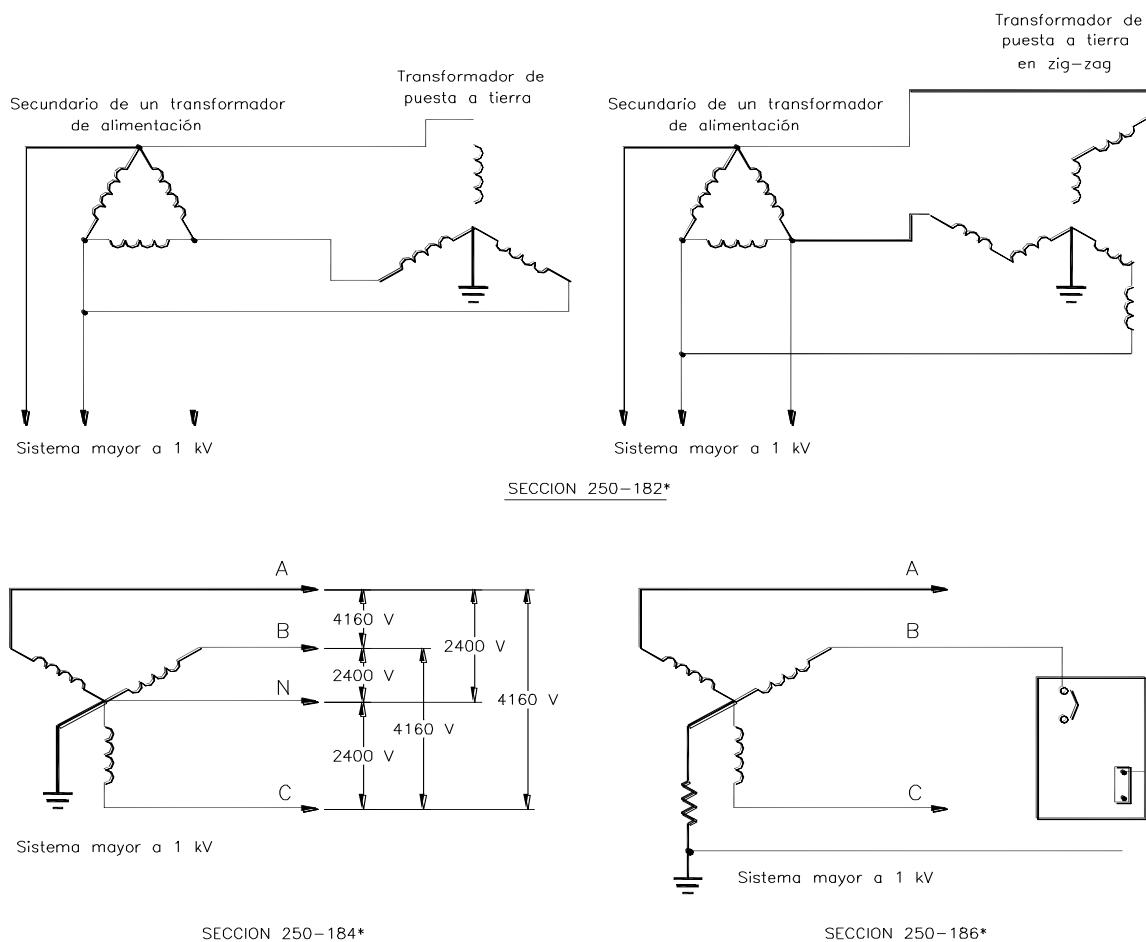


Figura 1.8
Sistemas que funcionan de 1000 Volts en adelante

1.3.1.4. Sistemas derivados separadamente

Un sistema derivado en forma separada es aquel sistema que no tiene ninguna conexión eléctrica directa incluyendo el conductor neutro, con otro sistema de alimentación. El sistema puede derivarse de una batería, un sistema fotovoltaico, un generador, un transformador, o los devanados de un convertidor. Una forma de identificar un sistema derivado en forma separada es un sistema de alimentación diferente al de la compañía suministradora.

El NEC establece que los sistemas derivados en forma separada deben ser conectados a tierra si se requiere, de acuerdo a los puntos anteriores (Sección 250-20 (d)).

1.3.2. Conexión a tierra para equipo

La conexión a tierra para equipo tiene que ver con la puesta a tierra e interconexión de las partes y estructuras metálicas a través de las cuales viajan los conductores energizados y en general todas aquellas partes metálicas no energizadas que puedan entrar en contacto con los conductores del sistema y que estén expuestos al personal.

Los propósitos principales de la conexión a tierra para equipo son las siguientes:

- (1) Mantener una diferencia de potencial baja entre las partes metálicas, para evitar el riesgo de electrocución del personal presente en el área
- (2) Proporcionar un medio conductor efectivo, por medio del cual puedan fluir las corrientes de cortocircuito producidas por una falla a tierra, sin producir chisporroteos u otra evidencia de elevación térmica, y con el fin de evitar un riesgo por incendio de material combustible o explosión de gases en atmósferas combustibles
- (3) Conducir a tierra corrientes estáticas o de fuga

La razón principal para la conexión a tierra para equipo es evitar que cualquier objeto metálico llegue a estar energizado, ya que esto representa riesgos de electrocución a las personas. De manera más específica, si un conductor no aterrizado del sistema entra en contacto con cualquier parte metálica, dicha parte metálica se elevará al potencial con respecto a tierra del conductor no aterrizado.

La figura 1.9 muestra esta elevación de potencial entre un chasis metálico y tierra, cualquier persona que tenga contacto con la canalización estará expuesta al mismo riesgo que si tocara el mismo conductor energizado.

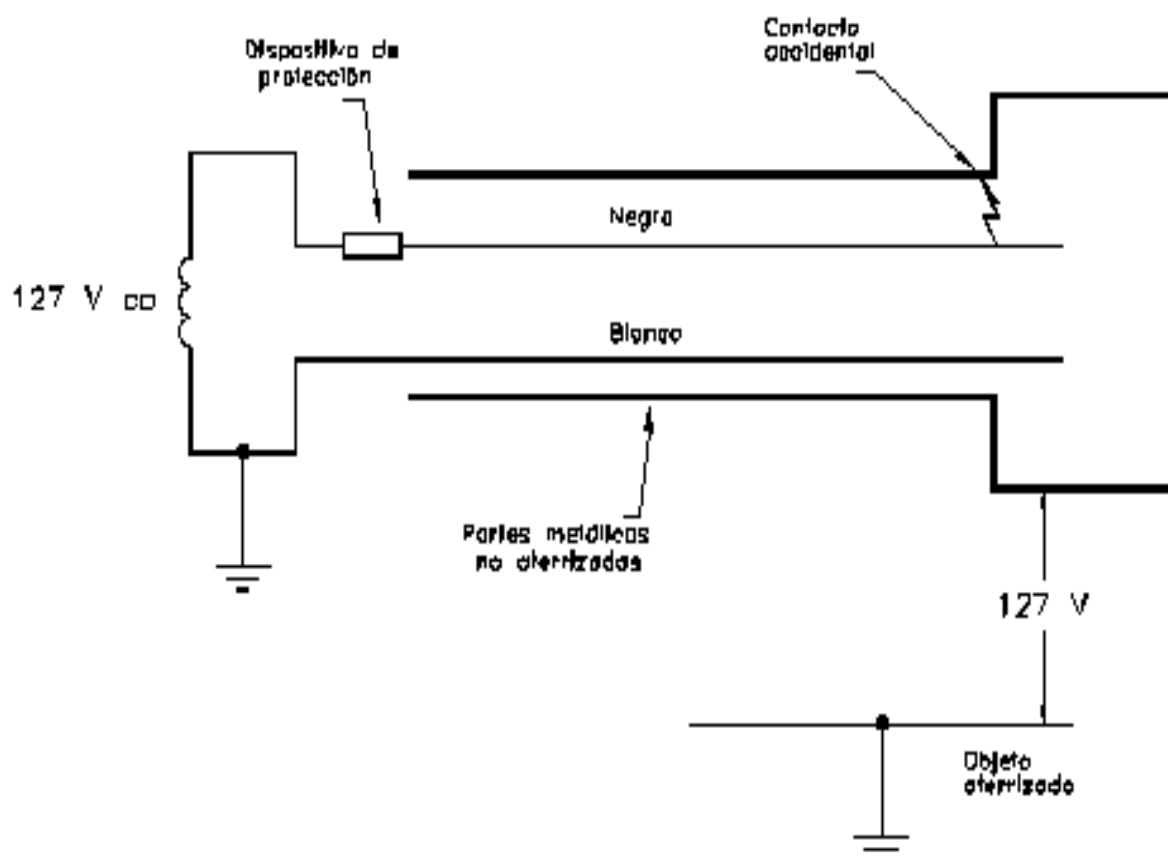


Figura 1.9
Elevación de potencial de partes metálicas no aterrizadas

A menos que todas las partes metálicas conductoras en una instalación hayan sido conectadas a tierra intencionalmente en una manera apropiada, la ocurrencia de una falla de aislamiento en los conductores puede provocar la aparición de un voltaje de magnitud suficiente que represente un riesgo de electrocución a cualquier persona que las toque.

Al conectar a tierra todas las partes metálicas, cualquier contacto accidental de un conductor no aterrizado con éstas partes metálicas, será equivalente a un cortocircuito entre el conductor no aterrizado y el conductor aterrizado del sistema. Esto ocasionará que actúe el dispositivo de protección del circuito que contiene la falla, evitando que las partes metálicas queden energizadas, es decir, al potencial del conductor no aterrizado.

La figura 1.10 muestra la trayectoria para el flujo de corriente debido al contacto accidental de un conductor no aterrizado. Dicha trayectoria puede ser la canalización misma conectada a tierra en la fuente de alimentación, acometida, etc., o puede ser un conductor especial para esa función (el conductor de color verde según el NEC), que se origine en el punto de conexión a tierra del tablero o fuente de alimentación y que acompañe a los circuitos de alimentación. Lo anterior está establecido en la sección 250-118 del NEC.

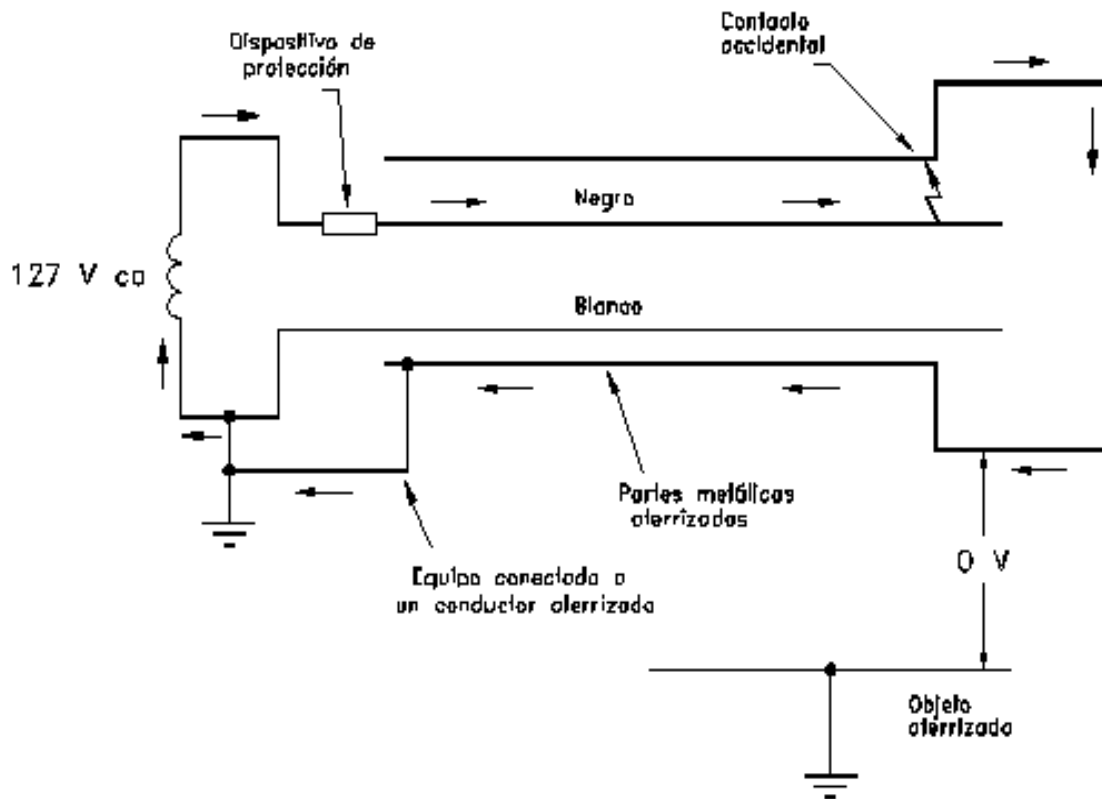


Figura 1.10
Trayectoria a tierra para las corrientes de falla

Debe notarse que la corriente realmente no fluye a “tierra”, si no fluye hacia la fuente de alimentación a través del contacto accidental y hacia el punto común de conexión a tierra del sistema y del equipo, de tal manera que se completa el circuito de regreso a la fuente.

Esta corriente se define como “corriente de falla”, puesto que solo fluye si existe una falla en el circuito. Es muy importante asegurar que la trayectoria de puesta a tierra para equipo tenga una baja impedancia a lo largo del circuito, esto permitirá que los dispositivos de protección abran el circuito.

1.3.2.1. Consideraciones que permiten no aterrizar los equipos

De acuerdo con la sección 250-110 del NEC todas las partes metálicas asociadas con los sistemas eléctricos deben ser aterrizadas. La única excepción a esta regla es que los equipos cumplan con uno o más de los siguientes requisitos:

1. Estén doblemente aislados
2. Estén resguardados
3. Estén físicamente aislados o apartados (del alcance del personal)

1.3.2.2. Consideraciones que obligan a aterrizar los equipos

Para los equipos que si deben ser aterrizados el NEC establece una clasificación de los equipos, tal clasificación es la siguiente:

- a) Equipo fijo o conectado por medio de cableado permanente
- b) Equipo conectado por medio de cordón y clavija
- c) Equipo no eléctrico

De acuerdo con la sección 250-110 del NEC, los equipos fijos deben ser aterrizados si cumplen con cualquiera de las condiciones siguientes:

- 1) Si están dentro de una distancia vertical de 2.44 m (8 ft) o a una distancia horizontal de 1.53 m (5 ft) con respecto a tierra o de cualquier objeto aterrizado y que se encuentre expuesta al contacto con las personas
- 2) Si están en lugares húmedos o mojados
- 3) Si están en contacto eléctrico con algún objeto metálico
- 4) Si están en lugares o áreas clasificadas como peligrosas
- 5) Si están alimentados por medio de una canalización metálica
- 6) Si el equipo tiene una de sus terminales a más de 150 V con respecto a tierra

1.3.2.3. Características de la trayectoria a tierra

Como se menciona anteriormente, es importante que la trayectoria de puesta a tierra de los equipos cumpla ciertas características que aseguren el cumplimiento de los objetivos establecidos. De acuerdo a la sección 250-2 (d) del NEC, la trayectoria de conexión a tierra debe ser:

1. Continua. La trayectoria debe ser permanente y eléctricamente continua, lo cual generalmente depende de las conexiones mecánicas.
2. Baja impedancia. Debe mantener la oposición al flujo de corriente lo más bajo posible, lo cual depende del conductor que se utilice, de las conexiones y de la configuración en la que se disponga el conductor de puesta a tierra

3. Ampacidad. Debe tener suficiente capacidad de conducción de corriente para conducir de manera segura la corriente de falla que el equipo pueda demandar.
4. El terreno natural no deberá ser utilizado como el único medio conductor de puesta a tierra para equipo.

Para que la trayectoria a tierra cumpla específicamente con el punto 2, es decir, para lograr una baja impedancia, el conductor de puesta a tierra dedicado (esto es, un conductor diferente a la canalización metálica) debe estar contenido dentro de la misma canalización, cable o cordón, o tenderse con los conductores del circuito.

La importancia de disponer un conductor de puesta a tierra para equipo, físicamente cercano a los conductores de alimentación de un circuito de CA, es esencial para asegurar una impedancia mínima en las trayectorias de puesta a tierra, lo cual a su vez facilita la remoción de las fallas.

Bajo tales condiciones, el voltaje a tierra es mínimo y la corriente de falla es la máxima posible debido a la baja impedancia, por lo cual el dispositivo de sobrecorriente del circuito operará efectivamente y en un menor tiempo.

I.3.3. Conexión a tierra para equipo electrónico

1.3.3.1. Introducción

La conexión a tierra es esencial para proteger contra la posibilidad de electrocución eléctrica del personal, y además es un elemento vital en la protección contra descargas atmosféricas. Su papel de protección de los equipos y sistemas contra el “ruido” eléctrico o Interferencia Electromagnética, no es analizado adecuadamente en la generalidad de las situaciones.

Históricamente computadores y otros equipos sensibles, han requerido de sus fabricantes de un “sistema de tierra aislado”, separado del sistema de tierra de potencia. Esto con el propósito de aislar a estos equipos del “ruido del sistema de tierra” de los equipos eléctricos de potencia. Lo cierto es que el sistema de tierra de potencia es ruidoso.

En todo sistema eléctrico-electrónico sobre todo los que dominan la generación actual (telecomunicaciones, informática, control de procesos, microprocesadores, robótica, etc.) operan a voltajes muy bajos y en altas frecuencias, una pequeña diferencia de potencial entre sus partes o componentes puede causar serios problemas.

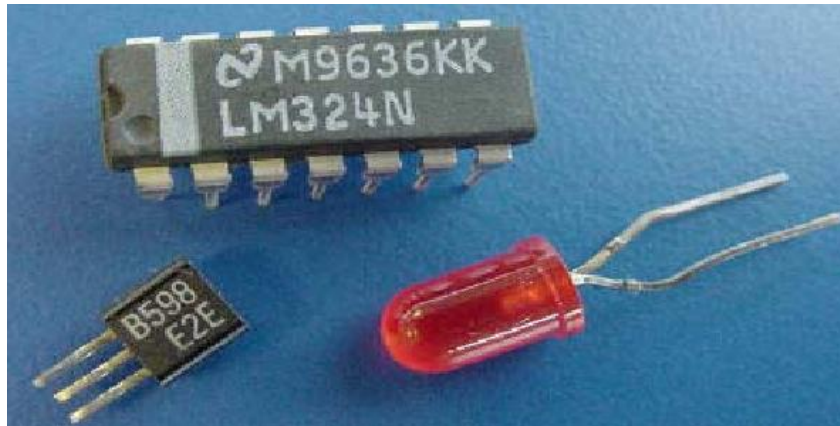


Figura 1.11
Material electrónico

1.3.3.2. Interferencia

Interferencia es cualquier perturbación eléctrica o electromagnética extraña que (1) tiende a alterar la recepción de las señales deseadas o (2) produce respuestas indeseables en un circuito o sistema.

Los circuitos electrónicos que funcionan a alta frecuencia, generalmente requieren de una referencia común para señal, a la cual pueda ser conectado el conjunto de componentes, circuitos y redes relacionadas. En forma ideal, ésta conexión común de referencia ofrece una trayectoria de cero impedancia para todas las señales a las cuales sirve como referencia. Estas corrientes deben regresar a sus respectivas fuentes sin crear un acoplamiento no deseado con otro circuito. Desafortunadamente los circuitos de conexión a tierra no son ideales, y por lo tanto, no proporcionan trayectorias de cero impedancia para las corrientes que circulan por ellas.

Debido a esto, cuando en un sistema se comparten trayectorias de retorno para varias señales se producen problemas de interferencia.

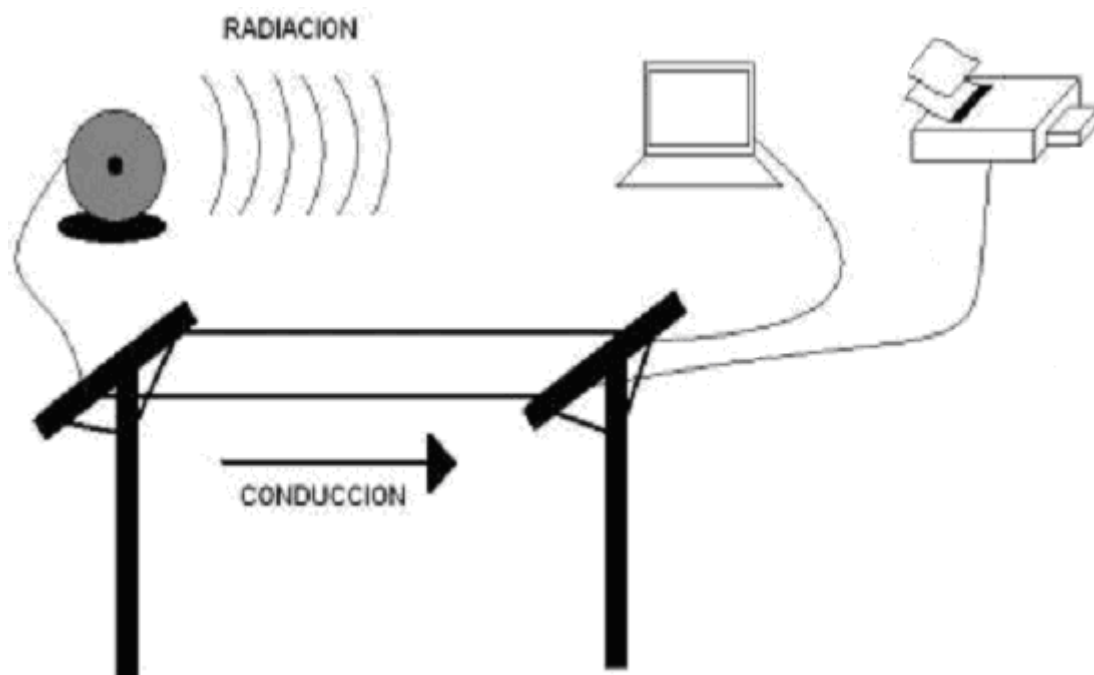


Figura 1.12
Interferencias

Un análisis de lo anterior conduce a establecer los tres elementos básicos que hacen posible los problemas de interferencia:

- 1) Una fuente de perturbación o ruido
- 2) Una forma de acoplamiento
- 3) Un circuito sensible al ruido

Los problemas de interferencia pueden entonces ser eliminados, modificando cualquiera de estos tres elementos. Esto es, si existe un problema de interferencia en una instalación, en el que intervenga el sistema de conexión a tierra, se puede corregir suprimiendo:

1) La interferencia desde la fuente, 2) evitando que entre al sistema (evitando el acoplamiento), o 3) disminuyendo la sensibilidad del equipo.

Para entender los problemas de ruido se debe partir de la idea de que no existe ruido interno en el equipo antes de que cualquier cable externo se conecte a este. Por lo tanto el ruido eléctrico es un problema que tiene que ver con las interacciones del equipo con sistemas externos, de aquí que se deba poner un especial énfasis en las conexiones e interconexiones de los equipos, especialmente en la presencia o formación de trayectorias comunes y el sistema de conexión a tierra.

1.3.3.3. Formas de ruido

1) Ruido en modo normal

El ruido en modo normal es el ruido eléctrico que aparece en la forma de señales de voltaje entre una línea y otra y entre cualquier línea y neutro. Esta condición provoca la circulación de corrientes entre dos conductores cualesquiera que pueden estar o no aterrizados. El ruido en modo normal se le conoce también como ruido en modo diferencial. La figura 1.13 muestra la medición del ruido en modo normal en un circuito aterrizado.

2) Ruido en modo común

El ruido en modo común es el ruido eléctrico que ocurre sobre todos los conductores de un circuito eléctrico en el mismo instante. Esto es, una señal de voltaje presente entre el punto de referencia a tierra local y cada uno de los conductores de alimentación incluyendo el neutro. El ruido en modo común ocasiona que fluya una corriente simultáneamente en todos los conductores de un circuito, utilizando generalmente el sistema de conexión a tierra como trayectoria de retorno para cerrar el circuito. Una manera efectiva de medir la magnitud del ruido en modo común es colocar las terminales de un instrumento de medición (osciloscopio) o el conductor neutro y la envolvente metálica de un tablero de distribución o de un equipo sensible aterrizado.

La figura 1.13 muestra un circuito donde se presenta una señal de ruido en modo común. De acuerdo al NEC las partes metálicas no energizadas son aterrizadas por cuestiones de seguridad, utilizando un conductor de puesta a tierra para equipo. Sin embargo, éste conductor crea una trayectoria para las corrientes de ruido en modo común formando un circuito que empieza como el que se muestra en la figura 1.13. Cualquier flujo de corriente a través de este circuito puede ocasionar ruido en los conductores de señal de los equipos sensibles, por medio de acoplamiento electromagnético o por conexión directa (acoplamiento de impedancia común) y capacitancias parásitas distribuidas.

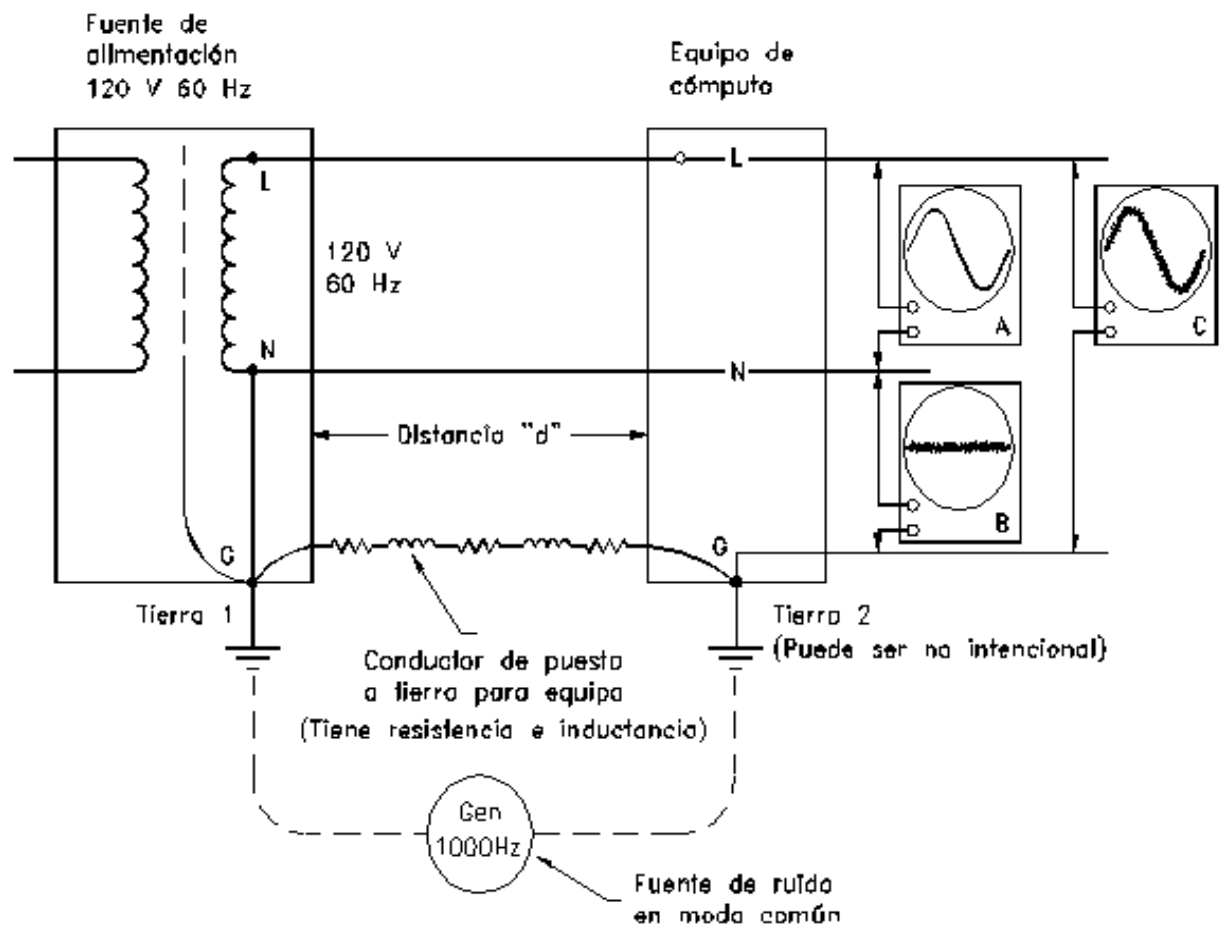


Figura 1.13
Formas de ruido

Las formas más eficientes de reducir el ruido en modo común, y que involucran a los sistemas de conexión a tierra, son las siguientes:

- 1) Desconectar una de las conexiones a tierra (El NEC, por cuestiones de seguridad, impide desconectar la conexión G1)
- 2) Disminuir la impedancia del conductor de puesta a tierra del equipo, por medio de
 - a) Acortar la distancia "d"
 - b) Utilizar conductores de corta longitud

1.3.3.4. Diferentes esquemas y disposiciones de conexión a tierra

Existen cuatro esquemas de aterrizado de equipos electrónicos. Estos son:

- a) Esquema convencional.
- b) Esquema de tierra aislada.
- c) Esquema de tierra aislada total.
- d) Esquema de malla de referencia.

a) Esquema convencional.

Este esquema encuentra su uso en las instalaciones de PC's y de PLC's, donde sus alambrados están distribuidos en áreas muy pequeñas.

No es recomendado para muchas instalaciones de sistemas electrónicos distribuidos, porque:

- a) Puede resultar excesivamente ruidoso el sistema de tierra.
- b) Los transitorios pueden sobrepasar el nivel de aislamiento.
- c) No es compatible con las recomendaciones de la mayoría de los fabricantes de equipos electrónicos.
- d) No puede ser fácilmente realambrado para cumplir con esquemas de aterrizado de redes de cómputo.
- e) El alambrado puede ser obsoleto cuando se cambien las tarjetas y equipos por otros de una tecnología de mayor velocidad.

b) Esquema de tierra aislada.

Este esquema es el más socorrido en la industria y por la mayoría de los proveedores de equipos electrónicos.

En esta configuración se tiene una tierra relativamente libre de ruido e interferencia para la referencia lógica de los aparatos y, es complementada con la tierra de seguridad convencional del sistema de tierras de potencia. Pero, tiene las siguientes limitaciones:

a) En altas frecuencias, la impedancia del conductor de tierra es demasiado alta para servir de buena conexión.

b) El acoplamiento de las tierras dentro de los aparatos puede causar lazos de corriente, resultando en ruidos electrónicos.

Un arreglo de este esquema es hacer un anillo de tierras alrededor de los pisos de un edificio o un cuarto de cómputo. Y de este anillo se hacen varias conexiones al sistema perimetral de tierras, siempre que tengan las mismas longitudes y estén acomodadas simétricamente. Y a este sistema interno se conectan los equipos.

c) Esquema de tierra aislada total.

Este esquema consiste en conectar todos los aparatos e instrumentos a tierra usando una configuración de estrella a partir de un solo punto físico, el cual es un cabezal o placa de conexión (existen fabricantes de ellas), el o la cual a su vez está conectada mediante un conductor apropiado a la red general de tierra.

Sin embargo, también tiene sus limitaciones:

a) Esta configuración puede ser difícil de crear en un ambiente industrial.

b) Todos los equipos cercanos deben conectarse de esta manera a tierra o, se pueden tener lazos de corrientes.

c) Puede tener una impedancia en alta frecuencia muy alta, que en términos prácticos, la puesta a tierra sea ineficaz.

Este problema es posible que no se tenga en la mayoría de equipos industriales, porque no emplean muy altas frecuencias

d) Esquema de malla de referencia.

Observar que adicionalmente a la estrella mencionada en el punto anterior, los equipos y partes metálicas estructurales se conectan a este tipo de piso mediante trencillas, y que al ofrecer un plano de referencia de tierra, baja la impedancia a tierra en todas las frecuencias.

Sus limitantes son:

a) Muchos fabricantes de equipos electrónicos industriales no están de acuerdo con su empleo.

b) En ambientes industriales, es difícil su implementación.

No importa cuál de los tres últimos métodos se emplee, la trayectoria es crucial. No coloque puentes de unión a través de otro equipo. Siempre conecte a tierra cada aparato por separado.

El aterrizado de blindajes y el de cables de señal deben ser parte integral del diseño de sistemas de tierras.

1.3.4. Conexión a tierra para protección atmosférica

1.3.4.1. Principios fundamentales de protección contra descargas atmosféricas

El principio fundamental en la protección de la vida y la propiedad contra el fenómeno atmosférico es proporcionar un medio por el cual una descarga atmosférica pueda entrar o salir de tierra sin ocasionar daños o pérdidas materiales. Para lograr esto debe proporcionarse una trayectoria de baja impedancia a tierra por medio de la cual la corriente de descarga sea conducida de manera preferente a todas las trayectorias de alta impedancia alternas ofrecidas por los materiales de un edificio, tales como madera, ladrillo, teja, roca, o concreto.

Cuando la descarga sigue las trayectorias de alta impedancia pueden ocurrir daños debido al calor y a las fuerzas mecánicas generadas durante el paso de la descarga. La mayoría de los metales, que son buenos conductores eléctricos, no se ven afectados por el calor o las fuerzas mecánicas si tienen el tamaño suficiente para conducir la corriente esperada. La trayectoria metálica debe ser continua desde el electrodo de tierra (terminal de tierra) hasta la punta pararrayo (figura 1.14).

Debe ponerse especial cuidado en la selección de los conductores metálicos para asegurar la integridad de éstos por un periodo largo contra los efectos de oxidación o corrosión.



Figura 1.14
Pararrayos

1.3.4.2. Sistemas de protección contra descargas atmosféricas

Los sistemas de protección contra descargas consisten de tres partes básicas que proporcionan la trayectoria metálica de baja impedancia para conducir las corrientes producidas por las descargas:

- (a) Un sistema de terminales aéreas (puntas pararrayo) colocadas sobre los techos u otras localidades elevadas (protección externa).

- (b) Un sistema de terminales de tierra (electrodos de tierra)

- (c) Un sistema de conductores que conectan las terminales aéreas a las terminales de tierra.
- (d) Un sistema de supresión contra picos de tensión (también conocido como protección interna).

Localizados e instalados adecuadamente, estos componentes básicos aseguran que las descargas atmosféricas sean conducidas sin ocasionar daños desde las terminales aéreas hasta las terminales de tierra.

Sin embargo, al interceptar, conducir y disipar la descarga principal, los tres componentes básicos del sistema de protección pueden ser insuficientes para prevenir los posibles efectos secundarios que se producen al ocurrir una descarga atmosférica. Por lo tanto, deben proporcionarse conductores secundarios para interconectar los cuerpos metálicos y asegurar que éstos se mantengan al mismo potencial, evitando que ocurran arcos o desviaciones de la corriente de la descarga.

1.3.4.3. Características de los sistemas de protección

1.3.4.3.1. Terminales aéreas

Todas las partes aéreas que puedan recibir una descarga atmosférica deben considerar la instalación de terminales aéreas (figura 1.15), la estructura a proteger debe examinarse para determinar la posición y separación de las mismas.

El objetivo de las terminales es interceptar la descarga por encima de las partes que tengan probabilidad de recibir una descarga y proporcionar una trayectoria directa a tierra para la corriente de la descarga.

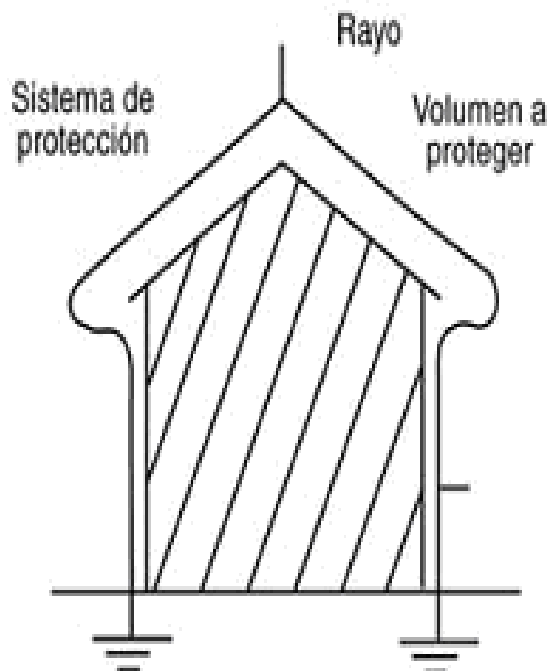


Figura 1.15
Terminal aérea

Las terminales aéreas deben ser colocadas suficientemente alto por encima de la estructura para evitar un posible daño provocado por un arco eléctrico. La recomendación del NFPA-780 (Sección 3-9.1) establece que la longitud de una terminal aérea que sobresale por encima del objeto o área que va a ser protegida, no debe ser menor a 25.4 cm (10 in). También permite el uso de terminales aéreas con puntas de 60 cm por encima del área a proteger (Sección 3-11).

La separación de las terminales aéreas para edificios está determinada por la geometría de la estructura o techo donde serán colocadas las terminales, así como de la zona de protección que proporcionan. Es importante destacar que mientras mayor sea la altura a la que se coloquen las terminales, mayor es la zona de protección en dirección horizontal.

1.3.4.3.2. Sistemas de conductores

La trayectoria más directa es la mejor, por lo tanto, es recomendable que no se formen curvaturas pronunciadas o lazos estrechos. El NFPA recomienda que las curvaturas no formen ángulos mayores a 90 grados ni radios de curvatura menores a 20.3 cm (8 in).

Por otro lado, también establece que los conductores que interconectan las terminales aéreas deberán formar una doble trayectoria desde las terminales aéreas a las terminales de tierra, con trayectorias en forma horizontal, vertical o con elevación a una razón no mayor a 7.62 cm por cada 30.48 cm (3 in per ft), según lo permita la estructura donde serán colocados dichos conductores. Ver figura 1.16.

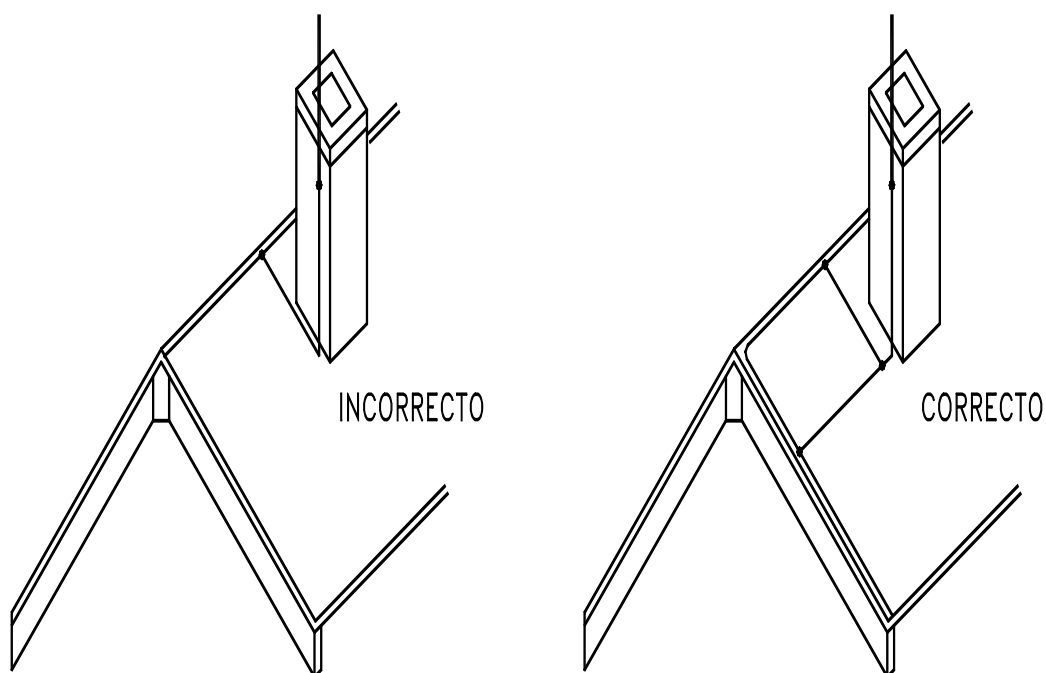


Figura 1.16
Doble trayectoria para conductores en elevación

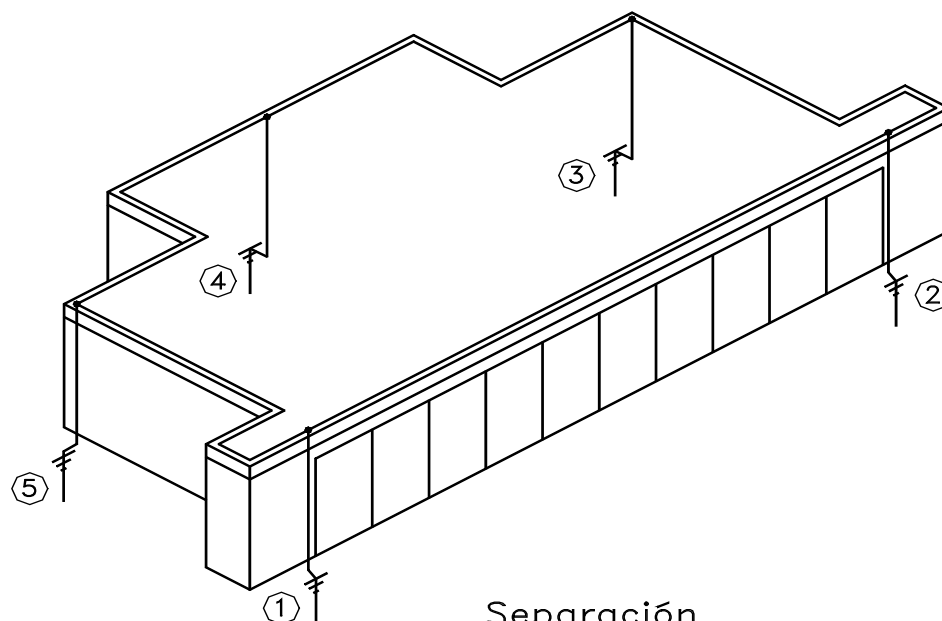
La razón para utilizar varios conductores es que la impedancia del sistema de conductores es inversamente proporcional al número de trayectorias a tierra separadas ampliamente.

Por consiguiente, deberán existir al menos dos trayectorias a tierra para cada terminal aérea para cualquier tipo de estructura en general.

La localización de tales trayectorias estará determinada por la ubicación de las terminales aéreas, los caminos más directos a tierra, las condiciones del terreno y la existencia de tuberías metálicas subterráneas.

Para estructuras con un perímetro mayor a 76 m (250 ft) deberá agregarse un conductor de bajada adicional por cada 30 m (100 ft).

La figura 1.17 ilustra esto.



Separación

1-2	40 m
2-3	26 m
3-4	26 m
4-5	26 m
5-1	26 m

Perímetro total: 144 m

Trayectorias requeridas: 5

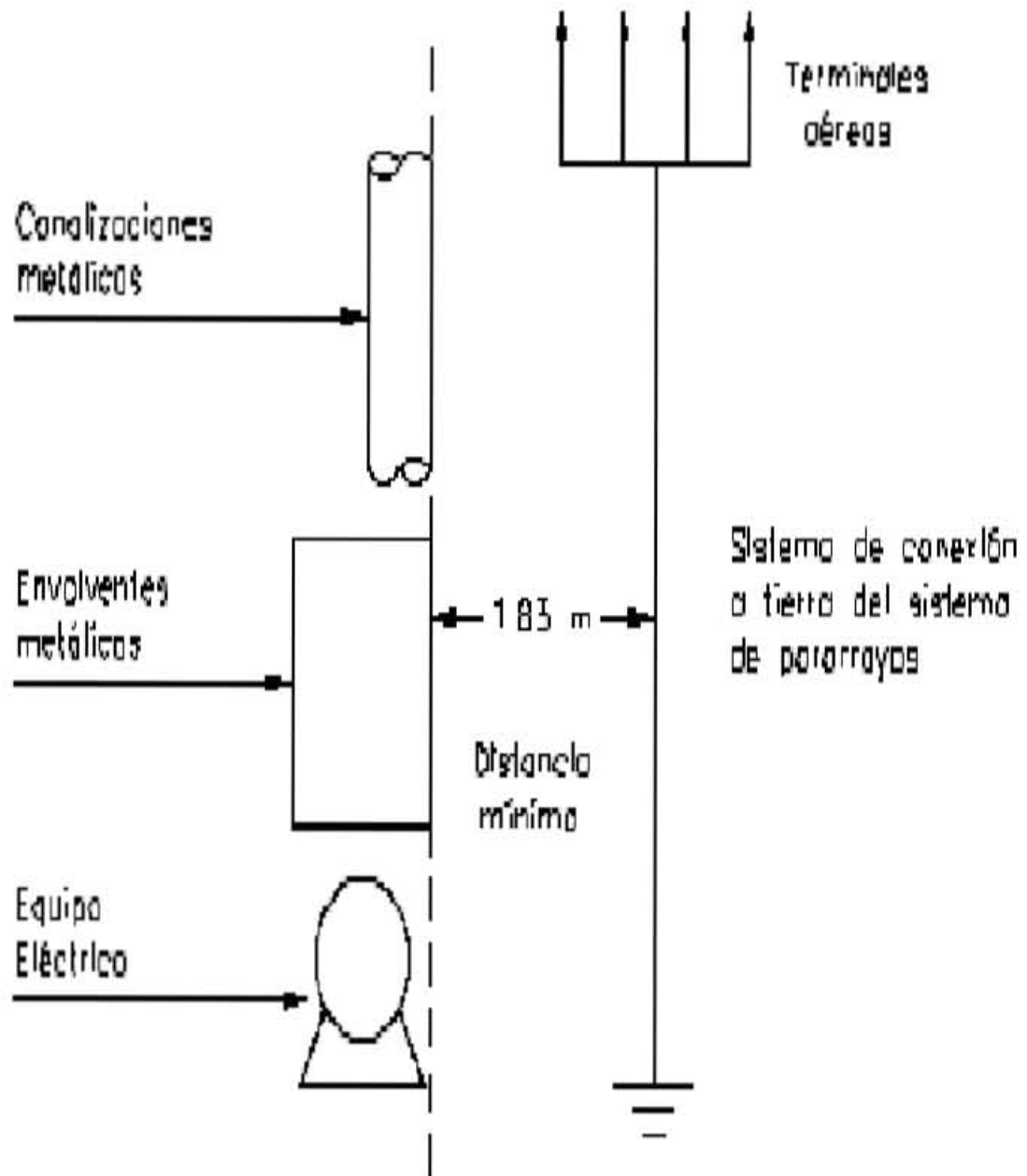
Figura 1.17
Número de conductores de bajada a tierra

Cuando las trayectorias a tierra se instalen en edificios de gran altura, deberá realizarse la interconexión de cada uno de los conductores a tierra en forma de un lazo horizontal, aproximadamente a cada 18 m (60 ft), con la intención de formar un plano equipotencial.

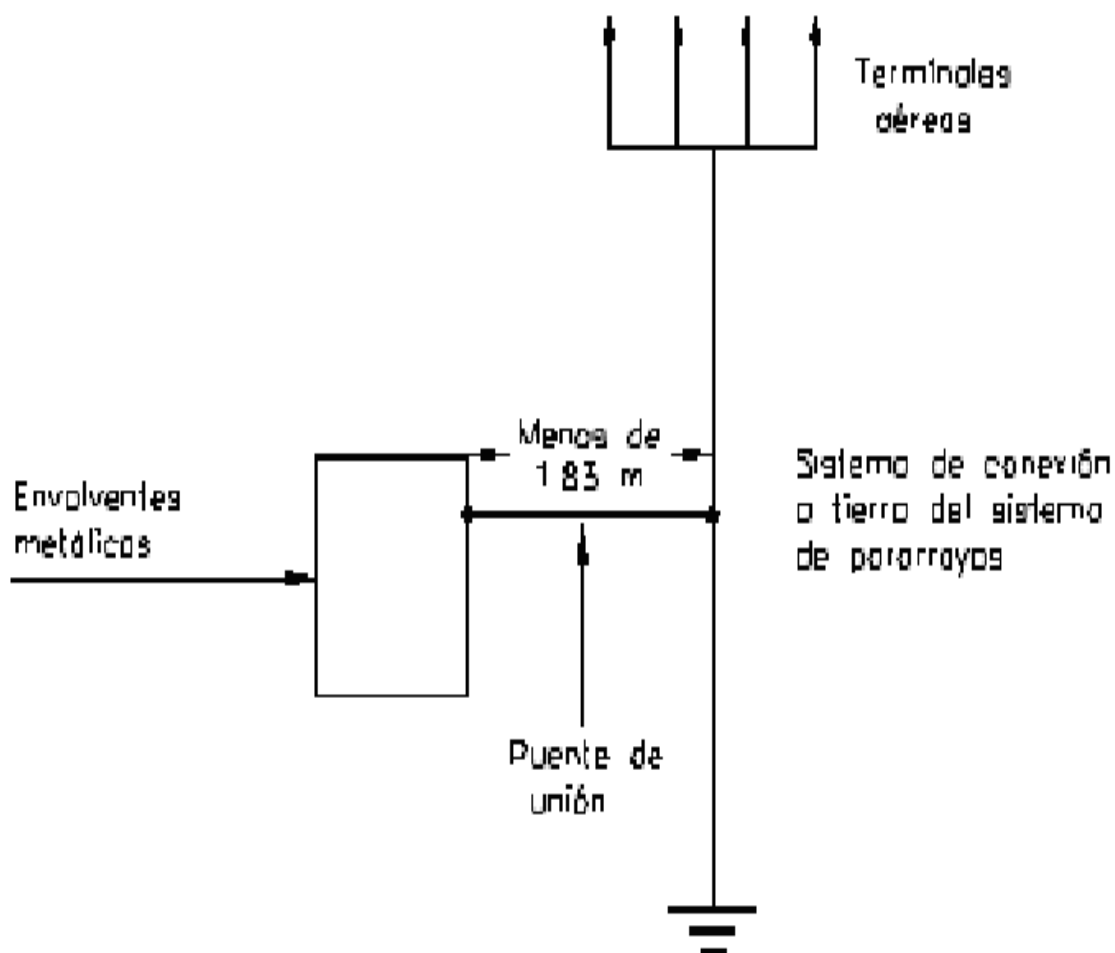
El problema principal en la conexión a tierra, es la existencia de conductores cercanos a objetos metálicos de tamaño considerable (tan sólo a unos pocos centímetros de distancia). Esta situación provocará una tendencia a producir arcos o desviaciones de corriente entre el objeto metálico y algún conductor.

Para evitar esto, se deben disponer conductores de interconexión en todos los lugares donde exista posibilidad de que estos efectos ocurran. Lo anterior hace necesaria la aplicación de los puentes de unión ("bonding").

La sección 250-106 del NEC establece que los conductores de puesta a tierra de pararrayos y las partes metálicas no energizadas cercanas a éstos, deberán unirse eléctricamente cuando exista una distancia menor a 1.83 m (6 ft) si el medio interpuesto es aire (figura 1.18), y 0.92 m (3 ft) cuando sea a través de materiales densos.



- a) Distancia mínima de separación entre conductores de pararrayos y partes metálicas no energizadas



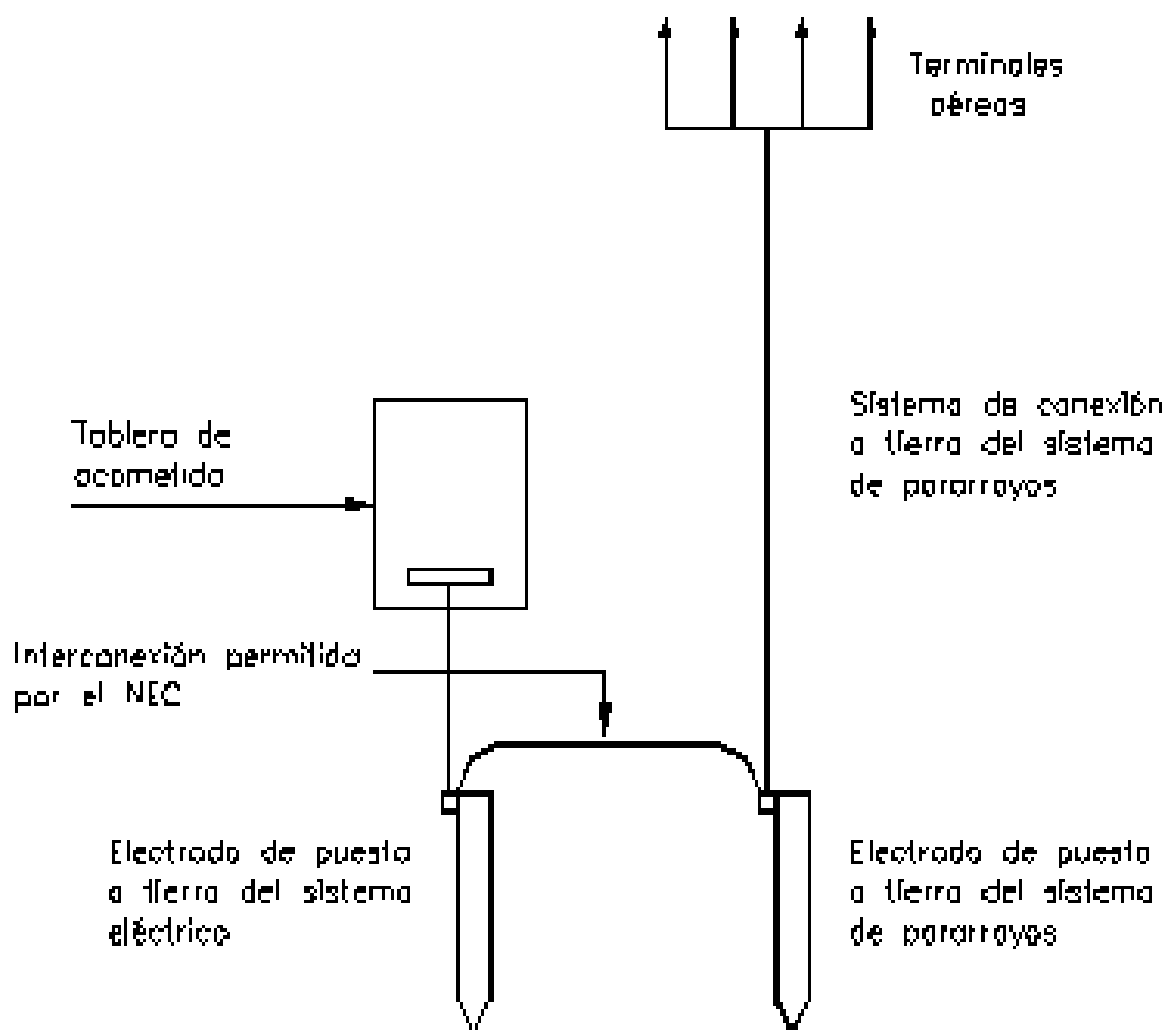
b) Conexión a través de un puente de unión si la distancia

Figura 1.18
Separación mínima de los conductores de bajada de pararrayos

1.3.4.3.3. Terminales de tierra

Uno de los problemas principales en los sistemas de conexión a tierra es la utilización de el(los) electrodo(s) del sistema de pararrayos para la puesta a tierra del sistema eléctrico y de las partes metálicas no energizadas de los equipos y la instalación. La sección 250-60 del NEC establece que el electrodo de tierra del sistema de pararrayos no debe utilizarse para conectar a tierra los sistemas y equipos eléctricos.

Este esquema se muestra en la figura 1.19. Sin embargo, el electrodo de puesta a tierra de los pararrayos, el de puesta a tierra del sistema eléctrico y otros sistemas de electrodos deben interconectarse para evitar diferencias de potencial entre éstos y los sistemas eléctricos asociados, o entre las partes metálicas de equipos aterrizados por diferentes electrodos.



La interconexión de electrodos separados
limita las diferencias de potencial entre estos

Figura 1.19
Interconexión de electrodos de pararrayos y otros sistemas de electrodos

Las dimensiones mínimas para las varillas de tierra, establecidas en el NFPA-780, no deberán ser menores a 12.7 mm (1/2 in) de diámetro y 2.4 m (8 ft) de longitud. Sin embargo, la forma y extensión de las terminales de tierra están determinadas por las características del terreno.

Al respecto, el NFPA-780 (Sección 3-16.1) proporciona una clasificación general (en orden creciente con respecto a la resistividad) como se resume a continuación:

- Suelos de arcillas húmedas
- Suelos Arenosos o con Grava
- Suelos rocosos con capas superficiales
- Suelos con capas menores a 0.3 m (1 ft) de profundidad

Los terrenos de baja resistividad requieren de una o más varillas que se extiendan a un mínimo de 3 m (10 ft) de profundidad y con un distanciamiento entre ellas igual a su longitud, generalmente de 3 m. La figura 1.20 muestra las características que se deben cumplir para estos electrodos de tierra.

Los terrenos de alta resistividad y que presentan dificultad para hacer excavaciones, sólo permiten tender conductores horizontales dentro de trincheras que se extiendan lejos del edificio donde se localiza el sistema de protección.

Las dimensiones de las trincheras varían según la resistividad de la capa superficial del suelo: para capas de suelo arcilloso las dimensiones de la trinchera deberán ser de al menos 3.7 m (12 ft) de longitud y entre 0.3 y 0.6 m (1 ft a 2 ft) de profundidad; para capas de suelo arenoso o con grava, la longitud de la trinchera deberá ser de al menos 7.5 m (24 ft) de longitud y al menos 0.6 m (2 ft) de profundidad.

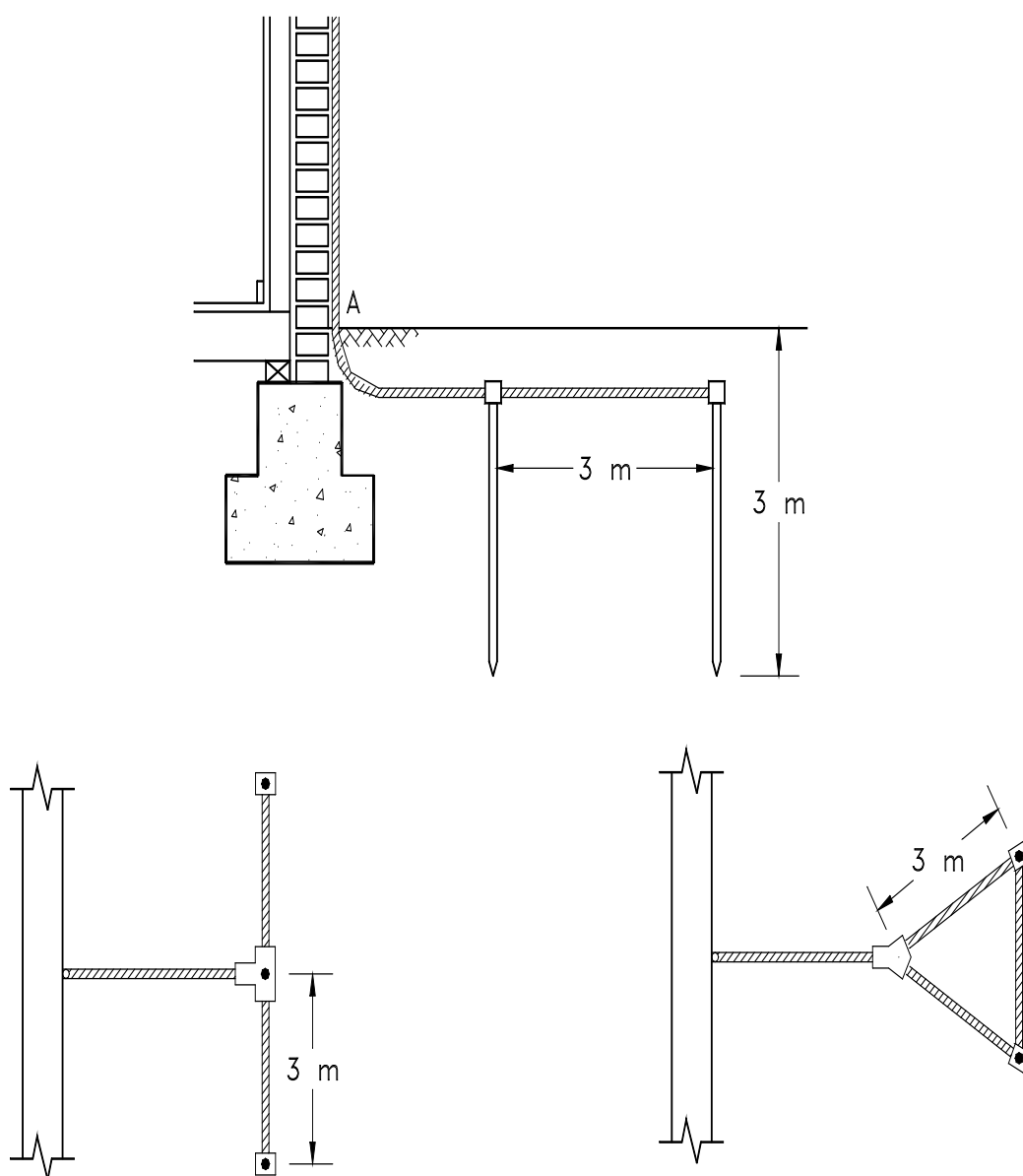


Figura 1.20
Conexión a tierra en terreno arenoso o con grava

En el último caso, es muy recomendable que los conductores que sirven como electrodo de tierra formen un lazo, instalado en una trinchera alrededor del edificio, que sirva para establecer un área de equipotencialidad y facilitar la conexión con otros sistemas de electrodos. Adicionalmente a éste esquema se pueden utilizar electrodos en forma de placa para mejorar el contacto con tierra, como se ve en la figura 1.21.

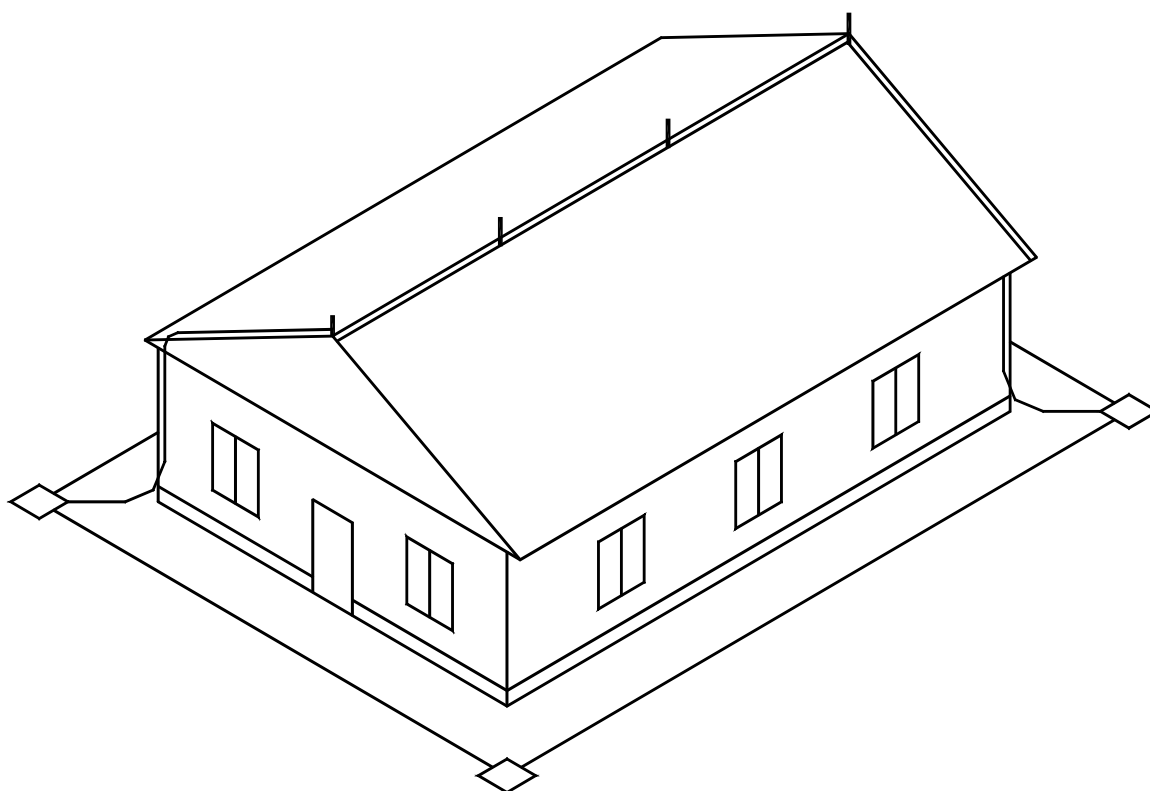


Figura 1.21
Conexión a tierra en terrenos con profundidades menores a 0.3 m

De lo anterior se puede deducir que la preocupación principal en las conexiones a tierra debe estar encaminada en proporcionar un amplio contacto con el terreno. Esto no necesariamente significa que la resistencia de conexión a tierra sea baja, sino más bien que la distribución del metal en el terreno pueda ser tal que permita la disipación efectiva de una descarga atmosférica.

Lo más importante es que la distribución de potencial cerca del edificio sea uniforme, de tal manera que el efecto de protección resultante sea igualmente aceptable para un terreno de baja resistividad como para uno de alta resistividad.

En general, el alcance de los arreglos de conexión a tierra dependerá de las características del suelo, variando desde extensiones simples de conductor cuando el terreno es profundo y de alta conductividad, hasta una red muy elaborada cuando el suelo es muy seco y de muy baja conductividad. Su alcance estará determinado grandemente por el juicio del diseñador de la instalación de acuerdo al siguiente criterio: Mientras mayor sea el alcance de metal bajo tierra, más efectivo será el sistema de protección.

1.3.4.3.4. Principios acerca de los puentes de unión (bonding)

El problema principal en la protección de un edificio es la ocurrencia de diferencias de potencial entre los conductores del sistema de protección contra descargas atmosféricas y otros cuerpos metálicos aterrizados o cables que pertenezcan al edificio. Estas diferencias de potencial son ocasionadas por efectos resistivos e inductivos, y pueden ser de tal magnitud que provoquen arcos peligrosos.

Para reducir ésta posibilidad, es necesario igualar los potenciales por medio de puentes de unión entre los cuerpos metálicos aterrizados y el sistema de protección contra descargas.

Algunas opciones para solucionar estos problemas son: 1) la localización planeada de los conductores evitando los cuerpos metálicos aterrizados o manteniendo una distancia segura, y 2) el aumento del número de conductores a tierra para reducir las distancias de unión, es decir disminuir la necesidad de utilizar los puentes de unión.

La figura 1.22 ilustra la forma en que se presentan estas diferencias de potencial.

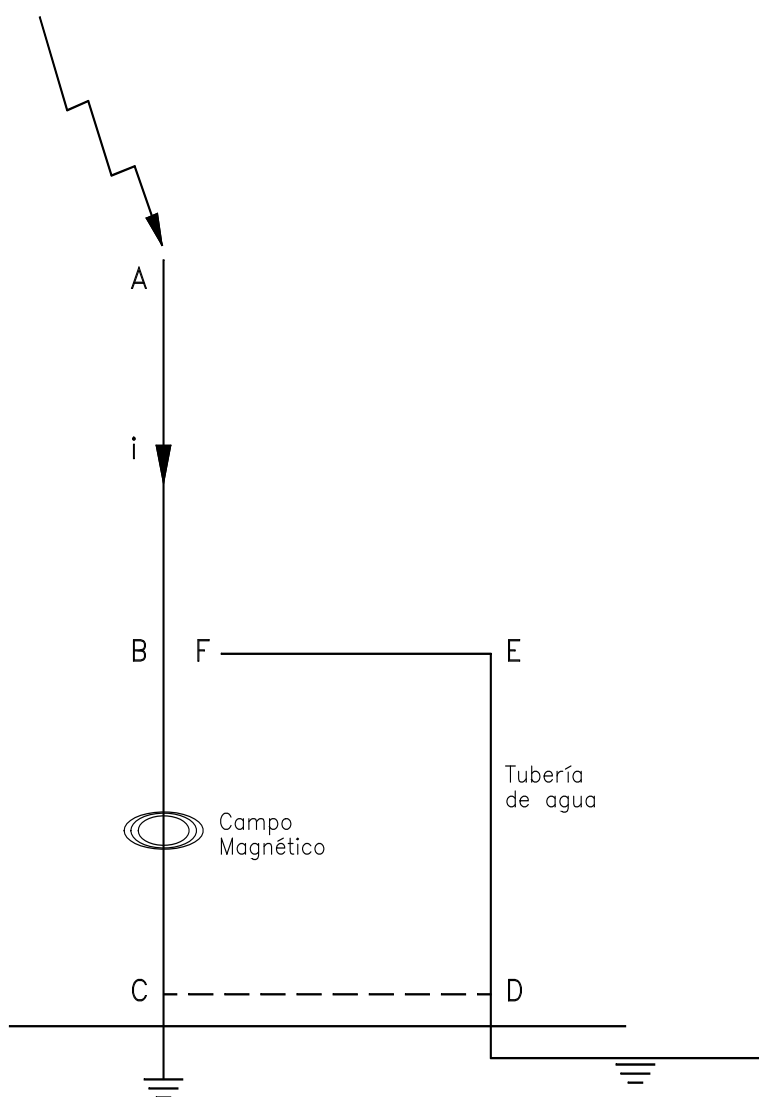


Figura 1.22
El campo magnético alrededor de un conductor

1.3.5. Conexión a tierra para subestaciones

La conexión a tierra de subestaciones (figura 1.23) es sumamente importante.

Las funciones de conectar a tierra un sistema se enumeran a continuación:

- Proporcionar la conexión a tierra para el neutro a tierra para transformadores, reactores y capacitores.
- Garantizan la seguridad del personal de operación al limitar las diferencias de potencial que puedan existir en una subestación.
- Proporcionan un medio de descargar y desenergizar equipo para efectuar trabajos de conservación en el mismo.
- Proveen una trayectoria de resistencia suficientemente baja a tierra, para reducir al mínimo una elevación del potencial a tierra con respecto a tierra remota.

Los requerimientos de seguridad de las subestaciones exigen la conexión a tierra de todas las partes metálicas de interruptores, estructuras, tanques de transformadores, calzadas metálicas, cercas, montajes de acero estructural de edificios, tableros de conmutación, etc., de manera que una persona que toque el equipo o se encuentre cerca del mismo, no pueda recibir descarga peligrosa si un conductor de alto voltaje relampaguea o entra en contacto con cualquier parte del equipo arriba enumerado.

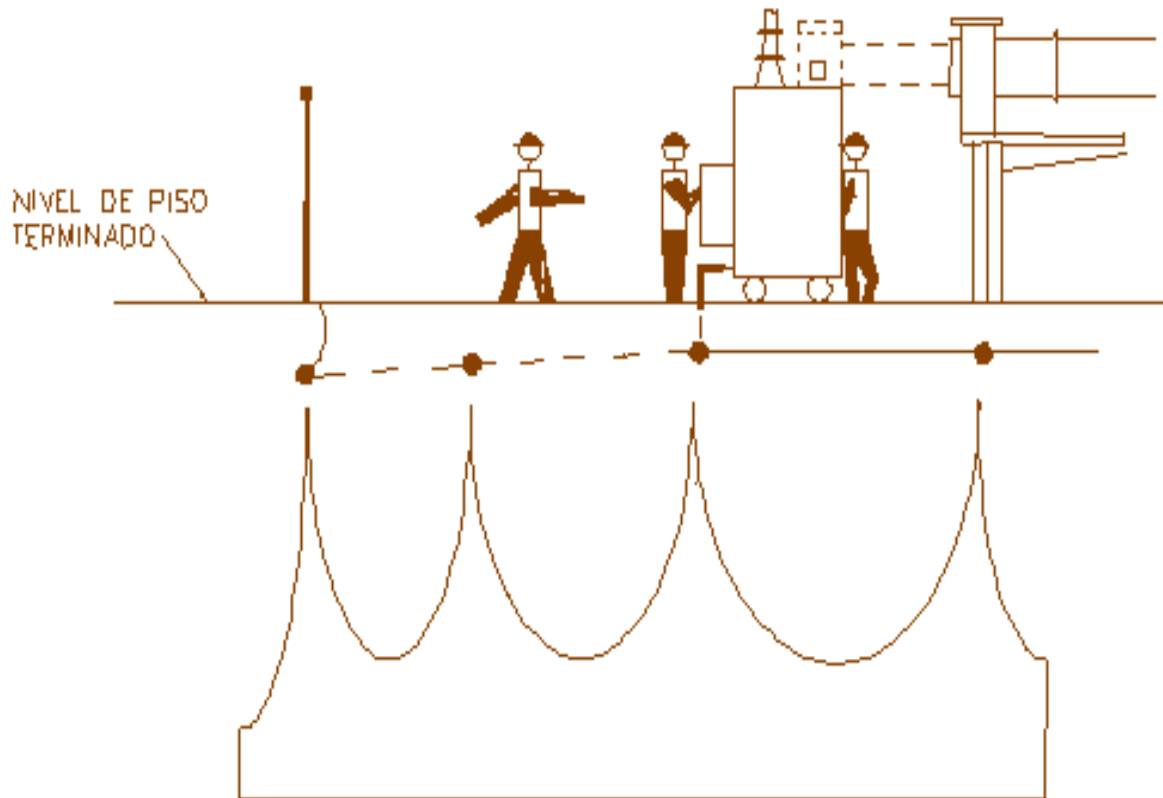


Figura 1.23
Conexión a tierra para subestaciones

En general, esta función se satisface si toda la armazón metálica con la que una persona pueda hacer contacto o que una persona pueda tocar al estar de pie en tierra, se encuentra de tal modo unida y conectada a tierra que no puedan hacer potenciales peligrosos. Esto significa que toda parte individual del equipo, toda columna estructural, etc., debe tener su propia conexión al emparrillado a tierra de la estación.

El sistema básico de tierra de subestaciones, utilizado en la mayor parte de las plantas eléctricas, toma la forma de una red de conductores enterrados horizontalmente. La razón por la que la red o emparrillado sean tan eficaces se atribuye a lo siguiente:

- En sistemas en donde la corriente máxima de tierra puede ser muy alta, raras veces es posible obtener una resistencia de tierra que sea tan baja como para garantizar que la elevación total del potencial del sistema no alcance valores inseguros para las personas. Si éste es el caso, el riesgo puede corregirse sólo mediante el control de potenciales locales. Una rejilla es por, lo general, el modo más práctico de lograr esto último.
- En las subestaciones tipo HV (alto voltaje) o EHV (extra alto voltaje), no hay un electrodo que por sí solo sea adecuado para proporcionar la necesaria conductividad y capacidad de conducción de corriente. Sin embargo, cuando varios de ellos se conecten entre sí, y a estructuras, bastidores de equipos, y neutros de circuitos que deban conectarse a tierra, el resultado es necesariamente una rejilla cualquiera que sea la meta original. Si esta red a tierra se entierra en un suelo de conductividad razonablemente buena, proporciona un excelente sistema de conexión a tierra.

El primer paso en el diseño práctico de una rejilla o emparrillado consiste en examinar el plano de recorrido del equipo y estructuras. Un cable continuo debe rodear el perímetro de la rejilla para abarcar tantas tierras como sea práctico, evitar concentración de corriente y por lo tanto gradientes elevados en puntas de cables a tierra.

Dentro de la rejilla, los cables deberán colocarse en líneas paralelas y a distancias razonablemente uniformes; cuando sea práctico, deben instalarse a lo largo de hileras de estructuras o equipo para facilitar las conexiones a tierra.

El diseño preliminar debe ajustarse de manera que la longitud total del conductor enterrado, incluso empalmes y varillas, sea por lo menos igual a la longitud requerida para mantener las diferencias de potencial locales dentro de límites aceptables.

Por lo general se utilizan cables o tiras de lámina de cobre para conexiones a tierra de bastidores de equipos. Sin embargo, los tanques de transformadores se utilizan a veces como parte de la trayectoria a tierra de pararrayos que a aquellos se conecten. Análogamente, se pueden utilizar estructuras de acero como parte de la trayectoria a tierra si se puede establecer que la conductividad.

Las conexiones entre los diversos alambres a tierra y la rejilla de cables y conexiones dentro de la rejilla de cables suelen hacerse con abrazaderas, y soldadura eléctrica. Los sistemas de conexión a tierra bien diseñados son de especial importancia para el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia y para la seguridad del personal, lo cual se ha reconocido desde la existencia de los sistemas de potencia. Desafortunadamente, los procedimientos de diseño se dificultan por un número de factores difíciles de cuantificar.

El estándar 80 del IEEE proporciona los criterios de diseño y una guía de lo que se debe considerar en el proceso de diseño de los sistemas de conexión a tierra. Además de esto, proporciona las ecuaciones de diseño aplicables a sistemas de conexión a tierra simples.

1.3.5.1. Problemas básicos de conexión a tierra para subestaciones

Los principales criterios de diseño de los sistemas de conexión a tierra son:

- a) La seguridad del personal que opera dentro y en las inmediaciones de la subestación, expresada por los voltajes de paso y de contacto permisibles.
- b) La reducción de la elevación del potencial de tierra (GPR -Ground Potential Rise- o EPR), necesaria para reducir los requisitos de protección de equipo de comunicaciones.

Los riesgos al personal son producidos principalmente por los voltajes de paso, de contacto y de transferencia durante condiciones de falla en los sistemas de potencia. Los requisitos de protección para los circuitos de comunicación dependen de la máxima elevación de potencial de tierra y de los voltajes inducidos.

En general, los sistemas de conexión a tierra deben ser diseñados para:

- 1) Limitar los voltajes de paso, de contacto y de transferencia dentro y alrededor de la subestación a valores que estén por debajo de los niveles de riesgo a los seres humanos
- 2) Limitar la elevación de potencial de la red de tierra de la subestación a un valor aceptable para cualquier condición de falla posible.

Los dos objetivos anteriores (figura 1.24) están interrelacionados, ya que los voltajes de paso, de contacto y de transferencia son proporcionales a la elevación de potencial de tierra. Las constantes de proporcionalidad dependen del diseño del sistema de conexión a tierra.

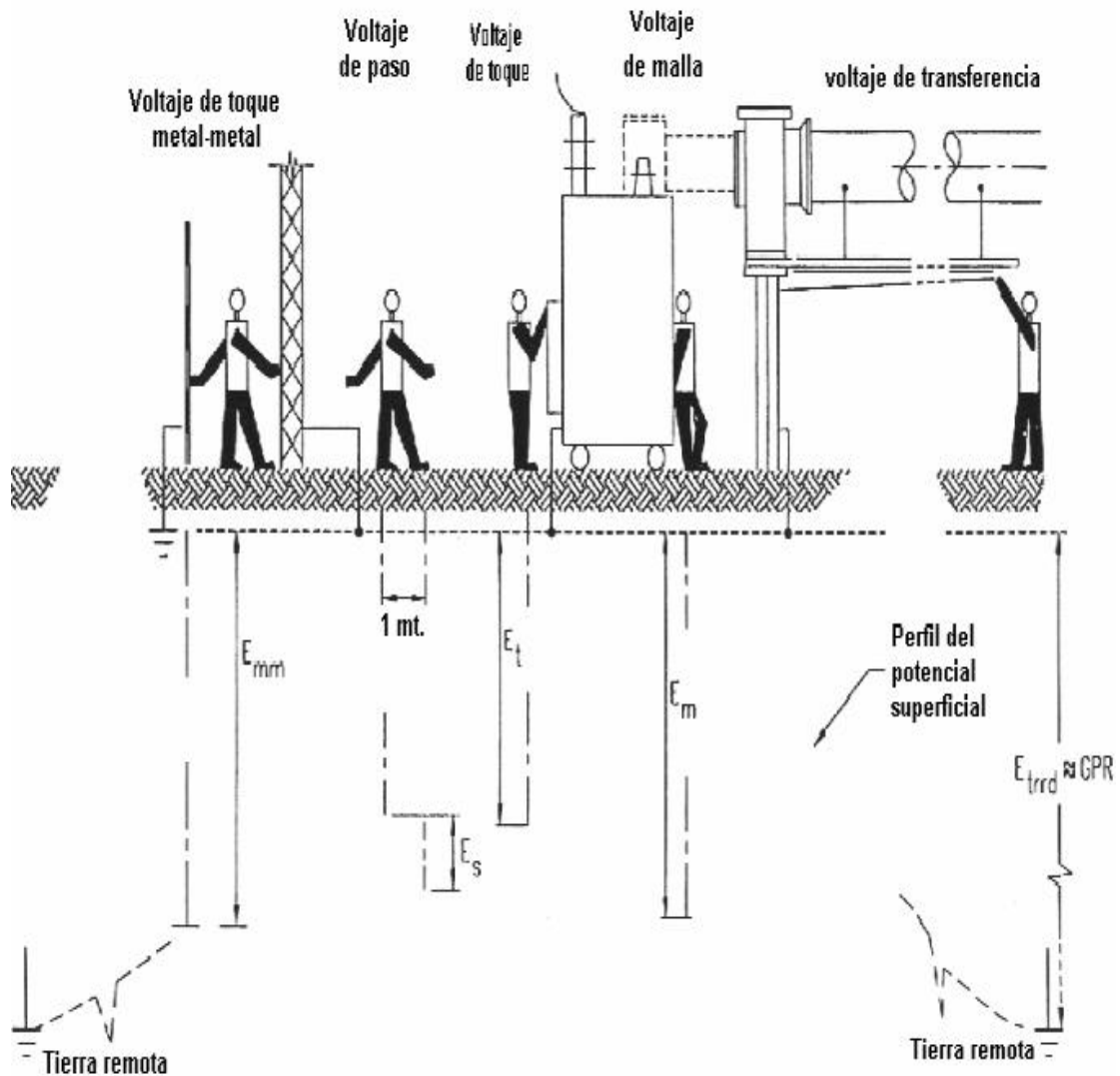


Figura 1.24
Objetivos de una subestación

En general, el funcionamiento de un sistema de conexión a tierra está determinado por un gran número de parámetros:

1. La resistividad del terreno en la vecindad de los conductores enterrados
2. El área y la geometría de la red de tierra
3. La estructura y los parámetros de los sistemas de potencia interconectados, incluyendo las interconexiones de los transformadores, hilos de guarda, la puesta a tierra de las torres de transmisión, etc.

De ésta manera, el análisis de los sistemas de conexión a tierra debe conducir a los siguientes problemas:

- Determinación de la resistividad del suelo.
- Cálculo de la máxima elevación de potencial de tierra (GPR).
- Cálculo de los potenciales de contacto, de paso y de transferencia.
- Comparación de los potenciales.

El procedimiento de diseño del sistema de conexión a tierra puede realizarse de manera iterativa. El diseñador debe proponer un cierto diseño y luego hacer un análisis del mismo. Este análisis determina si los criterios de diseño se cumplen, si no es así, deben hacerse modificaciones y repetir el proceso.

CAPITULO II

Diseño y Construcción de un sistema de tierras

2.1. Generalidades

En el diseño de los sistemas de conexión a tierra deben tomarse en cuenta las consideraciones particulares del caso en estudio o de la aplicación específica. Algunas de éstas consideraciones pueden ser el nivel de tensión del sistema eléctrico que se va a aterrizar, la importancia del proceso de producción si se trata de un sistema industrial, la configuración del sistema de distribución, el tipo de cargas a alimentar, el medio ambiente (interferencia electromagnética), el nivel de exposición a descargas atmosféricas y la elección de los esquemas de conexión a tierra aplicables para cada caso.

Tales esquemas de conexión a tierra pueden ser muy típicos en la mayoría de los casos, pero esto no debería justificar la aplicación de tales esquemas sin el análisis previo dentro de un sistema eléctrico instalado o en la etapa de diseño de una instalación por construir.

Aunque en la mayor parte de los sistemas de conexión a tierra el objetivo principal es el de la protección de la vida y de la propiedad, existen otros factores que aunque menos críticos no dejan de ser importantes, principalmente para el buen funcionamiento de los equipos y sistemas eléctricos.

Para tener un panorama amplio, algunos de los criterios que se analizan en éste capítulo se resumen a continuación. El valor de la resistencia de conexión a tierra por ejemplo, se puede manipular por medio de sus tres elementos principales: la resistencia de las conexiones, la de contacto con el suelo y la del mismo suelo. Aunque la normatividad establece un valor mínimo de 25 Ohms, que en algunas situaciones puede ser poco factible alcanzar, se debe recurrir a la manipulación de cualquiera de los tres elementos mencionados, tomando en cuenta que el segundo y tercer elementos son los más determinantes.

Por otro lado, la conexión a tierra del neutro en un sistema eléctrico tiene dos formas generalmente conocidas: conexión sólida a tierra y conexión a tierra a través de impedancia, la elección de una frente a otra está fundamentada en las características funcionales que se desean en el sistema, es decir, los niveles de corriente de falla a tierra, el control de sobrevoltajes, la interrupción inmediata de la energía ante una falla a tierra y por supuesto la seguridad de las personas.

La conexión a tierra de equipo sensible, además de cumplir con la función de ofrecer seguridad a las personas y proporcionar un medio de protección contra daño a los equipos, debe prever la introducción de interferencia o ruido.

Los esquemas y técnicas de alambrado son una parte importante para evitar las distintas formas de acoplamiento que favorecen los problemas de interferencia.

La conexión a tierra de pararrayos, debe tener las características de constituir una trayectoria de baja impedancia a tierra. Las características de las corrientes producidas por fenómenos atmosféricos deben ser conducidas de manera afectiva a tierra sin ser desviadas por ninguna otra trayectoria en su camino y sin producir diferencias de potencial elevadas que representen un riesgo a las personas o al funcionamiento de los equipos.

La revisión de los esquemas en los casos anteriores permite visualizar las prácticas de conexión a tierra en uso y establecer criterios específicos que permitan evaluar la adecuación de una aplicación práctica.

2.2. Valor de la resistencia de conexión a tierra

2.2.1 Naturaleza de la resistencia de conexión a tierra

La resistencia de conexión a tierra de un electrodo está compuesta por tres elementos principales (figura 2.1):

- (1) La resistencia del material del electrodo y la conexión de éste con los conductores de puesta a tierra
- (2) La resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo
- (3) La resistencia del suelo, desde la superficie exterior del electrodo, a una tierra infinita.

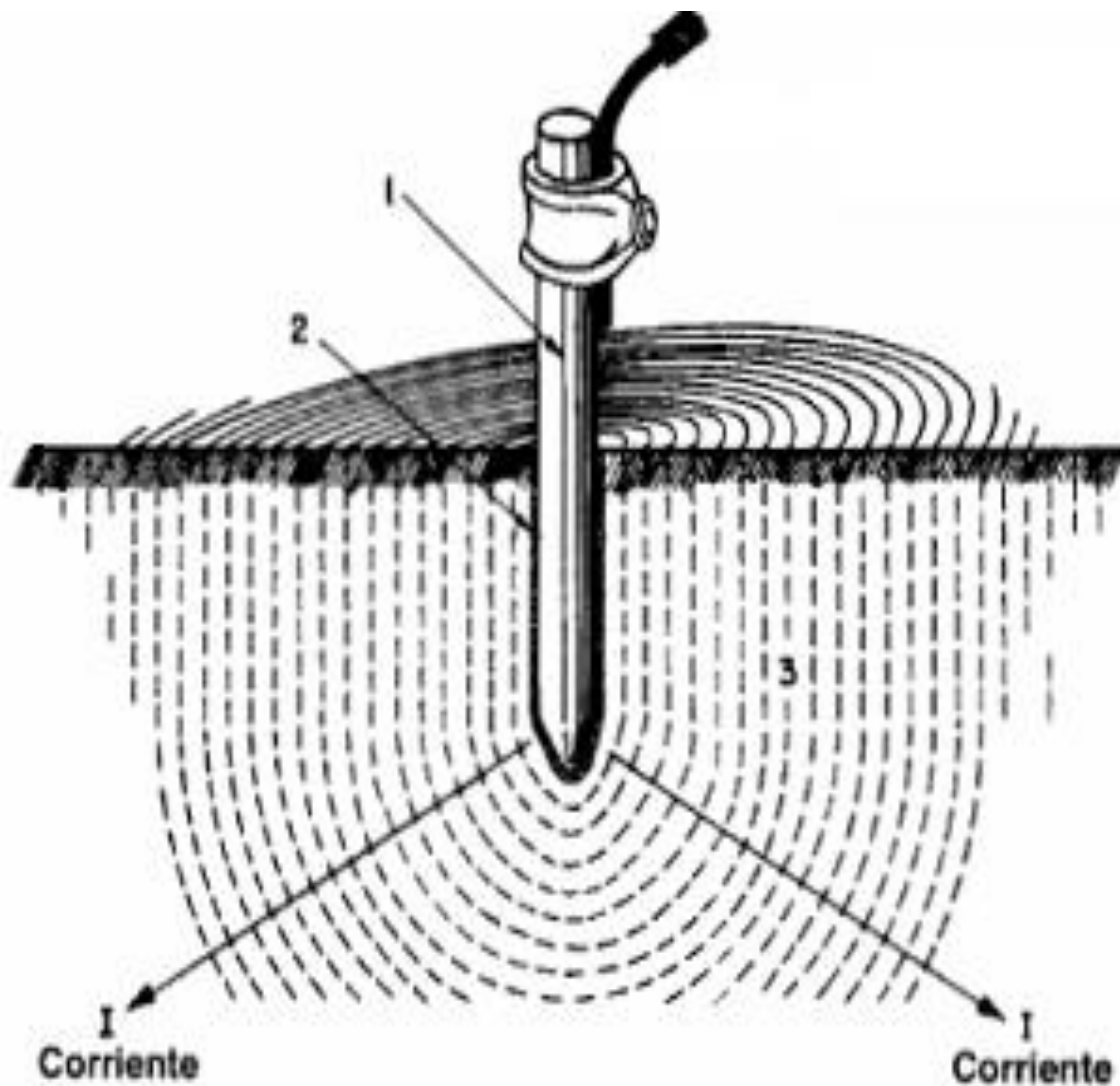


Figura 2.1
Naturaleza de un electrodo a tierra

El primer valor constituye el valor más pequeño y menos representativo de la resistencia total, por lo cual se considera despreciable, el segundo valor generalmente constituye el punto clave para mejorar la resistencia de conexión a tierra y es aquí donde se centran los esfuerzos al respecto, el tercer valor generalmente se considera como el valor que determina en mayor proporción la resistencia total de conexión a tierra, pero al mismo tiempo es el que presenta mayor variación con el tiempo debido a las condiciones climáticas y físicas del terreno.

Para explicar el valor del tercer elemento se debe tomar en cuenta que el suelo tiene la capacidad de absorber una gran cantidad de corriente, lo cual se explica por su tamaño relativamente infinito en comparación con los demás elementos del sistema de conexión a tierra. En la práctica, ésta gran cantidad de corriente a tierra se transmite a través del electrodo metálico y el suelo en la forma en que se describe a continuación.

Alrededor de un electrodo de conexión a tierra, la resistencia del suelo es la suma de las resistencias en serie de las capas de tierra, localizadas progresivamente en la superficie exterior del electrodo. La capa más cercana a la varilla tiene el área circular o sección transversal más pequeña, de tal manera que tiene la resistencia más alta. Las capas subsecuentes posteriores a ésta tienen áreas progresivamente más grandes, y por lo tanto resistencias progresivamente más bajas.

En la medida en que el radio de la varilla se incrementa, la variación de la resistencia por unidad de radio disminuye aproximadamente a cero. La figura 2.2 muestra una varilla (típica) de tierra de 3 m (10 ft) por 16 mm (5/8 in). La trayectoria de corriente a tierra hacia el exterior de la superficie de la varilla consiste en capas cilíndricas y hemisféricas sucesivas.

En la medida en que se incrementa la distancia con respecto a la varilla, las secciones transversales de las capas individuales se incrementan.

Al incrementarse las áreas, sus respectivas resistencias en serie decrecen proporcionalmente. La tabla 2.1 muestra los valores medidos de resistencia para una varilla a una distancia de 7.62 m (25 ft), a la cual se obtiene el 100 % de la resistencia total a tierra de esa varilla.

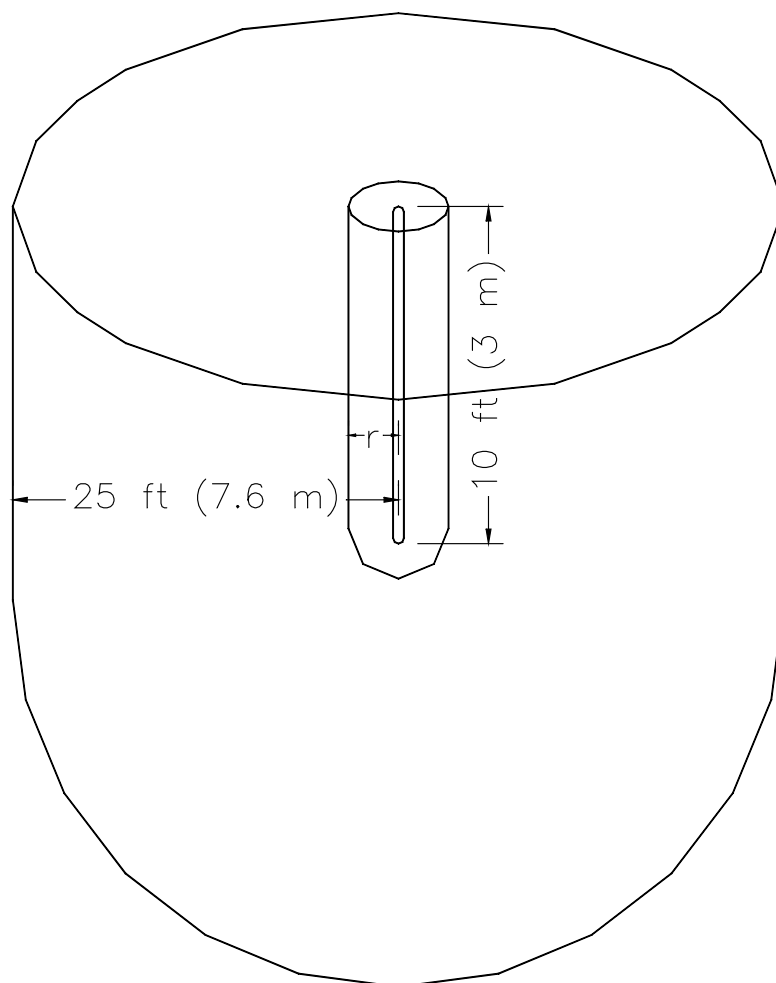


Figura 2.2
Conformación de la resistencia de un electrodo

En la tabla 2.1 se puede observar que los primeros centímetros de separación de la varilla son los más importantes para lograr una reducción de la resistencia del electrodo.

En lugares con suelo de alta resistividad, la aplicación de tratamiento químico o uso de concreto, será la mejor forma de mejorar la efectividad de un sistema de electrodos de conexión a tierra.

El agregar más electrodos a un primer electrodo, con la intención de reducir la resistencia eléctrica, no se refleja mucho en el valor de la resistencia total si éstos están cercanos uno de otro.

Tabla 2.1

Resistencia de un electrodo

Resistencia de un electrodo a un radio de r metros de una varilla de 3 m (10 ft) de largo por 16 mm (5/8 in) de diámetro (Donde la resistencia total a $r = 7.6$ m (25 ft) equivale al 100%)

Distancia de la superficie del electrodo (r)		Porcentaje Aproximado de la Resistencia total
m	ft	
0.03	0.1	25
0.06	0.2	38
0.09	0.3	46
0.15	0.5	52
0.30	1.0	68
1.50	5.0	86
3.00	10.0	94
4.60	15.0	97
6.10	20.0	99
7.60	25.0	100
(30.5)*	(100)	(104)
(305)*	(1000)	(117)

* Estos datos muestran que por razones prácticas la mayor parte de la resistencia a una tierra lejana se da a una distancia de 7.6 m (25 ft) del electrodo, esto es, a 305 m (1000 ft) la resistencia sólo es 17% mayor que a 7.6 m (25 ft).

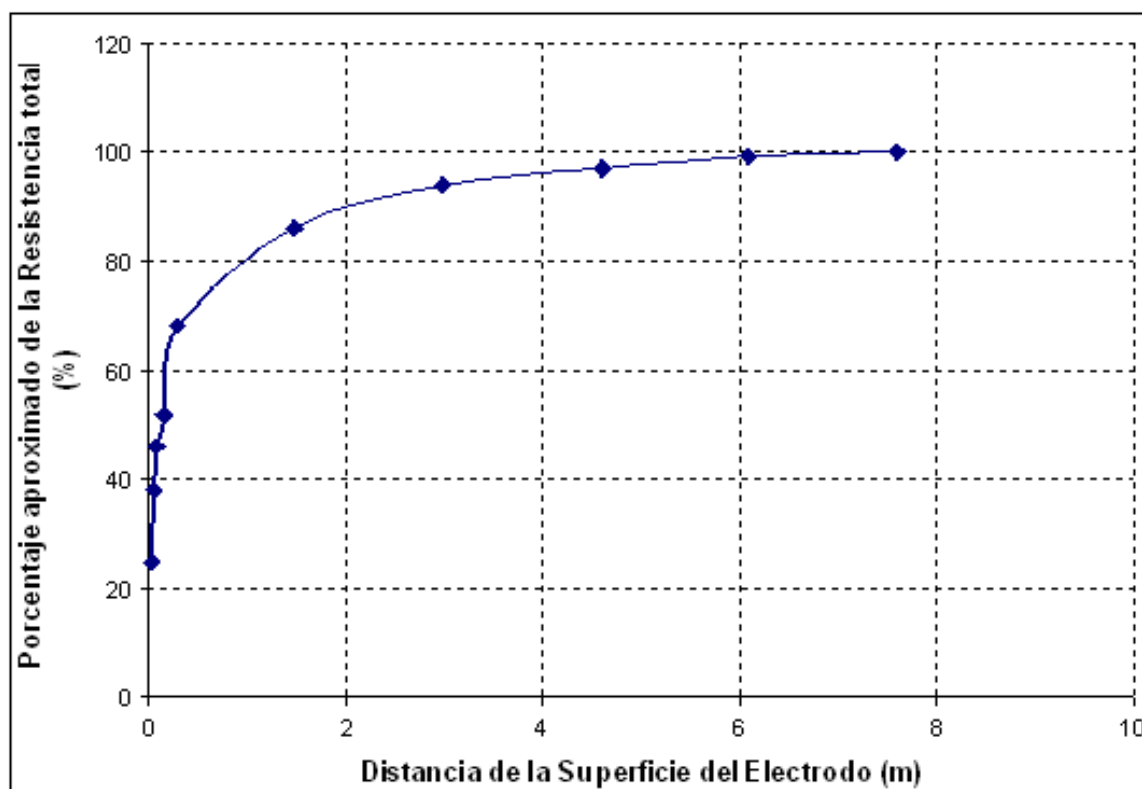


Figura 2.3
Resistencia de un electrodo

2.2.2 Valores recomendados de resistencia a tierra

La conexión a tierra es una de las partes más importantes en los sistemas de conexión a tierra, es también la parte más difícil de diseñar debido a las variables que intervienen.

El hecho de diseñar un sistema de conexión a tierra que cumpla todos los objetivos, no es suficiente si no se logra que la conexión a tierra sea adecuada para cada caso en particular.

La conexión a tierra por medio de un sistema de electrodos, necesita tener una resistencia suficientemente baja para permitir la operación rápida de los dispositivos de protección del circuito en el caso de que suceda una falla a tierra, proporcionar además la seguridad contra riesgos de electrocución del personal que pueda estar cercano al equipo, conductores, o de los electrodos mismos, y por último limitar los sobrevoltajes transitorios.

Lógicamente, mientras más baja sea la resistencia del sistema de conexión a tierra, se logra cumplir mejor con los requisitos anteriores. Sin embargo, las instalaciones con niveles bajos de corriente de falla a tierra no requieren valores tan bajos de resistencia de conexión a tierra como los sistemas con niveles mayores de corriente de falla a tierra. Se pueden obtener valores de resistencia a tierra inferiores a 1 Ohm por medio de la interconexión de un número individual de electrodos (figura 2.4).

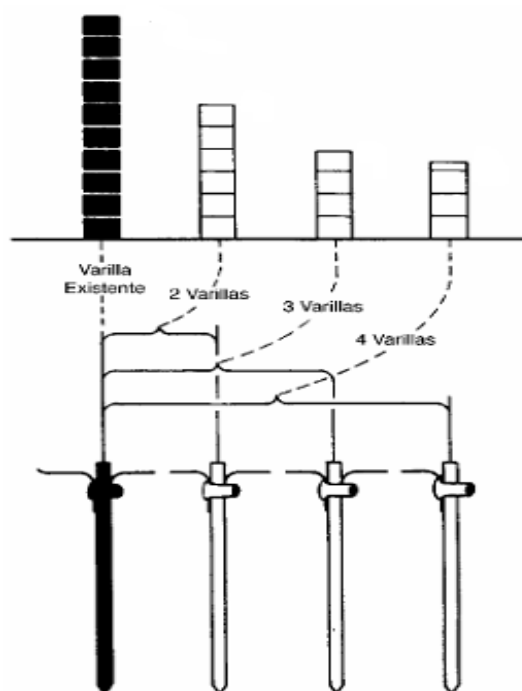


Figura 2.4
Conexión de electrodos múltiples

Tal resistencia de baja magnitud suele ser requerida sólo en grandes subestaciones, líneas de transmisión o estaciones generadoras. Una resistencia a tierra dentro de un rango de 1 a 5 Ohms generalmente es adecuada para subestaciones de plantas industriales, edificios e instalaciones comerciales grandes. Aunque esta sea una recomendación práctica, los valores para la resistencia a tierra pueden variar de acuerdo a la aplicación.

2.2.2.1 Recomendaciones del Código Nacional Eléctrico (NEC)

➤ Resistencia de conexión a tierra de un solo electrodo

El NEC (sección 250-56) establece que si un solo electrodo de puesta a tierra tiene una resistencia mayor a 25Ω , entonces se debe agregar un segundo electrodo adicional en paralelo (el cual puede ser cualquiera de los siguientes: tubería metálica subterránea, bastidores o estructuras metálicas de los edificios, electrodos encapsulados en concreto, anillo de tierra, varilla de tierra o electrodos de placa). Sin embargo el NEC advierte que la colocación de varillas a menos de 1.83 m (6 ft) de separación resulta ser una medida poco efectiva si se requiere disminuir la resistencia de conexión a tierra de manera significativa.

Sin embargo, habrá instalaciones donde ningún número de electrodos será adecuado, entre éstos sitios se encuentran las capas de lava, áreas desérticas, edificios sobre grandes masas de roca, etc.

En el caso de utilizar más de un electrodo, éstos deberán unirse de cualquier forma con el fin de evitar diferencias de potencial, resultado de condiciones de falla o fenómenos atmosféricos.

➤ Resistencia de conexión a tierra para equipo sensible

Aun cuando el NEC permite que el electrodo de conexión a tierra tenga una resistencia de 25Ω a tierra, los fabricantes de equipo electrónico requieren de un electrodo con una resistencia mucho menor a 25Ω , algunos requieren 5Ω o menos. Si las condiciones del suelo no son favorables, esto se puede lograr usando uno o más electrodos electrolíticos. Un electrodo electrolítico (figura 2.5) consiste en un tubo de 95 % de cobre y 5 % de níquel, de 2.59 m (8 ft 6 in) de longitud, alrededor de 5 cm (2 in) de diámetro, relleno con una mezcla de sales como cloruro de calcio (CaCl_2), y cloruro de sodio (NaCl).

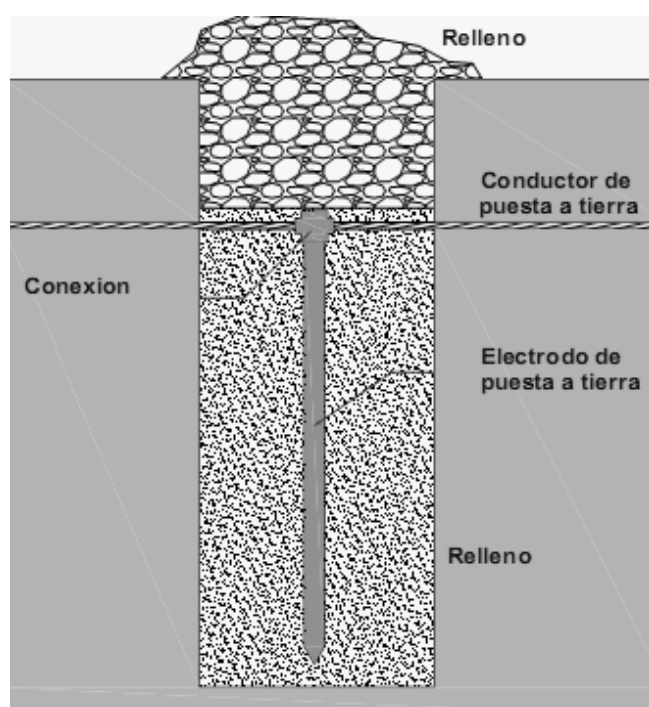


Figura 2.5
Electrodo electrolítico

El principio de operación está basado en la propiedad de la sal de cloruro de calcio de extraer la humedad del aire a través de dos orificios en la parte superior del electrodo.

La gravedad ocasiona que la humedad se disperse en la sal del tubo donde se convierte en electrolito. Un electrolito es un buen conductor de electrones, y cuando estos electrolitos se acumulan en el fondo del tubo se drenan a través de agujeros en el fondo del mismo para mezclarse con la tierra, dándole una mejor conductividad.

Adicionalmente se puede agregar bentonita (una arcilla volcánica de alta conductividad) alrededor del electrodo, la cual mezclada con agua tiene la propiedad de adherencia.

Esta propiedad de adherencia hace que la bentonita se pegue a las paredes del electrodo y a la tierra circundante, disminuyendo la resistencia de contacto entre el electrodo y tierra cuando ésta se separa del electrodo por efectos naturales.

2.2.2.2. Requerimientos de la Norma Oficial Mexicana (NOM)

➤ Electrodo Artificial

La NOM (Sección 250-84) requiere que el valor de la resistencia de conexión a tierra para electrodos artificiales (aquellos hechos intencionalmente para establecer la conexión a tierra, regularmente varillas o tubos), no debe ser mayor de 25Ω para casas habitación, comercios, oficinas o locales considerados como de concentración pública, con acometidas en baja tensión; aún en las condiciones más desfavorables.

Para sitios especiales donde se requiera un valor menor de resistencia a tierra, como pueden ser edificios que contengan equipos de cómputo, de comunicaciones o equipo electrónico en general, la NOM recomienda recurrir a las tierras especiales (Sección 250-83 de (a) a (d)), las cuales consisten en: a) Electrodo profundo, b) Electrodo horizontal, c) Electrodo químico, d) Electrodo múltiple.

➤ Bajadas de Pararrayos

Para las bajadas de tierra de los pararrayos la NOM recomienda un valor de 10 Ω . Para todos los casos anteriores, la NOM permite que el valor de resistencia a tierra sea el doble si la resistividad del terreno es superior a 3000 Ω .m. La tabla 2.2 muestra de manera resumida las condiciones anteriores.

Tabla 2.2

Resistencia de conexión a tierra de un electrodo

RESISTIVIDAD DEL TERRENO	RESISTENCIA A TIERRA (R_g) (Del Sistema de tierras)
Buena (<3000 Ω .m)	10 Ω
Alta (=3000 Ω .m)	Hasta 25 Ω
----- (>3000 Ω .m)	50 Ω

➤ Sistemas de conexión a tierra

En el caso de sistemas de conexión a tierra, consistentes en la interconexión de varios electrodos verticales con electrodos horizontales para formar una malla de tierras, la NOM requiere una resistencia de conexión a tierra suficientemente baja, como se muestra en la tabla 2.3, de tal manera que se minimicen los riesgos al personal en función de las tensiones de paso y de contacto, además de asegurar la correcta operación de los dispositivos de protección.

Tal valor de resistencia se ve directamente afectado por la resistividad del terreno.

Tabla 2.3

Resistencia de conexión a tierra de acuerdo a la resistividad del terreno

RESISTIVIDAD DEL TERRENO	RESISTENCIA A TIERRA (R_g) (Del Sistema de tierras)
Buena (<3000 Ω .m)	10 Ω
Alta (=3000 Ω .m)	Hasta 25 Ω
----- (>3000 Ω .m)	50 Ω

➤ Subestaciones

En el caso de subestaciones, donde generalmente se aplica una malla de tierra, la resistencia total de la malla debe determinarse, según la NOM (NRF-011-CFE-2002), tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Longitud total de elementos enterrados
- Resistividad eléctrica del terreno
- Área de la sección transversal de los conductores (mínima aceptable es 107.2 mm² de cobre (4/0 AWG))
- Profundidad

De acuerdo a la NOM (Artículo 921 parte D), la resistencia total del sistema de tierra debe determinarse en función de los factores que se muestran en la tabla 2.4, en donde intervienen tanto el nivel de tensión de la subestación, como la resistividad del terreno en donde será instalada ésta.

Tabla 2.4
Resistencia de conexión a tierra en subestaciones

TENSION	CAPACIDAD	RESISTENCIA A TIERRA (R_g)	
		$\rho_o \leq 3000 \Omega.m$	$\rho_o > 3000 \Omega.m$
Hasta 34.5 kV	Hasta 250 kVA	<25 Ω	<50 Ω
Hasta 34.5 kV	Mayores de 250 kVA	<10 Ω	<20 Ω
Mayor a 34.5 kV	Mayores de 250 kVA	<5 Ω	<10 Ω

2.3. La resistividad del suelo

2.3.1. Resistividad del suelo

La resistencia que presenta un terreno está en función de la resistividad del mismo y de las dimensiones y la forma del electrodo, y aunque se considere la tierra como un conductor de ilimitada conductancia por sus grandes dimensiones, no puede asumirse que las "conexiones" que a ella se efectúen mediante electrodos tengan esa misma propiedad, ya que cualquiera que sea la forma que presenten, ofrecerán una resistencia definida al paso de la corriente y, en muchos casos, resultará difícil obtener una puesta a tierra de baja resistencia.

La resistividad eléctrica ρ es la resistencia eléctrica de una unidad de volumen de un material, y se mide en unidades de resistencia eléctrica multiplicadas por la longitud, típicamente se expresa en $\Omega.m$.

Tabla 2.5
Valores típicos de resistividad para diferentes tipos de suelos

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD ($\Omega.m$)
Arcilla	2 - 100
Arena y grava	50 - 1,000
Piedra caliza de superficie	100 - 10,000
Piedra caliza	5 - 4,000
Esquisto o pizarra	5 - 100
Piedra arenisca	20 - 2,000
Granito, basalto	1,000

2.3.2. Factores que afectan la resistividad del suelo

En la resistividad del terreno influyen varios factores que pueden variarla, entre los más importantes se encuentran: naturaleza del terreno, humedad, temperatura, salinidad, estratigrafía, compactación y las variaciones estacionales.

Naturaleza del Terreno: Esta se refiere a que la resistividad varía según el tipo de terreno, es decir se tiene una resistividad más elevada en un terreno rocoso que en uno donde haya arena.

Humedad: Varía la resistividad según la humedad del terreno, mientras más húmedo sea éste más baja será la resistividad del terreno y mientras más seco este el terreno mayor será la resistividad de éste, es por esta razón que deben procurarse un terreno un poco más húmedo para obtener mejores valores

Temperatura: Aquí también la temperatura afecta en las mediciones ya que el calor crea una resistencia en el terreno, ya que es como si se tuviera un terreno seco. Y por el contrario a temperaturas muy bajas la poca humedad que hay en el terreno puede congelarse (solo la superficie del agua), y como se sabe el hielo no es un buen conductor por lo que se eleva la resistividad del terreno.

Salinidad: Como se sabe el agua por sí sola no conduce la electricidad pero con sales se convierte en un excelente conductor, es por esto que mientras más sales contenga el terreno y este húmedo más bajo serán los valores de resistividad.

Estratigrafía: Esta afecta por el exceso de rocas y piedras de tamaño considerable en un terreno ya que las rocas y piedras provocan una mayor resistencia en el terreno.

Compactación: Aquí la resistividad disminuye mientras más compactado este un terreno ya que cuando no está bien compacto hay pequeños espacios de aire los cuales impiden que la corriente eléctrica se pueda esparcir por el terreno.

Variaciones estacionales: Las estaciones también intervienen en el valor de la resistividad de un terreno ya que en una estación calurosa como lo es primavera el terreno estará más seco que si se tuviera una estación con muchas lluvias y por esto los valores cambiarían según la estación del año en que nos encontremos es por esto que se recomienda hacer varias mediciones en diferentes estaciones del año para determinar la resistividad promedio.

Cada uno de los factores anteriores es determinante en la conformación de la resistividad del terreno. Para observar esto, se presentan algunas gráficas de los factores antes mencionados.

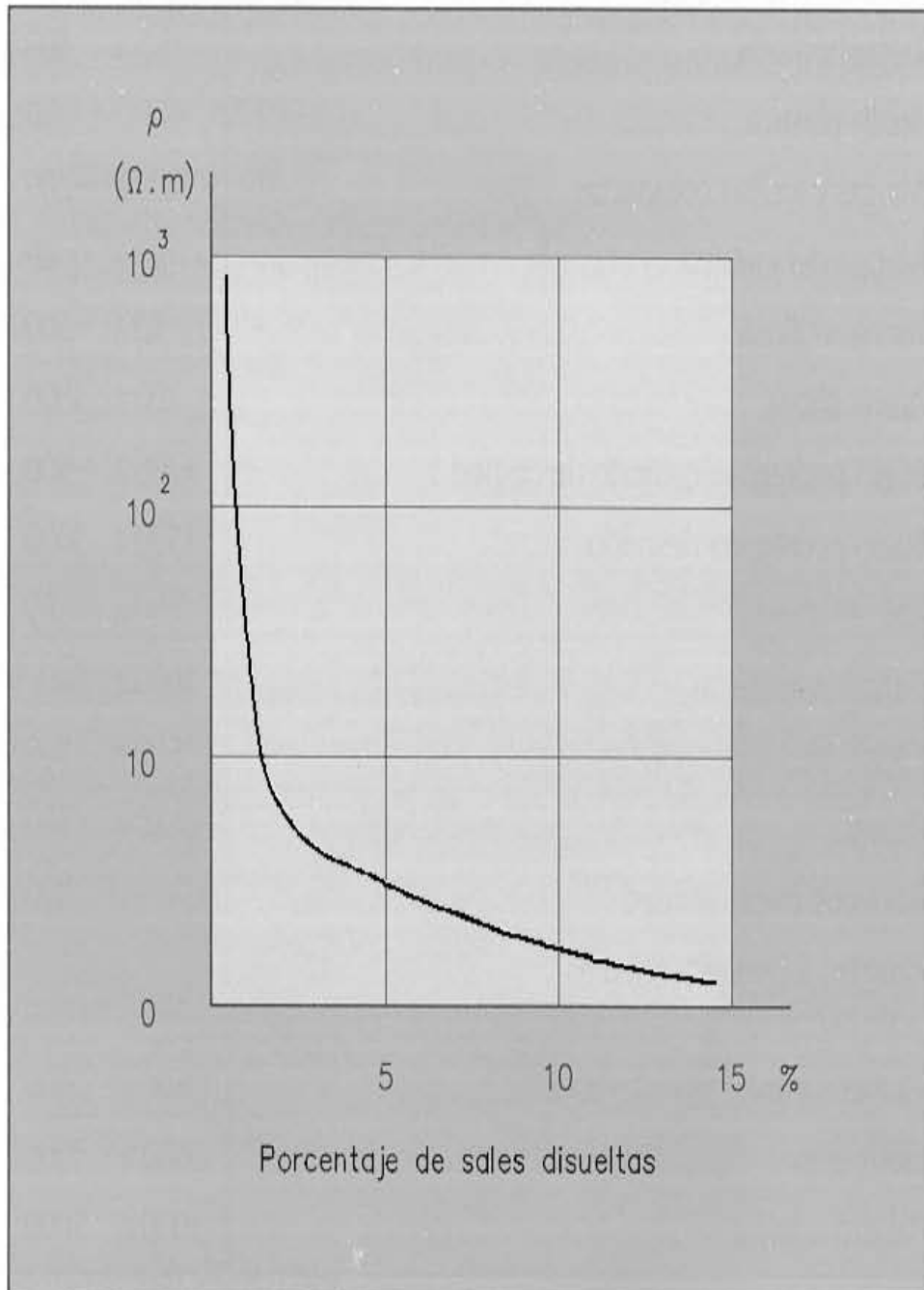


Figura 2.6
Resistividad del suelo en función de la concentración de sales disueltas

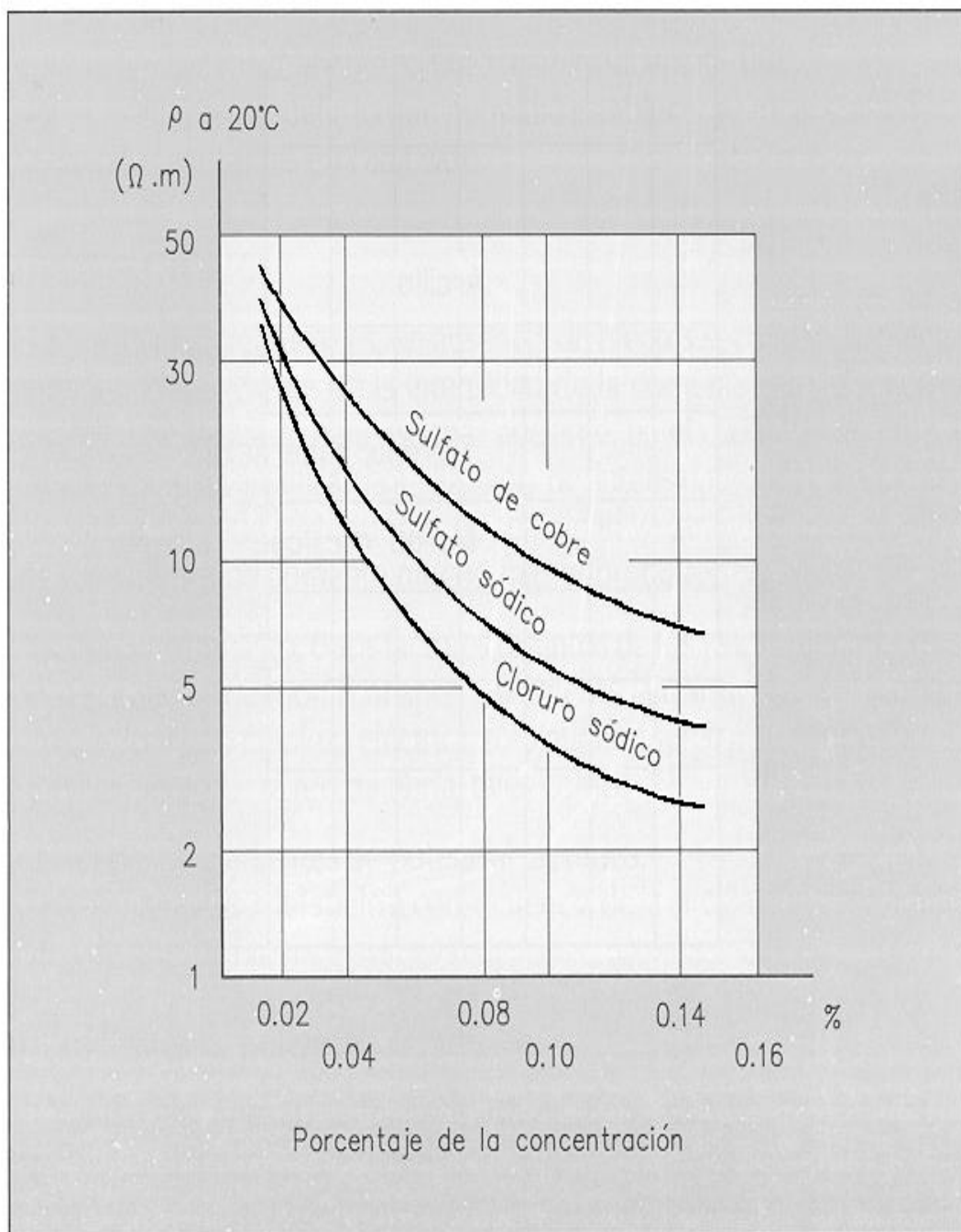


Figura 2.7
Resistividad del suelo en función del tipo de sales

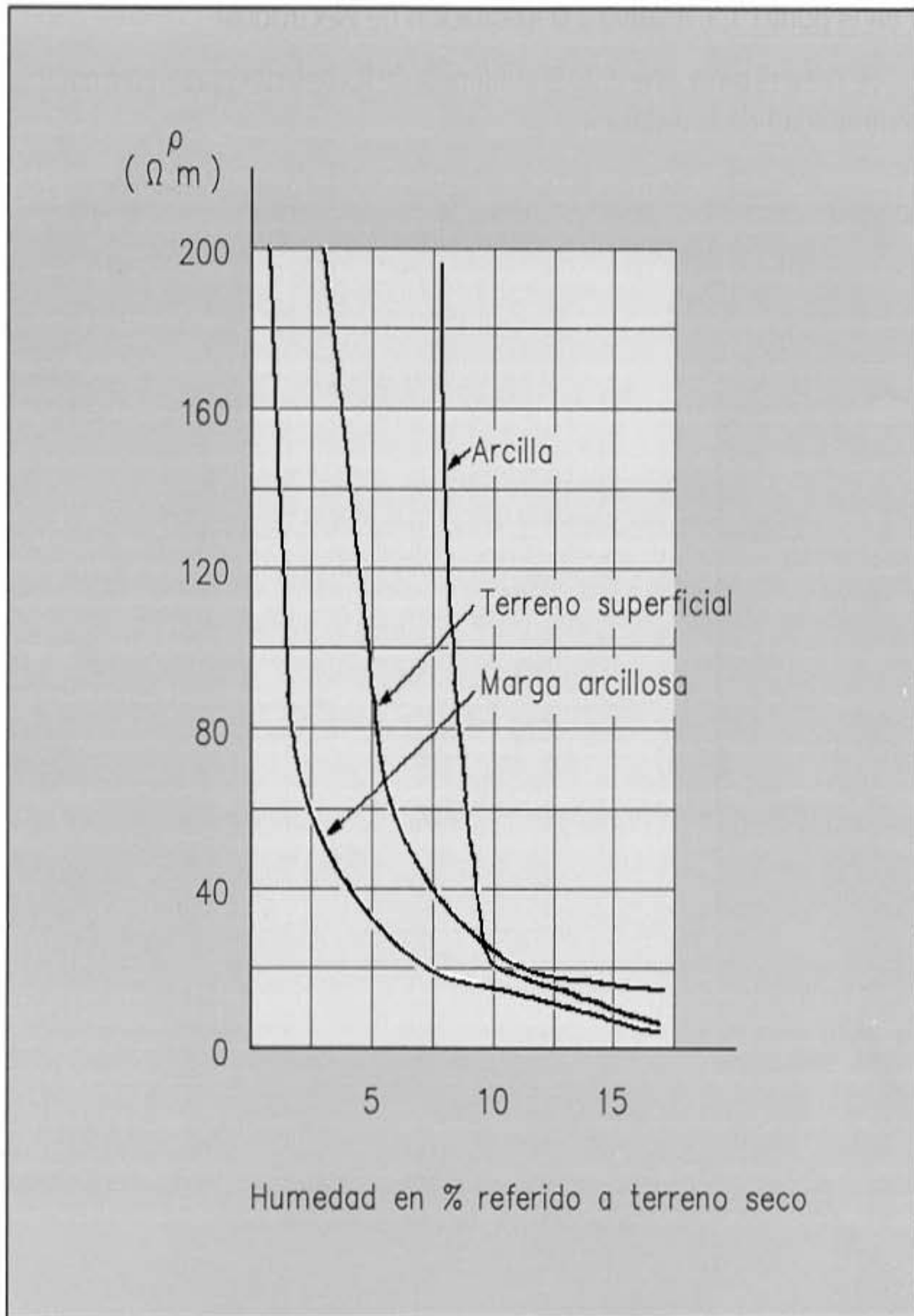


Figura 2.8
Resistividad del suelo en función de la humedad

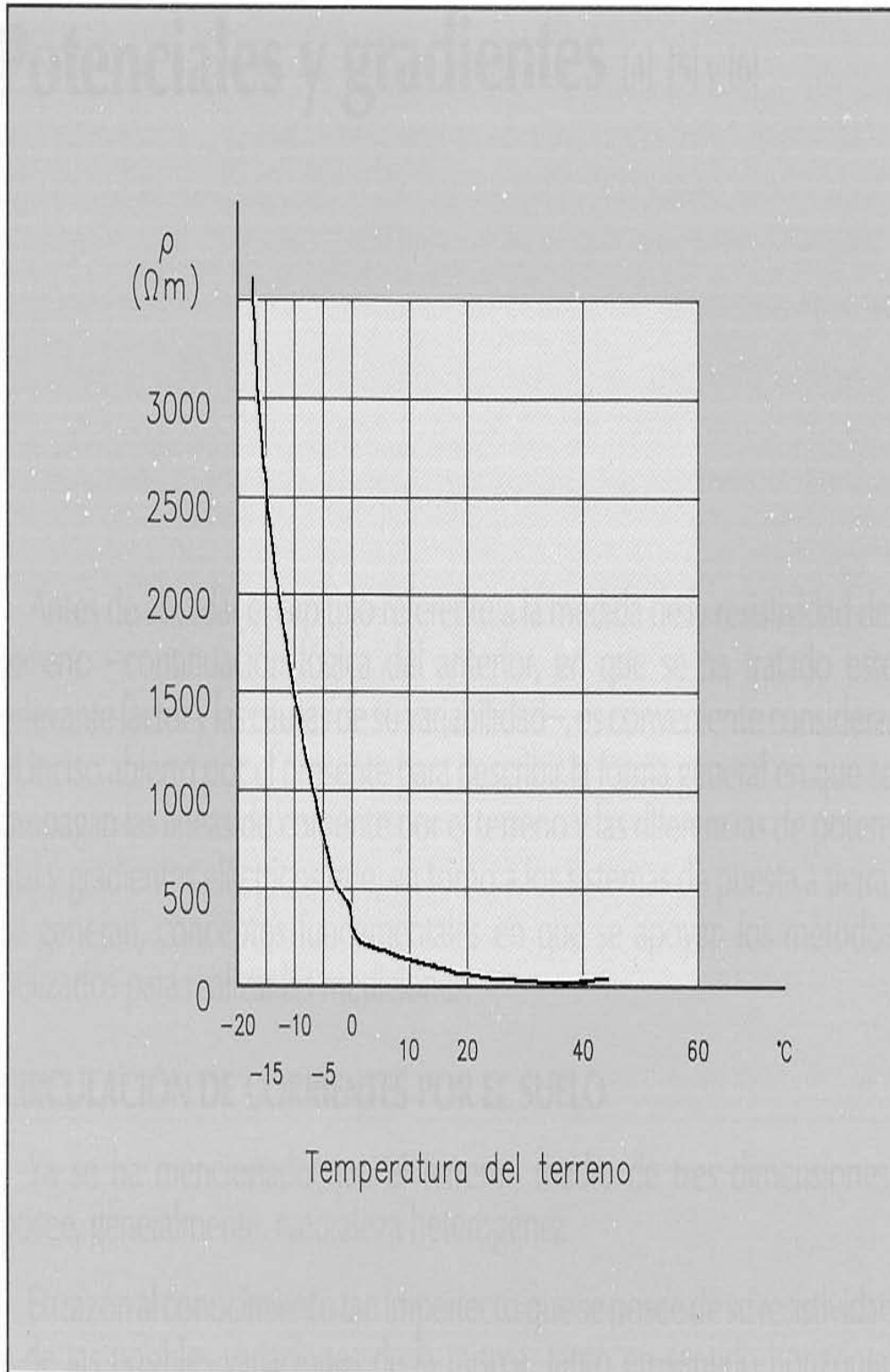


Figura 2.9
Resistividad del suelo en función de la temperatura

Además de la influencia de las variables físicas anteriores la conformación física del terreno agrega complejidad al asunto. Como se dijo antes, la resistividad del terreno se ve influenciada por los diferentes estratos o capas que se presentan en el terreno. De ésta manera, la resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes resistividades de las diversas capas que lo constituyen. Debido a esto y con el objeto de observar el efecto que tiene la existencia de diversas capas en el valor de resistividad, se ha propuesto el análisis del terreno por medio de un modelo de dos capas. La figura 2.10 muestra la distribución de corriente en un suelo estratificado, correspondiente a un modelo de dos capas.

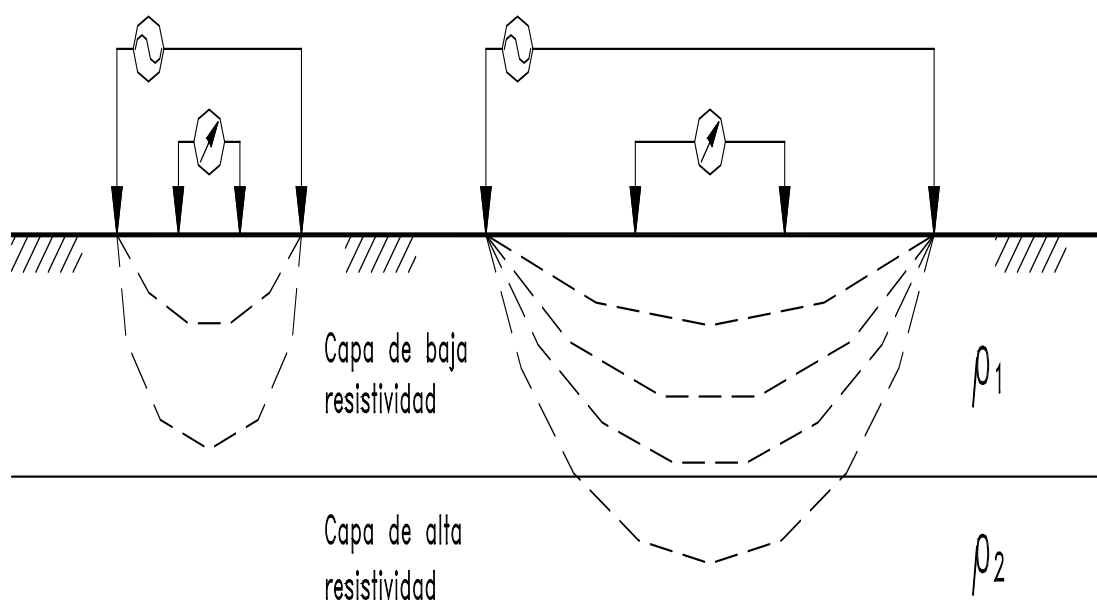


Figura 2.10
Variación de la distribución de corriente en un suelo estratificado

La figura 2.11 muestra el comportamiento de la resistividad para diferentes tipos de terreno, mostrando el efecto del número de capas que componen a éste y la relación de la resistividad entre las capas. Será por tanto prudente tener en cuenta éstas variaciones de resistividad en el establecimiento de una red de tierras enterrada a una profundidad del orden de 1 metro.

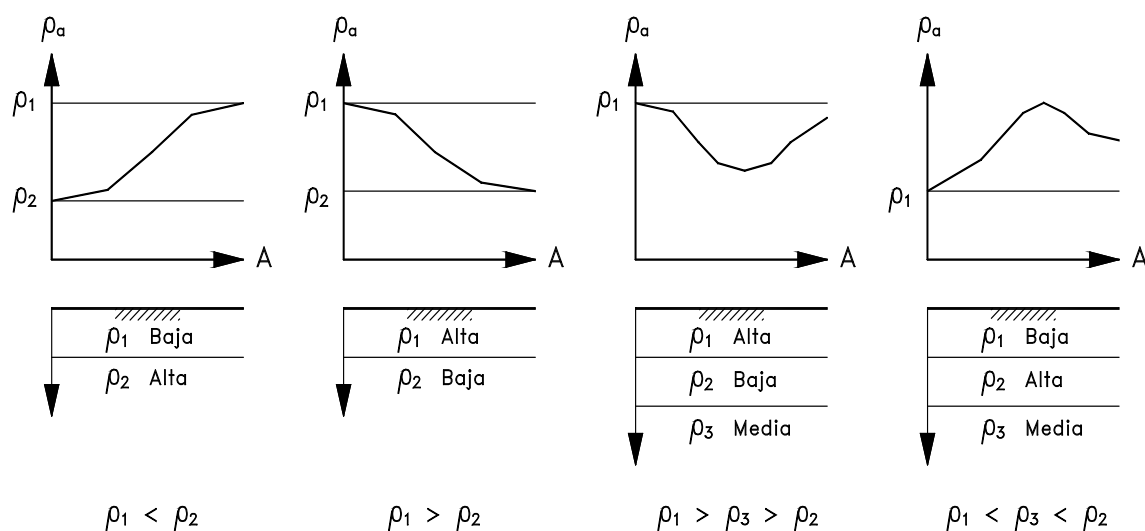


Figura 2.11
Gráficas cualitativas para diferentes perfiles de terreno

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

2.3.3. Cálculo de la resistencia de conexión a tierra

Una conexión a tierra ideal debería proporcionar un valor de resistencia próximo a cero con respecto a una tierra remota. En la práctica, la elevación de potencial de la red (EPR o GPR -Ground Potential Rise- por sus siglas en inglés, y que es el producto de la resistencia a tierra R_g y la corriente de falla a tierra I_g), se incrementa proporcionalmente con la corriente, por lo tanto, mientras mayor sea el valor de la corriente, se requerirá un valor más bajo de resistencia a tierra del sistema.

La estimación de la resistencia total a una tierra remota es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y diseño básico de un sistema de conexión a tierra. A primera vista pareciera que esto es difícil, puesto que el sistema de conexión a tierra no está diseñado aún, y su resistencia, que depende del diseño, se desconoce. Afortunadamente, la resistencia a tierra depende principalmente del área ocupada por el sistema de tierra, la cual generalmente se conoce en la etapa de diseño preliminar.

2.3.3.1. Aproximación general

Como primera aproximación, se puede estimar un valor mínimo de la resistencia de conexión a tierra en suelo uniforme por medio de la fórmula de una placa metálica circular a una profundidad cero, una vez que se ha determinado la resistividad del terreno:

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

Donde:

R_g = resistencia a tierra en Ω

ρ = resistividad promedio del terreno en $\Omega\text{-m}$

A = el área ocupada por la red de tierras en m^2

2.3.3.2. Fórmula de Laurent y Newman

Se puede obtener un mejor valor de resistencia agregando un segundo término a la fórmula antes descrita, como lo proponen Laurent y Niemann:

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

Donde:

L = longitud total de conductores enterrados

El segundo término reconoce el hecho de que la resistencia de cualquier sistema de conexión a tierra real, que consista de un número determinado de conductores, es más alta que una placa metálica sólida, y que la diferencia entre éstos disminuye con el incremento en la longitud de conductores enterrados, aproximándose a cero para una longitud L infinita cuando se alcanza la condición de una placa sólida.

2.3.3.3. Fórmula de Sverak

Las ecuaciones anteriores se pueden utilizar con una exactitud razonable para profundidades menores de 0.25 m. Sin embargo para profundidades entre 0.25 y 2.5 m, se requiere una corrección para la profundidad usando la aproximación de Sverak:

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

Donde:

h = profundidad de la red

Esta última fórmula es la que recomienda el IEEE Std. 80 para cálculos preliminares de mallas enterradas, como la estimación de la elevación de potencial de la red (EPR), y con éste a su vez determinar la longitud de conductor enterrado necesario para el control de los voltajes de paso y de contacto.

2.3.3.4 Fórmula para una sola varilla o varias de éstas

Se puede calcular la resistencia a tierra de una sola varilla vertical (figura 2.12) a tierra por medio de la fórmula siguiente:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$$

Donde:

R = resistencia, Ω

ρ = resistividad del terreno, $\Omega\cdot\text{m}$

L = longitud del electrodo vertical, m

r = radio del electrodo vertical, m

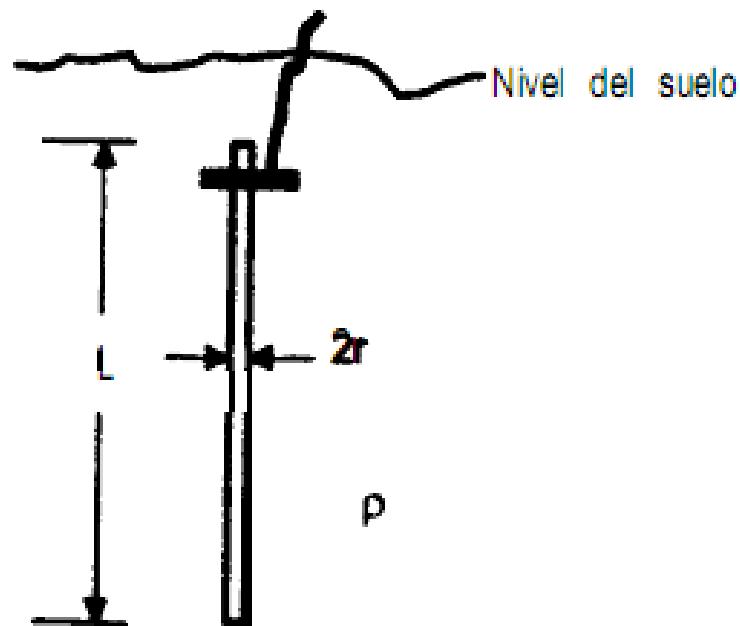


Figura 2.12
Esquema de un electrodo de puesta a tierra tipo vertical

Para efectos prácticos se puede simplificar por la relación, la cual considera que hay muy poca variación en la resistencia para los diferentes diámetros de los electrodos verticales comerciales (13, 16 y 19 mm) y para la longitud típica de 3,05m. Esta poca dependencia del radio, se observa porque dicho radio influye solamente en el término logarítmico, el cual requiere muy grandes variaciones para que pueda afectar en el resultado total.

$$R = \frac{\rho}{L} = \frac{\rho}{3}$$

La aplicación de electrodos múltiples en paralelo produce una resistencia a tierra menor que un solo electrodo, sin embargo, una segunda varilla interconectada a una primera no proporciona la mitad de la resistencia de una sola varilla, a menos que la longitud de separación entre éstas sea mayor a la suma de las longitudes de las mismas.

Una regla útil para calcular la resistencia de múltiples varillas a tierra, es dividir la resistencia obtenida por medio de la fórmula anterior, entre el número de varillas y multiplicada por el factor F que se da en la tabla siguiente:

Tabla 2.6
Factores para hallar la resistencia a tierra de varias varillas

Número de varillas	F
2	1.16
3	1.29
4	1.36
8	1.68
12	1.80
16	1.92
20	2.00
24	2.16

2.3.3.5 Contra-antena (Electrodo Horizontal)

Para contra-antenas (figura 2.13) se aplica la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} - 1 \right)$$

Y simplificando esta fórmula para $L \gg r$, se tiene que:

$$R = \frac{2\rho}{L}$$

Es decir, para la misma longitud de conductor, el conductor horizontal tendrá el doble de resistencia que el conductor vertical.

Para conductores de 6m de longitud, se tiene:

$$R = \frac{\rho}{3}$$

Esta aproximación es mayor entre 5 y 15% al calculado por la fórmula original. Sin embargo, cuando se colocan varias contra-antenas, habrá efectos mutuos y la resistencia equivalente aumentará respecto al valor que resulta cuando se considera un circuito paralelo de las resistencias de cada contra-antena.

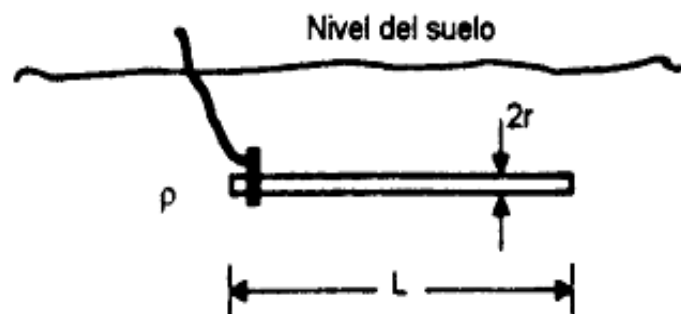


Figura 2.13
Esquema de un electrodo tipo contra-antena

2.3.4. Reducción de los Valores de Resistencia de Conexión a Tierra

Debido a que el valor de la resistencia de conexión a tierra se ve afectado por las características del terreno, los arreglos de las varillas de tierra y las conexiones entre ellas, los métodos de mejoramiento de los valores de resistencias de conexión a tierra en líneas de distribución hacen uso de los puntos mencionados anteriormente.

Para las características del terreno se usan métodos para disminuir la resistividad del terreno por medio de sales o productos químicos. Con los arreglos de varillas de tierra se recomiendan tanto número como disposición de varillas para disminuir la resistencia de conexión para ciertas resistividades de terreno.

2.3.4.1. Métodos de Mejoramiento

A continuación se enumeran algunos de los métodos usados para reducir o mejorar los valores de resistencia de puesta a tierra:

a) *Electrodos profundos.*- Cuando el terreno es penetrable se puede usar este método para mejorar el valor de resistencia de tierra. A mayor profundidad se tienen mejores valores de resistividad del terreno, especialmente en terrenos donde se tienen los mantos freáticos no muy profundos, resulta ser un método práctico y económico.

b) Electrodo múltiple en paralelo.- Cuando se tienen valores de la resistividad del terreno de las capas superiores más baja que la de las capas más profundas o en casos donde no se puedan obtener las profundidades adecuadas de las varillas de tierra, se recomienda el uso de dos o más electrodos en paralelo.

c) Contra-antenas.- En terrenos donde no es posible la penetración de varillas teniéndose un manto delgado de suelo sobre subsuelo de roca, se recomienda el uso de conductores enterrados a baja profundidad a lo largo de zanjas construidas específicamente para contener al conductor.

d) Hormigón armado.- El hormigón armado puede considerarse como electrodo metálico inmerso en un medio razonablemente homogéneo (el hormigón), cuya resistividad está en el orden de los 30 Ω -m. El hormigón, a su vez está inmerso en el terreno, cuya resistividad puede variar desde 1 hasta 1,000 Ω -m. La relación de resistividades de hormigón y terreno determina la resistencia de dispersión a tierra resultante.

e) Reducción de la resistividad del suelo mediante procedimientos artificiales.- En algunos terrenos con alta resistividad, las prácticas de los métodos resumidos anteriormente pueden resultar prácticamente imposibles de aplicar para obtener valores de resistencia de conexión a tierra aceptables. En estos casos puede resultar aceptable el uso de procedimientos para reducir artificialmente la resistividad del terreno que circunda al electrodo de tierra. Los métodos más usados se resumen a continuación:

e.1 Agregado de sales simples.- Un método simple de tratamiento químico de suelos es mediante sales. Esta se dispersa en una zanja alrededor del electrodo de tierra formando un círculo y tapada con tierra, sin llegar a tener contacto directo con el electrodo, como se muestra en la figura 2.14.

El sulfato de magnesio, el sulfato de cobre y la sal común (cloruro de sodio), son sales que pueden utilizarse para este propósito. Una de las desventajas de este método es la degradación que existe durante las lluvias, que drenan la sal a través de la porosidad del suelo y la corrosión de la varilla.

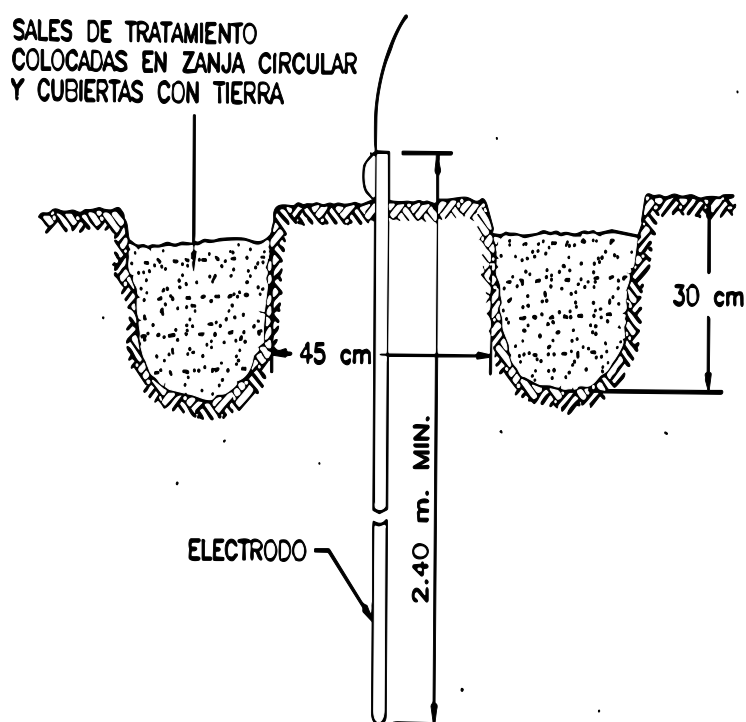


Figura 2.14
Agregado de sales simples en zanja alrededor del electrodo de tierra

e.2 Agregado de coque.- La resistividad del coque es de aproximadamente 1.3 Ω -m y además es independiente del contenido de humedad, pero al colocarse en el terreno se hace dependiente de la humedad debido al resto del terreno.

Una de las desventajas del uso del coque y de la sal es su efecto corrosivo, el cual disminuye la vida del electrodo de tierra.

e.3 Aporte de sales "gel".- Este método consiste en irrigar el terreno con dos o más sales combinadas con una solución acuosa y acompañadas de catalizadores que reaccionan entre sí formando un precipitado en forma de "gel" estable, con una elevada conductividad eléctrica. Esta mezcla es resistente a los ácidos del terreno y es insoluble en agua, lo que le da al método un mayor tiempo de permanencia.

e.4 Electrodo químicos.- Son electrodos formados por un tubo perforado que es relleno con sales químicas que han demostrado su efectividad para bajar la resistencia de conexión a tierra, pero aún no se ha determinado con exactitud su vida útil. Cada fabricante recomienda sus productos para ser instalados con dichos electrodos.

e.5 Inyección de sales artificiales.- Este método consiste en el uso de sales artificiales en grietas naturales formadas alrededor del electrodo de tierra o formando una capa alrededor de este. Las sales artificiales están compuestas de minerales de composición compleja, que posean principalmente características higroscópicas, ser buenos conductores de electricidad y que además protejan al electrodo de la corrosión.

2.4. Métodos para medir la resistividad del suelo

2.4.1. Método de cuatro puntos (Wenner)

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

El método fue desarrollado por Frank Wenner y para realizar las mediciones se requiere de cuatro pequeñas varillas localizadas sobre una línea recta (figura 2.15), las cuales se entierran a una profundidad b y espaciadas a una misma distancia entre ellas. Se hace circular una corriente de prueba de baja frecuencia entre los dos electrodos extremos (electrodos de corriente C1, C2) y se mide la caída de potencial con un voltmetro de alta impedancia entre los dos electrodos interiores (electrodos de tensión P1, P2). Por lo tanto la relación entre la tensión y la corriente determina la lectura de la resistencia R , la cual con la siguiente ecuación nos permite calcular la resistividad del terreno.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Donde:

ρ = resistividad aparente del suelo ($\Omega \cdot m$)

R = resistencia medida del terreno (Ω)

a = distancia entre electrodos o varillas (m)

b = profundidad de los electrodos (m)

En la práctica, los cuatro electrodos se colocan en línea recta con una profundidad que generalmente es mucho menor que el espaciamiento entre ellos ($b \leq 0.1 a$) por lo cual, para estos casos en la ecuación anterior se puede despreciar el valor de la profundidad de los electrodos y se reduce a la siguiente expresión:

$$\rho_w = 2 \pi a R$$

Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamiento, lo cual permite determinar, en su caso, la existencia de diversas capas del terreno.

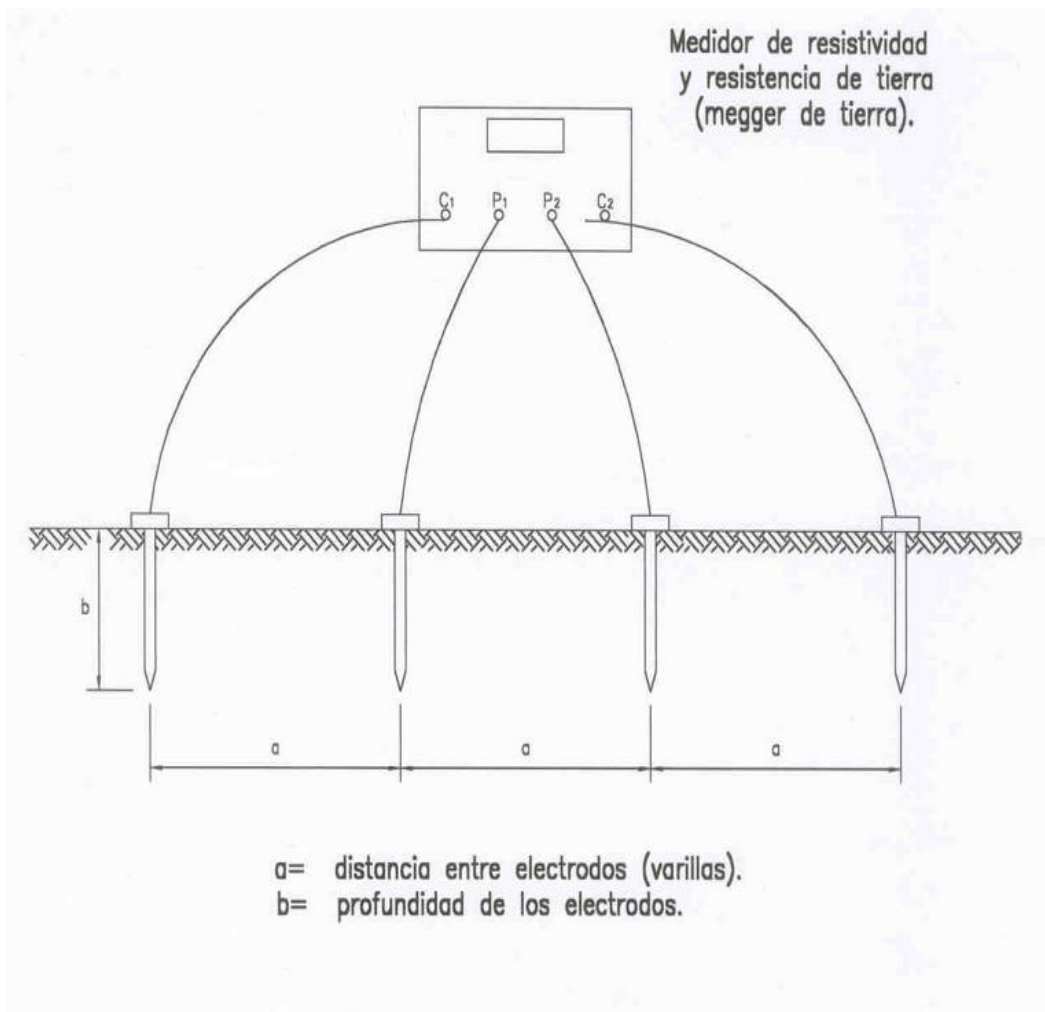


Figura 2.15
Medición de la resistividad del terreno por el método de Wenner

2.4.2 Método de Schlumberger - Palmer

Este método es prácticamente el mismo que el anterior, pero se considera el espaciamiento de los electrodos interiores de tensión d mayor al de los de corriente c . Esta disposición (figura 2.16) permite medir la resistividad con espaciamientos entre varillas mayores que el espaciamiento utilizado en el método Wenner, el cual tiene la desventaja del decremento rápido en la magnitud de la tensión medida entre los electrodos interiores, cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes.

En la figura 2.16 se aprecia que los electrodos de tensión se localizan lo más cercano a los electrodos de corriente, lo cual incrementa la tensión medida.

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

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

Donde:

ρ = resistividad aparente del suelo (Ω -m)

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

d = distancia entre electrodos de tensión (m)

R = resistencia medida del terreno (Ω)

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

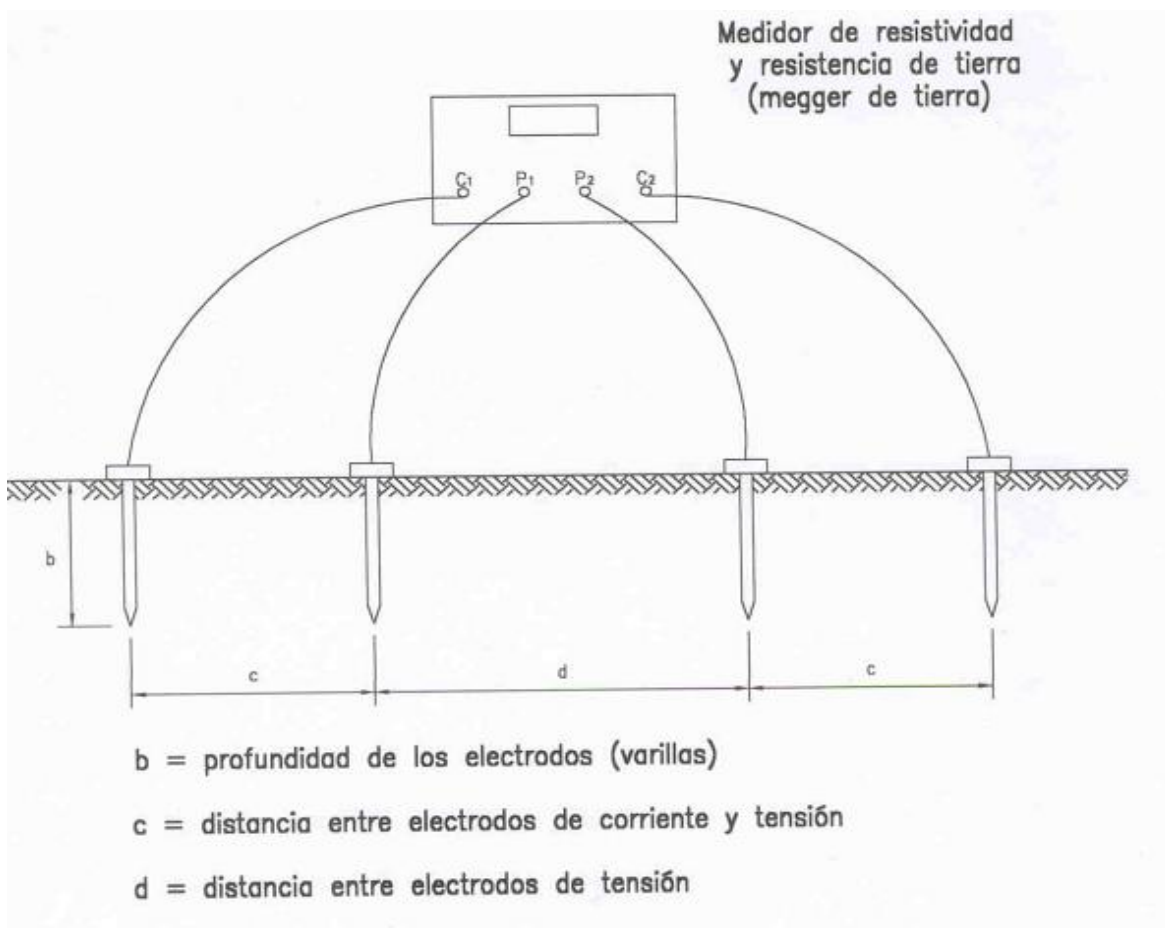


Figura 2.16
Medición de la resistividad del terreno por el método Schlumberger-Palmer

2.5. Medición de la Resistencia Eléctrica de la Red de Tierras

2.5.1. Método de Caída de Potencial

Este método se basa en la inyección de una corriente de prueba en el electrodo bajo análisis (red de tierra). Se toman mediciones de la tensión a diferentes distancias entre el electrodo bajo análisis **E** y el electrodo auxiliar de potencial **P**, el valor representativo de la resistencia se tendrá cuando la diferencia entre dos o tres mediciones sea despreciable (ver figura 2.17).

Este método 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 bajo prueba (E) y un electrodo de corriente (C), y medir el efecto de esta corriente en términos de diferencia de potencial (P); la relación V/I da el valor de resistencia.

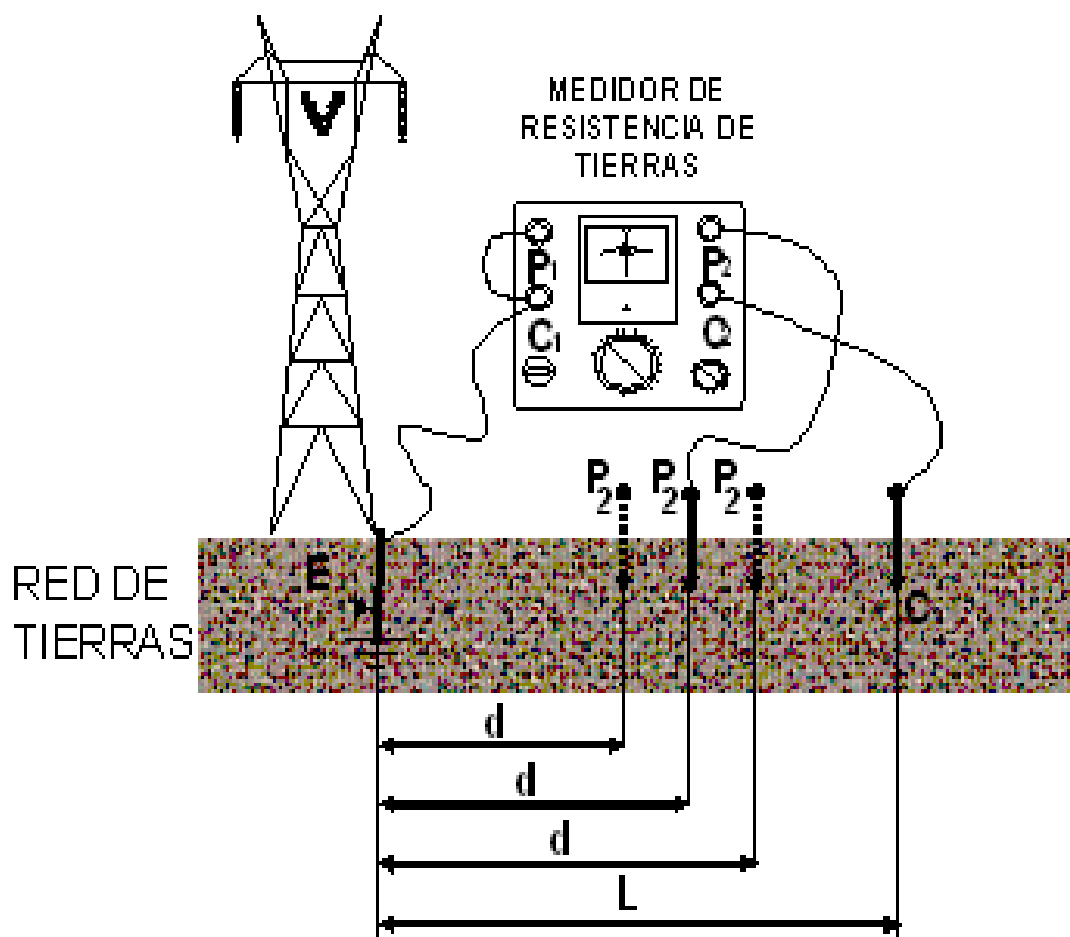


Figura 2.17
Método de medición de resistencia por caída de potencial

2.5.2. Pasos a seguir para la medición de la resistencia de un electrodo

1. Desconectar del sistema de puesta a tierra en estudio todos los componentes que lo estén.
2. Conectar el equipo de medición a la barra o electrodo en cuestión.

3. Colocar el electrodo de corriente a una distancia conocida de la barra o electrodo bajo prueba.
4. Realizar varias mediciones de resistencia para diferentes ubicaciones del electrodo de potencial, sin mover el electrodo de corriente (el electrodo bajo estudio y los electrodos de prueba deben estar en línea recta).
5. Graficar la curva obtenida de resistencia en función de la distancia de separación entre el electrodo bajo estudio y el electrodo de potencial.
6. Repetir lo anterior hasta tener una curva con una porción plana, esta parte plana u horizontal nos indica la resistencia real (R_t) 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).

En general, basados en numerosas pruebas, se utiliza una distancia entre el electrodo bajo estudio y el electrodo de corriente igual a cuatro o cinco veces la longitud de la máxima dimensión del electrodo bajo prueba.

En el caso de un área pequeña o de un electrodo simple, se puede colocar el electrodo de corriente a unos 30 metro del electrodo del electrodo bajo estudio (si el espacio permite llevar el electrodo de corriente a esa distancia) ya que a esta distancia se presume despreciable la influencia de uno respecto al otro. El electrodo de potencial se coloca a media distancia y se inicia el proceso de medición de resistencia como se describió anteriormente.

En cuanto a la distancia optima para el electrodo de potencial para hallar el punto en que se estabiliza la curva de resistencia en función de la distancia del electrodo de potencial respecto al de tierra, se tiene que generalmente este punto de equilibrio se encuentra al 62% de la de la distancia entre el electrodo de puesta a tierra bajo prueba y el electrodo de corriente; por lo que el método de caída de potencial también se conoce como el método del 62%.

CAPITULO III

MATERIALES Y EQUIPO PARA PUESTA A TIERRA

3.1. Electrodo de puesta a tierra

3.1.1. Tipos y configuraciones de electrodos de tierra

Para realizar un sistema de puesta a tierra se necesitan electrodos de tierra, los cuales existen de muchos tipos, algunos mejores que otros en ciertas características como el costo, entre otras.

Cuando se instala un electrodo de tierra, es común tener un registro, el cual puede ser de un pedazo de un tubo de albañal o bien, construir un registro. El objetivo de tener este registro es para poder ubicar el lugar donde se encuentra con facilidad y para que después de un cierto tiempo se le pueda dar mantenimiento (el uso de un registro es opcional).

3.1.1.1. Tipos de electrodos

Como se mencionaba anteriormente los electrodos de tierra se pueden encontrar en diferentes tamaños, formas, y con diferentes características. A continuación se describen los tipos de electrodos más comunes:

a) Varilla Copperweld

Esta varilla es una de las más usadas, ya que es de bajo costo de material. Este tipo de electrodo esta hecho de acero y recubierto de una capa de cobre, su longitud es de 3.05 metros y un diámetro de 16 milímetros. Esta varilla se debe enterrar en forma vertical y a una profundidad de por lo menos 2.4 metros, esto por norma (figura 3.1).

También por norma se acepta que la varilla vaya enterrada en forma horizontal, siempre y cuando sea en una zanja de mínimo 80cm de profundidad, pero no es muy recomendable.

La varilla copperweld no tiene mucha área de contacto, pero sí una longitud considerable, con la cual es posible un contacto con capas de tierra húmedas, lo cual se obtiene un valor de resistencia bajo.

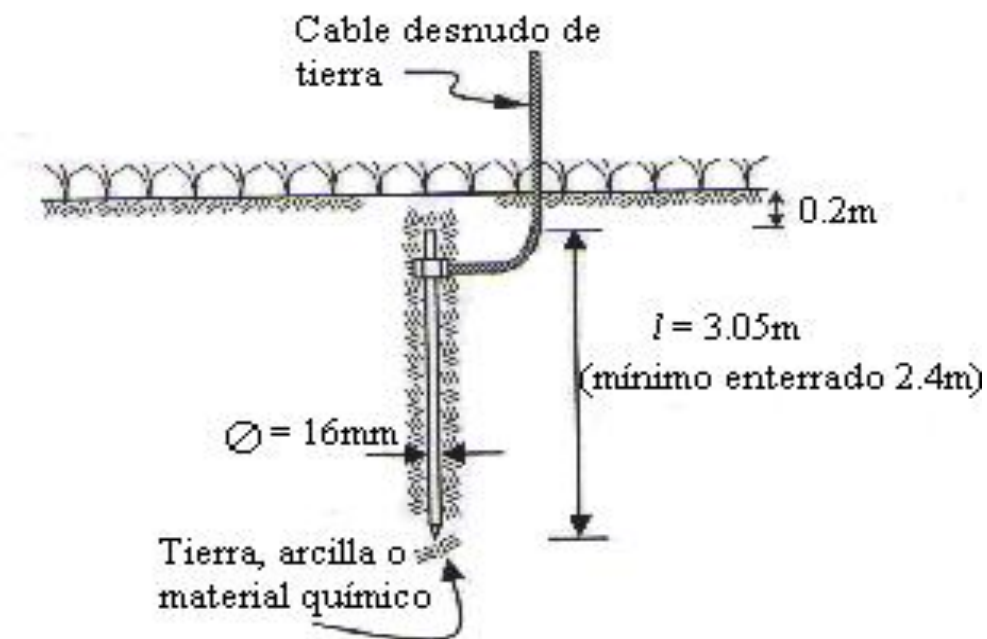


Figura 3.1

Electrodo de tierra tipo varilla Copperweld

b) Varilla o tubería

Este tipo de electrodo de tierra tiene un área de contacto más grande que la varilla copperweld, por lo que no necesita mucha longitud. Este electrodo se forma por un perfil de acero galvanizado, y puede ser en forma de cruz, de ángulo recto o en te (figura 3.2).

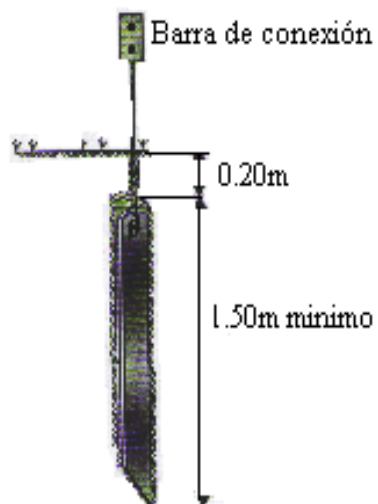


Figura 3.2

Picas o Jabalinas

c) Rehilete

Este electrodo se forma de dos placas de cobre cruzadas, las cuales van soldadas. Este tipo de electrodo es bueno para terrenos donde es difícil excavar, ya que tiene mucha área de contacto (figura 3.3).



Figura 3.3

Electrodo rehilete

d) Placa

Debido a que este electrodo tiene una gran área de contacto es recomendado en terrenos que tengan alta resistividad. Según el artículo 250-83(d) debe tener un área de por lo menos 2000cm^2 y un espesor mínimo de 6.4mm en materiales ferrosos y mínimo de 1.52mm en materiales no ferrosos (figura 3.4).

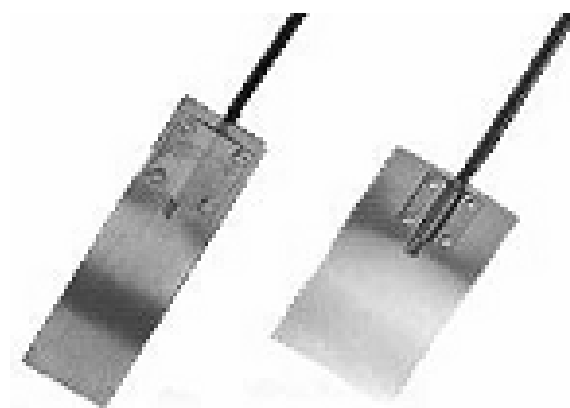
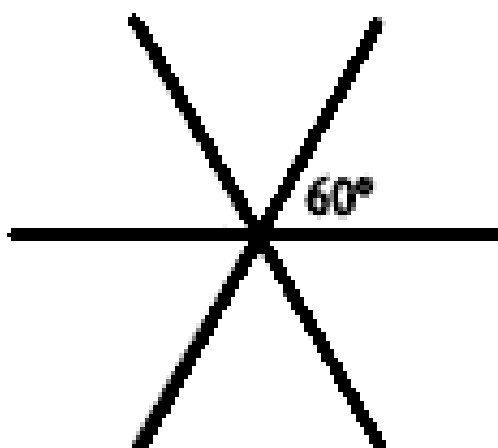


Figura 3.4

Electrodo placa

e) Electrodo en estrella

Este tipo de electrodo se puede hacer con cable de cobre desnudo con ramificaciones de 60° de ángulo. Estos electrodos se utilizan en el campo, ya que por la longitud del cable se obtiene un valor de resistencia menor (figura 3.5).

**Figura 3.5****Electrodo en estrella****f) Electrodo de anillos**

Este electrodo consiste en una espira de cable de cobre desnudo, con un diámetro mínimo de 33.6mm² (2 AWG) y una longitud mínima de 6m en contacto con la tierra, también el artículo 250-81(d) establece que debe tener una profundidad de por lo menos 80cm, así como también dice que se le pueden conectar electrodos. Estos anillos de tierra se emplean frecuentemente circundando una fábrica o un sitio de comunicaciones, para proveer un plano equipotencial alrededor de edificios y equipos (figura 3.6).

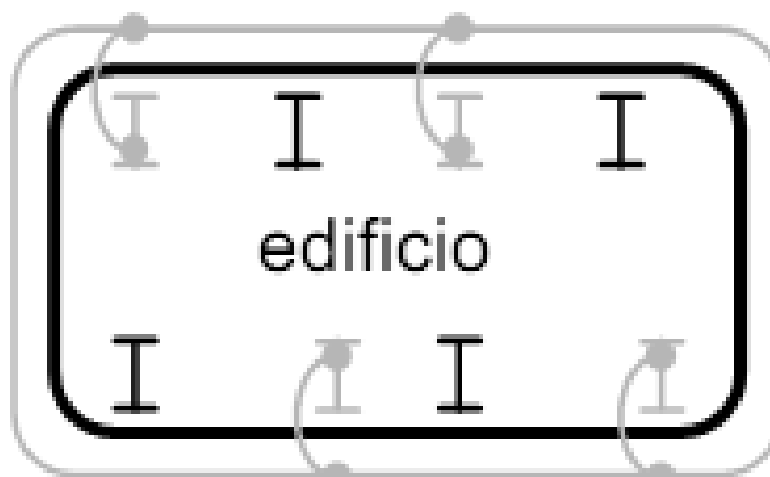


Figura 3.6

Electrodo de anillos

g) Malla

La malla se hace armando una red de conductores de cobre desnudos, esta malla se puede mejorar con algunos electrodos. Esta malla es muy utilizada en las subestaciones eléctricas, ya que reduce el riesgo de descargas (figura 3.7).

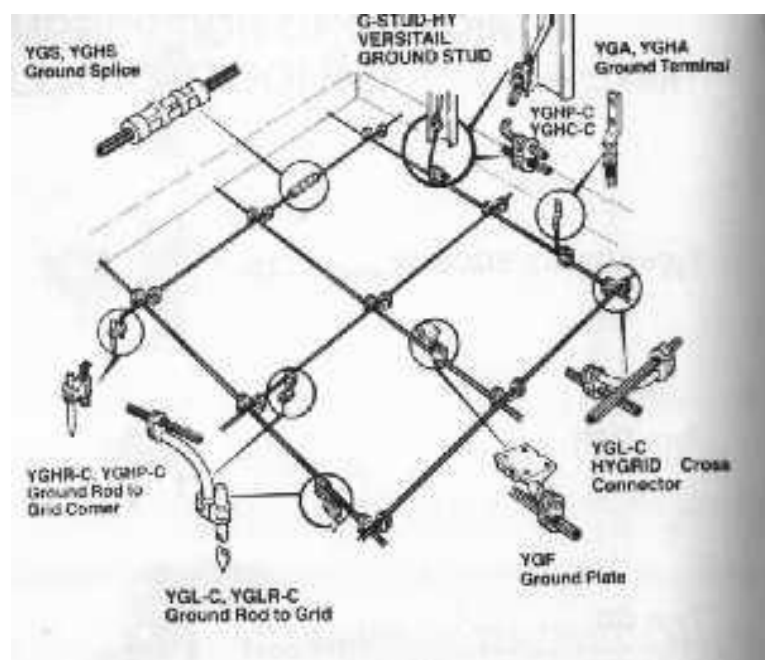


Figura 3.7

Malla

h) Placa estrellada.

Este tipo de electrodo es una placa que tiene varias puntas en su contorno, esta se conecta por medio de una barra atornillable. Su principal ventaja es que ayuda a que se disipe la energía a través de sus puntas.

i) Electrodo de varillas de hierro o acero.

Prácticamente este electrodo son las varillas que se aprovechan en la construcción de algún edificio, las varillas deben tener por lo menos 16mm de diámetro. Las varillas de acero inoxidable inferiores a 16 mm de diámetro, las de metales no ferrosos o sus equivalentes, deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 13 mm.

j) Electrodo de tubo metálico.

Este tipo de electrodo puede ser la tubería metálica del agua. El diámetro debe ser de mínimo 19mm, si el tubo es de acero o hierro tiene que tener una cubierta de otro metal para que lo proteja de la corrosión, la tubería debe estar enterrada por lo menos 3m.

k) Electrodo empotrado en concreto.

Este tipo de electrodo según el artículo 250-81(c) se debe encontrar en una cimentación que este enterrada y tenga una longitud de por lo menos 6m, con varillas desnudas con 13mm de diámetro mínimo. El electrodo debe estar incrustado en concreto como mínimo 5 cm (figura 3.8).

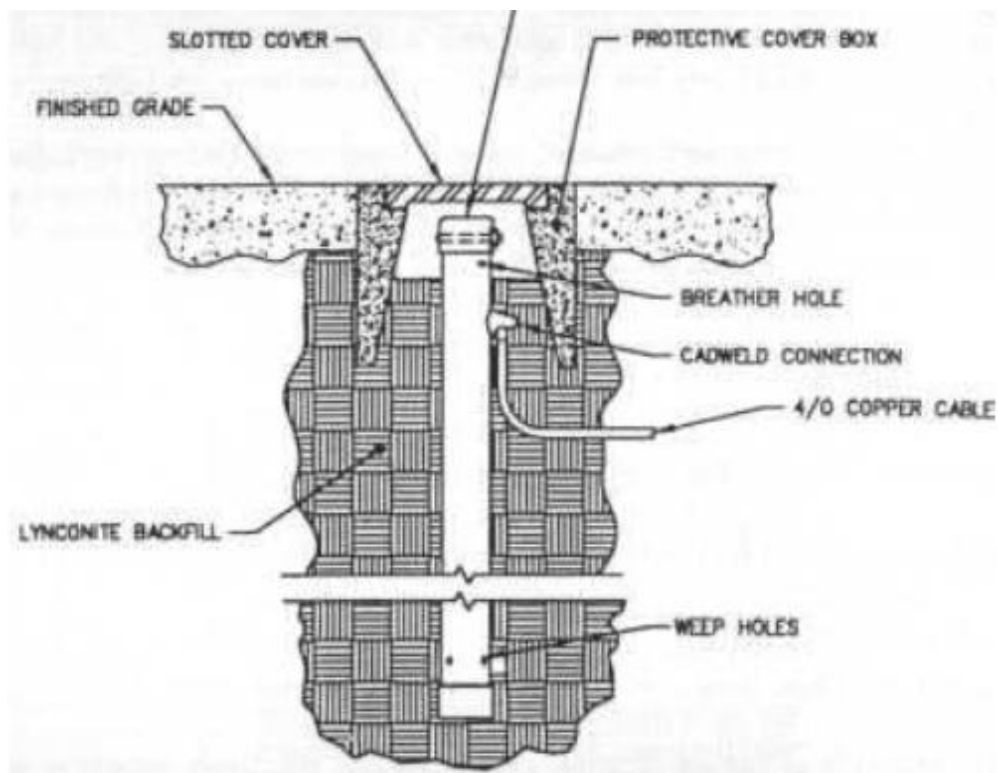


Figura 3.8

Electrodo empotrado en concreto

l) Electrodo de aluminio.

Los electrodos de aluminio según el artículo 250-83 (e) no están permitidos, ya que el aluminio se corroe rápidamente al estar en contacto con la tierra.

m) Electrodo horizontal o contra-antena.

El electrodo horizontal es un conductor de cobre desnudo enterrado de forma horizontal en una zanja de 50cm mínimo de profundidad, se pueden hacer varias configuraciones, pero la más utilizada es la línea recta. Su principal inconveniente es que la excavación es muy costosa.

n) Electrodo profundo.

Este tipo de electrodo no es más que una varilla copperweld unida a un conductor de cobre desnudo de gran longitud. Son utilizados en terrenos donde haya mucha roca, se hace una perforación vertical profunda hasta encontrar las capas húmedas de la tierra, ya que la humedad aumenta la conductividad.

o) Electrodo en espiral.

El electrodo en espiral es un cable de cobre desnudo en espiral de diferentes diámetros y enterrados a diferentes profundidades para hacer contacto con las diferentes capas de la tierra.

p) Electrodo químicos.

Los electrodos químicos son aquellos electrodos a los que se les adiciona algún compuesto químico para aumentar la conductividad y de esta forma disminuir el valor de resistencia.

3.1.2. Naturaleza de los electrodos

Los electrodos pueden ser artificiales o naturales. Se entiende por electrodos artificiales los establecidos con el exclusivo objeto de obtener la puesta a tierra, y por electrodos naturales las masas metálicas que puedan existir enterradas.

Para las puestas a tierra se emplearan principalmente electrodos artificiales. No obstante los electrodos naturales que existirán en la zona de una instalación y que presenten y aseguren un buen contacto permanente con el terreno, pueden utilizarse bien solos o conjuntamente con otros electrodos artificiales.

En general, se puede prescindir de éstos cuando su instalación presente serias dificultades y cuando los electrodos naturales cumplan los requisitos anteriormente señalados con sección suficiente y la resistencia de tierra que se obtenga con los mismos, presente un valor adecuado.

3.1.2.1. Constitución de los electrodos artificiales

Los electrodos podrán estar constituidos por:

Electrodos simples constituidos por barras, tubos, placas, cables, pletinas u otros perfiles.

- Anillos o mallas metálicas constituidos por elementos indicados anteriormente o por combinaciones de ellos.

Los electrodos serán de metales inalterables a la humedad y a la acción química del terreno, tal como el cobre, el hierro galvanizado, hierro sin galvanizar con protección catódica o fundición de hierro. Para este último tipo de electrodos, las secciones mínimas serán el doble de las secciones mínimas que se indican para los electrodos de hierro galvanizados.

Sólo se admite los metales ligeros, cuando sus resistencias a la corrosión son netamente superiores a la que presentan, en el terreno que se considere, el cobre o el hierro galvanizado.

3.1.2.2. Constitución de los electrodos naturales

Los electrodos naturales puedan estar constituidos por:

a) Una red extensa de conducciones metálicas enterradas, siempre que la continuidad de estas conducciones quede perfectamente asegurada, y en el caso de que las conducciones pertenezcan a una distribución pública o privada, haya acuerdo con los distribuidores correspondientes. Se prohíbe utilizar como electrodos las canalizaciones de gas, de calefacción central y las conducciones de desagüe, humos o basuras.

b) La cubierta de plomo de los cables de una red eléctrica de baja tensión enterrada, con la condición de que la continuidad de la cubierta de plomo esté perfectamente asegurada y, en el caso de que la red pertenezca a una distribución pública, haya acuerdo con el distribuidor.

c) Los pilares metálicos de los edificios, si están interconectados, mediante una estructura metálica, y enterrados a cierta profundidad.

El revestimiento eventual de hormigón no se opone a la utilización de los pilares metálicos como tomas de tierra y no modifica sensiblemente el valor de su resistencia de tierra.

3.1.3. Configuraciones de electrodos

Como ya se menciona, la varilla copperweld es el electrodo mas utilizado debido a sus características, también ya mencionadas. El objetivo de este electrodo es estar en contacto con las capas húmedas de la tierra, y para lograrlo se recomienda instalarla en forma vertical, enterrada por lo menos 2.4m (figura 3.9), con esto se debe obtener un valor de resistencia bajo, si no se logra con una varilla se pueden colocar mas varillas conectadas por medio de conductor de cobre desnudo en diferentes configuraciones y un espaciado de por lo menos la longitud del electrodo.

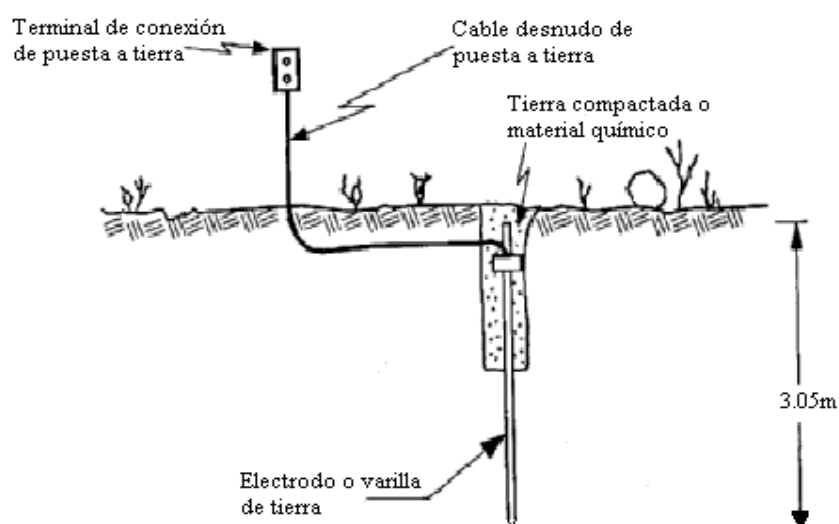


Figura 3.9

Instalación de un electrodo

Los electrodos que se unan eléctricamente se deben considerar como un solo electrodo. Por norma la separación mínima entre los electrodos debe ser de 1.83m.

En la tabla 3.1 se muestra el porcentaje en que se disminuye el valor de resistencia de acuerdo a diferentes configuraciones de electrodos.

Tabla 3.1.

Porcentaje de reducción del valor resistivo en función del tipo de configuración

Numero de electrodos	Valor original	El valor original se reduce al
Un solo electrodo	100%	
Dos electrodos en línea		55%
Tres electrodos en línea		38%
Tres electrodos en triángulo		35%
Cuatro electrodos en simetría		28%
Ocho electrodos en simetría		16%

3.1.3.1. Anillo de tierra

Un anillo de tierra consiste en un conductor de cobre desnudo, de sección transversal no menor al calibre 2 AWG y de longitud no menor a 6 m enterrado a una profundidad de 800 mm y, que rodee al edificio o estructura.

Estos anillos de tierra se emplean frecuentemente circundando una fábrica o un sitio de comunicaciones, para proveer un plano equipotencial alrededor de edificios y equipos.

3.1.3.2. Mallas

La NOM requiere de un sistema enmallado de tierra con múltiples electrodos y conductores enterrados, cuando están involucradas tensiones y corrientes eléctricas muy altas, con el fin de minimizar los riesgos al personal en función de la tensión eléctrica de paso y de contacto [921-18].

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

El cable que forma el perímetro exterior de la malla debe ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo eléctrico de la subestación o planta generadora. Con ello, se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y terminales cercanas [921-25).

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

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

Los conectores empleados en la malla del sistema de tierras de una subestación deben ser de tipo de compresión o soldables.

3.2. Conectores y sus accesorios

Los conectores son los elementos encargados de unir a la red de tierras. Los más utilizados en los sistemas de tierra son principalmente de tres tipos:

- Conectores atornillados
- Conectores a presión.
- Conectores soldados

Los conectores, independientemente de su tipo, deben poder soportar la corriente de la red de tierra en forma continua.

3.2.1. Conectores atornillados

Los conectores de tipo atornillados, se fabrican en materiales como bronce con alto contenido de cobre, y formando dos piezas que se unen por medio de tornillos. Cuyo material es de bronce con alto contenido de silicio, lo que le aporta una gran resistencia a la corrosión y de tipo mecánica. El bronce se utiliza, especialmente porque es un material no magnético, proporcionando una conducción segura de las descargas atmosféricas, que son de alta frecuencia.

En la figura 3.10, se pueden observar algunos tipos de conectores atornillados.

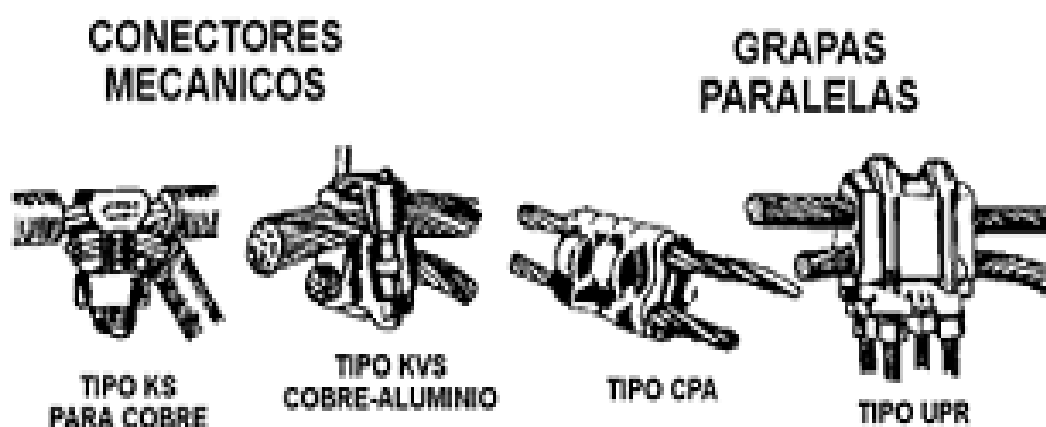
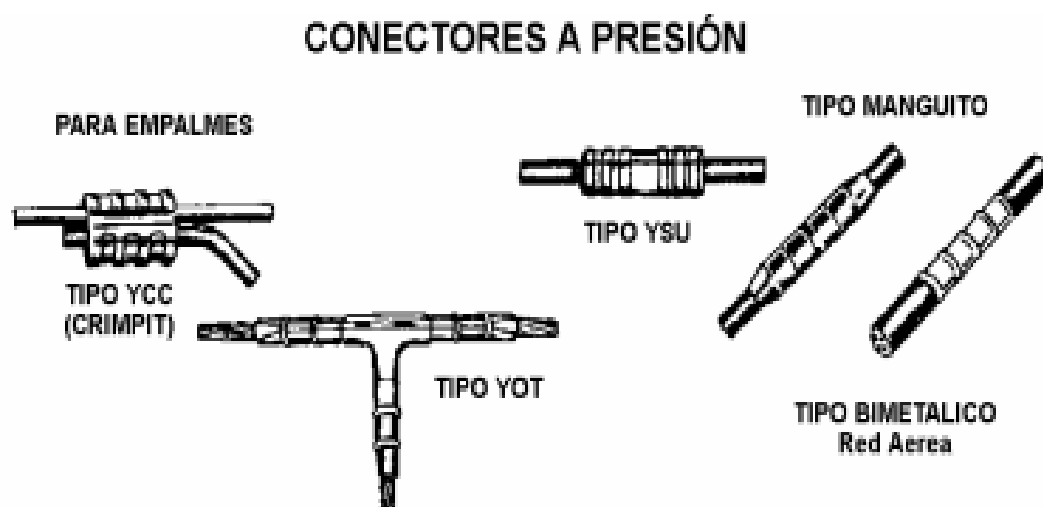


Figura 3.10
Conectores atornillados

3.2.2 Conectores a presión

Por otra parte, los conductores a presión son económicos y seguros (siempre que sean apretados con la fuerza necesaria), por lo que se usan muy frecuentemente, proporcionando un buen contacto y una buena relación costo beneficio.



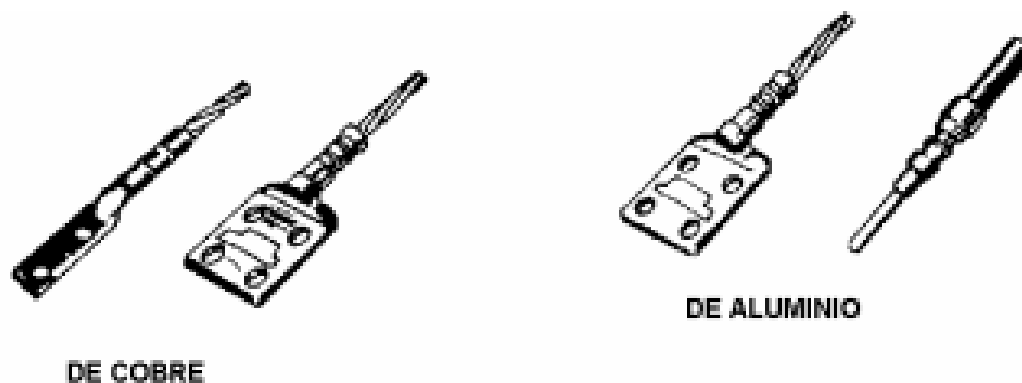


Figura 3.11
Conectores a presión

3.2.3. Conectores soldados

Los conductores soldados (cadweld) son los más económicos y seguros, por lo que se utilizan con gran frecuencia.

3.2.3.1 Soldadura exotérmica

Uno de los principales problemas de los sistemas de puesta a tierra, ha sido siempre el incremento de la resistencia de contacto por causa de empalmes defectuosos que se dan entre conductores, conductores y barras copperweld, o entre conductores y superficies.

El incremento de la resistencia por estas uniones se acrecienta en sólo pocos meses (5 ó 6), en un 60% o más debido a las sulfataciones que se produce por el paso de corriente a través de estos empalmes.

Para estos problemas de conexiones se han investigado distintas soluciones, siendo la más óptima la soldadura exotérmica. Las conexiones eléctricas por soldado exotérmico es un proceso en el que se hace un empalme eléctrico al verter una aleación súper calentada de cobre fundido en el interior de un recinto en el cual se encuentran alojados los conductores a ser unidos.

Esta aleación de cobre fundido, contenida y controlada dentro de un molde de grafito especialmente diseñado para este fin, hace que los conductores se fundan. Una vez enfriados, los conductores se encuentran empalmados mediante una soldadura de fusión.

Cuando se realizan conexiones eléctricas mediante soldadura exotérmica y son efectuadas debidamente, presentarán propiedades eléctricas muy similares a las conexiones soldadas. Debido a que este proceso es una soldadura molecular cuyo material utilizado tiene el mismo punto de fusión del cobre y cuando la soldadura está terminada su sección transversal es dos veces mayor que la de los conductores que están siendo empalmados, esto nos ofrece grandes ventajas tanto económicas así como técnicas.

La figura 3.12 nos muestra algunos tipos de uniones.



Figura 3.12
Tipos de soldaduras

3.2.4. Registros

La sección (250-117) dice textualmente que "las abrazaderas u otros accesorios para puesta a tierra, deben estar aprobados para su uso general sin protección, o protegerse contra daño físico con una cubierta protectora.", y la sección (250-112) menciona que la conexión debe ser accesible, siempre que no esté en un electrodo hundido, empotrado o enterrado.

Pero en el caso de las subestaciones, la misma norma especifica que deben hacerse mediciones periódicas en los registros para comprobar que los valores del sistema de tierras se ajustan a los valores de diseño. Por ello, se recomienda dejar registros en los electrodos de varilla (figura 3.13).

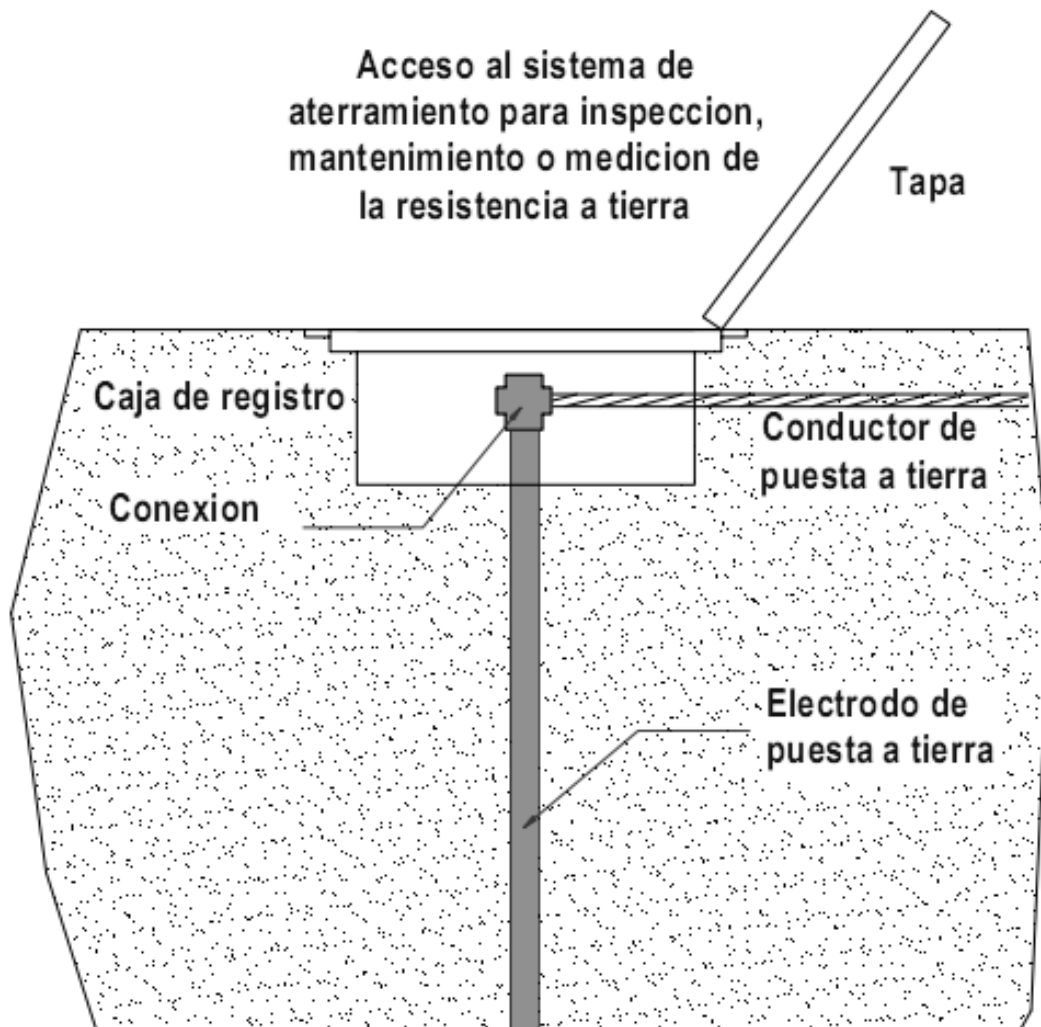


Figura 3.13
Registro

3.3. Determinación del calibre del conductor del sistema de tierras

De acuerdo a la NOM-001-SEDE-2005.

250-91. Materiales. Los materiales del conductor del electrodo de puesta a tierra se especifican en los siguientes incisos:

a) Conductor del electrodo de puesta a tierra. El conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser de cobre o aluminio. El material elegido debe ser resistente a la corrosión que se pueda producir en la instalación, y debe estar adecuadamente protegido contra la corrosión. El conductor debe ser macizo o cableado, aislado, forrado o desnudo y debe ser de un solo tramo continuo, sin empalmes ni uniones.

b) Tipos de conductores para la puesta a tierra de equipo. El conductor de puesta a tierra de equipo tendido con los conductores del circuito o canalizado con ellos, debe ser de uno de los siguientes tipos o una combinación de varios de ellos:

(1) un conductor de cobre u otro material resistente a la corrosión. Este conductor debe ser alambre o cable, aislado, cubierto o desnudo y formar un cable o barra de cualquier forma;

(2) un tubo (conduit) metálico tipo pesado;

(3) un tubo (conduit) metálico tipo semipesado;

(4) un tubo (conduit) metálico tipo ligero;

- (5) un tubo (conduit) metálico flexible, si tanto el tubo (conduit) como sus accesorios están aprobados para puesta a tierra;
- (6) la armadura de un cable de tipo AC;
- (7) el blindaje de cobre de un cable con blindaje metálico y aislamiento mineral;
- (8) el blindaje metálico de los conductores con blindaje metálico y los conductores de puesta a tierra que sean cables de tipo MC;
- (9) canalizaciones prealambradas, tal como se permite en 365-2(a);
- (10) otras canalizaciones metálicas con continuidad eléctrica, aprobadas para utilizarse para puesta a tierra.

c) Electrodo suplementarios de puesta a tierra. Se permite conectar electrodos suplementarios de puesta a tierra a los conductores de puesta a tierra de equipo, especificados en 250-91(b), pero el terreno natural no debe utilizarse como el único conductor de puesta a tierra de equipo.

250-92. Instalación. Los conductores de puesta a tierra deben instalarse como se especifica en los siguientes incisos:

a) Conductor del electrodo de puesta a tierra. Un conductor del electrodo de puesta a tierra o su envolvente debe sujetarse firmemente a la superficie sobre la que va instalado. Un conductor de cobre o aluminio de 21,2 mm² (4 AWG) o superior debe protegerse si está expuesto a daño físico severo. Se puede llevar un conductor de puesta a tierra de 13,3 mm² (6 AWG) que no esté expuesto a daño físico, a lo largo de la superficie del edificio sin tubería o protección metálica, cuando esté sujeto firmemente al edificio.

Si no, debe ir en tubo (conduit) metálico tipo pesado, semipesado, ligero, en tubo (conduit) no metálico tipo pesado o un cable armado. Los conductores de puesta a tierra de tamaño nominal inferior a 13,3 mm² (6 AWG) deben alojarse en tubo (conduit) metálico tipo pesado, semipesado, ligero, en tubo (conduit) no metálico tipo pesado o en cable armado.

No deben utilizarse como conductores de puesta a tierra, conductores aislados o desnudos de aluminio que estén en contacto directo con materiales de albañilería o terreno natural o si están sometidos a condiciones corrosivas. Cuando se utilicen a la intemperie, los conductores de puesta a tierra de aluminio no deben instalarse a menos de 45 cm del terreno natural.

b) Envolventes para conductores del electrodo de puesta a tierra. Las envolventes metálicas del conductor del electrodo de puesta a tierra deben ser eléctricamente continuas desde el punto de conexión a los envolventes o equipo hasta el electrodo de puesta a tierra, y deben estar sujetas firmemente a las abrazaderas o herrajes de tierra.

Las envolventes metálicas que no sean continuas físicamente desde el envoltorio o equipo hasta el electrodo de puesta a tierra, se deben hacer eléctricamente continuas mediante la unión de sus dos extremos al conductor de puesta a tierra. Cuando se utilice una canalización como protección del conductor de puesta a tierra, su instalación debe cumplir los requisitos del Artículo correspondiente a las canalizaciones.

c) Conductor de puesta a tierra de equipo. Un conductor de puesta a tierra de equipo se debe instalar como sigue:

1) Cuando consista en una canalización, un soporte tipo charola para cables, armadura o forro de cables o cuando sea un conductor dentro de una canalización o cable, debe instalarse cumpliendo las disposiciones aplicables de esta norma utilizando accesorios para uniones y terminales que estén aprobados para utilizarlos con el tipo de canalización o cable utilizados.

Todas las conexiones, uniones y accesorios deben fijarse firmemente con los medios adecuados.

2) Cuando haya un conductor de puesta a tierra de equipo independiente, como establece la Excepción de 250-50(a) y 250-50(b) y la Excepción 2 de 250-57(b) debe instalarse de acuerdo con lo indicado en 250-92(a) en lo que respecta a las limitaciones del aluminio y a la posibilidad de daño físico.

250-93. Tamaño nominal del conductor del electrodo de puesta a tierra para c.c. En los siguientes incisos se fijan los tamaños nominales de los conductores del electrodo de puesta a tierra de una instalación de c.c.

a) No debe ser de tamaño nominal inferior al del neutro. Cuando un sistema eléctrico de c.c. consista en un circuito balanceado de tres conductores o un devanado de equilibrio con protección contra sobrecorriente, como se establece en 445-4(d), el conductor del electrodo de puesta a tierra no debe ser de tamaño nominal inferior al del neutro.

b) No debe ser de tamaño nominal inferior al del conductor más grande. En instalaciones de c.c. distintas a las del anterior inciso (a), el conductor del electrodo de puesta a tierra no debe ser de tamaño nominal inferior al del conductor de mayor tamaño nominal del suministro de energía.

c) No debe ser inferior a 8,37 mm² (8 AWG). En ningún caso el conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser inferior a 8,37 mm² (8 AWG) de cobre o de 13,3 mm² (6 AWG) de aluminio.

250-94. *Tamaño nominal del conductor del electrodo de puesta a tierra en instalaciones de c.a.* El tamaño nominal del conductor del electrodo de puesta a tierra de una instalación de c.a. puesta o no puesta a tierra, no debe ser inferior a lo especificado en la Tabla 250-94 de la NOM.

TABLA 250- 94.- Conductor del electrodo de tierra de instalaciones de c.a.

Tamaño nominal del mayor conductor de entrada a la acometida o sección equivalente de conductores en paralelo mm ² (AWG o kcmil)		Tamaño nominal del conductor al electrodo de puesta a tierra mm ² (AWG o kcmil)	
Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
33,6 (2) o menor	53,5 (1/0) o menor	8,37 (8)	13,3 (6)
42,4 o 53,5 (1 o 1/0)	67,4 o 85,0 (2/0 o 3/0)	13,3 (6)	21,2 (4)
67,4 o 85,0 (2/0 o 3/0)	4/0 o 250 kcmil	21,2 (4)	33,6 (2)
Más de 85,0 a 177 (3/0 a 350)	Más de 127 a 253 (250 a 500)	33,6 (2)	53,5 (1/0)
Más de 177 a 304,0 (350 a 600)	Más de 253 a 456 (500 a 900)	53,5 (1/0)	85,0 (3/0)
Más de 304 a 557,38 (600 a 1100)	Más de 456 a 887 (900 a 1750)	67,4 (2/0)	107 (4/0)
Más de 557,38 (1100)	Más de 887 (1750)	85,0 (3/0)	127 (250)

250-95. Tamaño nominal de los conductores de puesta a tierra de equipo. El tamaño nominal de los conductores de puesta a tierra de equipo, de cobre o aluminio, no debe ser inferior a lo especificado en la Tabla 250-95. Cuando haya conductores en paralelo en varias canalizaciones o cables, el conductor de puesta a tierra de equipo, cuando exista, debe estar instalado en paralelo.

Cada conductor de puesta a tierra de equipo instalado en paralelo debe tener un tamaño nominal seleccionado sobre la base de la corriente eléctrica nominal del dispositivo de protección contra sobrecorriente que proteja los conductores del circuito en la canalización o cable, según la Tabla 250-95.

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

Cuando sólo haya un conductor de puesta a tierra de equipo con varios circuitos en el mismo tubo (conduit) o cable, su tamaño nominal debe seleccionarse de acuerdo con el dispositivo de sobrecorriente de mayor corriente eléctrica nominal de protección de los conductores en el mismo tubo (conduit) o cable.

Si el dispositivo de sobrecorriente consiste en un interruptor automático de disparo instantáneo o un protector de motor contra cortocircuitos, como se permite en 430-52, el tamaño nominal del conductor de puesta a tierra de equipo se puede seleccionar de acuerdo con la capacidad nominal del dispositivo de protección del motor contra sobrecarga, pero no debe ser inferior a lo especificado en la Tabla 250-95 de la NOM.

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

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

CAPITULO IV

Ejemplo de Puesta a Tierra

Puesta a Tierra de un Pararrayos en un Edificio

4.1. Equipo Propuesto

	Para una toma de tierra
Electrodos de Puesta Tierra	1 Varilla copperweld 16 mm diam. (5/8" x 3.05 m) 1 Conector para la varilla
Intensificador de Tierras	2 Sacos de GEM de 11 Kg cada uno. 1 galón de electrolito
Conductores de Cobre	5 m mínimo de cable desnudo #2/0 AWG
Conector mecánico	1 conector para varilla 5/8"
Registro de fibra de vidrio	1 registro con tapa de 28 cm longitud x 16,2 cm ancho

4.1.1. Intensificador de Tierras

GAP / GEM

Al aplicar el químico intensificador para bajar la resistencia del terreno correctamente, se asegura confiablemente de:

- El mejor rendimiento costo/beneficio
- Brindar seguridad personal
- Proporcionar baja resistencia todo el año
- Larga vida útil, garantizado por más de 20 años
- Cumplir con especificaciones de CFE
- Libre de mantenimiento no requiere de agua
- Ecológico, no contamina el subsuelo
- Resulta muy sencilla su instalación
- Evita la corrosión del sistema



Figura 4.1
Intensificador de tierras

4.2. Red equipotencial de puesta a tierra

Se presenta un ejemplo de instalación que corresponde a la puesta a tierra del pararrayos de un edificio de oficinas y de una red de luminarias a lo largo de 1.5 Km.

Como elemento dispersor a tierra se proyecta una red equipotencial de puesta a tierra en el edificio de oficinas y en la red de luminaras a lo largo de los 1.5 Km mediante un conductor en cable de cobre cal. # 2/0 AWG desnudo enterrado en el perímetro del edificio con una red de doce electrodos de tierra tipo varilla coperweld de 16mm de diámetro x 3.05 m de longitud con recubrimiento de 10 milésimas de cobre electrolítico, y una red de tierras en las luminarias en cable de cobre cal. #2/0 AWG desnudo entubado y con salidas cada 40 m a un electrodo de tierra tipo varilla coperweld de 16 mm de diámetro x 3.05 m de longitud con recubrimiento de 10 milésimas de cobre electrolítico.



Figura 4.2
Varilla Copperweld

La red equipotencial, trata con un producto intensificador para bajar la resistencia eléctrica y mejorar la resistividad eléctrica de los terrenos y estabilizar la resistencia total de los electrodos evitando su desgaste corrosivo mediante el uso de un potenciador anódico, el compuesto GRAF en bolsas de 11.5 Kg, con un valor de 3.4 ohm/cm según pruebas de calidad norma C-109-ASTM (American Society for Testing and Materials).

4.3. Sistema de Puesta a Tierra Física

Estas mallas de tierras se unen equipotencialmente mediante un limitador de tensión para unir tierras sin riesgo de aumentos de potencial modelo PS 100 con una capacidad de drenado de energía de 350 V y un tiempo de respuesta de 1.2 microsegundos.



Figura 4.3
Anillo de tierras tradicional

La trayectoria del conductor bajante deberá ser lo más directa posible, con el menor número de curvas posibles, evitando la intersección, proximidad o recorrido paralelo con conductores eléctricos y de telecomunicaciones.

El extremo superior del conductor bajante deberá fijarse al mástil del pararrayos mediante un conector apropiado; el extremo inferior se conectará al sistema de puesta a tierra.

El conductor bajante se fijará al techo o pared según sea el caso, mediante gazas especialmente destinadas a este propósito, las cuales se instalarán cada 50 cms. El conductor bajante deberá protegerse contra daños mecánicos mediante una guarda protectora apropiada hasta una altura de 2.4 metros sobre el nivel del suelo.

Si la protección del edificio requiere de la instalación de dos o más pararrayos, se deberán interconectar los mástiles en la base, a nivel de techo, con un conductor igual al bajante.

Cualquier cuerpo metálico ubicado a menos de un metro del conductor bajante, deberá conectarse a éste. Se deberá instalar un elemento desconectador a dos metros y medio sobre el nivel del suelo terminado, para permitir la desconexión del conductor bajante y llevar a cabo mediciones periódicas de la resistencia del sistema de puesta a tierra. Si la estructura del edificio es metálica, el medio de desconexión se ubicará en una caja de registro en el suelo.

El sistema de puesta a tierra del pararrayos deberá interconectarse a cualquier otro sistema de puesta a tierra asociado con el edificio a ser protegido, con el fin de garantizar un sistema equipotencial.

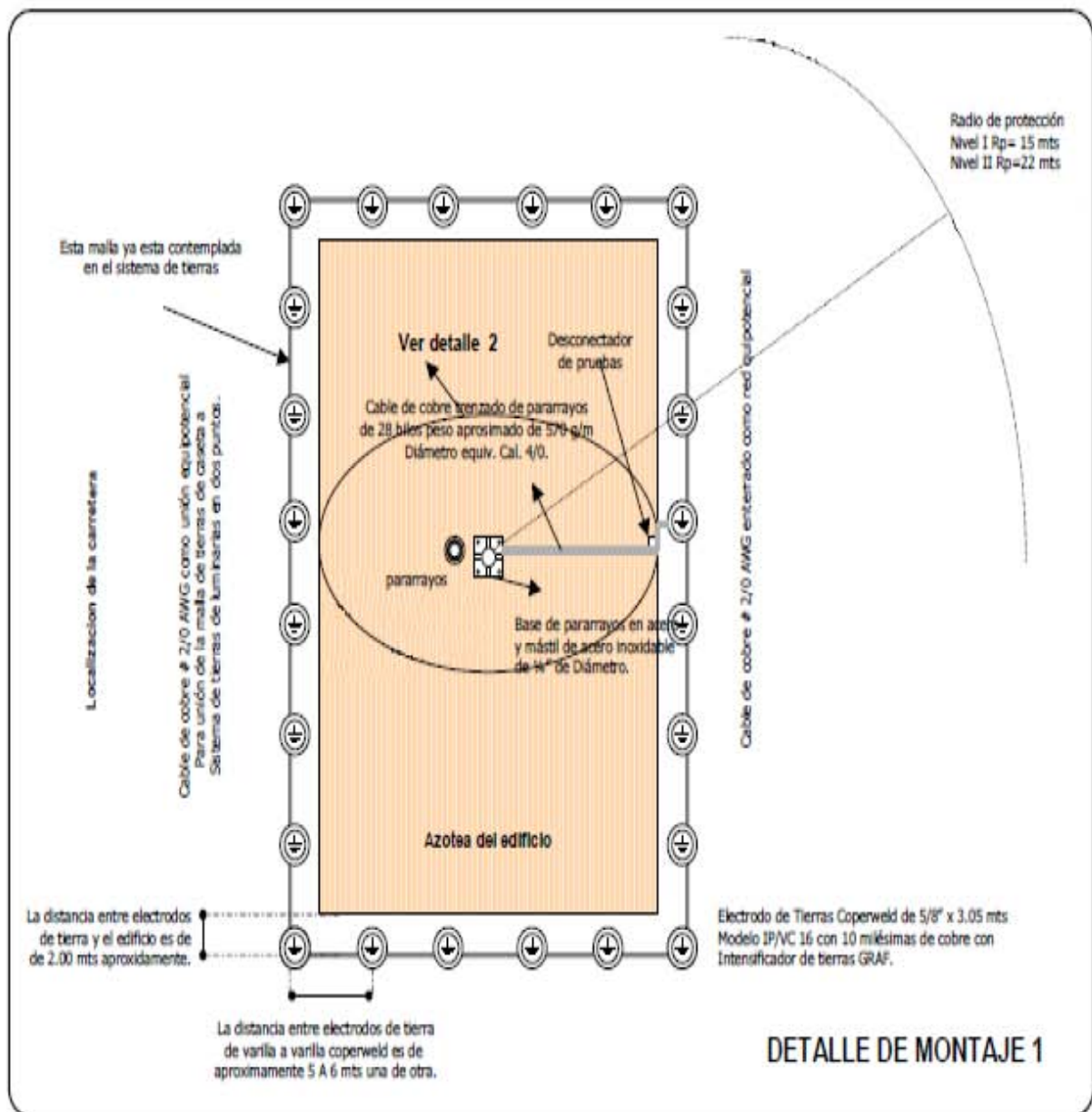
4.4. Conexiones soldables

Todas las conexiones, salvo que se indique lo contrario, serán mediante proceso de termofusión exotérmica de cobre a cobre y de cobre a acero estructural, que ha demostrado ser la mejor opción cuando la seguridad, capacidad de carga de corriente, confiabilidad y duración son críticas como en este caso en particular. No se deteriora con el paso del tiempo, se forma una adhesión molecular permanente que no se afloja, ni corroe y tolera corrientes de falla de forma repetitiva.

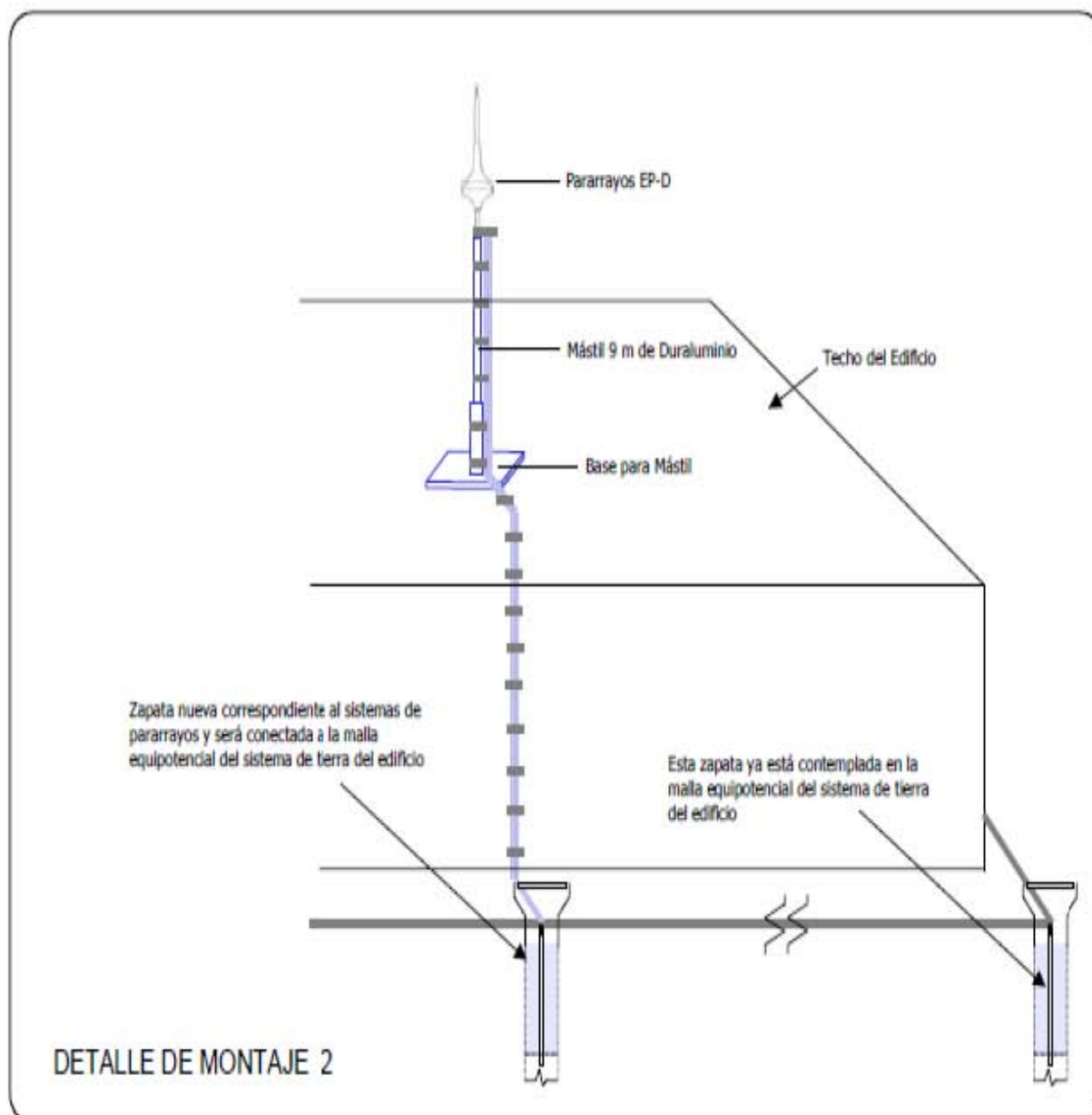


Figura 4.4
Soldadura exotérmica

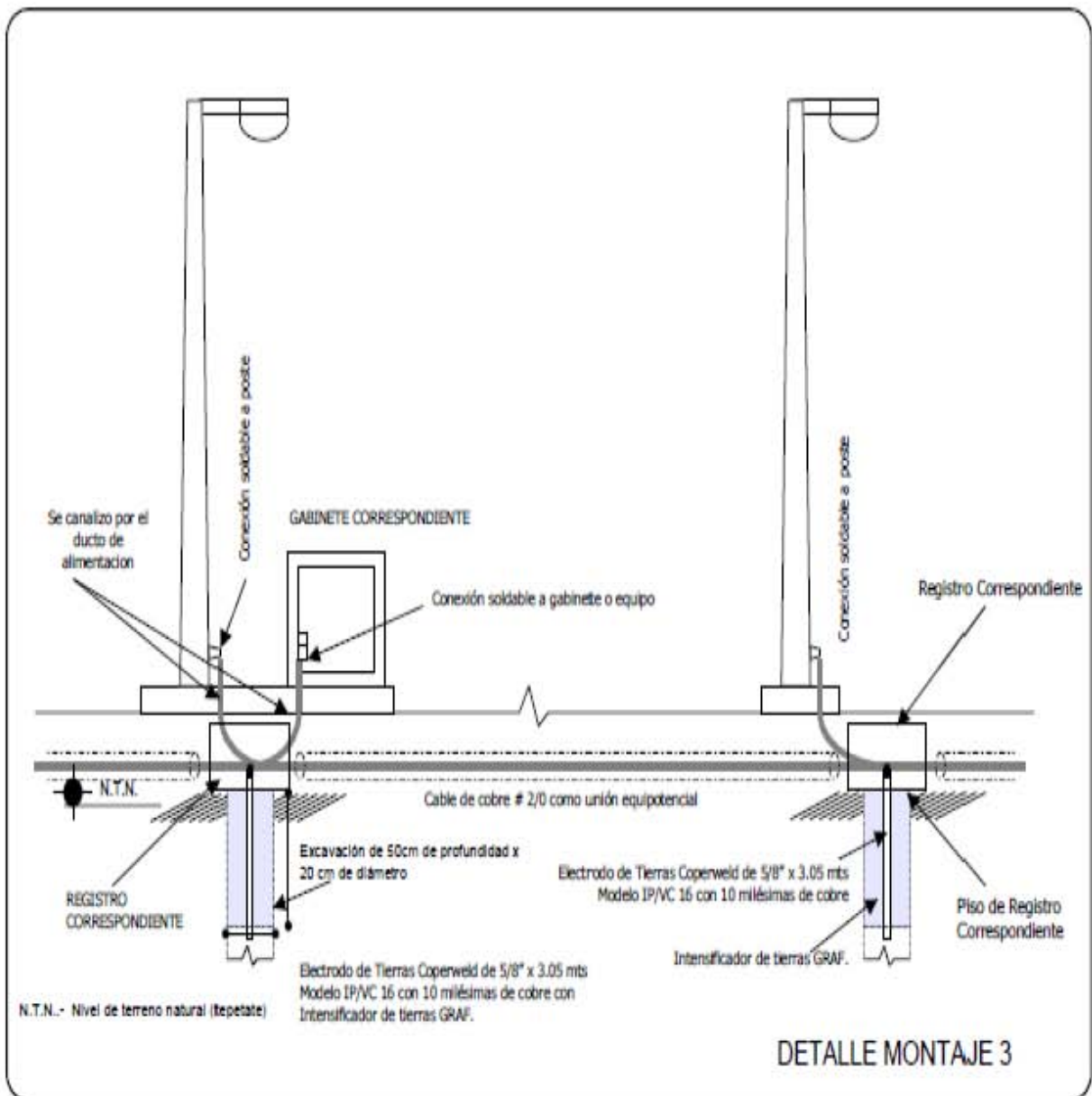
4.5. Diagrama de Instalación Pararrayos en el Edificio



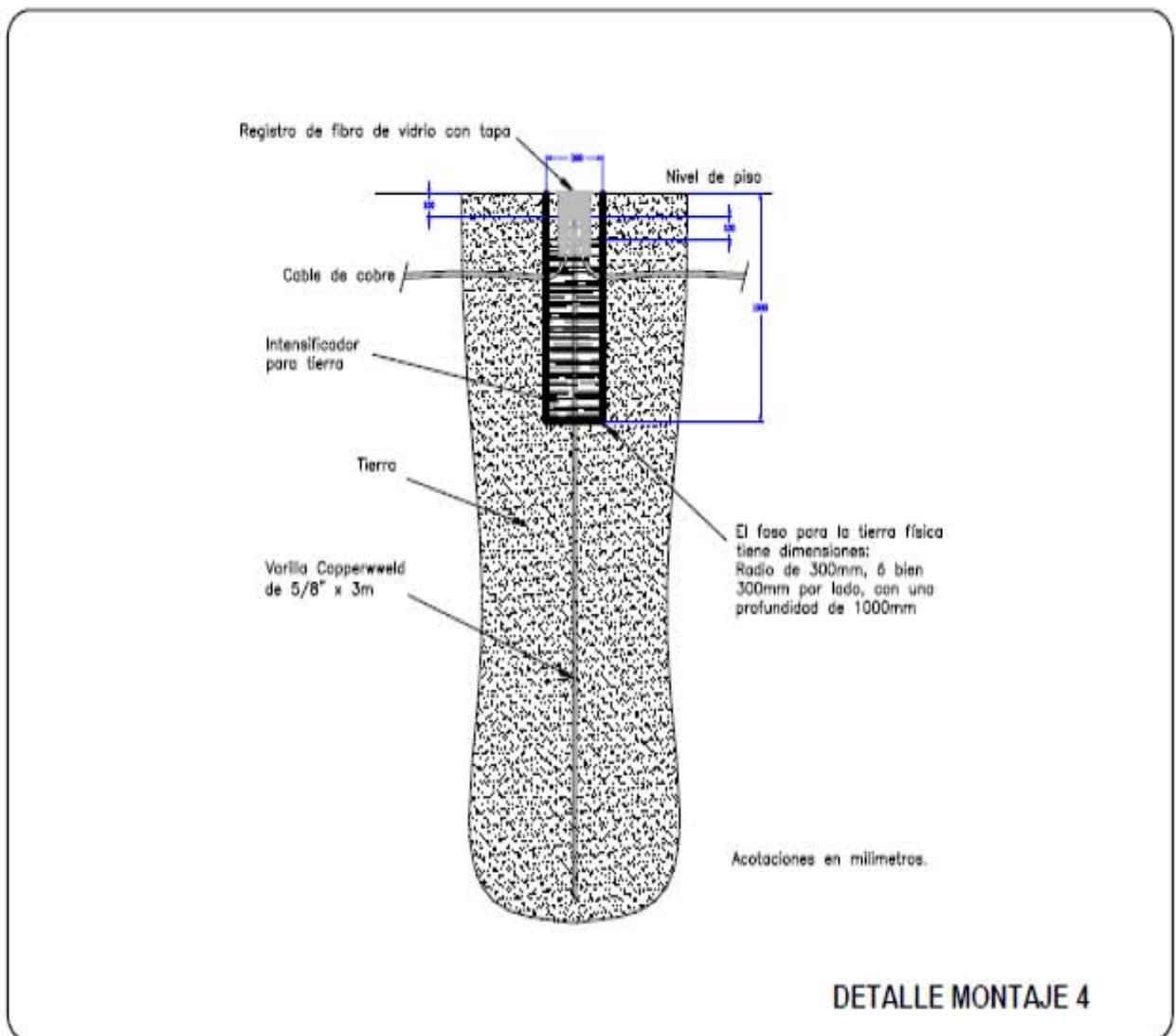
4.6. Sistema de Pararrayos



4.7. Diagrama de Instalación en la Red



4.8 Esquema del Foso de Tierra Física



4.9. Especificaciones Técnicas del Pararrayos

FICHA TÉCNICA	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS																
<p>PARARRAYOS DIPOLO</p>  <p>FOTOGRAFÍA</p>	<table border="0"> <tr> <td>Ángulo de protección:</td> <td>71 sustancial</td> </tr> <tr> <td>Barra de descarga:</td> <td>16 mm x 1.8 mts.</td> </tr> <tr> <td>Arillo de equipotencial:</td> <td>80 mm.</td> </tr> <tr> <td>Exitador toroidal:</td> <td>300 mm.</td> </tr> <tr> <td>Peso aprox.</td> <td>2.200 kg.</td> </tr> <tr> <td>Principio de operación:</td> <td>Iónico bipolarizante</td> </tr> <tr> <td>Corriente máx:</td> <td>30 000 amps</td> </tr> </table> <p>Instalación de acuerdo al método del ángulo de protección y dado que el ángulo fijo es de 70° el cono de protección del pararrayo Dipolo no tiene que tocar la estructura a proteger. Su ángulo de protección varía de acuerdo a la altura de mismo y puede elevarse con el uso de los mástiles.</p> <table border="0"> <tr> <td>ÁNGULO DE PROTECCIÓN</td> <td>MEDIDAS</td> </tr> </table>  <p>El diagrama muestra un cono de protección con ángulos de 30°, 45°, 60° y 71°. A la derecha, un diagrama de medidas indica: ARILLO EQUIPOTENCIAL, TORCHETE EXITADOR 300 mm, BARRA DESCARGA 16 MM X 1.8 MTB, y CONECTOR BUSHING.</p>	Ángulo de protección:	71 sustancial	Barra de descarga:	16 mm x 1.8 mts.	Arillo de equipotencial:	80 mm.	Exitador toroidal:	300 mm.	Peso aprox.	2.200 kg.	Principio de operación:	Iónico bipolarizante	Corriente máx:	30 000 amps	ÁNGULO DE PROTECCIÓN	MEDIDAS
Ángulo de protección:	71 sustancial																
Barra de descarga:	16 mm x 1.8 mts.																
Arillo de equipotencial:	80 mm.																
Exitador toroidal:	300 mm.																
Peso aprox.	2.200 kg.																
Principio de operación:	Iónico bipolarizante																
Corriente máx:	30 000 amps																
ÁNGULO DE PROTECCIÓN	MEDIDAS																

Conclusiones

- Un sistema de tierras debe ofrecer una trayectoria segura para disipar corrientes anormales y reducir voltajes peligrosos a niveles seguros, protegiendo el equipo eléctrico o electrónico sensible, pero como objetivo primordial del sistema de tierras es la seguridad de las personas.
- Los elementos principales de un sistema de tierras son: electrodo de puesta a tierra, conductor de puesta a tierra, punto de puesta a tierra y conector del electrodo de puesta a tierra.
- Para la instalación de un sistema de puesta a tierra, es imprescindible conocer el valor de resistividad que tiene el terreno, ya que el tipo de terreno influye en la resistencia del electrodo, y asimismo influye en la resistencia del sistema de puesta a tierra.
- El calibre del conductor requerido para un sistema de puesta a tierra debe ser el adecuado para poder soportar las altas corrientes de falla que puedan circular por dicho conductor. Para determinar el calibre de este conductor se tiene que tomar en cuenta la norma oficial mexicana para instalaciones eléctricas (NOM-001-SEDE-2005), ya que esta menciona los calibres adecuados para cada tipo de instalación de puesta a tierra.

- Las condiciones ambientales pueden deteriorar el sistema de puesta a tierra con el tiempo, por lo que se recomienda su monitoreo de vez en cuando para verificar su estado y cerciorarse de que tiene el valor de resistencia de puesta a tierra deseado. Asimismo, las condiciones ambientales modifican el valor de resistencia de puesta a tierra dependiendo de la estación en que esta se mida. Por ello, se recomienda que las mediciones regulares realizadas coincidan con diferentes estaciones del año y así asegurarse que se toman medidas en las condiciones más desfavorables.
- La puesta a tierra debe diseñarse y especificarse adecuadamente, siguiendo las recomendaciones normativas. Si alguno de estos elementos falla o no cumple su función cuando se le exige hacerlo, entonces podríamos tener consecuencias irreparables. De ahí la vital importancia de contar con un sistema de tierras.

Glosario

- **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.

- **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.

- **Contra-antena (Electrodo Horizontal)**

Conductor metálico desnudo, enterrado y tendido en forma horizontal en una sola dirección, a una profundidad y longitud variable, que sirve para drenar corrientes de descarga atmosférica o de falla.

- **Corriente a Tierra**

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

- **Electrodo de Tierra**

Cuerpo conductor o conjunto de elementos conductores agrupados y en contacto íntimo con la tierra y destinados a establecer una conexión con la misma.

- **Electrodo Vertical**

Cuerpo conductor o relleno de forma cilíndrica, enterrado y en posición vertical tal como: electrodos, tubos metálicos y mezclas de carbón.

- **Elevación del Potencial de Tierra (GPR)**

Es el máximo potencial eléctrico que una malla para tierra en una subestación puede alcanzar con relación a un punto de tierra distante, asumiendo que esté al potencial de la tierra remota.

- **Malla para Tierra**

Sistema de electrodos horizontales para tierra, que consiste de un numero 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.

- **Puesta a Tierra**

Conectar intencionalmente a la red de tierra estructuras y/o equipos.

- **Relleno**

Aportación de un material diferente al suelo natural en las inmediaciones de los electrodos de tierra.

- **Resistencia a Tierra**

Es la oposición al paso de la corriente eléctrica entre la estructura y un electrodo remoto medida en Ω (ohm).

- **Resistividad**

Es la resistencia eléctrica específica de un material medida en $\Omega.m$ (ohm-metro).

Es la constante de proporcionalidad entre la caída de potencial por unidad de longitud y la densidad de corriente (corriente por unidad de área)-

- **Sistema de Tierra**

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

- **Tensión de Contacto (Vc)**

Es la diferencia de potencial entre la elevación del potencial de tierra (GPR) y el potencial superficial en el punto donde una persona esta parada mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura metalica aterrizada.

- **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.

- **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.

- **Tierra**

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

- **NOM-001-SEDE-2005**

Esta norma mexicana establece las especificaciones y lineamientos de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas a la utilización de la energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de seguridad para las personas y sus propiedades.

- **NEC 2008 Edition**

El National Electrical Code (NEC), o NFPA 70, es un standard estadounidense para la instalación segura de alambrado y equipos eléctricos. Es parte de la serie de normas de prevención de incendios publicada por la National Fire Protection Association (NFPA). "National Electrical Code" y "NEC" son marcas registradas NFPA.

- **NFPA National Fire Protection Association**

La **NFPA** (*National Fire Protection Association*) es una organización creada en Estados Unidos, encargada de crear y mantener las normas y requisitos mínimos para la prevención contra incendio, capacitación, instalación y uso de medios de protección contra incendio, utilizados tanto por bomberos, como por personal el encargado de la seguridad. Sus estándares conocidos como *National Fire Codes* recomiendan las prácticas seguras desarrolladas por personal experto en el control de incendios.

Bibliografía

- **Manual NOM-001-SEDE-2005**
- **Manual NEC 2008 Edition**
- **Manual NFPA National Fire Protection Association**
- **Especificación NRF-011-CFE-2004**
Sistema de Tierras para Plantas y subestaciones Eléctricas
- **Especificación CFE 56100-16**
Electrodos para Tierra
- **Especificación CFE 00JL0-28**
Redes de Tierra para Estructuras de Líneas de Transmisión Aéreas
- **Manual de Luz y Fuerza del Centro**
Diseño de Sistemas de Tierra
- **Manual de Diseño de Sistemas de Conexión a Tierra**
Dr. Raúl Velázquez Sánchez
- **Curso de Tierras**
Ing. Gonzalo Mendoza Galván
- **Soluciones Prácticas para la Puesta a Tierra**
Pablo Díaz
Mc Graw Hill
- **La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas y el RAT**
Rogelio García Márquez
Marcombo