



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN PARA
SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES**

Manuel Enrique Huete Serrano
Asesorado por el Ing. Carlos Gabriel Gómez Villagrán

Guatemala, septiembre de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN PARA SISTEMAS
DE TELECOMUNICACIONES**

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MANUEL ENRIQUE HUETE SERRANO

ASESORADO POR EL ING. CARLOS GABRIEL GÓMEZ VILLAGRÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Inga. Glenda Patricia García Soria |
| VOCAL II | Inga. Alba Maritza Guerrero de López |
| VOCAL III | Ing. Miguel Angel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Ing. Kenneth Issur Estrada Ruíz |
| VOCAL V | |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez |
| EXAMINADOR | Ing. Julio Rolando Barrios Archiva |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES,

tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica, con fecha 14 de agosto 2007.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Manuel', is written over a circular stamp or seal that is partially obscured by the signature's loops.

MANUEL ENRIQUE HUETE SERRANO



Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica Eléctrica

Guatemala, 16 de mayo de 2008

Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Estimado Ingeniero:

Por medio de la presente le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: "**Sistema de Puesta a Tierra y Protección para Sistemas de Telecomunicaciones**", elaborado por el estudiante Manuel Enrique Huete Serrano, con carné No. 2002-80012 de la carrera de Ingeniería Electrónica.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Muy atentamente,



Ing. Carlos Gabriel Gómez Villagrán
No. De colegiado 6,375
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 04 de agosto de 2008

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **"SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCION PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES"**, desarrollado por el estudiante **Manuel Enrique Huete Serrano**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

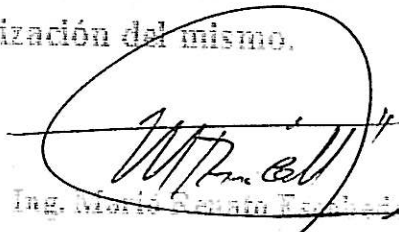

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica





FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: Manuel Enrique Huece Serrano, titulado: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobar, Mordínez
DIRECTOR



GUATEMALA, 14 DE AGOSTO 2008.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Enrique Huete Serrano**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, consisting of a large loop and a vertical line extending downwards.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, septiembre de 2008



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- DIOS** Amigo y compañero en todo momento, fuente de conocimiento infinito y ayuda incondicional.
- MIS PADRES** Que me han acompañado en mis días de desvelos y por todo el amor que me brindan sé que siempre están a mi lado.
- MIS HERMANOS** Por estar a mi lado y darme su apoyo y confiar en mí.
- AMIGOS** Que puedo contar con su mano en todo lugar y momento, un agradecido abrazo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN | XIII |
| OBJETIVOS | XV |
| INTRODUCCIÓN | XVII |
| | |
| 1. EMC Y EQUIPOTENCIALIDAD | 1 |
| 1.1. Interferencias electromagnéticas y compatibilidad Electromagnética (EMC) | 1 |
| 1.2. Tierra única y equipotencialidad | 3 |
| 1.2.1. Planchuelas de equipotencialización | 8 |
| | |
| 2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA | 9 |
| 2.1. Diferencia entre tierra y neutro | 10 |
| 2.2. Componentes de un sistema de puesta a tierra | 11 |
| 2.2.1. Características eléctricas del suelo | 13 |
| 2.2.1.1. Resistencia y resistividad de tierra | 14 |
| 2.2.1.2. Medición de la resistividad del suelo | 15 |
| 2.2.2. Conductor de puesta a tierra | 17 |
| 2.2.3. Electrodo y red de electodos | 19 |
| 2.2.3.1. Potencial alrededor de un electrodo | 19 |
| 2.2.3.2. Tipos de electodos | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.3.3. Configuraciones de electrodos | 28 |
| 2.2.3.4. Medición de la impedancia del electrodo | 30 |
| 2.2.4. Conexiones | 31 |
| 3. PUESTA A TIERRA DE CIRCUITOS DE ALIMENTACIÓN | 33 |
| 3.1. Sistema de alimentación CD | 34 |
| 3.2. Sistema de alimentación CA | 35 |
| 3.3. Conexión del neutro de los sistemas de alimentación | 36 |
| 3.3.1. Esquema TN | 37 |
| 3.3.2. Esquema TT | 38 |
| 3.3.3. Esquema IT | 38 |
| 4. TIERRA DE LOS EQUIPOS | 39 |
| 4.1. Conexión, colores, identificación | 40 |
| 4.2. Conductores del electrodo de puesta a tierra | 41 |
| 4.3. Instalación | 42 |
| 4.4. Tamaño de los conductores de puesta a tierra | 43 |
| 4.4.1. Tamaño del conductor del electrodo de PST para CC | 46 |
| 5. SITIOS DE TELECOMUNICACIONES | 47 |
| 5.1. Subsistema exterior e interior de tierra | 48 |
| 5.1.1. Barra externa de tierra | 50 |
| 5.1.2. Barra principal de tierra | 50 |
| 5.2. Sistema de puesta a tierra de un sitio de comunicaciones | 53 |
| 5.2.1. Radiales | 54 |
| 5.2.2. Anillo interior de tierra o halo | 55 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.3. | Medición de la resistencia en instalaciones celulares y torres de radio y microondas | 57 |
| 5.4. | Diseño de una malla de puesta a tierra | 59 |
| 5.5. | Puesta a tierra por tipo de suelos | 65 |
| 5.5.1. | Suelo arenoso o pedregoso | 65 |
| 5.5.2. | Suelo rocoso | 65 |
| 5.5.3. | Suelos en Guatemala | 66 |
| 6. | SUPRESORES, FILTROS Y BLINDAJES | 69 |
| 6.1. | Supresores | 70 |
| 6.2. | Filtros | 73 |
| 6.3. | Blindajes | 75 |
| 7. | PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS | 79 |
| 7.1. | Características de las descargas atmosféricas | 80 |
| 7.2. | Sistema de protección contra descargas atmosféricas | 83 |
| 7.2.1. | Sistema de terminación de aire | 83 |
| 7.2.1.1. | Ángulo protector | 84 |
| 7.2.1.2. | Esfera rodante | 85 |
| 7.2.1.3. | Método de mallas | 86 |
| 7.2.2. | Sistema de conductores bajantes | 87 |
| 7.2.3. | Sistema de terminación de tierra | 88 |
| 7.3. | Evaluación del riesgo de daño debido a las descargas | 90 |
| 7.4. | Clasificación de las protecciones | 91 |
| 7.4.1. | Protecciones primarias | 91 |
| 7.4.2. | Protección secundaria y terciaria | 93 |

| | |
|---|------------|
| 8. CORROSIÓN | 95 |
| 8.1. Resistencia a la corrosión | 96 |
| 8.2. Características de la corrosión | 98 |
| | |
| 9. SEGURIDAD INDUSTRIAL | 99 |
| | |
| 10. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y ANÁLISIS ECONÓMICO | 101 |
| 10.1. Sistema de puesta a tierra sobre suelo (spat ss) | 101 |
| 10.2. Sistema de puesta a tierra bajo suelo (spat bs) | 102 |
| 10.2.1. Anillo perimetral de la bts outdoor | 102 |
| 10.2.2. Anillo de la torre o monoposte | 103 |
| 10.2.3. Radiales del anillo de la torre | 103 |
| 10.3. Pararrayos | 104 |
| 10.4. Retorno de inversión | 104 |
| | |
| CONCLUSIONES | 109 |
| RECOMENDACIONES | 111 |
| BIBLIOGRAFÍA | 113 |
| E-GRAFÍA | 115 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Tierras separadas | 4 |
| 2. | Una sola tierra a nivel del terreno | 5 |
| 3. | Tierra única y equipotencialidad | 6 |
| 4. | Esquema tridimensional de niveles | 7 |
| 5. | Planchuelas de equipotencialización | 8 |
| 6. | Método Wenner | 16 |
| 7. | Método Schlumberger | 17 |
| 8. | Electrodo hemisférico de radio a | 20 |
| 9. | Distribución del potencial alrededor de un electrodo de punta | 21 |
| 10. | Curvas equipotenciales | 22 |
| 11. | Influencia de la separación entre electrodos en el efecto de apantallamiento | 22 |
| 12. | Variación de la resistencia con la distancia | 23 |
| 13. | Electrodo de pica en posiciones de norma | 26 |
| 14. | Electrodo de placa y varilla | 27 |
| 15. | Sistemas CD | 35 |
| 16. | Sistemas TN | 37 |
| 17. | Esquemas TT e IT | 38 |
| 18. | Anillo de tierra, exterior e interior | 49 |
| 19. | Barra exterior de tierra unida al anillo exterior de tierra | 50 |
| 20. | Barra principal de tierra | 51 |
| 21. | Sistema de puesta a tierra de un sitio de telecomunicaciones | 52 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 22. | Radiales | 55 |
| 23. | Anillo interior de tierra o halo | 56 |
| 24. | Instalación celular | 57 |
| 25. | Medición en instalación celular con el uso de pinzas | 58 |
| 26. | Filtrado | 74 |
| 27. | Pulso generado por un rayo | 81 |
| 28. | Nivel isocerámico de Guatemala | 82 |
| 29. | Espacio protegido por el sistema de terminación de aire | 84 |
| 30. | Método de la esfera rodante | 86 |
| 31. | Dispositivo de pararrayos en forma de malla | 87 |
| 32. | Longitud mínima de los electrodos de acuerdo al nivel de protección | 89 |
| 33. | Protecciones primarias | 92 |
| 34. | Circuitos de protecciones secundarias | 94 |
| 35. | Falla a tierra del motor y descarga eléctrica | 100 |
| 36. | Puente de unión | 100 |

TABLAS

| | | |
|-------|--|----|
| I. | Sección de los conductores de protección | 18 |
| II. | Tamaño nominal mínimo de los conductores de tierra para canalizaciones y equipos | 45 |
| III. | Conductor del electrodo de tierra de instalaciones de CA | 46 |
| IV. | Valores típicos de la resistividad de diferentes suelos | 59 |
| V. | Temperatura máxima de fusión | 61 |
| VI. | Parámetros de acuerdo a los niveles de protección | 85 |
| VII. | Calibre de los conductores bajantes | 88 |
| VIII. | Distancia promedio de los conductores bajantes | 88 |
| IX. | Susceptibilidad a la corrosión de metales | 97 |

| | | |
|-------|---|-----|
| X. | Corrosión vrs. Resistividad | 98 |
| XI. | Instalación red de tierras | 104 |
| XII. | Precio aproximado de una torre de telefonía celular | 105 |
| XIII. | Gastos por mes | 107 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------|-------------------------------|
| Ω | Ohmios |
| I | Corriente |
| V | Voltaje |
| Hz | Hertz |
| f | Frecuencia |
| ω | Frecuencia angular |
| ρ | Resistividad del terreno |
| σ | Conductividad |
| π | Pi |
| ∞ | Infinito |
| >> | Mucho mayor que |
| m | Metro |
| dB | Decibeles |
| μr | Constante magnética |
| E | Intensidad de campo eléctrico |
| H | Intensidad de campo magnético |
| J | Densidad de corriente |
| L | Inductancia |
| C | Capacitancia |
| R | Resistencia |
| Z | Impedancia |
| A | Ángulo |

| | |
|-----------|---|
| δ | Profundidad de penetración |
| gr | Gramos |
| λ | Longitud de onda |
| s | Segundo |
| MODEM | Modulador y demodulador |
| CA | Corriente alterna |
| CD | Corriente directa |
| CC | Corriente continúa |
| Cu | Cobre |
| NEC | Código Eléctrico Nacional |
| IEEE | Instituto de Ingenieros Electricistas y Eléctrico |
| SPAT SS | Sistema de puesta a tierra sobre el suelo |
| SPAT BS | Sistema de puesta a tierra bajo el suelo |

GLOSARIO

- Acoplamiento** Se forma entre dos circuitos cuando existe algún camino por el que uno de ellos pueda ceder energía al otro. El acoplamiento por conducción se da cuando dos circuitos tienen alguna impedancia común.
- Blindajes** Método que consisten en una superficie metálica dispuesta entre dos regiones del espacio, utilizada con el fin de atenuar la propagación de los campos electromagnéticos.
- Campo Eléctrico** Región del espacio en que una masa eléctrica pasiva colocada en cualquier punto sufre la acción de una fuerza.
- Campo Magnético** Campo de fuerzas creado por cargas eléctricas en movimiento, que se manifiesta por la fuerza que experimenta una carga eléctrica al moverse en su interior.
- EMC** Compatibilidad electromagnética. Definida como la capacidad de un equipo, aparato o sistema para funcionar en su ambiente electromagnético de forma satisfactoria y sin que produzca perturbaciones electromagnéticas intolerable para todo lo que se encuentra en ese ambiente.

| | |
|---------------------|--|
| EMI | Interferencia electromagnética. Degradación del funcionamiento de un equipo, canal de transmisión o sistema debido a la existencia de una perturbación electromagnética. |
| EMS | Susceptibilidad electromagnética. Es la inaptitud de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar sin degradación de calidad en presencia de una perturbación electromagnética. |
| ESD | Descargas electroestáticas. Son los fenómenos debidos a la presencia de cargas eléctricas estacionarias o móviles y a su interacción. |
| Filtrado | Es necesario para el desacoplo de los circuitos para su correcto funcionamiento. Utilizados para combatir los transitorios y los sobrevoltajes, filtrando armónicos y perturbaciones. |
| Transitorios | Son perturbaciones creadas por impulsos acopladas en los circuitos eléctricos, que se encuentran en forma conducida en los cables de alimentación y en las entradas de control y señalización. |
| MGB | Master Ground Bar. Platina de aterrizaje de tierras, donde van conectados todos los equipos instalados en una caseta o contenedor, instalada inmediatamente debajo del pasamuros. |

RESUMEN

El sistema de tierra a la que se conecta una radio base celular esta compuesto de varios subsistemas: puede considerarse uno interior y otro exterior. También puede considerarse de la siguiente forma: como un sistema de puesta a tierra bajo suelo y un sistema de puesta a tierra sobre suelo. Estos consisten en ciertos componentes básicos acordes para lograr las metas del sistemas de tierra y adaptado a las que características de cada sitio individual.

En un subsistema de puesta a tierra externo, la tierra de la torre consiste en un anillo enterrado de alambre que abraza la base de la torre. La tierra externa del edificio normalmente toma la forma de un anillo de alambre enterrado alrededor del edificio, aunque puede ser necesario usar otros planes. Este anillo de tierra externo mantiene la conexión primaria a tierra y el resto del sitio. El anillo de tierra externo y el anillo de la torre se conectan juntas y es complementado con electrodos. Finalmente, todas las líneas de transmisión de RF se conectan con tierra en varios puntos.

Las torres auto soportadas deben ser aterradas con al menos un electrodo de tierra adyacente a cada pata de la torre. Los electrodos deben ser conectados a la pata de la torre con un conductor sólido de cobre estañado de 70 mm² y entre ellas por medio de un anillo de conductor igual. Se recomienda que el anillo de tierra de torres no arriostradas sea suplementado por al menos dos conductores radiales desde cada montante principal de la torres.

Estos deberán ser de aproximadamente 6 m, o tan largo como sea práctico para el sitio, y extenderse mas allá del edificio. Los electrodos de tierra deben ser ubicadas en el medio y en extremo.

En la conexión a tierra de la torre, el radio de curvatura mínima para las guías de transporte de rayo, suspendidas en el aire debe ser de 0.203 m para minimizar la inductancia. Curvaturas de ángulo recto o conexiones con inductancias superiores deben evitarse. Entre las opciones se conecta el electrodo directamente al segundo plato en importancia. Esto tiene la cantidad mínima de doblamiento y es en su mayor parte vertical; o una conexión directamente desde el plato mas bajo al electrodo. Este camino pone la interconexión a través de la menor cantidad de aire, pero tiene la mayoría de las curvas.

Con respecto a los círculos radiales para tierra, una teoría es atar las varas de tierra igualmente espaciadas (de la base de la torre) juntos para formar un círculo o círculos. Consiste en que los alambres radiales deben ser interconectados por anillos de alambre. El método no mejora la protección. Si este tipo de sistema de tierra se instalara en un sitio con una capa de superficie pobremente conductiva, la inductancia grande de las interconexiones a los anillos hará los anillos ineficaces. Dos anillos estrechamente espaciados están como dos varas de tierra que intentan acoplar la carga en el mismo volumen de tierra. Se rechazan los electrones de cada vara. No es un empleo efectivo de tiempo de la instalación y materiales. El costo del alambre y esfuerzo involucrado instalando estos círculos concéntricos seria mejor utilizado poniendo radiales adicionales desde la base de la torre.

OBJETIVOS

General

Resaltar la importancia de un buen sistema de puesta a tierra para el mantenimiento, monitoreo y funcionamiento del equipo de telecomunicaciones, y particular métodos y normas para la instalación de sistemas de puesta a tierra que minimizaran los riesgos al personal, proteja el equipo de daño permanente y prevenir interrupciones temporales del funcionamiento del sistema durante sobretensiones de rayo o fallas de tierra.

Específicos

1. Conocer y comprender las normas que regulan el diseño e instalación de un sistema de puesta a tierra.
2. Aplicar los conocimientos y formulas para el desarrollo de un diseño óptimo de puesta a tierra para torres y equipo de telecomunicaciones.
3. Establecer las diferencias entre las diferentes topologías de puesta a tierra y su aplicación dependiendo de las circunstancias.

INTRODUCCIÓN

La importancia de comprender el comportamiento de las descargas y cuales son los daños que pueden causar, resalta la importancia que tienen las protecciones tanto para los sistemas electrónicos y fundamentalmente para el hombre, sin tomar en cuenta las pérdidas económicas que las descargas atmosféricas o sobretensiones causan a los sistemas.

Este trabajo esta enfocado en su mayor parte a la protección de sistemas de telecomunicaciones, desde una breve introducción a los conceptos necesarios para la instalación del sistema, como los diferentes componentes importantes en el diseño de una red de puesta a tierra. Las normas establecidas por IEEE y el NEC requeridas para la instalación de un sistema de puesta a tierra.

Se tiene un breve análisis de las diferentes topologías de sistemas para puesta a tierra, debido principalmente a los diferentes suelos en el área guatemalteca, como las variables situaciones climáticas imperantes en toda la región de Guatemala, impidiendo así unificar un solo método o práctica de instalación. Las recomendaciones básicas para el desarrollo de una puesta a tierra para la variedad de suelos

La instalación de una puesta a tierra tiene como principal punto la seguridad. Se citan los requisitos de mínimos de seguridad para el personal y equipo instalado en el sitio.

1. EMC Y EQUIPOTENCIALIDAD

1.1. Interferencias electromagnéticas y compatibilidad electromagnética (EMC)

Actualmente, el desarrollo tecnológico obliga a tener una eficiente protección de los sistemas de Telecomunicaciones. Todo sistema electrónico es sensible a interferencias electromagnéticas que degradan el buen funcionamiento de nuestro sistema, estos fenómenos electromagnéticos son en la mayoría de casos, perturbaciones causadas por descargas electroestáticas y atmosféricas, ambas básicamente producto de cargas acumuladas, ya sea por la presencia eléctrica estacionaria de las mismas o a su interacción; como también a las concentraciones existentes en las nubes. Esto lleva a diseñar y desarrollar un sistema de protección adecuado contra cualquier tipo de interferencia electromagnética que se nos presente en nuestro sistema.

Las interferencias que comúnmente se encuentran se pueden clasificar en naturales como por ejemplo: las interferencias producidas por descargas atmosféricas, descargas electrostáticas (ESD), ruido cósmico, radiaciones naturales, etc., y las artificiales que a su vez se dividen en: conducidas, cuando el medio de propagación es un conductor eléctrico que une la fuente con el conductor afectado; radiadas, cuando la propagación se efectúa a través de campos electrostáticos o electromagnéticos; y acopladas. Basándose en las normas, también se pueden clasificar dependiendo de su longitud de onda y distancia de propagación.

Para combatir estas fuentes de interferencias, se necesita lograr lo que se conoce como “compatibilidad electromagnética”, que de ahora en adelante se le nombrara como EMC, por sus siglas en inglés, que no es más que la capacidad del sistema o equipo para adaptarse bien a un ambiente donde existan perturbaciones de tipo electromagnético, o dicho en otras palabras, la capacidad de funcionar bien en su ambiente electromagnético de trabajo de manera satisfactoria. La EMC depende mucho del nivel de las interferencias. Las interferencias nos afectan más a muy bajo nivel (μV o mV) en circuitos analógicos, en cambio en los circuitos digitales que cuentan con un margen de EMI mayor, son afectados hasta sobrepasar dicho margen anteriormente mencionado. Además hay que tomar en cuenta que la sensibilidad a las EMI de los circuitos no se nota en la fase de desarrollo debido a las condiciones ambientales en los laboratorios. Estos problemas surgen en el momento de la instalación del sistema, por lo que se debe considerar la medida de inaptitud de los sistemas a dichos ambientes o posibilidad de funcionar mal, conocido como susceptibilidad electromagnética.

En la actualidad la EMC, se incluye en el diseño de instalaciones eléctricas industriales y de telecomunicaciones, cumpliendo en un cien por ciento con normas y estándares que rigen dichas aplicaciones respectivamente, que intrínsecamente parten de un sistema de puesta a tierra. Ignorar la EMC, es adquirir el surgimiento de problemas de interferencias, que conllevan a que nuestro sistema sea ineficiente, que provoca que nuestro producto resultante no sea competitivo. El ingeniero con funciones de diseño y producción, debe considerar todos estos aspectos relacionados con la EMC, por lo cual, debe proporcionar un diseño óptimo, para que durante la instalación de equipos eléctricos y electrónicos se cumplan con las normas estipuladas y los métodos adecuados, evitando que el sistema sea susceptible a la contaminación electromagnética y tener la necesidad posteriormente cuando el sistema este en marcha de implementar soluciones técnicas y económicamente altas.

Se recomienda para el análisis de las EMI, aislar las fuentes, acoplamiento y receptores, los métodos para su eliminación se obtiene con apantallamiento, filtrado, aislamiento galvánico, control de impedancias, correcto cableado, adecuadas masas. Finalmente, es conveniente efectuar mediciones de EMI dentro de las posibilidades para tener una indicación de la magnitud del problema. Las normas nos especifican las técnicas y documentos de apoyo para la solución de estos problemas, tomando en cuenta que la normalización nos aporta soluciones para aplicaciones repetitivas que se desarrollan en el ámbito de la ciencia y tecnología.

1.2. Tierra única y equipotencialidad

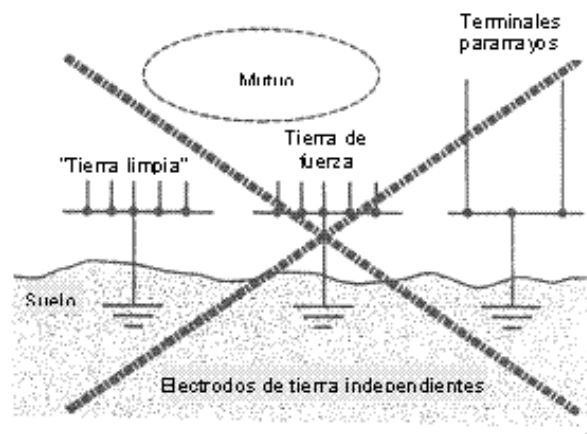
En una instalación eléctrica o de equipos electrónicos, para cumplir con la EMC, es necesario tratar de conseguir una equipotencialidad casi perfecta, necesaria para evitar el surgimiento de potenciales inducidos, contribuyendo a la seguridad del personal y equipo.

Anteriormente, la mayoría de profesionales que trabajaban en sistemas de comunicaciones, redes de datos y sistemas digitales, tenían el concepto y por lo tanto sugerían que era mejor mantener los sistemas de puesta a tierra independientes al resto de redes de tierras existentes, para evitar ruidos indeseables producto de las uniones de estas redes. El concepto válido es el uso de una tierra única y equipotencial, con la unión de todas las partes metálicas al sistema.

La equipotencialidad es necesaria para evitar el surgimiento de potenciales no deseados por inducción de otras tierras cercanas, estructuras o partes metálicas al momento de la ocurrencia de un evento electromagnético.

La equipotencialidad asegura que todos los objetos conductores, no vinculados eléctricamente, estén a un mismo potencial, manteniendo un nivel de seguridad requerido y necesario para el personal y equipo de trabajo. Sin la equipotencialidad apropiada, los sistemas de protección no trabajan adecuadamente.

Figura 1. Tierras separadas

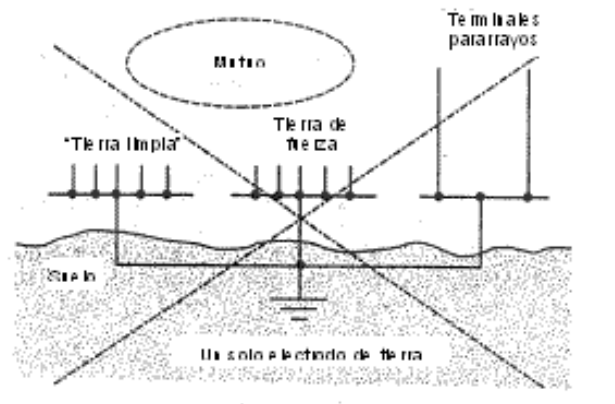


Fuente: UPI CEN

De lo anteriormente comentado, se pueden mencionar varios ejemplos, comúnmente nos topamos con el concepto erróneo de electrodo de tierra “independiente”, como se muestra en la figura 1, en un intento por obtener una red de puesta a tierra “limpia”, el electrodo de tierra no se interconecta con los otros electrodos de tierra. Este procedimiento no es adecuado para la EMC y es un peligro para la seguridad de la instalación. Para solucionar el problema de las tierras separadas, se hizo el intento de unir las tierras en la masa terrestre dando como una solución un solo electrodo de tierra, lo que fue una alternativa al efecto provocado por las tierras separadas.

Como se aprecia en la figura 2, estos sistemas son independientes excepto al nivel del terreno, buscando con ello una equipotencialidad. Esto actualmente no es aprobado desde el punto de vista de la equipotencial.

Figura 2. Una sola tierra a nivel del terreno

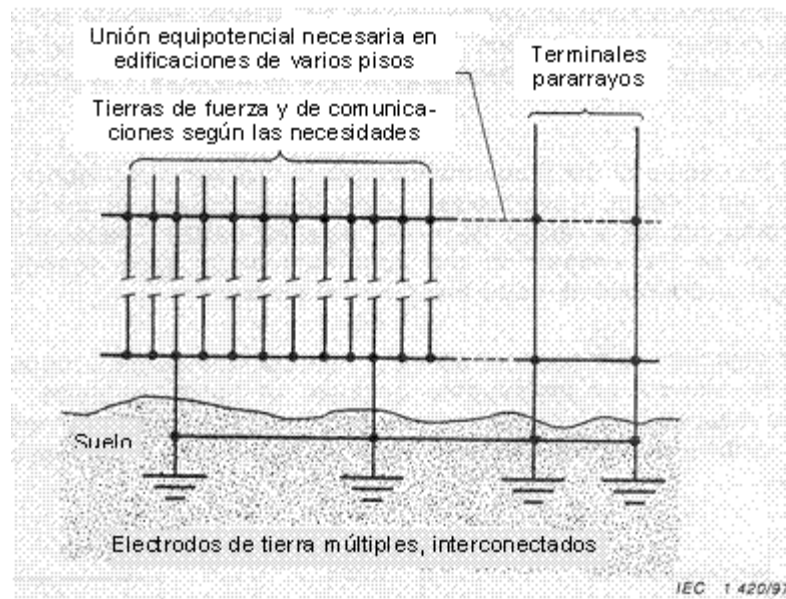


Fuente: UPI CEN

Con la existencia de múltiples electrodos de tierra, es necesario que estos estén interconectados entre sí, a esta unión de electrodos se le denomina “única referencia de tierra”, cuyo objetivo es que el potencial de las tierras bajen o suban conjuntamente. En caso de una descarga atmosférica, el electrodo de tierra del sistema de protección contra rayos se elevará miles de voltios por unos instantes, de la misma manera la tierra del edificio y la estructura metálica. Sin embargo no existirá una diferencia de potencial entre el edificio y el sistema de tierra.

Las normas actuales nos llevan que para lograr una mayor equipotencialidad debe existir una única tierra que sirva para todos los fines, además de una equipotencialidad por niveles, no por sistemas. Cuando existe un único nivel, igualmente se debe lograr una equipotencialidad general, como se aprecia en la figura 3.

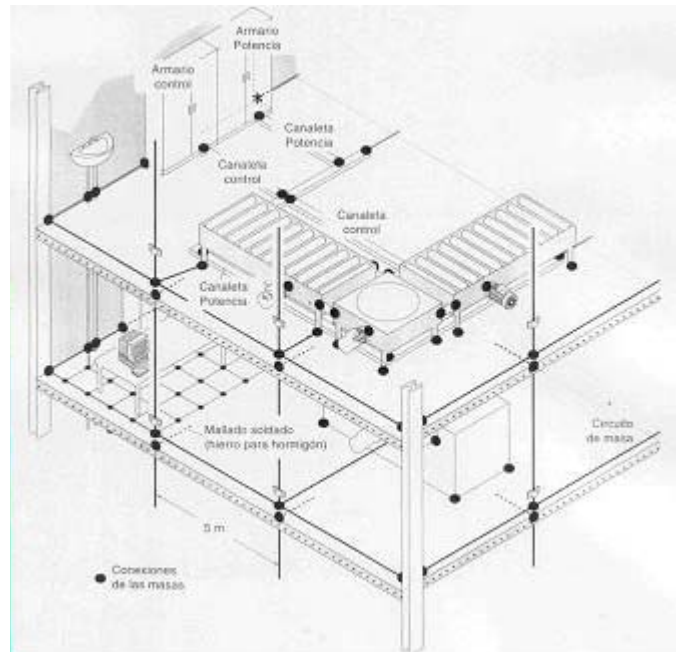
Figura 3. Tierra única y equipotencialidad



Fuente: UPI CEN

Cuando las edificaciones presentan varios niveles como en la figura 4, hay que buscar una equipotencialidad por pisos, incluyendo en ella la unión de los bajantes del pararrayos. Cada piso debe tener una unión equipotencial perfecta, la que se logra a través de una barra equipotencial, donde incluye no solo los sistemas, sino además los aceros de la construcción, escaleras metálicas, bandejas eléctricas, chasis de equipos, paneles eléctricos, y todos aquellos elementos estructurales. Un sistema tridimensional, se recorre cada rincón de la edificación con el único objeto de conseguir la unión entre todos los componentes y estructura.

Figura 4. Esquema tridimensional de niveles



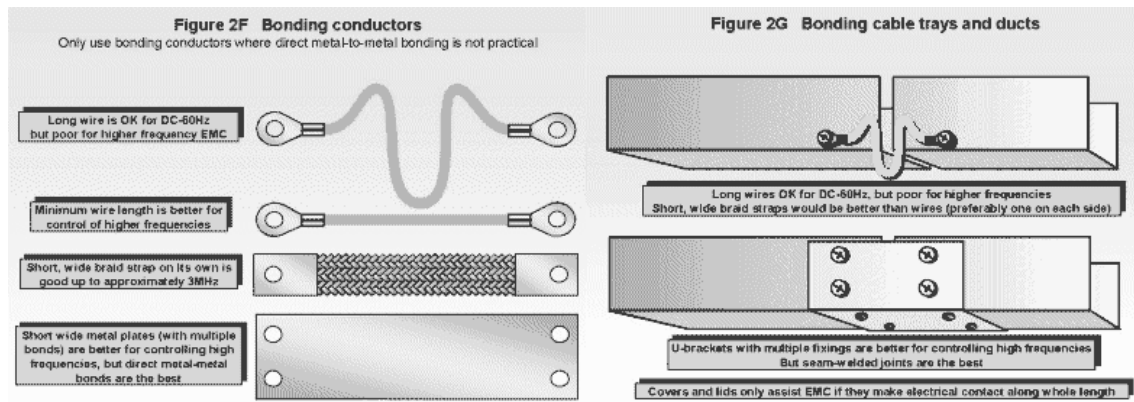
Fuente: UPI CEN

Las conexiones equipotenciales constituyen una red de protección, cuyo objetivo es unificar el potencial eléctrico en una instalación, de todas las partes metálicas accesibles que no están destinadas a conducir corriente eléctrica. Con este propósito se conectan todas las partes metálicas a tierra, mediante conductores que se unen entre sí y luego a tierra. Una instalación protegida mediante conexiones equipotenciales tiene en cuenta lo siguiente: todas las partes metálicas a protegerse, partes metálicas del edificio, tuberías y demás elementos que hagan buen contacto con tierra, se unen a la red de protección. La sección de conductores y sus derivados se consideran como conductores de puesta a tierra. Para las uniones equipotenciales se realizan por medio de planchuelas y cintas en lugar de cables circulares, esto debido a que hay que considerar los efectos de la alta frecuencia en los cables circulares.

1.2.1. Planchuelas de equipotencialización

Están formados por láminas metálicas, bandas metálicas de malla o cables redondos. Para sistemas de alta frecuencias las láminas metálicas o bandas trenzadas son adecuadas, debido a que lo determinante es el área perimetral o la superficie. Desde el punto de vista de la EMC, los cables redondos no son efectivos a frecuencias superiores de 10 MHz. En la figura 5 se muestran algunos ejemplos de planchuelas de equipotencialización y su conexión.

Figura 5. Planchuelas de equipotencialización



Fuente: UPI CEN

2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El objetivo principal de un buen sistema a tierra es mantener buenos niveles de seguridad del personal, operación de los equipos y desempeño de los mismos, generando un punto de protección al equipo, conectando los sistemas a tierra limitamos las sobretensiones eléctricas, transitorios en la red o contacto accidental con líneas de alta tensión. Estabilizar la tensión eléctrica a tierra durante su funcionamiento normal. Los equipos al conectarse a tierra ofrecen un camino de baja impedancia para las corrientes eléctricas de falla, facilitando así, el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes.

La puesta a tierra comprende toda la ligazón metálica directa sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente entre determinados elementos o partes de una instalación y un grupo de electrodos, enterrados en el suelo, con objetivo de conseguir que entre el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima al terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de una descarga de origen atmosférico. La forma en que se conecta el sistema a tierra tiene efecto sobre las magnitudes de voltaje de línea, los cuales deben de ser mantenidos en condiciones normales y bajo condiciones transitorias. El sistema de puesta a tierra nos ayuda a evitar la contaminación de nuestro equipo con señales de frecuencias diferentes a la deseada, mediante blindajes de todo tipo conectado a nuestra referencia cero. Los dispositivos de protección conectados entre los conductores activos y la referencia, disminuye el riesgo de destrucción de los elementos semiconductores por causa del aumento de voltaje. Canalizando los rayos y cargas electroestáticas a tierra sin mayores daños a personas y equipos del sistema.

Con respecto al sistema de puesta a tierra, los reglamentos nos establecen lo siguiente:

- Las instalaciones que lo precisen dispondrán de un número suficiente de puntos de puesta a tierra, distribuidos convenientemente conectados al mismo electrodo o conjunto de electrodos.
- El punto de puesta a tierra estará constituido por un dispositivo de conexión, que permita la unión entre conductores de las líneas y la principal de tierra, de tal manera que puedan separarse para hacer pruebas y medidas de resistencia de tierra.

Los propósitos de un sistema de puesta a tierra son:

- Mantener la diferencia de voltaje bajo, entre diferentes estructuras metálicas resguardando al personal de cualquier coche eléctrico.
- Conducir cualquier corriente producto de fallas de sistema o descargas atmosféricas a tierra, evitando incendios provocados por materiales volátiles.
- Tener baja impedancia con el objeto de limitar el voltaje a tierra y así contribuir con un mejor desempeño en la operación de los sistemas de protección, además mantiene un mismo nivel de potencial de tierra en todas las unidades del sistema que están conectados entre sí a tierra al mismo tiempo.

2.1. Diferencia entre tierra y neutro

Con frecuencia, no se tienen claros los conceptos de sistema de puesta a tierra (tierra) y neutro, por lo que técnicos en la materia los llegan a confundir, no solo teóricamente sino que también en la práctica.

Es por eso que se enfatiza en dar a conocer estos sencillos conceptos y sus diferencias. La diferencia de estos dos elementos es que el neutro lo usamos como regreso de nuestra línea de alimentación o en otras palabras es por donde pasa la corriente de regreso a los postes de suministro eléctrico.

Por otro, lado la conexión a tierra es la conexión que usamos para que circule la corriente no deseada o descargas eléctricas hacia tierra para evitar que dañen a equipos eléctricos, electrónicos e incluso a personas, explicado de otra forma es la conexión que usamos para la protección personal y de equipos contra sobre tensiones o descargas eléctricas de cualquier tipo.

La masa es un punto o plano de conexión equipotencial, conectando o no a la tierra, que sirve de referencia para un circuito o sistema. Para instalaciones eléctricas una masa es cualquier parte conductora de un aparato, equipo o instalación accesible al contacto que en funcionamiento normal no tiene tensión, pero puede tenerla si se produce un fallo.

2.2. Componentes de un sistema de puesta a tierra

Un diseño correcto del sistema de puesta a tierra es fundamental para asegurar la correcta conducción de una corriente de falla, la resistencia del sistema de puesta a tierra es pequeña para evitar tensiones inducidas. Un sistema de puesta a tierra consta, principalmente de:

Tomas de tierra: Elemento de unión entre el circuito eléctrico aislado y el terreno. A su vez, la toma de tierra consta de elementos como:

- **Electrodos:** Elemento metálico que permanece en contacto directo con el terreno, facilitando el paso a éste de las corrientes de falla. Construidos con materiales resistentes a la humedad y la acción química del terreno.
- **Línea de enlace con tierra:** También conocido como anillo de enlace, está formado por un conjunto de conductores que unen a los electrodos con el punto de puesta a tierra. Debe ser de cobre desnudo, su sección no será inferior a 35 mm² y en ningún caso inferior a sus derivaciones.
- **Punto de puesta a tierra:** Es un punto situado fuera del suelo, generalmente dentro de una cámara, que sirve de unión entre el anillo de enlace y la línea principal de tierra.

Línea principal de tierra: Formado por conductores de cobre que parten del punto de tierra, y se usan para conectar todas las derivaciones necesarias para la puesta de tierra, a través de los conductores de protección. Su recorrido debe ser corto para reducir los efectos inducidos y sin cambios bruscos de dirección. La línea principal de tierra será de cobre desnudo. Su sección no será inferior de 16 mm² y en ningún caso inferior a las de sus derivaciones. El conductor principal de equipotencialidad debe tener una sección no inferior a la mitad de la del conductor de protección mayor de la instalación, con un mínimo de 6 mm² sin embargo puede ser reducido a 2.5 mm² si es de cobre.

Derivaciones de las líneas principales de tierra: Constituidas por conductores que unen la línea principal de tierra con los conductores de protección o, directamente con las masas. Los conductores serán de cobre e irán entubados junto a los conductores activos. Se identificarán mediante el color amarillo verde a rayas de su aislamiento y la sección dependerá de la sección del conductor de fase al que acompañan. Este criterio se aplica también en los conductores de protección.

Conductores de protección: Unen eléctricamente las masas de una instalación a ciertos elementos, asegurando la protección contra los contactos indirectos, manteniendo la seguridad del circuito a tierra. También se le conocen como conductores de protección a los conductores que unen las masas a:

- ✓ el neutro de la red.
- ✓ otras masas.
- ✓ a elementos metálicos distintos de las masas.
- ✓ un relé de protección.

2.2.1. Características eléctricas del suelo

Un parámetro importante en el diseño de un sistema de puesta a tierra es la resistividad del terreno, definida como la capacidad del suelo para conducir corriente ante un campo eléctrico aplicado. Los factores que influyen en la resistividad del terreno son muchos entre ellos: estratigrafía, compactación, humedad, temperatura, etc. Además el contenido electrolíticos varía la resistividad de un terreno y la mejoramos tratándola con sales, geles o abonado electrolítico.

Estratigrafía: Es la variación de la composición del suelo y su estructura a lo largo del mismo, implicando esto, cambio transversales y longitudinales de resistividad. La anisotropía nos refiere el desorden de la resistencia del terreno. Un factor a tomar en cuenta es la relación del grano predominante del suelo y sus características higroscópicas y de retención de agua.

Compactación y salinidad: El estado de compactación del terreno altera el valor de resistencia, debido al grado de unión de los granos. Aquí la resistividad disminuye mientras más compacto este un terreno, ya que al no estarlo hay pequeños espacios de aire que impide la conducción de corriente eléctrica. El contenido de sales produce una menor resistividad ínter granular, debido a que la sal es un material absorbente de humedad, puesto que como sabemos el agua por si sola no conduce la electricidad.

Humedad y temperatura: La resistividad varía conforme la humedad del terreno, mientras más húmedo más baja será esta, si está seco tendremos mayor resistencia. La temperatura afecta la humedad del terreno, a bajas temperaturas puede congelarse el terreno y la resistividad se elevaría, además el calor crea una resistencia en el terreno, afectando las mediciones.

2.2.1.1. Resistencia y resistividad de tierra

Aunque estos términos puedan confundirse, tienen significados diferentes. La resistencia de tierra se define como la resistencia que ofrece un sistema de tierra al paso de la corriente eléctrica. Este valor depende de la resistividad del terreno, características físicas del electrodo, como también de la longitud y área de los conductores. Esta se mide en ohms. La resistividad de un material se define como la resistencia en corriente directa entre las caras paralelas opuestas de una porción de éste, de longitud unitaria y sección unitaria uniforme, esta se mide en $\Omega \cdot m$.

2.2.1.2. Medición de la resistividad del suelo

Esta se mide con el objeto de encontrar los puntos óptimos para la colocación de la red de tierra, si usamos un valor incorrecto de resistividad del suelo en la etapa del diseño, la medida de impedancia del sistema de tierra puede resultar diferente de lo planeado, trayendo seria consecuencias. Algunos métodos para medir la resistividad son:

Método de Wenner: Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los 4 electrodos colocados en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra. El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. En la figura 6 muestra la disposición esquemática de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente (ρ) está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot r}{1 + \left(\frac{2 \cdot a}{(a^2 + 4 \cdot b^2)^{0.5}} \right) - \frac{2 \cdot a}{(4 \cdot a^2 + 4 \cdot b^2)^{0.5}}} \right] \quad \text{(Ecuación 1)}$$

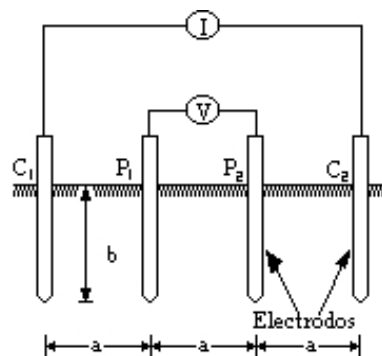
Donde:

- ✓ a es la distancia entre electrodos en m.
- ✓ b es la profundidad de enterrado de los electrodos en m
- ✓ r es la lectura de la resistencia en el telurómetro en Ω .

Si la distancia enterrada **b** es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos **a** ($a \gg b$) la fórmula se simplifica:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot r \quad (\text{Ecuación 2})$$

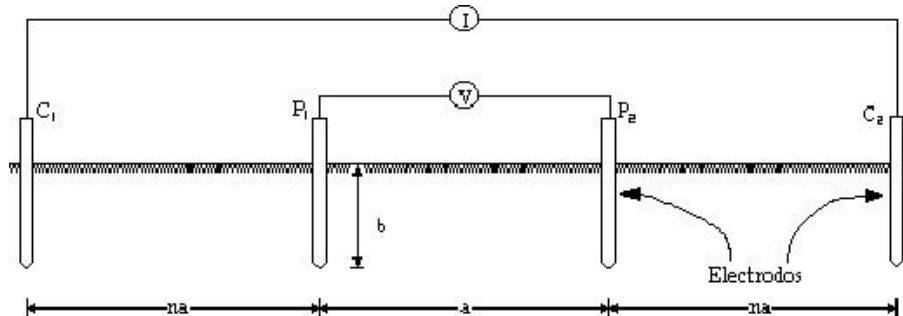
Figura 6. Método Wenner



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html

Método de Schlumberger: El método de *Schlumberger* es una modificación del método de *Wenner*, también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial **a** se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos **na** de la separación base de los electrodos internos **a**. La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la figura 7.

Figura 7. Método Schlumberger



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html

La resistividad se calcula por:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (n + 1) \cdot na \quad (\text{Ecuación 3})$$

El método de *Schlumberger* es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son poco inteligentes.

2.2.2. Conductor de puesta a tierra

El conductor de puesta a tierra es el encargado de la comunicación del sistema exterior con la barra equipotencial, para de ahí distribuir a los equipos. La selección de los cables, se realiza teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Magnitud de la corriente inicial asimétrica de falla a tierra.
- ✓ Duración de la corriente de falla a tierra.
- ✓ Elevación máxima permisible de temperatura.

Para conductores de cobre con temperatura inicial de 26° C y una elevación hasta 450° C se emplea la fórmula para la sección del conductor requerido:

$$S = 0.0537 \cdot I \cdot \sqrt{T} \quad (\text{mm}^2) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

- ✓ S es la sección del conductor a utilizar.
- ✓ I es la corriente inicial asimétrica en A.
- ✓ T es el tiempo de duración de la falla en s.

Tabla I. Sección de los conductores de protección

| Sección de conductores de fase Sfase (mm²) | Sección mínima de conductores de protección Sp (mm²) |
|--|--|
| Sf ≤ 16 | Sp = Sf |
| 16 < Sf ≤ 35 | Sp = 16 |
| Sf > 35 | Sp = Sf/2 |

Fuente: http://www.ffii.nova.es/puntoinfomcyt/Archivos/rbt/ITC_BT_18.pdf

En todos los casos, los conductores de protección que no formen parte de la canalización de alimentación serán de cobre, con una sección al menos de:

- 2.5 mm², si los conductores de protección disponen de una protección mecánica.
- 4 mm², si los conductores de protección no disponen de una protección mecánica.

Ningún aparato deberá ser intercalado en el conductor de protección. Las masas de los equipos a unir con los conductores de protección no deben ser conectadas en serie en un circuito de protección, con excepción de las envolventes montadas en fábrica o canalizaciones prefabricadas.

2.2.3. Electrodo y red de electrodos

Los electrodos tienen como finalidad principal la transmisión de la corriente de falla a tierra de una manera segura, garantizando la unión íntima con ella, además disminuyen la resistencia de tierra para dicho propósito. Los electrodos de tierra son: Artificiales, constituidos por barras, tubos, placas, cables y otros elementos metálicos. Naturales, elementos metálicos enterrados en la tierra, aprovechados para la puesta a tierra si cumplen condiciones reglamentarias. Cuando los electrodos están lo suficientemente distantes para que la corriente máxima que pasa por cada uno de ellos modifique al potencial de los otros, se dice que los electrodos de tierra son independientes.

2.2.3.1 Potencial alrededor de un electrodo

Al pasar la corriente eléctrica por el electrodo hincado sobre el terreno, aparece en él una caída de voltaje a partir del electrodo. Este potencial esta en función de la resistividad del terreno y la densidad de corriente. Además, la densidad de corriente a través del electrodo depende de su forma geométrica, colocación y distancia entre electrodos y la distancia hasta el electrodo del punto que se analice. A fines de cálculo asumiremos homogénea la resistividad ρ del terreno, con la resistencia del material del electrodo menor al del terreno, tomando como base la figura 8 para dichos cálculos. Por la simetría del electrodo la corriente se distribuye uniformemente. Si inyectamos una corriente I por el centro del electrodo, la densidad de corriente a una distancia r será:

$$J = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Debido a la simetría, el vector de corriente \mathbf{J} en coordenadas esféricas, tiene una dirección radial perpendicular a la superficie del electrodo. Su forma puntual aplicando la ley de Ohm, para el vector de dirección radial del campo eléctrico \mathbf{E} :

$$E = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

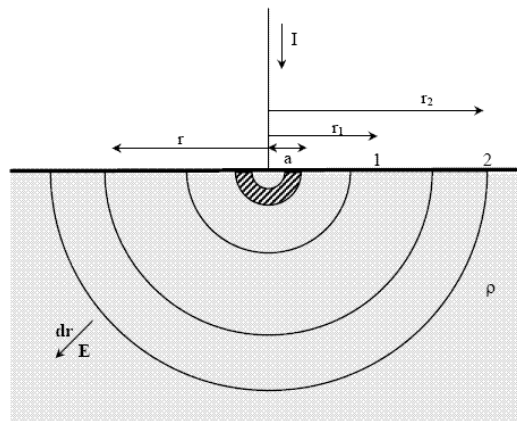
Integrando, para encontrar la diferencia de potencial entre los puntos 1 y 2, sobre la superficie del terreno, ubicados a distancias r_1 y r_2 del centro del electrodo resulta para una expresión de voltaje:

$$V_{12} = \int_1^2 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = \rho \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} dr = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right]$$

Si hacemos que $r_2 \rightarrow \infty$, solamente queda el potencial en el punto 1, respecto a una referencia infinita; en consecuencia, para obtener el potencial del electrodo respecto a un punto ubicado a una distancia muy grande ($r = a$), tenemos la ecuación para el voltaje del electrodo:

$$V = \rho \cdot J = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (\text{Ecuación 7})$$

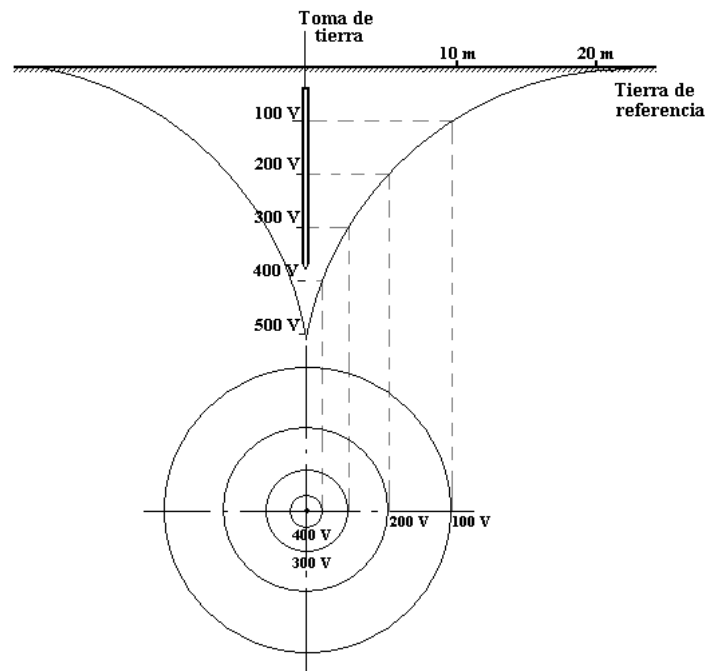
Figura 8. Electrodo hemisférico de radio a



Fuente: www.saber.ula.ve/.../electronica/sct/resistencia_a_tierra.pdf

Es importante tomar en cuenta el gradiente del potencial cuando se diseña el sistema de aterramiento, por la peligrosidad de este a un ser viviente al momento de una corriente de falla. En los electrodos simétricos, el voltaje ubicado radialmente a la misma distancia y profundidad, será el mismo. Los puntos equipotenciales se encuentran sobre círculos concéntricos cuyo punto central coincide con el centro del electrodo. En los electrodos asimétricos, los puntos equipotenciales sobre la tierra sigue aproximadamente la forma del electrodo. En cualquier caso, a medida que se separa del electrodo la diferencia de potencial disminuye. La zona en la que el voltaje entre dos puntos se hace prácticamente igual a cero sobre la superficie, se le llama “tierra de referencia”. Se puede trazar una curva que relacione los voltajes existentes entre la tierra de referencia y puntos ubicados sobre la superficie de la tierra en dirección perpendicular al electrodo, ver figura 9, de esta forma es que varía el voltaje con la distancia.

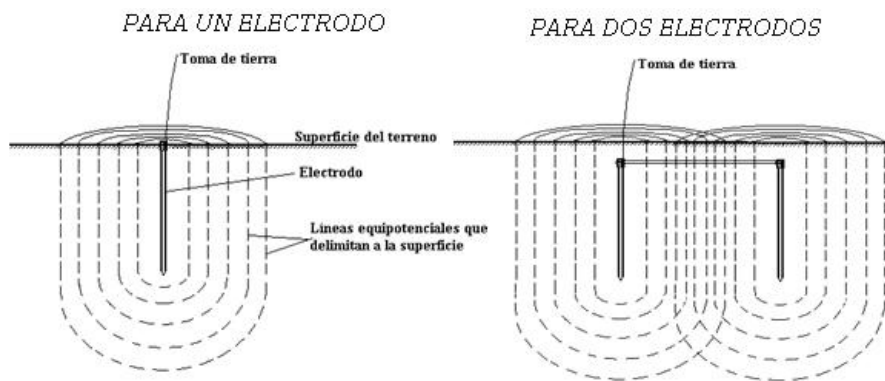
Figura 9. Distribución del potencial alrededor de un electrodo de punta



Fuente: www.saber.ula.ve/.../electronica/sct/resistencia_a_tierra.pdf

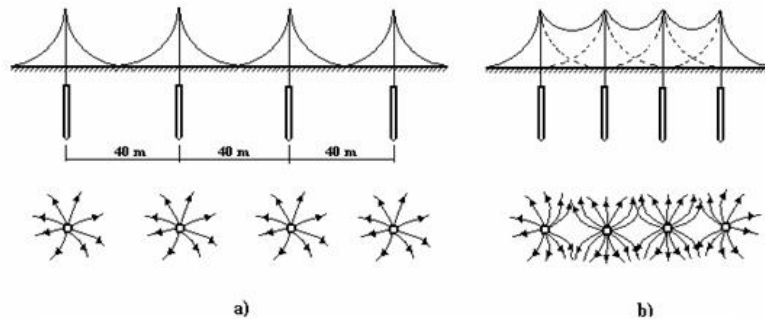
Factor de apantallamiento: La distribución de la corriente sobre el terreno es uniforme, si este es homogéneo, y las superficies equipotenciales delimitan las zonas del terreno puestas en serie con respecto al paso de la corriente. Las secciones aumentan al alejarse del electrodo como en la figura 11. Al conectar dos o más electrodos en paralelo mediante uno horizontal de enlace, se dispersa una corriente a tierra, este resultado de interacción entre zonas de dispersión provoca un solapamiento entre áreas, incrementando estas la resistencia de paso, como se aprecia en la figura 10.

Figura 10. Curvas equipotenciales



Fuente: www.saber.ula.ve/.../electronica/sct/resistencia_a_tierra.pdf

Figura 11. Influencia de la separación entre electrodos en el efecto de apantallamiento.

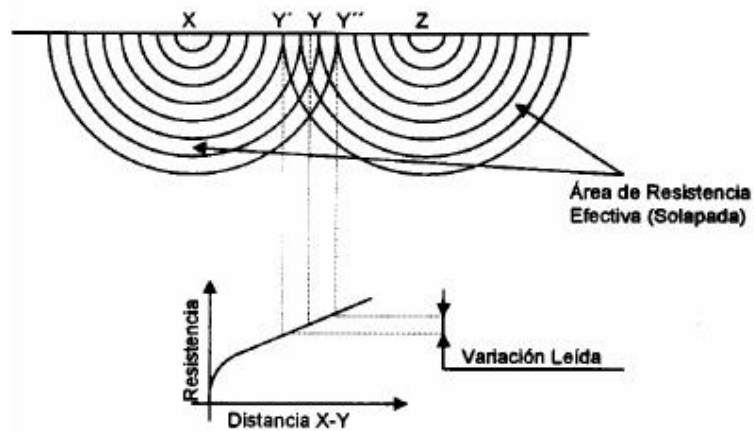


a) Electrodos a una separación tal que no existe superposición de las áreas de resistencia.
 b) Influencia mutua entre electrodos cuando se encuentran cercanos.

Fuente: www.saber.ula.ve/.../electronica/sct/resistencia_a_tierra.pdf

La medición de la resistencia de puesta a tierra por cualquier método genera gradientes de potencial en el terreno producto de la inyección de corriente por tierra a través del electrodo de corriente. Por ello, si el electrodo de corriente, el de potencial y el de tierra se encuentra muy cercanos entre sí, ocurrirá un solapamiento de los gradientes generados por cada electrodo; resultando una curva en la cual el valor de la resistencia medida se incrementará con respecto a la distancia, tal como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Variación de la resistencia con la distancia



Fuente: www.saber.ula.ve/.../electronica/sct/resistencia_a_tierra.pdf

Al momento de ocurrir una falla, una corriente circula por el electrodo de puesta a tierra, aparecen dos voltajes peligrosos que hay que considerar:

Voltaje de contacto: Cuando una persona se pone en contacto con alguna parte aterrada de la instalación al momento de ocurrir una falla a tierra, aparecerá una diferencia de voltaje entre sus manos y pies debido a la corriente de falla que circula por el sistema de puesta a tierra. Este voltaje corresponde a un punto sobre la curva de potencial del electrodo de tierra. Para calcular el voltaje de contacto se tiene:

$$V_c = 0.7 \cdot \frac{\rho \cdot I}{L} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

- ✓ ρ es la resistividad superficial del terreno en $\Omega - m$.
- ✓ I es la corriente de falla en A.
- ✓ L es la longitud total del electrodo horizontal en m.

Voltaje de paso: Es el voltaje del electrodo que puede ser puenteadado por una persona al caminar en las zonas próximas a la toma de tierra. Con la resistencia del cuerpo y contacto de los pies, se obtiene el voltaje de contacto, inferior al potencial entre el electrodo y el punto donde se encuentra la persona. Una persona al moverse en una dirección perpendicular a las líneas equipotenciales, aparecerá entre sus pies el voltaje. El voltaje de paso se calcula con la siguiente fórmula:

$$V_p = 0.16 \cdot \frac{\rho \cdot I}{h \cdot L} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

- ✓ L es la longitud total del electrodo horizontal en m.
- ✓ h es la profundidad de la toma de tierra en m.

2.2.3.2. Tipos de electrodos

Los electrodos deben tener propiedades mecánicas y eléctricas adecuadas para responder a ensayos e inspección, el material no debe corroerse y además tener buena conductividad eléctrica. Se usa el cobre, acero galvanizado, acero inoxidable y hierro fundido. Encontramos por ejemplo la varilla *Copperweld*.

La varilla *Copperweld* de acero recubierto de cobre, que se entierra profundidad de por lo menos de 2.4 m; de encontrarse roca a menos de 1.25 m, esta puede enterrarse a un mínimo de 0.8 m. Su desventaja es el área de contacto, pero presenta buena longitud.

Electrodos naturales: Entre estos tenemos las tuberías de agua, que se usan si cumplen condiciones como: tener por lo menos 3 m en contacto directo con la tierra y ser eléctricamente continua hasta el punto de conexión. Estructuras metálicas de edificios, para lo que debemos tener en cuenta que su impedancia a tierra debe ser baja, lográndolo uniendo las columnas a las partes metálicas de la cimentación con conductores según los calibres de los conductores de puesta a tierra de la norma (NEC 250-94).

El electrodo puede tener forma diversa, los más comunes se describen a continuación:

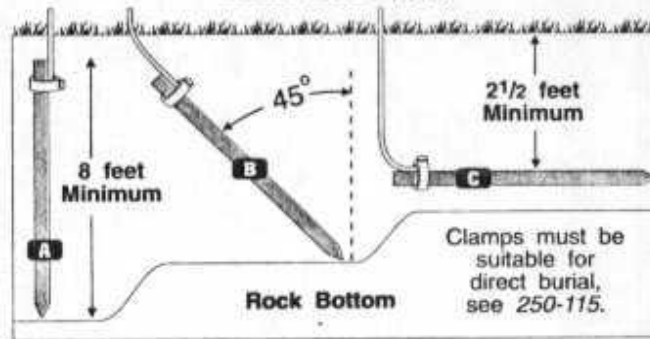
Electrodos de varilla: De acuerdo con la norma (NEC 250-83c) los electrodos de varilla, no deben tener menos de 2.40 m de largo y deben instalarse de tal modo que por lo menos 2.40 m de su longitud esté en contacto con la tierra, como se aprecia en la figura 14b. Están disponibles en diámetros de 15 a 20 mm (cobre sólido) y 9.5 a 20 mm (acero recubierto de cobre). Estos electrodos se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanzan la profundidad adecuada. En caso de terrenos rocosos o de tepetate, las varillas no pueden meterse de esa manera; se doblan o solamente no pueden entrar. Si encontramos una roca a menos de 2.40 m, estos electrodos se pueden meter en diagonal hasta con un ángulo de 45° de la vertical, figura 13. La resistencia de contacto de una varilla está dada por la fórmula de *Dwight* del M.I.T.

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{L}{r} \right) - 1 \right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

- ✓ ρ es la resistividad del terreno en $\Omega \cdot \text{m}$.
- ✓ L es el largo de la varilla en m.
- ✓ r es el radio de la varilla en m.

Figura 13. Electrodo de pica en posiciones de norma



Fuente: Roberto Ruelas. www.ruelsa.com/notas/tierras/pe80.html

La fórmula de *Dwight* para el caso de varilla enterrada en doble capa de tierra:

$$R = \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot (\ln(a_1) - \ln(a_0)) + \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot (\ln(4 \cdot L) - 1 - \ln(a_1)) \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

- ✓ ρ_0 es la resistividad del terreno adjunto en $\Omega \cdot \text{m}$.
- ✓ ρ_1 es la resistividad del terreno circundante en $\Omega \cdot \text{m}$.
- ✓ a_0 es el diámetro de la varilla en m.
- ✓ a_1 es el diámetro del terreno adjunto a la varilla en m.

Electrodos de placa: Los electrodos de placa no deberán tener menos de 0.2 m² de superficie en contacto con el suelo. Y las placas de acero o hierro deberán tener por lo menos 6.4 mm de espesor. Si son de material no ferroso deberán tener por lo menos 1.52 mm de espesor. Para utilizar una placa como electrodo, se debe de considerar que su posición óptima es de forma vertical, instalados a unos 2 m de profundidad, figura 14a, al colocarla horizontalmente, el terreno debajo de ella se asentaría y separaría del mismo.

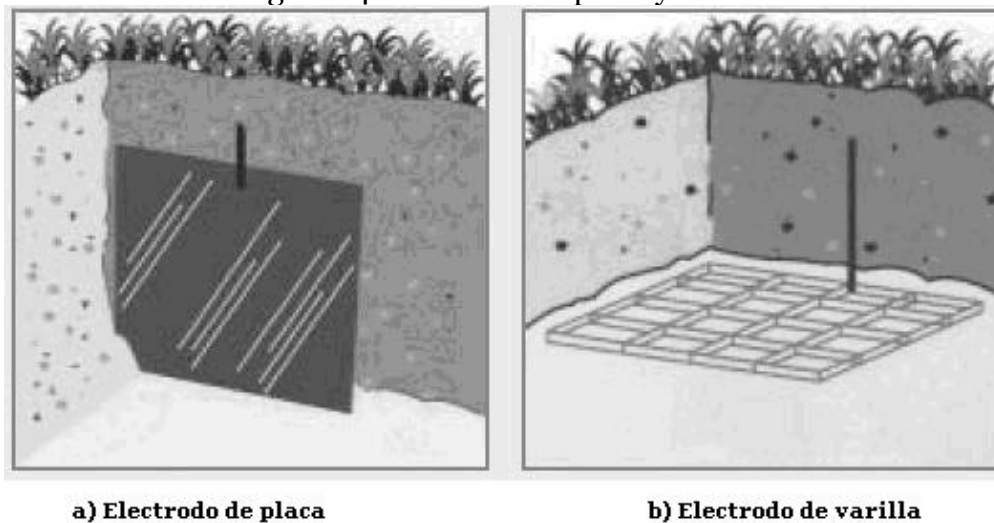
Recomendados en los terrenos de la tierra vegetal es de 1 a 1.5 m. La resistencia de tierra es, para la posición vertical:

$$R_T = 0.8 \cdot \left(\frac{\rho_T}{P} \right) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

- ✓ ρ_T es la resistividad del terreno en Ω - m.
- ✓ P es el perímetro de la placa en m.

Figura 14. Electrodo de placa y varilla



Fuente: Cortesía A N Wallis and Co.

Electrodo de cinta o cable: Si se elige un electrodo de cinta, se debe considerar que su sección debe ser de al menos 100 mm². Se conocen como dimensiones típicas las de 30 x 4 mm y las de 40 x 5 mm. Estas cintas son galvanizadas y se fabrican con estos fines, lo más usual, más práctico y duradero es el cable desnudo o cinta de cobre reconocidamente usado con efectividad y durabilidad. Estos electrodos para máxima efectividad, son instalados como únicos electrodos horizontales, colocados a 1 m de profundidad. El uso de electrodos horizontales y extensos es típico en terrenos rocosos que dificultan las perforaciones profundas. En el caso de que los cables o cintas sirvan para unir a electrodos verticales formando una malla, deben enterrarse a profundidades de 0.8 m sobre el nivel del terreno (para evitar el voltaje de paso).

2.2.3.3. Configuraciones de electrodos

El método convencional para lograr un sistema de tierra, es la combinación de electrodos verticales y horizontales. La configuración de estrella, la de anillo o la de malla, son configuraciones típicas de electrodos. Su complicación radica en obtener una resistencia de tierra baja, lo que implica el uso de altos números de electrodos. Una corriente, al pasar por un electrodo de punta simétrico, su distribución de potencial, está determinada por líneas concéntricas de iguales potenciales, que van decreciendo hasta hacerse cero en la tierra de referencia, 20 m es una adecuada distancia para ser usada como tierra de referencia. Lo anterior, hace existir la condición de una distancia que minimice la interacción de los campos entre ellos, como consecuencia efectos de apantallamientos; mientras más alejados estén dos electrodos, la resistencia lograda con su unión será menor. En la práctica es imposible por economía y espacio, usar distancias tan grandes. Lo usual es tabular valores de apantallamiento con la distancia de separación y configuración del electrodo.

Un valor recomendado en la práctica es usar como distancia entre electrodos, dos veces la profundidad enterrada que tenga el mismo, siendo la separación igual a la profundidad enterrada.

Configuración de malla: La norma requiere un sistema enmallado de tierra con múltiples electrodos y conductores enterrados, cuando están involucradas tensiones y corrientes eléctricas muy altas (NEC 921-18). La malla consta de una red de conductores enterrados a una profundidad que usualmente varía de 2.5 a 3 m, colocados paralela y perpendicularmente con un espaciado igual a la distancia del electrodo como mínimo. El cable que forma el perímetro exterior de la malla debe ser continuo, evitando concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y terminales cercanas (921-25). Los cruces de conductores en la malla, deben de estar conectados de manera rígida entre sí con soldadura exotérmica o en las esquinas de la malla. Con respecto al factor de apantallamiento, esta es la configuración mas adecuada, en contraposición, requiere mas espacio. Los cables empleados en las mallas de tierra son de acero, acero inoxidable, acero galvanizado, y cobre. El factor principal en la selección del material es la resistencia a la corrosión.

Configuración en forma de estrella: Este caso responde al uso de los electrodos horizontales formando caminos o ramas alrededor de un punto. La estrella formada no debe exceder de 6 rayos, ya que un número mayor introduciría coeficientes bajos de apantallamiento que serían perjudiciales. El número de rayos más usados es entre 3 y 4 rayos. Este tipo de configuración se realiza con cable de cobre desnudo con ramificaciones de 60° o más de ángulo, utilizados en el campo por la longitud del cable, ya que se obtiene una resistencia de menor valor. Si se unen entre sí las ramificaciones que constituyen un electrodo en estrella, se obtiene una red estrellada.

Configuración poligonal o de anillo: Es cuando el sistema rodea a la edificación. En estos casos también deben cumplirse las profundidades y espaciamentos citados. En este método, para iguales distancias de espaciamiento, igual cantidad de electrodos e igual longitud de cable horizontal enterrado, se obtienen valores de mayor valor óhmico, que los que se lograrían si estos electrodos se colocaran de forma lineal. La configuración de anillo tiene a su favor que permite una distribución alrededor del edificio propiciando las uniones equipotenciales, ocupa menos espacio y es menos propensa a los daños mecánicos fortuitos, por estar cerca de la edificación y mantenerse dentro de sus límites. Esta configuración es típica de sub-estaciones eléctricas y sitios de comunicaciones. Un anillo de tierra consiste en un conductor de cobre desnudo, de sección transversal no menor al calibre 2 AWG (por resistencia mecánica) y de longitud no menor a 6 m enterrado a una profundidad de 800 mm y, que rodee al edificio o estructura.

2.2.3.4. Medición de la impedancia del electrodo

Es necesario la medida del valor óhmico por: revisar su valor, posterior a la instalación y previo a la conexión del equipo, y, parte del mantenimiento de rutina, verificando que su valor no ha aumentado. Un método común para medir la resistencia de un electrodo pequeño o mediano es el de “caída de potencial”, este método puede ser aplicado con éxito en instalaciones de gran área si los cables de prueba se extienden hasta 800 o hasta 1000 m. El instrumento usado para la resistencia de terreno puede ser usado para medir el valor resistivo de la impedancia del electrodo. El instrumento puede protegerse contra posibles sobrevoltajes durante el tiempo de prueba con fusibles de 100 mA, conectados externamente.

Por seguridad, se debe tener una conexión con el electrodo de tierra remota, que se encuentra al potencial de tierra real aproximadamente. Como recomendación en la medición de la resistencia del electrodo debemos, tener una persona encargada, comunicación entre todos los participantes vía radio, usar guantes de goma y calzado adecuado, uso de una placa metálica para asegurar una equipotencial en la posición de trabajo.

2.2.4. Conexiones

La conexión entre electrodos se realiza por medio de cobre desnudo, ayudando esto a reducir la impedancia global. Las conexiones deben ser robustas mecánicamente, resistencia a la corrosión y baja resistividad. Dichas conexiones son factores tomados en cuenta en el diseño. Se tomará en cuenta algunos métodos empleados para unir, método mecánico, bronceado, soldadura exotérmica y soldadura por fusión autógena.

Conexiones mecánicas: Empleadas comúnmente la conexión apernada (mecánica) y la compresión (hidráulica), deben cumplir las normas pues serán sometidos a impactos mecánicos, eléctricos y térmicos. Se debe tener cuidado al efectuar perforaciones efectuadas para acomodar pernos cuando se unen cintas entre sí. Al apernar diferentes metales, se debe limpiar y proteger con inhibidor de óxido.

Conexiones bronceadas: Se aplican en cobres y aleaciones de cobre. Su ventaja principal es que proporciona baja resistencia de unión que no se corroe. Es necesario una superficie limpia y plana de los materiales para el bronceado.

Uniones exotérmicas: Se realizan mediante moldes de grafito, diseñado para ajustar el tipo específico de unión. Usando una pistola con pedernal se enciende una mezcla de polvo de aluminio y de óxido de cobre y la reacción que se crea forma una unión de cobre puro. Entre sus beneficios están: proporcionar una unión permanente de baja resistencia y resistente a la corrosión. No es permitida para conectar cobre y aluminio en las subestaciones.

Conexión con soldadura autógena: El cobre se puede unir por soldadura de bronce o soldadura al arco en presencia de gas. Esta técnica emplea alta temperatura y material de relleno. El arco eléctrico proporciona el calor, mientras que el área en torno al electrodo y la soldadura es envuelta por un gas tal como argón o nitrógeno, esto reduce la oxidación durante el proceso de soldadura.

3. PUESTA A TIERRA DE CIRCUITOS DE ALIMENTACIÓN

El sistema de puesta a tierra de potencia en teoría, no tiene que ser aterrizado argumentando que es más confiable. En general, las redes no aterrizadas no son confiables debido a la sobre sollicitación del aislamiento que rodea cables o líneas. Las estructuras residenciales necesitan un sistema de CA conectado a tierra. Las centrales eléctricas generalmente proporcionan este servicio, lo que requiere que la estructura cumpla con requerimientos del código.

El código divide un sistema de CA en cuatro grupos, (NEC 250-20):

- Menor de 50 voltios.
- De 50 a 1000 voltios.
- 1000 voltios y voltajes superiores.
- Sistemas derivados separadamente.

No se exige una conexión a tierra para un sistema CA menor a 50 V, excepto en tres situaciones:

- ✓ Cuando se suministra con transformador con voltaje superior a 50 V.
- ✓ Cuando se suministra por transformador, y la fuente de potencia no esta conectado a tierra.
- ✓ Cuando es instalado como conductores aéreos fuera de edificio.

Cuando tenemos sistema de 50 a 1000 V, el código requiere conexión a tierra donde el sistema:

- ✓ Es un sistema trifásico, de 4 hilos, conectado en estrella donde el conductor neutro es utilizado como conductor de circuito.

- ✓ Es un sistema trifásico, de 4 hilos, conectado en delta el cual tiene el punto medio del devanado conectado a tierra.

3.1. Sistema de alimentación CD

Sistemas eléctricos en CD de no más de 300 V no requieren conexión a neutro, a menos de que alguna de las siguientes condiciones se cumpla:

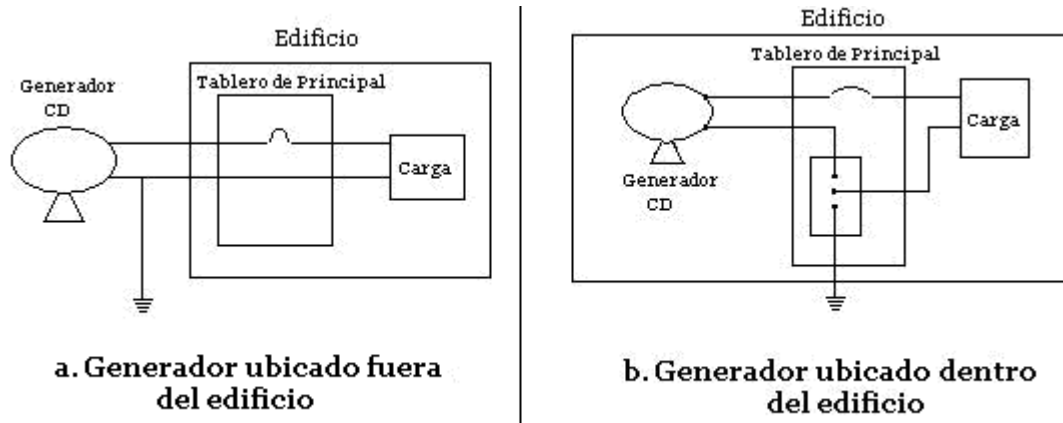
- Suministren energía a sistemas industriales en áreas limitadas y sean equipados con un detector de tierra.
- Operen a menos de 50 V entre conductores.
- Sean alimentados con un rectificador desde un sistema en CA aterrizado.

En la sección 250 162 del NEC, trata dos sistemas CD, de dos y tres hilos, dichos sistemas son:

- Un sistema de dos hilos entre 50 y 300 voltios.
- Un sistema de 3 hilos que suministra el cableado del edificio.

Sistema de tres hilos: Se debe conectar el neutro a tierra sin excepciones. Los requerimientos son iguales en los dos sistemas, estos depende de si la fuente se encuentra fuera o dentro del edificio. Si el sistema se encuentra fuera del edificio, figura 15a, la conexión a tierra se hace en una o mas estaciones de suministro y no se hace en los servicios individuales o en cableado dentro del edificio. Si la fuente está dentro del edificio, figura 15b, una conexión a tierra debe hacerse en uno de los siguientes puntos: la fuente, el primer desconector de servicio o interruptor de circuito y por medios que logren un sistema equivalente de protección utilizando equipo listado y apropiado.

Figura 15. Sistemas CD



3.2. Sistema de alimentación CA

Existen diversos sistemas de potencia CA:

Sistema no puesto a tierra: Este sistema no tiene una conexión a tierra deliberada. En condiciones normales, la capacidad entre cada fase y tierra es la misma, el efecto es estabilizar el sistema respecto a tierra de modo que en un sistema trifásico, el voltaje de cara fase a tierra es el volta estrella del sistema. El punto neutro, está en o cerca del potencial de tierra. Cuando ocurra una falla por mal tiempo, no habrá tanto daño puesto que no existe un circuito metálico cerrado que permita el flujo de corriente. Se tendrá resonancia, debido a la alta capacitancia del sistema causando sobretensiones, y se dará cuando se conecte a tierra una conexión con alta inductancia.

Sistemas puestos a tierra: Tiene un conector conectado a tierra, esta conexión se realiza cerca de donde se unen los 3 enrollados individuales de un transformador trifásico, en el punto común de la estrella.

Este método se emplea cuando hay necesidad de conectar al sistema cargas fase neutro, previniendo que el voltaje a neutro varíe con la carga. Este tipo de puesta a tierra se clasifican en:

- **Sistema puesto a tierra mediante impedancia:** Se insertan de manera deliberada resistores y reactores en la conexión entre el punto neutro y tierra, limitando la corriente de falla. Para evitar sobrevoltajes debido a resonancia, las puestas a tierras inductivas deben permitir el flujo a tierra de falla de al menos 60% de la capacidad de cortocircuito trifásico.
- **Sistema puesto a tierra con baja impedancia:** Aquí el neutro se conecta a tierra a través de una conexión adecuada sin impedancias. Su desventaja es que las corrientes de falla a tierra son altas pero los voltajes permanecen controlados bajo condiciones de falla.

3.3. Conexión del neutro de los sistemas de alimentación

Los métodos empleados para la conexión a tierra, siguen estándares, el régimen de neutro define las conexiones eléctricas del neutro de las masas respecto de la tierra, cada uno identificados por un código que contiene las siguientes letras:

Primera letra: Situación del neutro respecto de la tierra.

- T = conexión directa del neutro a la tierra.
- I = conexión a la tierra mediante una impedancia elevada.

Segunda letra: Situación de las masas respecto de la tierra.

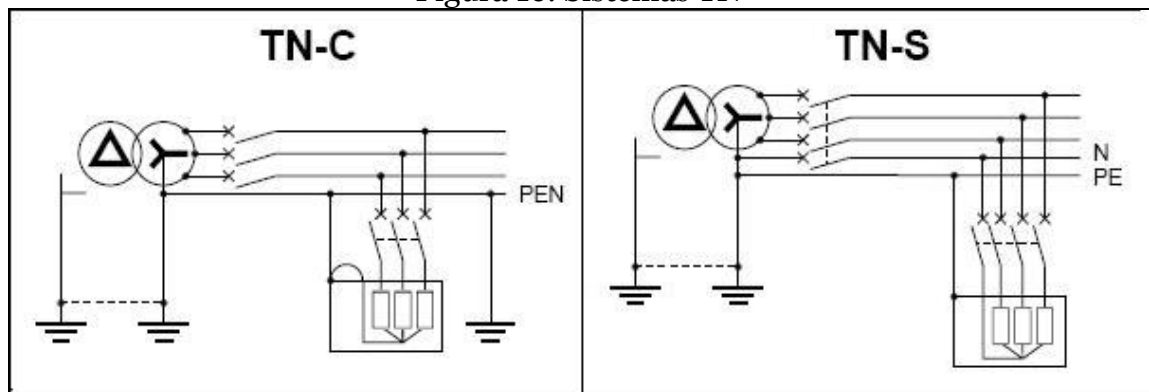
- T = conexión directa de las masas a una tierra diferencial.
- N = conexión de las masas a la tierra del neutro.

3.3.1. Esquema TN

TN-C: La tierra (PE) y el neutro (N) van por un mismo conductor llamado PEN. No se recomienda en lugares con riesgo, las corrientes son muy altas en el conductor PEN. Circulan corrientes perturbadoras por las masas, genera radiación de perturbaciones CEM por el PE.

TN-S: La tierra (PE) y el neutro van por conductores diferentes conectados a tierra. Es necesario controlar los equipos con corrientes de fuga elevadas situados después de las protecciones diferenciales.

Figura 16. Sistemas TN



Fuente: www.um.es/docencia/mmc/pdf/cem.pdf

La figura 16 muestra el sistema TN. Las consideraciones que se deben de tener son: En un esquema TN-C, el conductor PEN, no debe estar cortado en ningún caso, además, debe estar conectado a tierra. En esquema TN-S, el conductor PE, no debe estar cortado en ningún caso. Los esquemas TN-C y TN-S se pueden utilizar en una misma instalación, el esquema TN-C debe estar situado necesariamente delante del esquema TN-S, este es indispensable para secciones de cable $< 10 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ o $< 16 \text{ mm}^2$ y en el caso de cables flexibles.

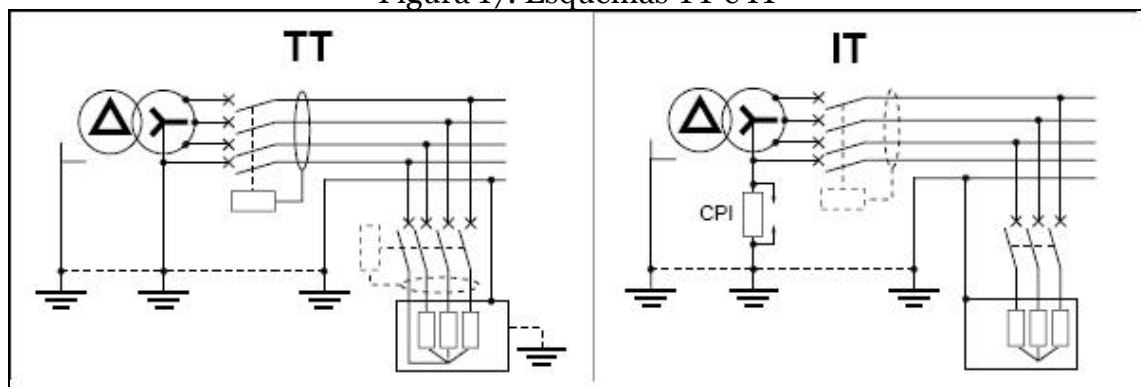
3.3.2. Esquema TT

La alimentación se pone a tierra en un único punto, figura 17, pero la pantalla del cable y las partes metálicas expuestas de la instalación del cliente están conectadas a tierra vía un electrodo separada que es independiente del electrodo de alimentación. Para la seguridad de las personas es obligatorio un disyuntor diferencial.

3.3.3. Esquema IT

Este es un sistema que no tiene conexión directa entre partes vivas y tierra pero sí con partes conductivas expuestas de la instalación, figura 17, conectadas a tierra. Algunas veces se proporciona una conexión a tierra de alta impedancia que simplifica la protección para detectar la primera falla a tierra.

Figura 17. Esquemas TT e IT



Fuente: www.um.es/docencia/mmc/pdf/cem.pdf

4. TIERRA DE LOS EQUIPOS

El Artículo **250** del **NEC** cubre los requisitos generales para la puesta a tierra y sus puentes de unión en las instalaciones eléctricas y, además, los requisitos específicos que se mencionan: En sistemas, circuitos y equipos en los que se exige, se permite o donde no se permite que estén puestos a tierra. El conductor del circuito que es puesto a tierra en sistemas puestos a tierra. Ubicación de las conexiones a tierra. Tipos y tamaños nominales de los conductores, puentes de unión y electrodos de conexión para puesta a tierra. Métodos de puesta a tierra y puentes de unión. Condiciones en las que se puede sustituir a los resguardos, separaciones o aislamiento por la puesta a tierra.

Se deben poner a tierra las partes metálicas del equipo no-eléctrico descrito en los siguientes incisos:

- a) Estructuras y vías de grúas operadas eléctricamente.
- b) La estructura metálica de elevadores movidos no eléctricamente, a las que están sujetos conductores eléctricos.
- c) Los cables de acero de los elevadores eléctricos.
- d) Partes metálicas de subestaciones de voltajes de más de 1 kV entre conductores.
- e) Casas móviles y vehículos de recreo. (550 y 551).

En contrapartida, no debemos poner a tierra los siguientes circuitos:

- a) Los circuitos de grúas eléctricas que funcionen sobre fibras combustibles.
- b) Instituciones de salud (clínicas y hospitales).
- c) Celdas electrolíticas.

4.1. Conexión, colores, identificación

El equipo fijo, conectado por un alambrado permanente, requiere poner a tierra las partes metálicas no conductoras del equipo, canalizaciones u otros envolventes, haciéndose por los siguientes métodos:

- a) Todos los permitidos por 250-91(b).
- b) Mediante el conductor de puesta a tierra de equipo instalado dentro de la misma canalización, cable o tendido de cualquier otro modo con los conductores del circuito. Se permiten conductores de puesta a tierra de equipos desnudos, cubiertos o aislados. Los conductores de puesta a tierra cubiertos o aislados individualmente deben tener un acabado exterior continuo, verde liso o verde con una o más franjas amarillas.

Excepción: Se permite que, durante la instalación, un conductor aislado o cubierto de tamaño nominal superior a 13.3 mm² (6 AWG), de cobre o de aluminio, se identifique permanentemente como conductor de puesta a tierra en sus dos extremos y en todos los puntos en los que el conductor esté accesible, o cuando las condiciones de mantenimiento y de supervisión aseguren que la instalación está atendida solo por personal calificado, identificar permanentemente durante la instalación uno o más conductores aislados en un cable multipolar como conductores de puesta a tierra de equipo, en cada extremo y en todos los puntos en los que el conductor esté accesible, por los siguientes medios:

- ✓ Quitando el aislamiento o el recubrimiento en toda la parte expuesta.
- ✓ Pintando de verde el aislamiento o el recubrimiento expuesto.
- ✓ Marcando el aislamiento o el recubrimiento expuesto con una cinta o etiquetas adhesivas de color verde.

4.2. Conductores del electrodo de puesta a tierra

Los materiales del conductor del electrodo de puesta a tierra se especifican en los siguientes incisos:

- **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.
- **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 macizo o cableado, aislado, cubierto o desnudo y formar un cable o barra de cualquier forma; (2) un tubo metálico tipo pesado; (3) un tubo metálico tipo semipesado; (4) un tubo metálico tipo ligero; (5) un tubo metálico flexible, si tanto el tubo como sus accesorios están aprobados y listados 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) los soportes para cables tipo charola; (10) cableductos; (11) otras canalizaciones metálicas con continuidad eléctrica, aprobadas para usarse para puesta a tierra.

- **Puesta a tierra suplementaria:** Se permiten electrodos suplementarios de puesta a tierra para aumentar los conductores de puesta a tierra de equipo especificados en 250-91(b), pero el terreno natural no se debe utilizar como el único conductor de puesta a tierra de equipo.

4.3. Instalación

Los conductores de puesta a tierra se deben instalar como se indican a continuación.

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 21.15 mm² (4 AWG) o superior, se debe proteger, 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. Los conductores de puesta a tierra de tamaño nominal inferior a 13.3 mm² (6 AWG) deben alojarse en tubo metálico tipo pesado, semipesado, ligero, en tubo no metálico tipo pesado, o en cable armado. No se deben usar 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 se deben instalar a menos de 45 cm del terreno natural.

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 un puente de unión de sus dos extremos al conductor de puesta a tierra. Un conductor de puesta a tierra de equipo se debe instalar como sigue:

Cuando consista en una canalización, un soporte para cables tipo charola, armadura o forro de cables o cuando sea un conductor dentro de una canalización o cable, se debe instalar cumpliendo las disposiciones aplicables de esta norma usando accesorios para uniones y terminales que estén aprobados para usarlos con el tipo de canalización o cable utilizados. Todas las conexiones, uniones y accesorios se deben fijar firmemente con los medios adecuados. Cuando haya un conductor independiente de tierra de equipo, se debe instalar de acuerdo con lo indicado en el inciso anterior en lo que respecta a las limitaciones del aluminio y a la posibilidad de daño físico. No es necesario que los cables inferiores a 13.3 mm² (6 AWG) se alojen dentro de una canalización o armadura cuando se instalen por los espacios huecos de una pared o cuando vayan instalados de modo que no sufran daño físico.

4.4. Tamaño de los conductores de puesta a tierra

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 II. Cuando haya conductores en paralelo en varias canalizaciones o cables, el conductor de puesta a tierra de equipo, 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. Cuando se usen varios grupos de conductores de entrada a la acometida, la sección transversal equivalente del mayor conductor de entrada a la acometida se debe calcular por la mayor suma de las secciones transversales de los conductores de cada grupo. Cuando no haya conductores de entrada a la acometida, la sección transversal del conductor al electrodo de puesta a tierra se debe calcular por la sección transversal equivalente del mayor conductor de entrada a la acometida de acuerdo con la corriente eléctrica de carga calculada.

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 deberán ajustar proporcionalmente según el área en mm² de su sección transversal. Cuando solo haya un conductor de puesta a tierra de equipo con varios circuitos en el mismo tubo 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 o cable.

Si el dispositivo de sobrecorriente consiste en un interruptor automático de disparo instantáneo o un protector de motor contra cortocircuitos, 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 sobrecorriente, pero no debe ser inferior a lo especificado en la tabla II.

La tabla III muestra las especificaciones del conductor del electrodo en una instalación de CA.

Tabla II. Tamaño nominal mínimo de los conductores de tierra para canalizaciones y equipos

| Capacidad o ajuste máximo del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones, etc. (A) | Tamaño nominal mm ² (AWG o kcmil) | |
|--|--|-------------------|
| | Cable de cobre | Cable de aluminio |
| 15 | 2.082(15) | --- |
| 20 | 3.307(12) | --- |
| 30 | 5.26(10) | --- |
| 40 | 5.26(10) | --- |
| 60 | 5.26(10) | --- |
| 100 | 8.367(8) | 13.3(6) |
| 200 | 13.3(6) | 21.15(4) |
| 300 | 21.15(4) | 33.62(2) |
| 400 | 33.62(2) | 42.41(1) |
| 500 | 33.62(2) | 53.48(1/0) |
| 600 | 42.41(1) | 67.3(2/0) |
| 800 | 53.48(1/0) | 85.01(3/0) |
| 1000 | 67.3(2/0) | 107.2(4/0) |
| 1200 | 85.01(3/0) | 126.7(250) |
| 1600 | 107.2(4/0) | 177.3(350) |
| 2000 | 126.7(250) | 202.7(400) |
| 2500 | 177.3(350) | 304(600) |
| 3000 | 202.7(400) | 304(600) |
| 4000 | 253.4(500) | 405.37(800) |
| 5000 | 354.7(700) | 608(1200) |
| 6000 | 405.37(800) | 608(1200) |

Véase limitaciones de la instalación en 250-90(a)

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

Fuente: <http://www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/instalacelectricas/42.htm>

4.4.1. Tamaño del conductor del electrodo de PST para CC

No debe ser de tamaño nominal inferior al del neutro. Cuando un sistema eléctrico de CC consista en un circuito balanceado de tres conductores o un devanado de equilibrio con protección contra sobrecorriente. 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. En ningún caso el conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser inferior a 8.367 mm² (8 AWG) de cobre o de 13.3 mm² (6 AWG) de aluminio.

Tabla III. Conductor del electrodo de tierra de instalaciones de CA

| 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 tierra mm ² (AWG o kcmil) | |
|---|--|---|-------------|
| Cobre | Aluminio | Cobre | Aluminio |
| 33.62 (2) o menor | 53.8 (1/0) o menor | 8.367 (8) | 13.3 (6) |
| 42.41 ó 53.48 (1 ó 1/0) | 67.43 ó 85.01 (2/0 ó 3/0) | 13.3 (6) | 21.15 (4) |
| 67.43 ó 85.01 (2/0 ó 3/0) | 4/0 ó 250 kcmil | 21.15 (4) | 33.62 (2) |
| Más de 85.01 a 177.3 (3/0 a 350) | Más de 126.7 a 253.4 (250 a 500) | 33.62 (2) | 53.48 (1/0) |
| Más de 177.3 a 304.0 (350 a 600) | Más de 253.4 a 456.04 (500 a 900) | 53.48 (1/0) | 85.01 (3/0) |
| Más de 304 a 557.38 (600 a 1100) | Más de 456.04 a 886.74 (900 a 1750) | 67.43 (2/0) | 107.2 (4/0) |
| Más de 557.38 (1100) | Más de 886.74 (1750) | 85.01 (3/0) | 126.7 (250) |

Fuente: <http://www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/instalacelectricas/42.htm>

5. SITIOS DE TELECOMUNICACIONES

En las industrias de telecomunicaciones, la técnica que se utiliza para las conexiones a tierra es diferente a los sistemas de CA. Para los sistemas de telecomunicaciones, se utiliza una barra de tierra principal como referencia a tierra para varios sistemas en un edificio, como las tierras del equipo de telefonía, la tierra de las baterías, tierras RF, tierras halo y las tierras aisladas del equipo electrónico. La barra de tierra principal se ubica fuera del equipo de servicio, para quedar de forma accesible, de esta manera la tierra de telecomunicaciones y tierras CD se pueden conectar fácilmente sin la intervención de un electricista. Una de las razones de esta barra de tierra principal, es la cantidad de conexiones, requiriendo para ello numerosos agujeros. Además debe existir un punto central para remover los terminales. No se puede olvidar el factor de seguridad, para que nadie remueva el neutro accidentalmente buscando una tierra.

Los sistemas de telecomunicaciones utiliza bancos de baterías para no ver interrumpido el suministro de energía, eliminando así problemas de transitorios e interrupción. Las baterías son útiles, puesto que la mayoría de equipo funciona con CD, el banco de éstas se instalan proporcionando varias horas de respaldo. El terminal del sistema de CD se conecta a tierra en la sección N de la barra principal; hay que recordar un esquema muy importante, las armónicas deterioran los bancos de baterías. En el caso de torres de radiodifusión, se emplean cables en configuración de estrella (radiales) para su puesta a tierra. Se ha encontrado más efectivo tener conectados los cables en un punto que tener múltiples anillos rodeando el sitio.

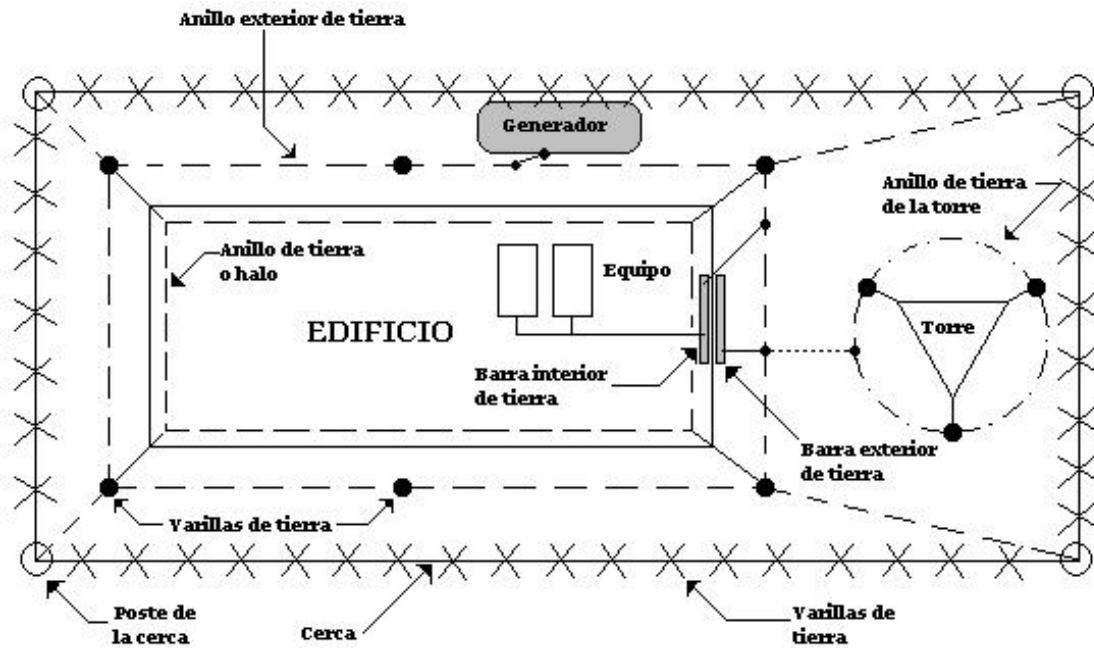
Estos cables radiales llamados contra-antenas pueden ser menores a 30 m de largo si el suelo es adecuado. Los cables dispersan la energía de las descargas muy eficientemente. Como la corriente se divide en proporciones iguales en los cables radiales, entre más cables, menor corriente los circula. Y, una baja corriente es más fácil de disipar y tendrá menor impacto en la elevación del potencial de tierra del sistema.

El método recomendado para realizar una puesta a tierra efectiva en un sitio de telecomunicaciones es la utilización del concepto de “punto único de conexión a tierra”, que se ha convertido en el estándar de la industria de telecomunicaciones para poner a tierra su equipo digital. El sistema punto único de conexión a tierra se logra conectando todos los elementos de tierra en un punto común, el cual se conoce como barra principal de tierra.

5.1. Subsistema exterior e interior de tierra

En sitios con antenas de radio, el propósito de la conexión a tierra es proporcionar una trayectoria con la impedancia más baja posible, desde las antenas y la torre, a tierra. La tierra de la torre consiste en un anillo de alambre que está enterrado alrededor de la base. La tierra externa del edificio consiste por lo general en un alambre enterrado, en forma de anillo, que circunda el edificio. El anillo externo tiende a igualar el potencial del terreno en los alrededores de la caseta y torre. Los dos anillos, el de la torre y el del edificio se conectan entre sí y se complementan con una varilla de tierra. Todos los blindajes de las líneas de transmisión de RF y equipos de entrada se conectan a tierra, como se muestra en la figura 18. El anillo exterior de tierra debe estar a un mínimo de 60 cm del edificio y el anillo de tierra de la torre a un mínimo de 50.8 mm de las bases.

Figura 18. Anillo de tierra, exterior e interior

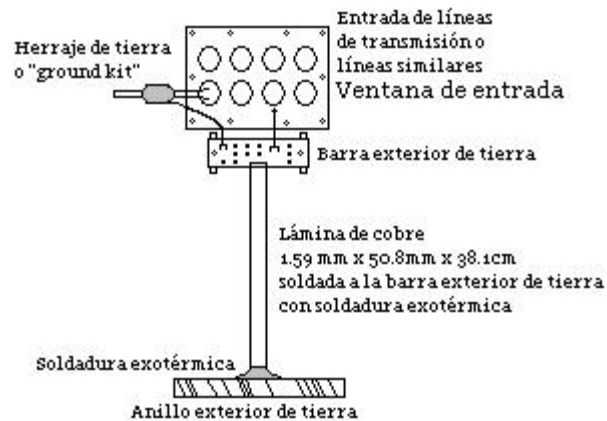


Es preciso que el sistema interno tenga una trayectoria de baja impedancia a tierra y que logre una mínima diferencia de potencial entre las estructuras conductoras del sitio, mientras elimina o minimiza cualquier flujo de sobrecorriente a través del equipo. Las conexiones internas se efectúan a una barra de cobre, llamada barra principal de tierra (MGB), que ofrece un punto de baja resistencia para todas las tierras internas. Todo el equipo de RF se conecta directamente a esta barra y a su vez ésta se conecta al anillo externo de tierra, a la conexión de tierra de la línea de alimentación de CA y a otras tierras, como la estructura metálica del edificio. Otras barras auxiliares se conectan a la barra principal de tierra, y sirven para conectar a tierra cierto grupo de equipos o compartimientos dentro del edificio. Las cubiertas de los equipos y los gabinetes deben estar aislados de las trayectorias de tierra no planeadas para evitar flujos de corriente de tierra.

5.1.1. Barra externa de tierra

La barra externa de tierra es una barra de cobre, con orificios taladrados para montar las terminales. Puede estar equipada con una cinta de cobre de 5.8 cm de longitud y de 1.3 mm de espesor, que sirve como conexiona esta barra, la cual proporciona un punto de baja resistencia para aterrizar las terminales de los accesorios de conexión a tierra de las líneas de transmisión en el punto de entrada en el cuarto del equipo. Se ubica directamente debajo de la ventana de entrada de la guía de onda en la parte exterior del cuarto del equipo, figura 19.

Figura 19. Barra exterior de tierra unida al anillo exterior de tierra



5.1.2. Barra principal de tierra

La barra principal de tierra, figura 20, es el centro de actividad del sistema de tierra. Es el punto de conexión común para las protecciones contra sobrevoltajes transitorios (P) y los absorbedores de carga (A), lo mismo que para las tierras de los equipos de ambas áreas, las no aisladas (N), y las aisladas (I).

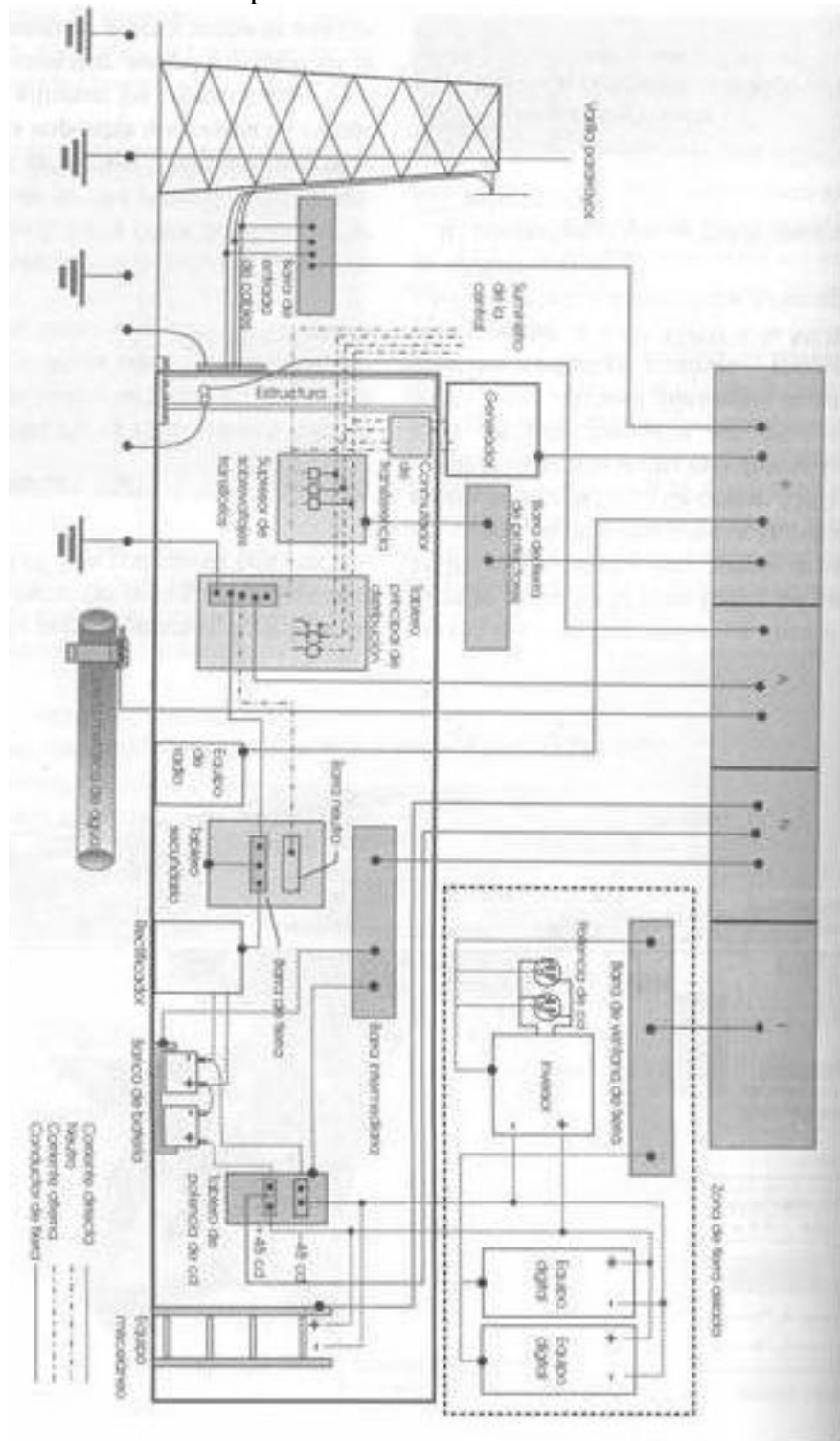
La barra es de cobre y está aislada de su soporte y se ubica fuera del área de la zona de tierra aislada, sus dimensiones mínimas son 57 mm de largo por 78 mm de ancho y 6.35 mm de espesor. Por lo general, se instala en la pared del sitio. Todas las terminales a la barra deben conectarse al conductor por medio de conectores del tipo lengüeta con dos pernos, que tengan conexión de compresión o soldadura exotérmica con el conductor. La configuración de la unión a la barra, facilita la concentración y disipación de altas sobrecorrientes que se generan fuera del alambrado de la planta, equipo de radio, etc., por medio de las secciones (P) y (A) de la barra. Ésta mantiene el mismo potencial de voltajes a través de sus secciones (N) e (I).

Figura 20. Barra principal de tierra



En la parte de los generadores se encuentran: los blindajes de cables de teléfonos, marco del generador, etc., tierra de equipo de radio, etc. En la parte de los absorbedores están, la conexión T-N del edificio, anillo de tierra exterior, acero del edificio, tubería de agua, etc. La batería de 24 V y la de 48 V, se encuentran en la zona de tierra no aislada, mientras que la barra de ventana de tierra se encuentra en la tierra de la zona aislada. En la figura 21 se encuentra la conexión de los sistemas hacia la barra de tierra.

Figura 21. Sistema de puesta a tierra de un sitio de telecomunicaciones



Fuente: Pablo Díaz. Soluciones prácticas para la puesta a tierra. Página 191

5.2. Sistema de puesta a tierra de un sitio de comunicaciones

El sistema presenta una trayectoria directa de baja impedancia entre la tierra y todos los equipos de alimentación y comunicaciones, se compone de cuatro subsistemas básicos: sistema de electrodo de tierra, sistema de protección contra fallas, sistema de protección contra descargas atmosféricas y, sistema de señal de referencia.

El sistema de electrodos se instala con el fin de proporcionar una trayectoria de baja resistencia para conducir la energía de rayos y evita que ocurran diferencias peligrosas de voltajes. El sistema de electrodo de tierra en un sitio de comunicaciones deberá unirse:

- En un punto único tal como lo exige la sección del NEC 250-32.
- A todos los subsistemas de tierra, los cuales incluyen el sistema de protección contra descargas atmosféricas, la referencia de señal y los sistemas de protección contra fallas.
- A la tubería metálica bajo tierra, a los tanques u otras masas u objetos metálicos enterrados.

Para el anillo externo de tierra, el sistema esta compuesto de un conductor externo que rodea el perímetro de la caseta y torre y de electrodos o barras de cobre. Las puntas de los conductores se unen para formar un anillo. A este conductor se soldan exotéricamente las barras de cobre asegurando el contacto permanente con la textura del terreno. Se deben utilizar barras de cobre pues su corrosión es más lenta que en otro metal económicamente aceptable. Esta prohibido el uso conductores de aluminio. Las varillas de tierra deberán:

- Ser de acero recubierto con cobre y tener una longitud mínima de 2.40 m y un diámetro de 16 mm. El revestimiento de cobre no debe ser menor de 0.31 m.
- El espacio mínimo aceptable entre varillas es de 1.80 m, pero se recomienda un espacio de dos veces la longitud de la varilla.
- El espacio mínimo entre las varillas y el edificio es de 60 cm.
- Debe enterrarse a una profundidad de 75 cm.

Las características del conductor del anillo exterior de tierra son:

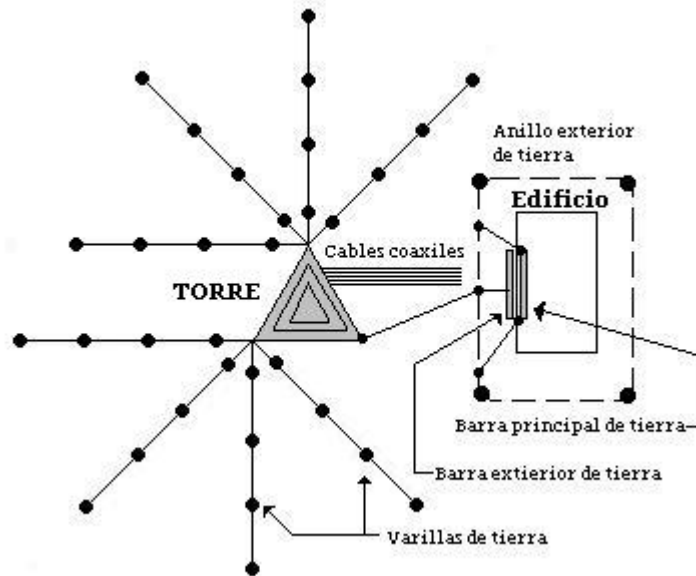
- Sólido de cobre (BTC) y su calibre mínimo se a AWG, número 2.
- Que se entierra 75 cm por debajo de la superficie del terreno.
- Que se conecte a la barra principal de tierra.

5.2.1. Radiales

La interconexión de varillas de tierra es la medida correcta en lugares donde es posible enterrarlas. Los radiales, o cables extendidos horizontalmente son excelentes no sólo para un buen sistema de baja frecuencia, sino también para un sistema a tierra contra radiofrecuencias, ver figura 22. Teóricamente cuatro radiales enterrados, cada uno de 20 m de longitud, y de alambre AWG calibre 10, tendrán una resistencia de 30Ω en un suelo de $1000 \Omega/\text{m}$. Ocho radiales proporcionarían una resistencia de 25Ω . Ocho radiales separados uno de otros 50 m colocados sobre la superficie o enterrados en forma superficial tendrán una resistencia aproximada de 13Ω en un suelo de $1000 \Omega/\text{m}$. Para casos prácticos se recomienda que los radiales se extiendan en secciones de 22 m, nunca menores de 15 m, y que se utilicen radiales adicionales desde la torre para reducir aún más la resistencia de tierra.

De esta forma, la mayor cantidad de energía se aleja de la torre y la caseta del equipo. Los tendidos de radiales deben estar orientados de tal forma que se alejen lo más posible de la caseta.

Figura 22. Radiales



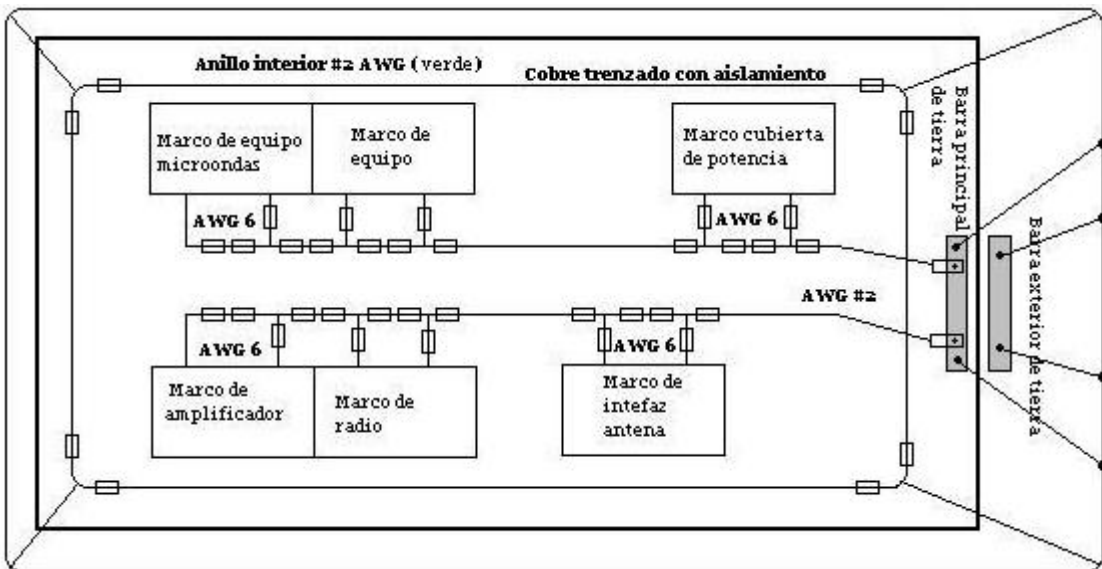
5.2.2. Anillo interior de tierra o halo

Las instalaciones celulares, que son redes de alta frecuencia, requieren un plano de tierra equipotencial que entre más extenso sea minimizará con mayor efectividad las diferencias de potencial entre los equipos que están interconectados de potencial entre los equipos que están a alta frecuencia. En una instalación típica, el anillo interior de tierra, proporciona este plano equipotencial. El sistema de anillo interior consiste de cable AWG calibre #2, con aislante color verde, puesto alrededor de perímetro del área a cubrir. La forma correcta de utilizar el halo en una instalación de comunicaciones es como un blindaje de Faraday, figura 23.

Si se conecta en los cuatro rincones de la estructura, el anillo exterior de tierra funcionará como un plano de tierra invertido para bloquear la radiofrecuencia y los campos inducidos a los circuitos por las descargas atmosféricas. Solamente metal inactivo debe conectarse al halo, como: conductores del aire acondicionado y calefacción, marcos metálicos de puertas, etc. Siempre se utiliza un punto único de conexión a tierra y el halo debe ser parte de este sistema. El halo debe cubrir los siguientes requisitos:

- Instalarse aproximadamente 15 cm por debajo del techo interior de la caseta o estructura.
- Cuando se conecte el anillo exterior de tierra en las cuatro esquinas de la estructura no debe conectarse a la barra principal de tierra.
- La barra principal de tierra se conecta al anillo exterior de tierra.
- No debe existir conexión entre el halo y la barra principal de tierra.
- Si se conecta el halo a la barra principal de tierra, no debe existir conexión entre el halo y el anillo exterior de tierra.

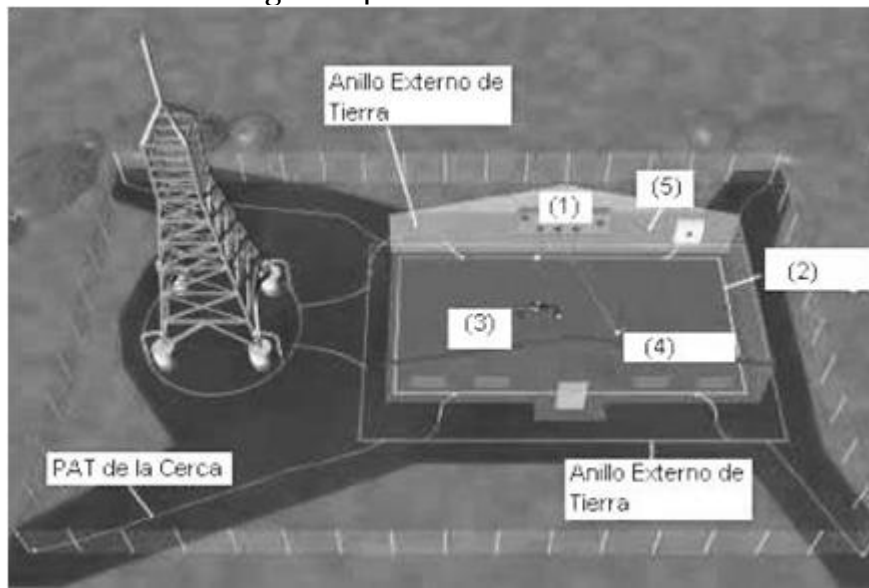
Figura 23. Anillo interior de tierra o halo



5.3. Medición de la resistencia en instalaciones celulares y torres de radio y microondas

En la figura 24, se muestra una instalación celular. En la mayoría de estas instalaciones hay una torre con cada una de sus patas puestas a tierra. Estas tierras son conectadas entre sí con un cable calibre #2 de cobre desnudo. Cerca de la torre está el edificio de la instalación con todos los equipos de transmisión, etc. Dentro del edificio existe un anillo de tierra y una barra principal de tierra. El anillo es conectado a la barra principal de tierra. El edificio de la instalación es puesto a tierra a las cuatro esquinas y éstas son interconectadas mediante un cable #2. Este anillo externo es también conectado a la barra principal. Se realiza también una conexión entre el anillo externo de tierra del edificio y el anillo de tierra de la torre. En la instalación celular de la figura 24 se muestra: 1. Barra principal de tierra, 2. Anillo de tierra de la central, 3. Tubería de agua, 4. Estructura metálica del edificio, 5. Neutros puestos a tierra.

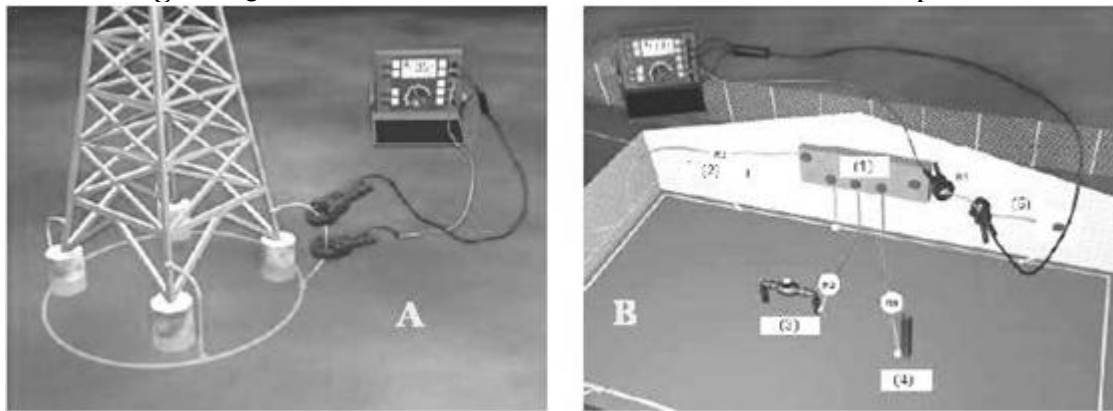
Figura 24. Instalación celular



<http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/MMPAT.pdf>

La primera medición a realizar es sin electrodos para cada una de las patas de la torre y las cuatro esquinas del edificio. Esta no es una medición real de resistencia de puesta a tierra debido a la conexión de la red. Es una prueba de continuidad para verificar que existe la puesta a tierra, se tiene una conexión eléctrica y puede pasar corriente. En la figura 25 se tiene un esquema para la realización de esta medición. La figura 25a muestra la medición en la torre de transmisión, mientras que la figura 25b, la medición dentro de la instalaciones.

Figura 25. Medición en instalación celular con el uso de pinzas



<http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/MMPAT.pdf>

Una vez completada la prueba anterior, se mide la resistencia del sistema completo por el método de caída de potencial. Posteriormente, se medirán los diferentes caminos a tierra mediante el método selectivo con la pinza. Esto verificara la integridad de estas puesta a tierra y sus conexiones. Así, se medirá la resistencia de cada pata de la torre y las puestas a tierra de las cuatro esquinas del edificio.

Con el fin de obtener una primera aproximación de la resistencia de tierra, los cálculos pueden efectuarse utilizando los valores medios de la tabla IV.

Tabla IV. Valores típicos de la resistividad de diferentes suelos

| Naturaleza del terreno | Resistividad (Ω - m) |
|--|------------------------------|
| Terrenos pantanosos | De algunas unidades a 30 |
| Limo | 20 a 100 |
| Humos | 10 a 150 |
| Turba húmeda | 5 a 100 |
| Arcilla plástica | 50 |
| Margas y arcillas compactas | 100 a 200 |
| Margas del jurásico | 30 a 40 |
| Arena arcillosa | 50 a 500 |
| Arena silícea | 200 a 3000 |
| Suelo pedregoso cubierto de césped | 300 a 500 |
| Suelo pedregoso desnudo | 1500 a 3000 |
| Caliza blandas | 100 a 300 |
| Caliza compactas | 1000 a 5000 |
| Caliza agrietadas | 500 a 1000 |
| Pizarras | 50 a 300 |
| Rocas de mica y cuarzo | 800 |
| Granitos y gres procedente de alteración | 1500 a 10000 |
| Granitos y gres muy alterados | 100 a 600 |

Fuente: Sistema de puesta a tierra Procobre

5.4. Diseño de una malla de puesta a tierra

El procedimiento general debe incluir los siguientes pasos:

- ✓ Cálculo del área del terreno donde se va a instalar la malla.
- ✓ Cálculo del radio equivalente de esta área.
- ✓ Dibujar un rectángulo sobre esta área.
- ✓ Insertar una malla dentro de este rectángulo.
- ✓ Calcular la longitud del conductor requerido que se propone.
- ✓ Medir la longitud real del conductor resultante.
- ✓ Medir la resistividad del terreno.
- ✓ Cálculo de corrientes de cortocircuito.
- ✓ Cálculo de la corriente máxima de la malla.

- ✓ Análisis de las tensiones de paso y contacto.
- ✓ Medición de la resistencia de malla de puesta a tierra.

Las fórmulas para el diseño de la malla de puesta a tierra las establece el IEEE, las prácticas avaladas por el IEEE establece ciertos parámetros:

- ✓ Valor máximo de la resistencia de puesta a tierra.
- ✓ Corriente de falla.
- ✓ Tiempo máximo de duración de la malla en segundos.
- ✓ Resistividad del terreno.

El área (**A**) que ocupa la malla después de su configuración y el radio (**r**) de área circular equivalente a **A** de ésta se calcula con:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

La corriente de corto circuito (I_{cc}) se puede calcular aplicando la siguiente ecuación:

$$I_{cc} = \frac{MVA}{\sqrt{3} \times KV} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

- ✓ MVA potencia de corto circuito trifásica en MVA.
- ✓ KV tensión de suministro en KV.

El calibre del conductor depende del valor de la corriente de falla, el tiempo de duración de ésta y el material del que esté hecho el conductor. El cálculo del conductor de puesta a tierra se puede realizar de la siguiente manera:

$$A = I \cdot \sqrt{\frac{33 \cdot s}{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

- ✓ A es el área en cmils.
- ✓ I es la corriente máxima de falla a tierra en A.
- ✓ s es el tiempo durante el cual fluye la corriente de falla.
- ✓ T_m es la temperatura máxima de fusión, en °C.
- ✓ T_a es la temperatura ambiente.

El factor T_m , temperatura máxima de fusión, se puede obtener de la tabla V.

Tabla V. Temperatura máxima de fusión

| Descripción | Temperatura de fusión °C |
|---|--------------------------|
| Alambre de cobre recocido | 1083 |
| Alambre de cobre duro | 1084 |
| Núcleo de acero con revestimiento de cobre | 1084/1300 |
| Alambre de aluminio | 657 |
| Aleación de aluminio | 660 |
| Alma de acero con recubrimiento de aluminio | 660/1300 |
| Alma de acero con cubierta de zinc | 419/1300 |
| Acero inoxidable | 1400 |

Fuente: Pablo Díaz, Soluciones prácticas para la puesta a tierra, página 300

Para el cálculo de la longitud al cual se debe enterrar el conductor, se requieren los siguientes factores, K_m y K_i :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{D^2}{16h \cdot d}\right) + \frac{1}{\pi} \ln\left[\frac{3}{4} \times \frac{5}{6} \times \frac{7}{8} \dots \frac{2n-3}{2(n-1)}\right] \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

- ✓ D es la separación entre conductores de la malla en m.
- ✓ d es el diámetro del conductor en m.
- ✓ h es la profundidad de la zanja donde se entierra la malla en m.
- ✓ n es el número de conductores.

$$K_i = 0.656 + 0.172 \cdot n \quad (\text{Ecuación 17})$$

Entonces, la longitud (L) para los conductores de la malla para mantener el potencial entre los límites de seguridad se realiza con:

$$L = \frac{K_m \times K_i \times \rho \times I \times \sqrt{t}}{116 + 0.17 \cdot \rho_s} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

- ✓ I es la corriente de falla en A.
- ✓ t el tiempo de duración de la corriente de falla en seg.
- ✓ ρ la resistividad del terreno en $\Omega - m$.
- ✓ ρ_s la resistividad superficial del terreno en $\Omega - m$.

Los potenciales tolerables por el cuerpo humano para los voltajes de paso y de contacto son:

$$V_{paso} = \frac{116 + 0.7 \cdot \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$V_{contacto} = \frac{116 + 0.17 \cdot \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

La resistencia total del sistema será la suma de la resistencia de los componentes del sistema de electrodos de tierra, el cual puede estar formado de electrodos, varillas, placar y la estructura metálica del edificio, así como la resistencia de la malla.

Cuando existen diferentes sistemas de electrodos de tierra, como tubería de agua, varilla y acero de refuerzo, se determina como un sistema de resistencia en paralelo.

Para la resistencia de una malla de tierra (R_m) con varillas es recomendable la fórmula de *Swcharz*:

$$R_m = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - R_{12}} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

- ✓ R_1 es la resistencia del conductor.
- ✓ R_2 es la resistencia de todas las varillas.
- ✓ R_{12} es la resistencia mutua entre R_1 y R_2 .

$$R_1 = \left(\frac{\rho_1}{\pi \cdot l_1} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l_1}{h'} \right) + K_1 \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - K_2 \right] \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$R_2 = \left(\frac{\rho_a}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot l_2} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot l_2}{d_2} \right) - 1 + 2 \cdot K_1 \left(\frac{l_2}{\sqrt{A}} \right) (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (\text{Ecuación 23})$$

$$R_{12} = \left(\frac{\rho_a}{\pi \cdot l_1} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l_1}{l_2} \right) + K_1 \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - K_2 + 1 \right] \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$\rho_a = \frac{l_2(\rho_1 \cdot \rho_2)}{\rho_2(H - h)} + \rho_1(l_2 + h - H) \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

- ✓ ρ_1 la resistividad de los conductores de la malla a una profundidad h .
- ✓ ρ_a la resistividad aparente vista por las varillas.
- ✓ H es la profundidad de la capa superior.
- ✓ ρ_2 la resistividad desde H hacia la profundidad.
- ✓ l_1 es la longitud total de la malla.
- ✓ l_2 es el promedio de la longitud de las varillas.
- ✓ h es la profundidad de enterramiento de la malla.
- ✓ $h' = \sqrt{dx} \sqrt{h}$, para conductores enterrados a una profundidad h ; $0.5d_1$, para $h = 0$.
- ✓ A es el área cubierta por la malla de dimensiones $a \times b$ en m^2 .
- ✓ n es el número de varillas ubicadas en el área A .
- ✓ K_1, K_2 son las constantes que dependen de la geometría del terreno.
- ✓ d_1 es el diámetro del conductor de la malla en m .
- ✓ d_2 es el diámetro de las varillas en m .
- ✓ a es la longitud de lado largo de la malla.

Para el cálculo de la resistencia del sistema de tierras también se puede utilizar la siguiente fórmula de *Laurent*:

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot R} + \frac{\rho}{L} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

- ✓ R es el radio equivalente del sistema.
- ✓ L es la longitud total del conductor de la malla en m .
- ✓ ρ es la resistividad de terreno en $\Omega - m$.

5.5. Puesta a tierra por tipo de suelos

5.5.1. Suelo arenoso o pedregoso

Terrenos con alta resistividad, la retención de humedad de estos terrenos también es una dificultad a analizar. En un suelo arenoso o pedregoso, se deben enterrar dos o más varillas de tierra, en un espacio entre varillas no menor de 3 m. Estas varillas encajan verticalmente a una profundidad mínima de 3 m, deben ser de cobre, de acero revestido de cobre, o de acero inoxidable, de 2.4 m de longitud y 5.8 cm de diámetro. Este sistema de electrodo de tierra provee baja resistencia para la protección estructural y del sistema eléctrico. Si al hacer la medición de resistencia de suelo no se obtiene el valor deseado, se deben añadir más varillas hasta que se logre el valor deseado. En suelos de mayor resistencia será necesario utilizar otros esquemas de electrodos de tierra, tales como anillo de tierra, o radiales en caso de suelo rocoso.

5.5.2. Suelo rocoso

Terrenos con alta resistividad, tenemos dos variantes generales: Terreno de roca sólida y Terreno de Roca suelta. En áreas donde la roca se encuentra cerca de la superficie del suelo es necesario excavar y extender conductores en forma de radiales desde el edificio. Estas zanjas no deben ser menores de 3.7 m de longitud y de 30 cm a 60 cm de profundidad. En suelos pedregoso y arenoso esta zanja no debe ser menor de 7.5 m de longitud y 60 cm de profundidad.

Si estos métodos no son prácticos y la roca es la superficie del suelo, se permite extender el cable sobre la roca pero éste debe unirse a una placa de cobre, de 0.8 mm de espesor mínimo y con un área de superficie de 0.18 m². Los electrodos encajados en concreto sólo deben utilizarse en nuevas construcciones. Este electrodo debe ubicarse cerca de los cimientos del edificio y estar encajado en 50.8 mm de concreto. Asimismo, debe tener las siguientes características:

- Ser de cobre desnudo.
- Debe tener una longitud mínima de 6.1 m.
- Puede estar constituido de una o más barras de refuerzo con una longitud mínima de 6.1 m y 12.7 mm de diámetro unidas conjuntamente por medio de soldadura o una sobre otra para formar 20 diámetros uniéndolas con alambre.

5.5.3. Suelos en Guatemala

En Guatemala, predominan más los suelos arcillosos (resistividad de 100 a 1000 Ω-m), como también la existencia de suelos con limo (resistividad de 10 a 100 Ω-m), y arena volcánica (resistividad de 10⁵ a 10⁹ Ω-m). Veamos un pequeño ejemplo para el primer caso.

Tomando el valor medio de la resistividad del suelo arcilloso (500 Ω-m), calculamos la resistencia que tendría una varilla en estas condiciones. Una varilla de 2 m de largo y 14 mm de diámetro (0.007 m de radio), tiene una resistencia de:

$$R_{\text{var}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) = 240.37 \cdot \Omega$$

Ahora una varilla no es suficiente para conseguir la resistencia necesaria para la puesta a tierra ($< 25 \Omega$) por lo que se requieren más, usando un número de 8 varillas, lo usual en un sitio de telecomunicaciones, tenemos:

$$R(\# \text{ var}) = \frac{R(1 \text{ var})}{\# \text{ de var}} = 30.04 \cdot \Omega$$

Teniendo la longitud promedio de alambre necesario para el anillo de la torre (70 m), con las siguientes características, calibre 1/0, profundidad del conductor 0.7 m, área del conductor 53.24 mm², radio 0.00412 m. Con estos datos, encontramos la resistencia del conductor.

$$R_{cab} = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \left(\ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{P} - 2 \right) = 14.82 \cdot \Omega$$

De esta forma la resistencia que tendrá el sistema de puesta a tierra, será:

$$R_T = \frac{R(\# \text{ var}) \times R_{cab}}{R(\# \text{ var}) + R_{cab}} = 9.92 \cdot \Omega$$

Cumpliendo con la norma de ($9.92 \Omega < 25 \Omega$). Para mayor protección del personal y equipo se recomienda un sistema de puesta a tierra con resistencia menor a 5 Ω . Podemos tratar el terreno con el objeto de bajar la resistividad del mismo por lo menos a 200 Ω -m. Usando los datos anteriores con la nueva resistividad tenemos, para la resistencia de un electrodo:

$$R_{var} = \frac{200}{2\pi \times 2} \left(\ln \frac{4 \times 2}{0.007} - 1 \right) = 96.15 \cdot \Omega$$

La interacción de las 8 varillas de cómo resultado una resistencia de:

$$R(\# \text{ var}) = \frac{96.15}{8} = 12.01 \cdot \Omega$$

La resistencia del conductor da como resultado:

$$R_{cab} = \frac{200}{2\pi \times 70} \left(\ln \frac{2 \times 70}{0.00412} + \ln \frac{70}{0.7} - 2 \right) = 5.93 \cdot \Omega$$

La resistencia total de la puesta a tierra es:

$$R_t = \frac{12.01 \times 5.93}{12.01 + 5.93} = 3.97 \cdot \Omega$$

Como podemos apreciar la resistencia disminuye al tratar el terreno.

6. SUPRESORES, FILTROS Y BLINDAJES

Con lo que respecta al tema de la compatibilidad electromagnética, están las sobretensiones transitorias provocadas por causas y efectos que varían en dependencia del tipo y su fuente. Debido al creciente desarrollo de los sistemas de comunicaciones, es necesaria la renovación de la estrategia de diseño, montaje y puesta en marcha de los sistemas de puesta a tierra. Podemos agrupar las sobretensiones en las debidas al impacto directo del rayo o a la acción de los campos electromagnéticos asociados al mismo, como también, sobretensiones causadas por procesos de conmutación.

Los voltajes transitorios originados por el rayo después de su caída, directa o en zonas lejanas, por conceptos de inducción o acoplamiento, inciden en los sistemas de alimentación y sistemas de operación. Estos efectos suelen ser de corta duración, pero con valores de voltajes elevados, afectando los conductores externos en la instalación, provocando la penetración por esta vía del fenómeno externo hasta el interior de la misma. Un mecanismo con el que contamos para la protección contra sobretensiones transitorias es el supresor, dispositivo creado para llevar a la masa terrestre las sobretensiones transitorias, evitando así, que estas afecten los equipos sensibles.

Además de la protección contra transitorios, tenemos la necesidad de un desacoplamiento y acoplamiento de los circuitos, esencial para su correcto funcionamiento. Al distribuir la alimentación debe procurarse tener la menor caída de tensión entre la fuente de alimentación y los circuitos, para ello debemos tener la menor impedancia posible.

En el problema de las interferencias, tenemos tres elementos: el origen de la perturbación, el camino de propagación y el circuito afectado. El objetivo de los filtros es la eliminación o atenuación hasta valores admisibles, de las perturbaciones conducidas y evitar la propagación de las componentes de alta frecuencia por radiación de los cables o pistas.

Un método de protección frente acoplamientos consiste en la utilización de blindajes metálicos, separando la región del espacio en dos, atenúa la propagación de campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, sirviendo tanto, para evitar que la zona protegida entre los campos, como también que salgan de ella.

6.1. Supresores

Tiene como finalidad la conducción a tierra de sobretensiones transitorias que se dan en el sistema, producidas más por la caída de rayos. Los supresores se conectan entre las fronteras de las zonas de protección o inmediatamente antes del equipo a proteger, se comportan de la siguiente manera, muy alta impedancia antes condiciones normales de operación, y conmutan a valores de baja impedancia (valores despreciables), en condiciones de sobretensión. Este funcionamiento es la clave de su importancia y necesidad.

Los supresores de protección contra sobretensiones de aparatos conectados en la red de energía, se fabrican en el margen de tensión nominal hasta 1000 V; para los de instalaciones y equipos informáticos hasta 60 V, con algunas excepciones donde llegan hasta 110 V para instalaciones de telefonía.

Los supresores de sobretensiones (clase C o D) están diseñados en base a la forma de onda 8/20 μ s, su principal característica es el voltaje residual que son capaces de entregar, protegen contra descargas lejanas de rayos, sobretensiones por conmutaciones, descargas electroestáticas. Los supresores de corriente de rayo (clase B) están diseñados para una onda 10/350 μ s, su principal característica, la corriente máxima de descargas capaces de derivar hacia la masa terrestre, limitando sobretensiones por descargas directas o cercanas de rayos.

Para contar con una buena zona de protección se requiere por parte del supresor, velocidad de respuesta, compatibilidad de voltajes entre escalones de protección y mínima impedancia entre zonas. La zona de protección externa, es donde se producen impactos directos y donde los campos electromagnéticos son altos, seguido hacia el interior del edificio, zonas de protección de riesgo menor. En la intersección entre zonas se usan protecciones adecuadas, reduciendo el alto voltaje y corriente de la zona precedente, hasta un nivel permisible por la próxima zona. Zona de protección 1, están ubicadas las pizarras generales de instalación, transformadores de potencial y de corriente, equipos poco sensibles a transitorios, aquí se controlan voltajes residuales de la zona anterior, sobretensiones por conmutación de la misma zona. En la zona de protección 2, están instaladas, computadoras, equipos de MODEM, fotocopadoras, pizarras telefónicas etc. Aquí se protegen equipos sensibles, por lo tanto, las protecciones deben tener mínimo voltaje residual, ser rápidas e instaladas lo más próximo al equipo a proteger.

Los descargadores destinados a la protección de las redes de datos, generalmente guardan diferencias con respecto a los de protección de redes de energía. Estos descargadores se conectan en serie con las líneas que deben proteger y estas normalmente terminan, en Plock o enchufes especiales.

Líneas telefónicas: Las líneas de telefónicas y de transmisión de datos, sufren sobretensiones atmosféricas, por estar aéreas o subterráneas, igualmente líneas interiores por los efectos conductivos e inductivos. Los parámetros a considerar para la selección de los supresores para estas son:

- ✓ Tipo de línea, por ejemplo, red de telefónica básica, líneas dedicadas punto a punto y redes digitales de sistemas integrados.
- ✓ Conexiones, como son: RJ45, RJ11, atornillable, enchufable, etc.
- ✓ Número de líneas y forma de fijación.

Radio frecuencias: Los equipos, receptores o emisores de señales de radio frecuencia son sensibles a transitorios de tensión. Sus antenas están expuestas a la recepción de sobretensiones de origen atmosférico debido a su ubicación. Estas sobretensiones pueden ser conducidas (por impactos directos del rayo en la antena), o inducida (por la caída del rayo en las proximidades). Los parámetros a tener en cuenta para la selección de los supresores:

- ✓ Frecuencia de trabajo
- ✓ Tipo de conexión, BNC, N, UHF, TV, etc.
- ✓ Potencia de operación.
- ✓ Corriente máxima.

Redes locales: Las líneas informáticas más susceptibles son: líneas que proviene del exterior, líneas en zonas de grandes maquinarias de conmutación, líneas en zonas propensas a cargas electrostáticas, líneas en zonas con fuentes de alimentación conmutadas. Los parámetros a tener en consideración para la selección de los supresores son:

- ✓ Tipo de red.
- ✓ Tipo de conexión.
- ✓ Corriente máxima, de 0.34 KA (Líneas internas), hasta 10 KA (Líneas externas).

Líneas de medición y control: Estos son los más importantes en una planta de producción, las de mayor necesidad para protección son: líneas que proviene del exterior, líneas soterradas, líneas en zonas de gran cantidad de maquinarias de conmutación, líneas de elementos propensos a cargar electrostática. Los parámetros a tener en consideración para la selección de los supresores:

- ✓ Tipo de conmutación.
- ✓ Número de hilos.
- ✓ Velocidad de transmisión.

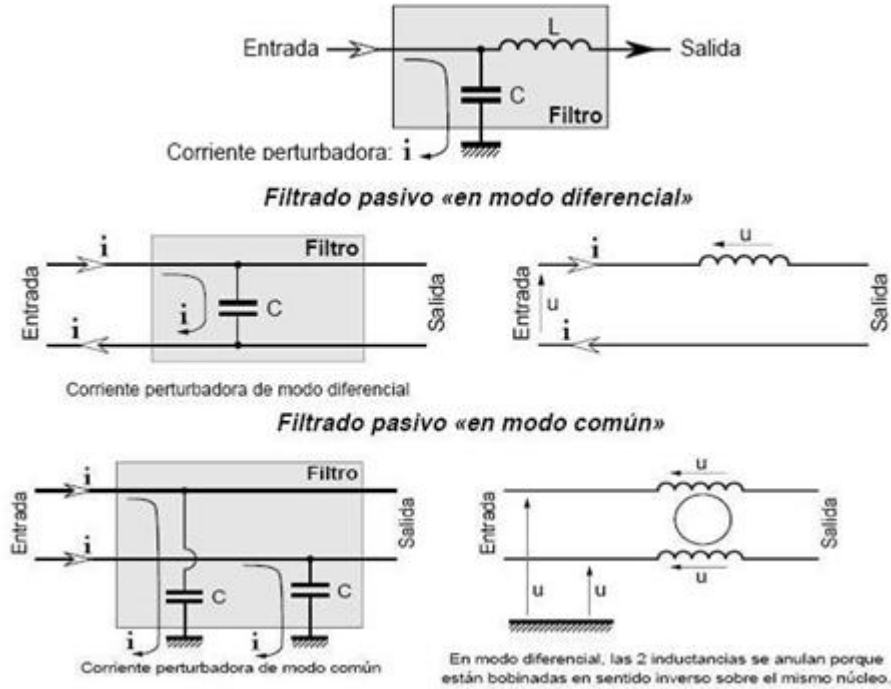
6.2. Filtros

La función de los filtros es dejar pasar las señales útiles y eliminar la parte no deseada de las señales transmitidas. El campo de utilización de estos son: filtros antiarmónicos ($f \leq 2.5$ kHz) y filtros RFI ($f \leq 30$ MHz). En el sentido de actuación de un filtro, los de entrada protegen la red de alimentación de las perturbaciones generadas por el equipo alimentado, y, protegen el equipo contra las perturbaciones procedentes de la red de alimentación; los filtros de salida protegen la carga contra las perturbaciones procedentes del equipo.

Entre los tipos de filtrados comunes tenemos: los filtros de modo diferencial, filtros de modo común, filtros completos que garantizan el filtrado de modo común y diferencial. Estos son pasivos o compensadores activos.

El principio del filtrado pasivo, es la desadaptación de impedancia, sirviendo de barrera contra las perturbaciones: inductancia en serie ($Z = L\omega$), canalizando las perturbaciones: capacidad en paralelo ($Z = 1/C\omega$) o, combinando ambas como en la figura 26.

Figura 26. Filtrado



Fuente: www.um.es/docencia/mmc/pdf/cem.pdf

El condensador desacoplamiento resuelve dos problemas: actúa como una FA cercana a la carga, aportando la energía necesaria para absorber los picos de corriente a través de una pequeña impedancia de línea y limita el tamaño de bucle con un área menor, con respecto a las componentes de alta frecuencia de las EMI, dicho de otra forma, efectúa un cortocircuito a alta frecuencia, impidiendo la creación de señales parásitas derivándolas a masa. El condensador debe ser capaz de aportar los picos de corriente requeridos por la carga, y la inductancia del bucle ser la menor posible. Este filtro no usa resistencia o inductancia en serie para desacoplar, como si fuera un filtro RL o LC, porque ello baja la velocidad de respuesta.

El compensador activo es utilizado para filtrar corrientes armónicas, generar una señal complementaria de la señal perturbadora para volver a construir una señal sinusoidal. Estos son filtros de modo común para alta frecuencia, las ferritas están formadas por materiales de permeabilidad magnética (μ_r) muy elevada. La ferrita utiliza dos principios: inductancia en modo común y absorción de las perturbaciones (FA) de modo común por calentamiento inducido. Estos dos principios generan una impedancia de modo común cuya eficacia depende de su relación con la impedancia del circuito por proteger.

En lo respecta a la adaptación de impedancias fuente-filtro-carga, la adaptación de impedancia óptima será aquella que consiga una máxima transmisión de potencia en la banda de paso, para lo cual, si $\mathbf{Z}_g = \mathbf{R}_g + \mathbf{jX}_g$ y $\mathbf{Z}_c = \mathbf{R}_c + \mathbf{jX}_c$ son respectivamente las impedancias de la fuente y la carga, las impedancias de entrada y salida del filtro deberían ser $\mathbf{Z}_e = \mathbf{R}_g - \mathbf{jX}_g$ y $\mathbf{Z}_s = \mathbf{R}_c - \mathbf{jX}_c$. Al mismo tiempo, el filtro debe introducir las máximas pérdidas de inserción en la banda de rechazo, para lo cual debe procurarse el efecto contrario al propuesto en la banda de paso.

6.3. Blindajes

El blindaje es una superficie metálica dispuesta entre dos regiones del espacio que se utiliza para atenuar la propagación de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos. Una manera de protección contra EMI, es mediante blindajes o pantallas metálicas, como definición es el resultado de acoplamiento de campos eléctricos (capacitivos), campos magnéticos (inductivos) y campos electromagnéticos (radiación), sobre un conjunto de conductores.

Los objetivos de los blindajes es no dejar salir el flujo electromagnético, y no dejarlo entrar, el rango de frecuencias de protección va desde Hz hasta los THz, y para ello utilizamos cajas, armarios, juntas, láminas o pinturas conductoras, cables apantallados, etc.

Las características del campo que afecta al receptor está determinado por: la frecuencia del generador, la distancia del generador al receptor y la característica del medio. En el estudio del campo electromagnético, se le ha dividido en tres zonas:

- Campo cercano ($d < \lambda/2\pi$): La influencia especial es de la fuente del campo. Si la corriente es alta y la tensión baja, predomina H ($E/H < 377\Omega$), si la tensión es alta y la corriente baja, predomina E ($E/H > 377\Omega$).
- Campo lejano ($d > \lambda/2\pi$): La influencia se debe al medio de propagación ($E/H = 377\Omega$), si el medio es el aire o vacío.
- Región de transición ($d \sim \lambda/2\pi$).

La efectividad de los blindajes está definida por la atenuación de los campos eléctricos y magnéticos, y es igual a la suma de las pérdidas por absorción mas las pérdidas por reflexión mas un factor que contabiliza las múltiples reflexiones en los blindajes. La efectividad depende de la frecuencia, la geometría del campo, la posición de la medida y el tipo del campo además de la polarización y la dirección de la incidencia. La efectividad S está definida para campos eléctricos y campos magnéticos como:

$$\boxed{\begin{array}{l} S = 20 \cdot \log(E_0 / E_1) [dB] \\ S = 20 \cdot \log(H_0 / H_1) [dB] \end{array}} \quad \text{(Ecuación 27)}$$

Donde E_0 y H_0 son las intensidades de campo incidente y E_1 y H_1 son las intensidades del campo que pasa por el blindaje.

Las pérdidas por absorción son las atenuaciones que sufren los campos al atravesar el blindaje y se debe a las corrientes inducidas por el mismo. La profundidad de penetración (δ), es la distancia en donde la intensidad del campo se ha atenuado 36.7% o 9dB. Las pérdidas son más importantes en baja frecuencia. La profundidad de penetración esta definida por la siguiente ecuación con la frecuencia en MHz.

$$\delta = \sqrt{2 / \omega \cdot \mu \cdot \sigma} = 0.0066 / \sqrt{\mu_r \cdot \sigma_r \cdot f} \quad (\text{Ecuación 28})$$

La pérdida por absorción esta dado por:

$$A = 131.3 \cdot t \cdot (\mu_r \cdot \sigma_r \cdot f) [dB] \quad (\text{Ecuación 29})$$

Las pérdidas por reflexión se producen cuando hay cambios en el medio (cambio impedancias características). Dependen del espesor del blindaje t frente a la profundidad de penetración.

✓ Campos eléctricos:

$$R = 141.7 - 10 \log(\mu \cdot f^3 \cdot d^2 / \sigma) [dB] \quad (\text{Ecuación 30})$$

✓ Campos magnéticos:

$$R = 74.6 - 10 \log(\mu / f \cdot d^2 \cdot \sigma) [dB] \quad (\text{Ecuación 31})$$

✓ Campos electromagnéticos:

$$R = 108.1 - 10 \log(\mu \cdot f / \sigma) [dB] \quad (\text{Ecuación 32})$$

En la clasificación de los blindajes tenemos:

- **Capacitivo:** Evita el acoplamiento eléctrico (Jaula de *Faraday*), se usan materiales conductivos como cobre y aluminio y es importante la puesta a tierra.
- **Inductivo:** Evita el acoplamiento magnético, se usan materiales con alta permeabilidad, y se debe minimizar el área efectiva de bucles, cables próximos al plano de tierra.

- **Radiofrecuencia:** Se utilizan en varios casos dos blindajes, con alta conductividad y con alta permeabilidad, minimizando las reflexiones y absorciones. Se utilizan materiales ferromagnéticos galvanizado, cobre dirigido hacia la fuente.

Las aperturas existen por la necesidad de ventilación y requisitos mecánicos, estas reducen la efectividad del blindaje debido al paso de ondas electromagnéticas. Se les debe tomar mayor importancia cuando se apantalla un campo magnético que un eléctrico. Las características de las aperturas son: pérdidas de efectividad del blindaje, dichas pérdidas se relacionan más con la geometría de las aperturas que con el área de estas. Se logra mayor efectividad si los agujeros tienen forma de guía de ondas.

El objetivo de los cables apantallados es evitar que las EMI se introduzcan o se generen por el cable en un medio, se realizan recubriendo los mismos con mallas de tejido metálico de distintas características, cuanto mayor contenido metálico mayor eficiencia. Ningún cable enterrado, ni de potencia, es inmune a la interferencia provocada por rayos y EMI. Las descargas atmosféricas prefieren viajar por conductores metálico, porque representan un camino de menor impedancia que por la simple tierra destruyendo el aislamiento. Todo esto causa que exista una diferencia de potencial entre los blindajes y conductores, destruyendo los componentes electrónicos dentro de la conexión. Dichos cables y circuitos de conexión deben soportar grandes voltajes causados por la diferencia de potencial. Estos blindajes son usualmente de un metal sólido o una película plástica metalizada con un alambre guía. Para que sea efectiva la protección de los cables internos, el blindaje debe cubrir bien los conductores sin dejar espacios vacíos, además ser continuo entre los extremos y estar bien aterrizado.

7. PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS

Como conocemos las sobretensiones son causadas por las descargas atmosféricas y electrostáticas (ESD), conmutaciones de cargas en la red eléctrica, contacto entre conductores de alta tensión e impulsos nucleares electromagnéticos; siendo estas una forma particular de EMI. Las medidas de protección con los efectos de los rayos son costosas, por ello la importancia de un sistema de protección contra descargas, proporcional al daño que estas puedan causar, esto debido al incremento en la cantidad de datos producidos por sistemas electrónicos que son procesados y transmitidos en un ambiente de interferencias y sobretensiones. La influencia sobre los circuitos electrónicos puede llegar a causar su destrucción en caso extremo. El objetivo principal de una protección contra rayos es blindar a un edificio, sus ocupantes y el equipo, de los efectos adversos asociados a la descarga del mismo.

La decisión de adoptar un sistema de protección contra rayos, depende de factores como la probabilidad de caídas de rayos en la zona, su gravedad y consecuencia para personas y equipo. Para realizar una correcta protección debemos dotar nuestra estructura de dos sistemas de protección: protección externa contra impactos directos de rayo (pararrayos, jaula de Faraday), y protección interna contra sobretensiones provocadas por la caída del rayo en cualquier tendido de cable (limitadores de tensión). Ambos sistemas deben estar apoyados por un buen sistema de puesta a tierra, para la evacuación de corrientes del rayo, así como una adecuada equipotencialidad entre todos los sistemas de tierra, tanto de los sistemas de protección como de los circuitos eléctricos y de telecomunicaciones del espacio a proteger.

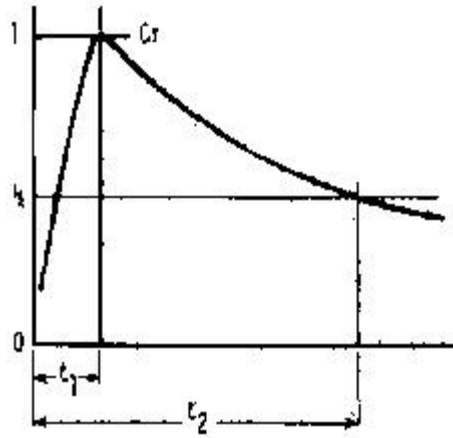
7.1. Características de las descargas atmosféricas

La información estadística conocida nos indica que alrededor del globo terráqueo se forman cerca de 2,000 tormentas simultáneamente. La intensidad media mundial de la descarga de un rayo se estima en 20 kA, pero se llegan a contabilizar rayos de hasta 200 kA. Naturalmente la orografía de cada país determina el número y la intensidad de las tormentas que se producen, riesgo que varía dentro de un mismo país. El conocimiento de las zonas de riesgo es una información importante para determinar eficazmente el tipo de protección contra el rayo más adecuado.

En condiciones atmosféricas propicias, dadas principalmente en verano, se crea dentro de la nube una separación de cargas colocándose las negativas en la base de la nube mientras las positivas lo hacen en la parte superior. El potencial dentro de la nube es generalmente del orden de varios millones de voltios. Este efecto produce un cambio similar, pero de polaridad opuesta en la superficie de la tierra y del mismo tamaño aproximadamente. El campo eléctrico entre la base de la nube y la superficie de la tierra situada bajo la misma, es tan alto que se crean pequeñas descargas desde la nube llamadas líderes de paso. Cuando estos líderes se acercan a la superficie de la tierra se genera un flujo ascendente de carga positiva. Cuando el líder de carga y el flujo ascendente se encuentran se cierra el circuito con una corriente de descarga entre 10kA y 200kA.

Las descargas atmosféricas, como procesos transitorios, alcanzan varios kilómetros con una alta corriente de descarga en un pequeño tiempo, figura 27. Las descargas que ocurren entre nubes se les conocen como descargas intranubes. Las descargas de nube a tierra son de mayor importancia en la práctica por su peligrosidad para las personas e instalaciones.

Figura 27. Pulso generado por un rayo



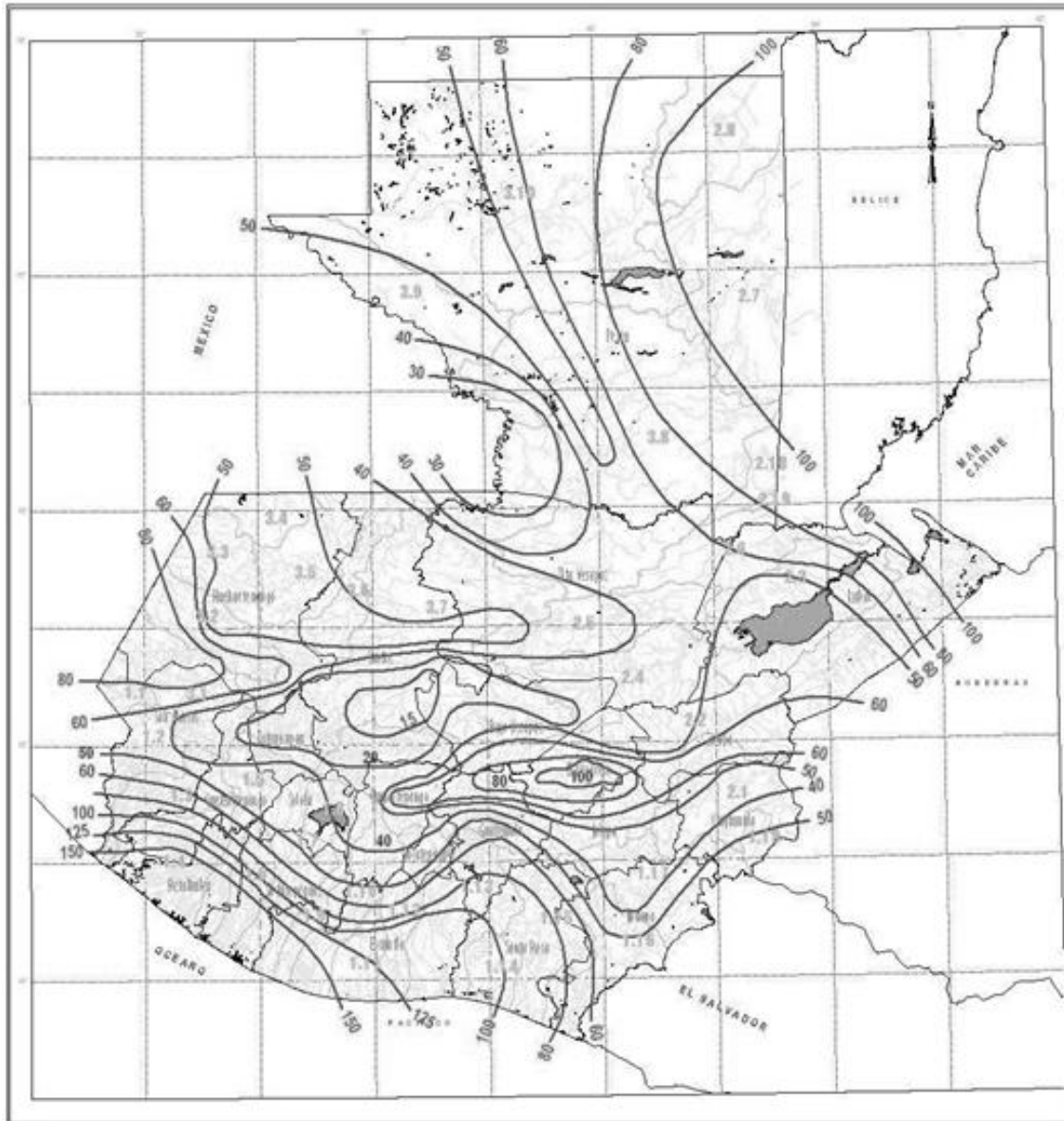
Fuente: www.andinalink.com/es~/catv/proteccion_contra_descargas.ppt

Existen cuatro tipos de descargas, el 90% de estas se indican por un trazador negativo, mientras que menos del 10% de las descargas se inician con un trazador descendente positivo. Las descargas también pueden iniciarse con un trazador ascendente desde la tierra, pero ocurren raras veces.

Los efectos producidos por las descargas atmosféricas pueden ser clasificadas como: térmicos, eléctricos, dinámicos, acústicos y químicos. La energía del rayo se transforma parcial o totalmente en calor, siendo este efecto muy importante debido al daño que produce. Debido al efecto eléctrico, sobre las líneas se generan los transitorios de corta duración pero crecimiento rápido de cresta en varios kV. Con la caída del rayo y el aumento de corriente en las líneas, aparecen fuerzas de atracción y repulsión entre las líneas de transmisión, haciendo que estas tengan contacto entre sí, describiendo lo que se conoce como efecto dinámico. El efecto acústico es identificado por el trueno; y el efecto químico se debe a la liberación de nitrógeno y ozono en la atmósfera.

El mapa isoceráunicos de la figura 28, muestra la información de las descargas eléctricas en Guatemala, como promedio anual. Esta información es necesaria para poder realizar la protección adecuada contra dichas descargas.

Figura 28. Nivel isoceráunico de Guatemala



Fuente:

http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Climatologico/des-electr.jpg

7.2. Sistema de protección contra descargas atmosféricas

Se le denomina protección exterior contra descargas atmosféricas a la totalidad de dispositivos e instalaciones en el exterior, encima y adosados a las estructuras que se ha de proteger, para captar y derivar la corriente de la descarga atmosférica a la instalación de puesta a tierra. Entre los tipos de sistemas exteriores de protección tenemos: SPDA natural, donde las partes metálicas de la estructura son consideradas como parte natural del SPDA, las cuales fueron construidas por otra razón; SPDA artificial, donde los elementos del metal son empleados únicamente con propósitos de protección contra descargas; y SPDA combinado.

Los componentes del sistema exterior de protección contra descargas atmosféricas se constituyen de tres componentes principales:

- ✓ Sistema de terminación de aire.
- ✓ Sistema de conductores bajantes.
- ✓ Sistema de terminación de tierra.

7.2.1. Sistema de terminación de aire

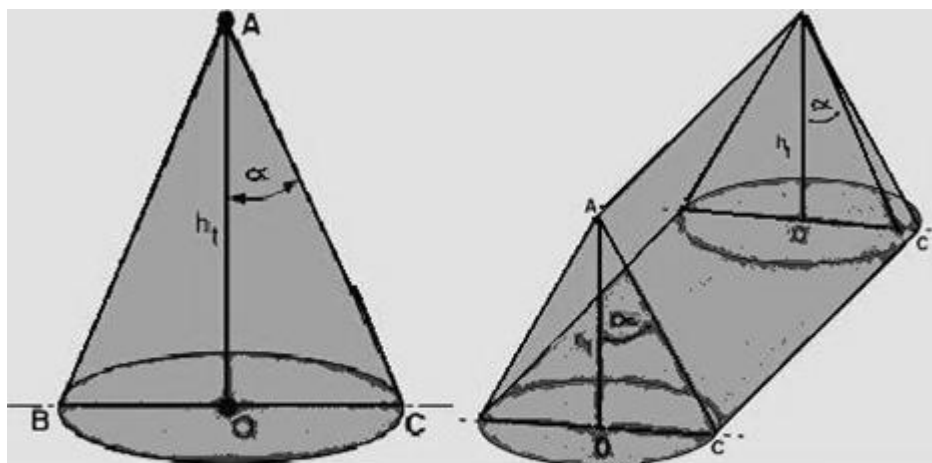
Elemento o piezas metálicas, situados encima, al lado, lateralmente o cerca de la instalación que se trata de proteger, y sirven como puntos para la descarga. Tenemos entre estos: conductores, barras metálicas, mástiles, etc. Utilizamos para este sistema, los siguientes métodos:

- ✓ Ángulo protector.
- ✓ Esfera rodante.
- ✓ Método de mallas.

7.2.1.1. Ángulo protector

Los conductores, mástiles y barras deben ser instalados de forma tal que todas las partes de la edificación a proteger se encuentren incluidas en la superficie generada por los puntos proyectados por los conductores de este sistema respecto a un plano de referencia, con un ángulo α respecto a la vertical en todas las direcciones. El ángulo α debe respetar los lineamiento de la tabla VI. En la figura 29 se observa como un punto simple genera un cono y cómo se crea el espacio protegido por los distintos conductores del sistema. Este método tiene limitaciones geométricas y no debe aplicarse si la altura h es mayor que el radio R de la esfera rodante, por lo que este método es preferible para la protección de estructuras simples o zonas pequeñas de edificaciones grandes.

Figura 29. Espacio protegido por el sistema de terminación de aire



A = Cabeza del Captor
B = Plano de referencia
OC = Radio del area protegida
ht = altura del captor sobre el plano de ref.
alfa = angulo de proteccion

Fuente: www.andinalink.com/es/~proteccion_contra_descargas.ppt

Tabla VI. Parámetros de acuerdo a los niveles de protección

| Nivel de protección | Altura [m] | 20 | 30 | 45 | 60 | Ancho de la Malla [m] |
|---------------------|------------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|
| | Radio [m] | α | α | α | α | |
| I | 20 | 25° | | | | 5 |
| II | 30 | 35° | 25° | | | 10 |
| III | 45 | 5° | 35° | 25° | | 10 |
| IV | 60 | 55° | 45° | 35° | 25° | 20 |

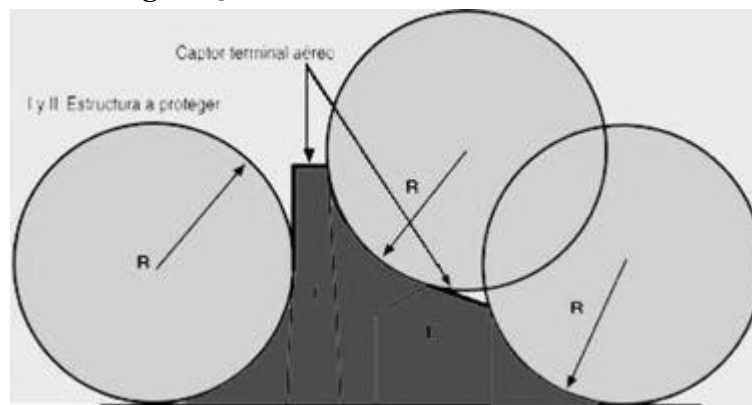
Fuente: <http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/EMC-rayos.pdf>

7.2.1.2. Esfera rodante

Debe utilizarse para identificar el espacio protegido de las estructura cuando la tabla VI excluye la utilización del método del ángulo protector. El radio de la esfera se escoge de acuerdo al nivel de protección seleccionado para el SPDA y se observa en la tabla VI. Para determinar el espacio protegido con este método, el procedimiento es el siguiente: se reproduce los objetos a proteger y los dispositivos del sistema de terminación de aire previstos en un modelo. Después se construye una esfera, de acuerdo con la escala del modelo, con el radio correspondiente al nivel de protección seleccionado para el SDPA; el modelo electrogeométrico se basa en considerar que el centro de la esfera corresponde con la cabeza de la descarga directriz, la cual se ha aproximado tanto a la tierra que la descarga de capitación, que se produce desde el objeto puesto a tierra más próximo a ella, da lugar a la unión con la descarga. La esfera de atracción se hace pasar rodando alrededor de todo el modelo y también en todas las posiciones posibles. Si al hacer esto, la esfera solamente toca los dispositivos del sistema de terminación de aire ello indica que el objeto se encuentra totalmente situado dentro del espacio de protección. Sin no se tocan alguno de estos dispositivos, los mismos pueden considerarse superfluos.

Si la esfera, al hacerla girar por encima del modelo, toca el objeto a proteger en algún punto, dicho objeto se encuentra insuficientemente protegido en este punto, y hay que completar la instalación de los elementos de protección contra descargas atmosféricas de forma que la esfera toque solamente éstos, figura 30.

Figura 30. Método de la esfera rodante



Fuente: www.andinalink.com/es/~proteccion_contra_descargas.ppt

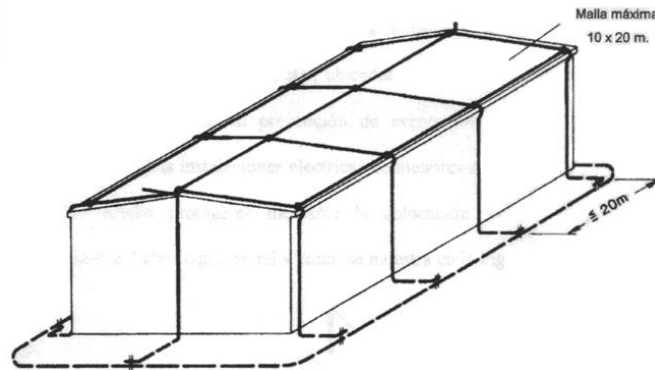
7.2.1.3. Método de mallas

Para protección de superficies planas, se puede utilizar una malla (figura 31) que satisfaga las siguientes condiciones:

- Los conductores del sistema de terminación de aire se localizan sobre las líneas de los bordes de los techos o azoteas de las edificaciones.
- Las superficies laterales de la edificación están equipadas con sistemas de terminación de aire para niveles por encima del valor del radio de la esfera rodante correspondiente (ver tabla VI).
- Las dimensiones de la cuadrícula de la red de terminación de aire no son mayores que las estipuladas por la tabla VI.

- La red del sistema de terminación de aire se instala de forma tal que se garantice que la corriente proveniente de la descarga siempre encontrará dos rutas de metal distintas hacia la tierra del sistema de terminación de tierra.

Figura 31. Dispositivo de pararrayos en forma de malla



Fuente: www.andinalink.com/es/~proteccion_contra_descargas.ppt

7.2.2. Sistema de conductores bajantes

Su función es conducir la corriente de la descarga desde el sistema de terminación de aire al sistema de terminación de tierra, y se encuentra formado por conductores y elementos de metal que aseguran un camino para la corriente. La selección del número y posición de los conductores bajantes toma en cuenta el hecho que, si la corriente de la descarga se divide entre varios conductores, se reduce los riesgos de descargas laterales entre éstos, como también las perturbaciones en el interior del área protegida. Los conductores bajantes deben:

- ✓ Tener calibres estipulados en la tabla VII.
- ✓ Ser tan cortos como sea posible (valores de inductancia bajos).
- ✓ La distancia promedio entre conductores respeta los valores establecidos en la tabla VIII.

Tabla VII. Calibre de los conductores bajantes

| Nivel de protección | Material | Calibre del conductor |
|---------------------|----------|-----------------------|
| I a IV | Cu | AWG #8 |
| | Al | AWG #8 |
| | Fe | AWG #4 |

Fuente: <http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/EMC-rayos.pdf>

Si el sistema de terminación de aire está formado por barras colocadas en mástiles separados, se requiere por lo menos un conductor bajante para cada mástil. Si el sistema de terminación de aire forma una red de conductores, se requiere por lo menos un conductor bajante para cada una de las estructuras de soporte.

Tabla VIII. Distancia promedio de los conductores bajantes

| Nivel de protección | Distancia promedio [m] |
|---------------------|------------------------|
| I | 10 |
| II | 15 |
| III | 20 |
| IV | 25 |

Fuente: <http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/EMC-rayos.pdf>

7.2.3. Sistema de terminación de tierra

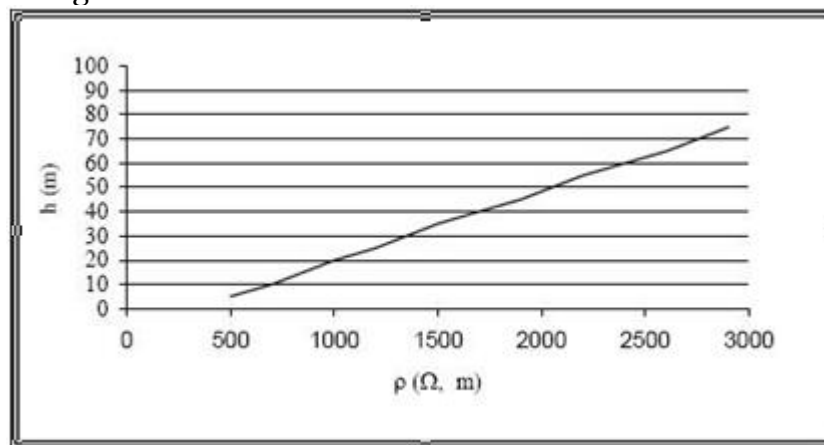
La función de este sistema es dispersar en la tierra la corriente proveniente de la descargas sin provocar sobrevoltajes peligrosos. Es más importante la forma y las dimensiones del sistema de tierra que los valores específicos de las resistencias de los electrodos; sin embargo, se recomienda un valor de resistencia pequeño para éstos ya que el valor de la resistencia del sistema de terminación de tierra para eventos transitorios depende de la configuración geométrica del sistema y la resistencia de los electrodos, se recomienda alrededor de 5Ω para instalaciones de telecomunicaciones.

Para los sistemas de terminación de tierra, se pueden utilizar dos tipos básicos de arreglos electródicos:

Tipo A. Está compuesto por electrodos de tierra, verticales o radiales. Se utiliza para SPDA aislados y en este tipo de arreglo cada conductor bajante debe ser conectado a un electrodo de tierra separado a sea radial o vertical. El número mínimo de electrodos debe ser dos y las longitudes mínimas para cada uno deben ser l para los electrodos radiales horizontales y $0.5l$ para los electrodos verticales, siendo l la longitud correspondiente al electrodo de acuerdo al nivel de protección seleccionado. Ver figura 30.

Tipo B. Este tipo de arreglo se utiliza cuando se ha instalado un sistema de terminación de aire en forma de malla o cuando se tiene una gran cantidad de conductores bajantes. Para los electrodos de tierra en anillo, el radio del área encerrada por el anillo no debe ser menor a l , de acuerdo a la figura 32. Si el radio del electrodo disponible resulta menor a l se requiere de electrodos horizontales adicionales los cuales deben tener una longitud de $l_r=l - r$ o de longitud vertical $l_v=0.5 (l - r)$.

Figura 32. Longitud mínima de los electrodos de acuerdo al nivel de protección



Fuente: <http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/EMC-rayos.pdf>

7.3. Evaluación del riesgo de daño debido a las descargas

El riesgo del daño o malfuncionamiento de un equipo sensitivo en una estructura puede ser expresado de la siguiente manera:

$$R = (1 - e^{-NP}) \cdot \delta \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde:

- ✓ N es el número de impactos de descargas atmosféricas cercanos y directos que influyen al equipo de la estructura.
- ✓ P la probabilidad de daño o malfuncionamiento del equipo en la estructura.
- ✓ δ es el coeficiente de las consecuencias económicas o sociales debido al daño o malfuncionamiento del equipo.

NP indica el nivel de riesgo de daño del equipo. La probabilidad P; es el resultado de la distribución de los sobrevoltajes en los circuitos abiertos de las instalaciones en la estructura y de la distribución de su tensión de aguante. El malfuncionamiento de los equipos sensitivos se debe en parte a los efectos térmicos y mecánicos de la descarga atmosférica que están relacionados con el valor pico de la corriente, la carga y la energía. Los efectos dañinos causados por los voltajes inducidos están relacionados con el paso de la corriente de la descarga ($S = kA/\mu A$).

7.4. Clasificación de las protecciones

La protección contra los efectos de rayos, directos o indirectos, los podemos establecer en niveles. El nivel primario está constituido por los sistemas de pararrayos, terminales aéreos, estructuras metálicas, blindajes y tomas de tierra. El nivel secundario sería necesario a nivel de la alimentación del equipo o sistema. El terciario a nivel de líneas de datos y transmisión, tarjetas de circuitos impresos y componentes electrónicos.

7.4.1. Protecciones primarias

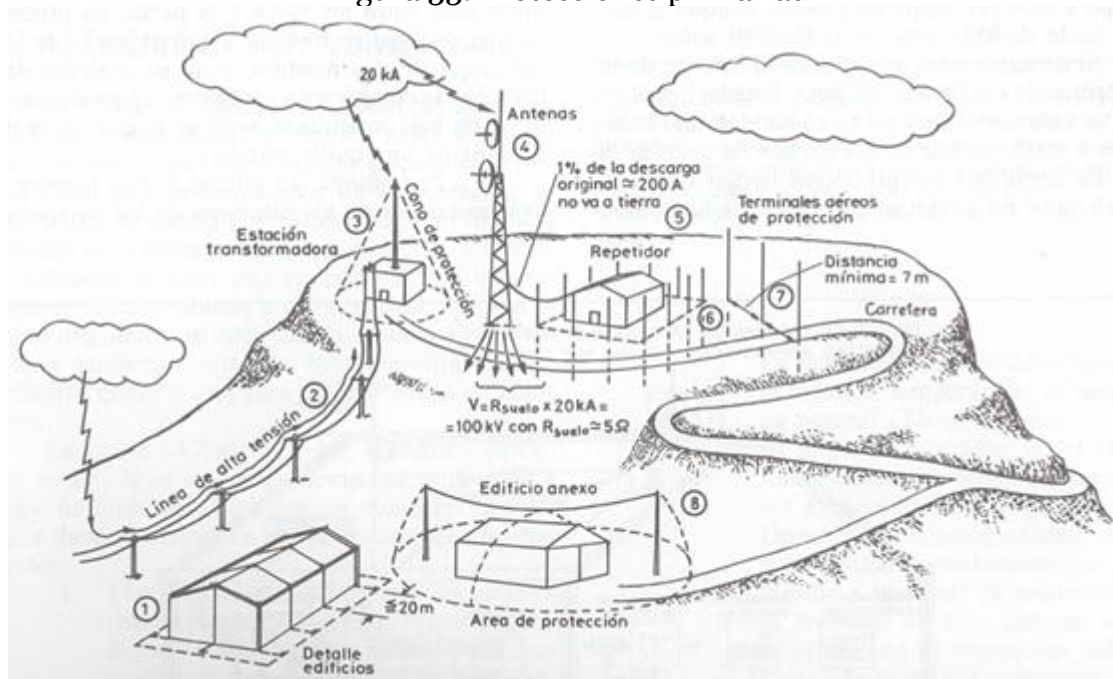
Una instalación de pararrayos se compone de una línea de captación, o terminal aéreo, de unas líneas bajantes y una red de toma de tierra y, en su defecto, picas de profundidad de 9 m como mínimo en cada derivador. Los pararrayos son la forma más conocida de protección primaria contra rayos y son utilizados en edificios rurales y lugares donde la protección es obligatoria, como tanques de combustibles y almacenes explosivos. El pararrayo proporciona un circuito de menor resistencia, estableciendo el camino a tierra para las descargas de nubes.

En la figura 33 se aprecian los diferentes métodos de protección que se emplean como:

1. Sistema de captación de rayos en forma de malla.
2. Protección con descargadores conectados directamente a una buena toma de tierra de la entrada de una línea de alta tensión.
3. Cono de protección.

4. Debido a que la torre de las antenas supone el principal blanco de rayos, se canaliza la máxima corriente del rayo a tierra en la base de la torre.
5. Para proteger un repetidor de radio o TV, un anillo de cable enterrado de, como mínimo, 10 mm de diámetro alrededor del edificio por fuera.
6. Suplemento con picas para el anillo de cable y terminales aéreos según las normas de distancia de puntos.
7. Terminales aéreos, situados a una distancia máxima de 7 m entre sí.
8. Cuando se desea la protección de grandes zonas, se pueden instalar varios pararrayos para proporcionar un mayor volumen protegido.

Figura 33. Protecciones primarias



Fuente: Joseph Balcells, Francesc Daura, Rafael Esparza, Ramón Pallás, Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos. Pág. 213

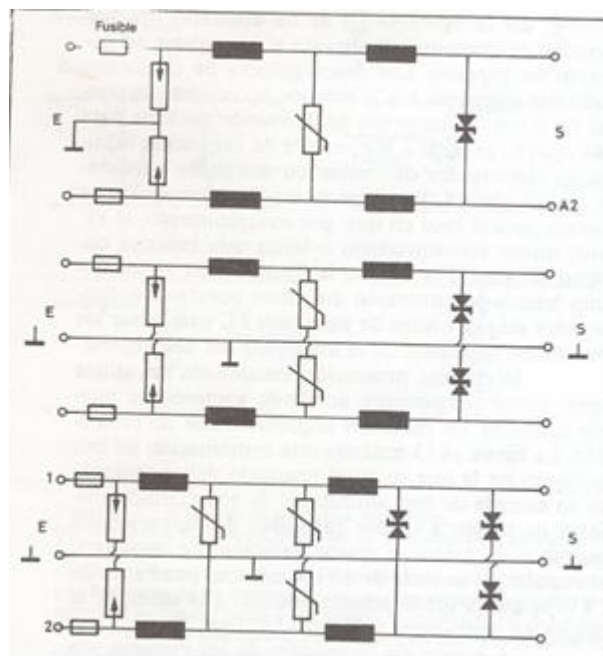
7.4.2. Protección secundaria y terciaria

En una protección secundaria el limitador está expuesto al más alto nivel de intensidad de transitorios inducidos. Se puede considerar que el nivel secundario va desde los primeros descargadores de alta energía después del pararrayos hasta las últimas protecciones en la alimentación de corriente continua a baja tensión. La protección terciaria es la aplicada a las líneas de datos, entrada/salida, comunicaciones e internas en un equipo electrónico. Es conveniente que los circuitos de protección se monten lo más cerca que se pueda de la unidad a proteger. La conexión a tierra de la unidad a proteger debe disponerse entre el contacto de tierra del circuito de protección y la barra equipotencial. De esta manera, la corriente de derivación ocasionada por la caída de potencial en la resistencia de puesta a tierra debida al impulso de sobretensión del rayo no cargará la entrada de la unidad electrónica a proteger. Los circuitos de protección considerados ofrecen la posibilidad de limitar las tensiones de modo común y de modo diferencial. En el caso de la protección de red es conveniente utilizar adicionalmente filtros antiparasitarios para la red en los que se filtren las frecuencias superiores de 50 Hz.

La acción de protección de los circuitos en modo común no es suficiente para una línea de red, puesto que también se requiere una protección contra las sobretensiones de modo diferencial. Hay diferentes circuitos de protección de tres escalones, de acuerdo con el nivel de protección para sobretensiones de modo común y de modo diferencial. El circuito de la figura 34a se emplea para proteger una línea de red en modo diferencia y en modo común. Los componentes de protección con diferentes escalones están dispuestos entre las fases y limitan la tensión de modo diferencial. La tensión de modo común queda limitada por los descargadores de gas.

El nivel de protección de estas tensiones de modo común depende en un alto grado de la pendiente de la tensión perturbadora transitoria, según sea el tipo de descargador de gas. En el circuito de la figura 34b puede quedar un cierto nivel de tensión diferencial no limitada debido a los desequilibrios entre los niveles de tensión de limitación de los componentes, por ello es conveniente utilizar el circuito completo de protección en modo común y en modo diferencial con tres escalones de protección de la figura 34c.

Figura 34. Circuitos de protecciones secundarias



Fuente: Joseph Balcells, Francesc Daura, Rafael Esparza, Ramón Pallás, Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos. Pág. 224

8. CORROSIÓN

Los componentes de un sistema de puesta a tierra, están expuestos al aire, humedad del terreno, sustancias químicas, causando corrosión en los componentes. La corrosión causa deterioro o destrucción del material metálico, oxidación por agentes de reacción. Entre los diferentes tipos de corrosión tenemos:

Por aire: Esta corrosión es causada por reacción química con soluciones en agua de lluvia disolviendo gases en el aire. También por conexiones bimetalicas no apropiadas. Esta corrosión es menos problemática y puede ser controlada por prácticas de construcción y selección de materiales.

Subterránea: Es una combinación de dos aspectos: la corrosión general uniforme debido a la pérdida de peso del componente y la corrosión de desgaste en áreas pequeñas.

Corrosión bimetalica: Se generará al unir dos metales. La implicación de este tipo de corrosión, es que debe seleccionarse de una manera adecuada diferentes materiales a emplearse, el potencial eléctrico entre ellos debe mantenerse en un mínimo para prevenir la acción galvánica.

Corrosión química: Esta corrosión tomará lugar por la acción química entre el metal y cualquier ácido o álcali en solución en el suelo. La norma guía que el material que rodea el electrodo sea relativamente neutro.

Los metales elegidos como electrodos de tierra y enterrados tienden a ser objetos de la corrosión por las causas siguientes:

- ✓ Reacciones químicas entre el agua del terreno y el electrodo.
- ✓ Ataque de los agentes químicos contenidos en el terreno.
- ✓ Corrientes eléctricas que atraviesan el terreno.
- ✓ Corrientes galvánicas.

Entre los metales usados como electrodos de tierra se deben hacer notar aspectos sobre la corrosión:

- **En el cobre:** Éste es un material de gran resistencia a la corrosión en la mayoría de los terrenos, excepto en suelos alcalinos o medios amoniacales como el en caso del agua contaminada con estiércol.
- **En el hierro galvanizado:** Susceptible a la corrosión en condiciones de aterramiento, una vez que se le afecte el recubrimiento galvánico. Su tasa de corrosión en condiciones soterradas es mucho más elevada que al aire libre. No se recomienda su uso en sistemas de tierra física.
- **Del aluminio:** Es propenso a muy rápida corrosión en suelos alcalinos, su utilización sólo debe hacerse previo análisis del terreno.
- **Corrosión bacteriana:** Es una forma de corrosión donde los suelos arcillosos son los más propicios, este tipo de corrosión es fundamentalmente dañina con el acero, no así con el cobre.

8.1. Resistencia a la corrosión

Este factor no es fácil de cuantificar, como otros factores que afectan la vida útil del componente. Esta es una razón más, por la que el cobre resulta seleccionado como material en ingeniería y en un sistema de puesta a tierra.

Las aplicaciones del cobre y aleaciones presentan buena resistencia a la corrosión, su uso para la puesta a tierra es basada a la experiencia ganada en tuberías de cobre enterradas. La tabla IX muestra el comportamiento galvánico de algunos metales, medido en agua salina.

Tabla IX. Susceptibilidad a la corrosión de metales

| Más susceptible (menos noble) | |
|--|--|
| ↓ | Magnesio y sus aleaciones |
| ↓ | Zinc y sus aleaciones |
| ↓ | Aluminio y sus aleaciones |
| ↓ | Cadmio |
| ↓ | Acero inoxidable, 13% Cr (activo) |
| ↓ | Soldadura plomo-estaño 50/50 |
| ↓ | Acero inoxidable 18/8 tipo 304 (activos) |
| ↓ | Acero inoxidable 18/8/3 Mo tipo 316 (activo) |
| ↓ | Plomo |
| ↓ | Estaño |
| | Latones |
| | Bronce de cañón |
| | Aluminio bronce |
| | Cobre |
| | Aleaciones cobre-níquel |
| ↑ | Monel |
| ↑ | Titanio y sus aleaciones |
| ↑ | Acero inoxidable (pasivo) |
| ↑ | Plata |
| ↑ | Oro |
| ↑ | Platino |
| Menos susceptible (más noble) | |

Fuente: Sistema de puesta a tierra Procobre

8.2. Características de la corrosión

Un factor a tomar en cuenta es la velocidad de corrosión, que se indica por la pérdida de peso del material por unidad de tiempo por penetración en unidad de tiempo mm/año.

$$\boxed{\frac{mm}{año} = 0.033 \times e \times \frac{i}{d}} \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde:

- ✓ e es el peso equivalente del metal
- ✓ i es la densidad de corriente en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
- ✓ d es la densidad del metal en gr/cm^3

Si se suaviza el metal, presenta este una muy pequeña velocidad de corrosión desde el punto termodinámico. Con lo que respecta a la resistividad del terreno y la corrosión, se presenta la siguiente tabla de cómo este factor influye.

Tabla X. Corrosión vrs. resistividad

| Resistividad $\Omega \cdot \text{cm}$ | Terrenos |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 0-900 | Altamente corrosivos |
| 900-5,000 | Severamente corrosivos |
| 5,000-10,000 | Moderadamente corrosivos |
| 10,000-20,000 | Ligeramente corrosivos |
| > 20,000 | Muy poco corrosivos |

Fuente: Universidad de los Andes, Venezuela

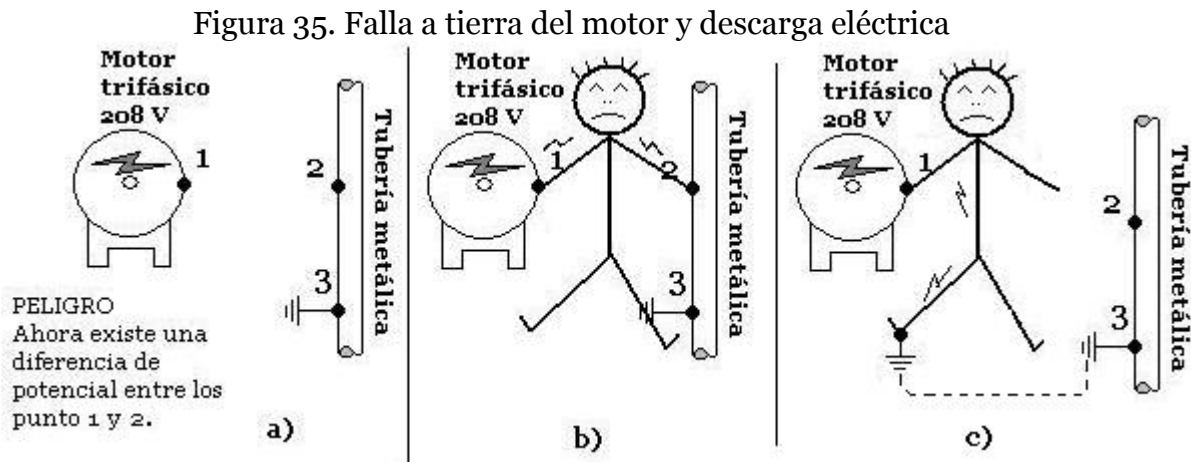
9. SEGURIDAD INDUSTRIAL

Al momento de que una persona toca con la mano una línea de 120 V y tiene su pie sobre la tierra, en este se genera una trayectoria para la corriente. La magnitud de la corriente a través del cuerpo es limitada por el voltaje y la resistencia corporal, por lo que el daño hacia la persona depende de tres factores:

- ✓ La trayectoria de la corriente que circula a través del cuerpo.
- ✓ La duración que toma la corriente en circular.
- ✓ La cantidad de corriente que fluye a través del cuerpo.

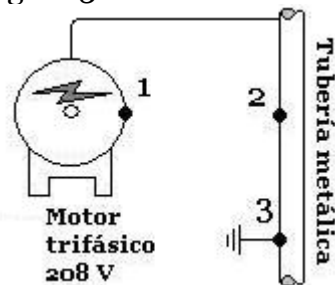
Un conductor cuenta con un revestimiento o aislante que mantiene el voltaje y electrones dentro de él, separando otros voltajes del conductor. El revestimiento también proporciona resistencia mecánica al conductor. La capacidad de un conductor para transportar corriente, la determina su material y aislante. La capacidad del cuerpo humano para transportar corriente es muy baja ya que sólo puede conducir una fracción de corriente antes de que cause daño. Una corriente de 80 mA puede ser mortal. En la figura 35a se aprecia un corto circuito dentro de un motor trifásico operando a 280 V, el chasis de éste se considera energizado. Cuando la falla ocurre dentro del armazón metálico del motor se encuentra al mismo potencial a tierra que el conductor de fase. Existe ahora probabilidad de un accidente si una persona toca al mismo tiempo el armazón del motor y una superficie que esté conectado a tierra, existiendo una diferencia de potencial entre el punto 1 y los puntos 2 y 3, cuyo valor puede variar dependiendo de la efectividad de la unión entre el conductor de fase del armazón del motor.

El valor máximo puede ser de 208 V o porción de éstos. La figura 35b, muestra un accidente que ocurre cuando alguien toca al mismo tiempo el armazón metálico del motor y la tubería metálica. Esto crea un circuito eléctrico completo a través de la persona quien ahora recibe la descarga.



La figura 35c, ilustra el segundo peligro existente. Una persona toca el armazón del motor y pisa otra superficie conectada a tierra, al mismo potencial que la tubería metálica para agua. De nuevo, existe una trayectoria de la corriente a través del cuerpo. La forma conceptual de eliminar esto es colocar un puente de unión, como en la figura 36. Esta instalación elimina los peligros anteriores.

Figura 36. Puente de unión



10. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y ANÁLISIS ECONÓMICO

Para una BTS *outdoor* y de la torre o monoposte, la distribución de la red de tierra deberá tener una resistencia menor o igual a 5Ω , con todos los equipos con partes metálicas deben quedar completamente aterrizados.

10.1. Sistema de puesta a tierra sobre suelo (spat ss)

MGB (*Master Ground Bar*): es la barra general que estará instalada en la platea, bajo la entrada de coaxiales y a través de un fleje de Cu de 70mm x 1mm conectada al anillo bajo suelo de la platea en el punto más cercano, todas ellas unidas por medio de soldadura de termofusión. El MGB deberá ser de 500mm x 100mm x 5mm, con perforaciones de 10mm de diámetro, instalada sobre soportes con aisladores. Las conexiones al MGB serán de topología radial, es decir que cada equipo debe de tener su cable de tierra en forma exclusiva al MGB. Al MGB irán conectados los cables de tierra de la BTS *outdoor* con cable de 35 mm². El cable de los *Grounding Kit* que está instalado en la entrada de coaxiales a la BTS. La escalerilla horizontal para los *feeders*. Por la estructura serán instaladas barras para conexión a tierra de los *grounding kits*, estas estarán de la siguiente manera: Una en la parte más baja antes de la curvatura de los coaxiales a 2.5m del nivel del suelo; otra en la parte alta donde los coaxiales se agrupan para bajar, a 3m abajo de los soportes de antenas; esto hasta una altura de torre de 45m.

Dimensiones de las barras: 500mm x 50mm x 5mm, con perforaciones de 10mm de diámetro. Estas barras deben ir solidarias por la estructura, sin aisladores y se asegurará su conexión a la misma a través de un cable de Cu de 35mm² directamente a la estructura en el cordón principal de la torre en el punto más cercano, respetando que la dirección del cable sea hacia abajo contraria a la dirección de una descarga atmosférica, la barra mas baja se puede conectar directamente al anillo bajo suelo de la torre en el punto mas cercano.

10.2. Sistema de puesta a tierra bajo suelo (spat bs)

10.2.1. Anillo perimetral de la bts outdoor

Estará en al parte externa de la platea de la BTS *outdoor*, se instalará a no menos de 50cm del perímetro de la misma y estará compuesta por 4 pozos, alrededor de la platea de la BTS *outdoor*, los pozos van interconectados entre sí cerrando el perímetro con cable fleje de Cu de 70mm x 1mm y soldados con soldadura de termofusión. Cada uno deberá tener una varilla *Copperweld* de 5/8" de diámetro y 2.4m de longitud, instalados uno en cada vértice del anillo y el último en el punto donde sale el fleje de Cu a la superficie para su conexión al MGB. Las conexiones a realizar al anillo de la platea son el aterrizaje de la estructura de hierro de las fundiciones de la platea; el fleje de Cu que interconecta el anillo de la platea con el anillo de la torre; el aterrizaje del poste de acometida eléctrica, para ello partirá desde el anillo de la platea un fleje de Cu intercalando varillas *Copperweld* de 5/8" de diámetro y 2.4m de longitud cada 6m hasta llegar a la puesta a tierra de la acometida eléctrica, a donde se conectará; y la puesta a tierra del generador a tierra del grupo.

10.2.2. Anillo de la torre o monoposte

El anillo de la torre o monoposte está compuesto por tres pozos con varillas *Copperweld* de 5/8” de diámetro y 2.4m de longitud cada una. En lugar de los pozos se puede aprovechar la excavación para la fundación de la torre; una vez terminado los pozos para la fundación de la torre y antes de colocar la armadura se debe introducir en el fondo de los pozos una placa de Cu al cual va soldado fleje de Cu cuyo extremo saldrá a la superficie hacia el lado externo de la viga de unión de las fundaciones, este fleje de Cu deberán ir interconectado formando un circuito cerrado fuera de la torre o monoposte, un anillo alrededor de la torre, las conexiones deberán ser con fleje de Cu y soldados con soldadura de termofusión.

En las conexiones al anillo de la torre se incluyen el aterrizaje de la armazón de hierro de los pedestales de la torre o monoposte; el aterrizaje de la base de la torre ó monoposte; la unión de anillo de caseta y torre ó monoposte en un solo punto, en la dirección de la bajada de los coaxiales y el cable de bajada del pararrayos. Ambos anillos, el de la caseta y el de la torre se unirán a través de un cable fleje de Cu.

10.2.3. Radiales del anillo de la torre

Desde el anillo de la torre y en dirección de cada cordón principal partirán 2 ó 3 radiales de 6m c/u o lo que permita el terreno, estos radiales serán de cable de Cu desnudo de 70 mm² (2/0) y una jabalina de cobre de 5/8” de diámetro y de 2.40m de longitud, ubicadas en el extremo de cada radial.

10.3. Pararrayos

Para el pararrayos deberá se deberá considerar que, en la torre se instalará y hará contacto con ella misma un pararrayos con dispositivo de cebado colocado sobre un mástil de 6 metros de altura. Para el conductor de bajadas del pararrayo se considera una unión de cobre trenzado desnudo 3/0, el cual a través de las uniones continuas haciendo puente entre cada sección de la torre y soldados con soldadura de termofusión, llegarán a hacer conexión con el anillo de la torre

10.4. Retorno de inversión

Para las especificaciones técnicas anteriormente descritas y, tomando una torre con promedio estándar de 42m de altura, tenemos un aproximado de inversión para el sistema de red de tierra de:

Tabla XI. Instalación red de tierras

| Descripción | Precio Total |
|---------------------------------------|---------------------|
| Anillo de torre | Q. 23600.00 |
| Cajas de registro de puesta de tierra | Q. 12000.00 |
| Conexión a tierra bajo cimentación | Q. 8800.00 |
| Barras de tierra | Q. 3375.00 |
| Total | Q. 47775.00 |

Realizando una comparación entre el porcentaje que representa un sistema de puesta a tierra contra la inversión realizada para la instalación completa de una torre de telefonía celular se verá que es completamente justificable desde la vista económica por la protección que realiza contra la inversión realizada.

La siguiente tabla muestra nuevamente un aproximado de la inversión para un sitio nuevo de telefonía celular, de 42m de altura:

Tabla XII. Precio aproximado de una torre de telefonía celular

| Descripción | Precio Unitario |
|--------------------------------|------------------------|
| Torre e instalación | Q289,500.00 |
| Trabajo de obra civil | Q81,200.00 |
| Estudio de planos | Q28,550.00 |
| Instalación eléctrica | Q16,900.00 |
| Instalación de red de tierra | Q47,775.00 |
| Sistema de transmisión | Q62,500.00 |
| Sistema radiante e instalación | Q35,550.00 |
| BTS e instalación | Q625,000.00 |
| Carga de datos para la BTS | Q40,000.00 |
| Total en quetzales | Q1,226,975.00 |
| Total en dólares | \$163,596.67 |

De la tabla anterior, se observa que el porcentaje de inversión de la instalación de red tierra es del 4%, que el equivalente del dinero que protege nuestra inversión contra descargas. Ahora, en cuanto tiempo tenemos el retorno de nuestra inversión.

Tomando en cuenta una región en el interior de Guatemala donde el consumo de tiempo de aire aproximado de hasta 7Erlg por sector tomado en una hora pico y en un día puede llegar a tener hasta un total de 20Erlg por sector, donde 1Erlg es el uso de canal de voz en una hora, como nuestro escenario es en el interior de Guatemala la mayoría de abonados se encuentran en un plan prepago donde el minuto de tiempo de aire tiene un costo de Q. 1.80:

$$\boxed{\text{Total}_{\text{ por sector}} : 7 \text{ Erlg} \times 60 \text{ min} \times Q.1.80 = Q.756.00} \quad (\text{Ecuación 35})$$

En este caso para los tres sectores en una hora pico se tiene:

$$\boxed{\text{Total}_{\text{ en hora pico por radiobase}} : Q.756.00 \times 3 = Q.2268.00} \quad (\text{Ecuación 36})$$

En un día promedio la radio base en sus tres sectores tarifica un total de 60Erlg, si se asume este valor durante una hora tener un total al día de ingresos, no da el siguiente valor:

$$\boxed{\text{Total}_{\text{ al día}} : 60 \text{ Erlg} \times 60 \text{ min} \times Q.1.80 = Q.6480.00} \quad (\text{Ecuación 37})$$

Para un mes, el ingreso por radio base de este promedio de Erlg es de:

$$\boxed{\text{Total}_{\text{ al mes}} : Q.6480.00 \times 30 = Q.194400.00} \quad (\text{Ecuación 38})$$

La inversión inicial por radio base es de Q.1226975.00 y por mes se tiene un ingreso de Q. 194400.00, por lo que la recuperación sin tomar en cuenta los gastos de mantenimiento y operación, consumo de energía, mercadotecnia y salarios, nos da un tiempo de:

$$\boxed{\text{Tiempo}_{\text{ de recuperación}} : \frac{Q.1226975.00}{Q.194400.00} = 6.31_{\text{ meses}}} \quad (\text{Ecuación 39})$$

Representando un aproximado de gastos en la siguiente tabla de gastos de mantenimiento, operación, ingenieros, consumo de energía y publicidad por mes, tenemos.

Tabla XIII. Gastos por mes

| Descripción | Cantidad | Costo Unitario | Total |
|---------------------------------------|----------|----------------|-------------------|
| Técnicos de mantenimiento y operación | 2 | Q6,000.00 | Q12,000.00 |
| Ingeniero de red | 1 | Q12,000.00 | Q12,000.00 |
| Personal de ventas | 2 | Q8,000.00 | Q16,000.00 |
| Publicidad y mercadotecnia | 1 | Q15,000.00 | Q15,000.00 |
| Energía y diesel en galones | 350 | Q40.00 | Q14,000.00 |
| Total | | | Q69,000.00 |

Si se asume que no se tiene crecimiento ni decrecimiento del tráfico cursado en la radio base tendremos un ingreso neto de Q. 194400.00 al mes contra un gasto de Q. 69000.00, dando una ganancia neta de Q. 125400.00. Para la inversión inicial necesaria para la puesta en servicio de un radio base en el interior de la Republica de Q. 1226975.00, se realiza un nuevo cálculo para el tiempo de recuperación de la inversión, dando como resultado:

$$\text{Tiemp_de_recuperación} : \frac{Q.1226975.00}{Q.125400.00} = 9.78\text{meses} \quad (\text{Ecuación 40})$$

Como se puede apreciar 10 meses en promedio de tiempo de recuperación de la inversión al incluir los gastos necesarios al ingreso que se obtiene por radio base en servicio por mes, el tiempo aumenta, sin embargo mantiene un buen promedio desde el punto de vista de la factibilidad de un buen negocio.

Con base a esto se tiene el siguiente resumen acerca de la necesidad de un sistema de puesta a tierra.

El 4% que representa la inversión de la instalación de un sistema de puesta a tierra queda completamente justificado, teniendo en cuenta que para un tiempo de recuperación promedio de 10 meses desglosándolo entre el tiempo.

Teniendo una inversión inicial de Q. 1226975.00, repartida entre los 10 meses se tiene Q. 122697.50 donde el 4% del sistema de puesta a tierra por mes es de Q. 4907.90 a partir de la inversión. Ahora, si se toma este valor se obtiene cuanto representa el retorno por mes de la radio base sin incluir los gastos que son de Q. 194400.00:

$$\text{Porcentaje}_{SPT} : \frac{Q.4907.90}{Q.194400.00} \times 100 = 2.52\% \quad (\text{Ecuación 41})$$

Por lo que por un 2.52% de los ingresos mensuales de la radio base se tiene una inversión del 100% protegida contra las descargas electro atmosféricas, fallas en la red del suministro de energía. En el peor de los casos, si se pierde la red de tierra por fallas, descargas o robo, el promedio de inversión para el por fallas en los dispositivos o reemplazo por robo o daño por uso es menor o igual al 2% al mes, significando aún un buen sacrificio para mantener nuestro 96% de la inversión a salvo.

CONCLUSIONES

1. La puesta a tierra de los equipos refieren la conexión intencional de carcasas, bastidores o estructuras metálicas, logrando mantener una diferencia de voltaje baja entre las diferentes estructuras metálicas, con lo que se resguarda al personal de cualquier choque eléctrico. Esto contribuye a un mejor desempeño de los sistemas eléctricos y electrónicos; evita incendios provocados por materiales volátiles o combustión de gases al mantener un camino seguro para la circulación de corrientes de falla y descargas atmosféricas. Por razones de seguridad del personal y buen desempeño de sistema, el diseño, correcta instalación, mantenimiento y monitoreo del sistema de puesta a tierra es necesario para cumplir con lo anterior.
2. El uso del electrodo en toda puesta de tierra es indispensable, no solo porque se consigue la menor resistencia para la instalación, sino también, porque este es el esqueleto de la misma. La variedad de electrodos en el medio da la oportunidad de su implementación en cualquier terreno, ya sea seco, rocoso o húmedo; además de sus diferentes formas geométricas, también permite realizar configuraciones acoplándose a las topologías del terreno así como sus dimensiones, esto siempre bajo las normas establecidas de instalación de los mismos.
3. Si el equipo tiene un camino separado a tierra, además de la barra de tierra, entonces ese camino paralelo permitirá que la corriente del rayo fluya a través del chasis del equipo, causando daños. Por lo que se requiere un único punto de tierra.

4. Para un subsistema de tierra interno se debe tener un camino de impedancia baja de conexión a tierra y también conseguir una diferencia de potencial mínima entre las estructuras conductoras dentro del sitio, eliminando cualquier onda de sobretensión que fluya, a través de los equipos del sitio. La barra principal de tierra es una barra de cobre usada como un punto de unión de baja resistencia para todas las tierras interiores. Todos los equipos de RF se conectan directamente a esta barra principal. Esta barra se conecta al sistema de tierra externo, como también la tierra de servicio AC, y otros caminos a tierra como estructuras metálicas.
5. Es importante conocer el valor de la resistividad del terreno, para la instalación del sistema de puesta a tierra. Por lo que es imprescindible que la resistividad del terreno para el sistema de puesta a tierra sea lo mayor eficiente posible. Este valor puede variar por factores como humedad, compactibilidad del terreno, como los demás mencionados.
6. Basados en el modelo económico y el tiempo de recuperación de la inversión se tiene que con un 4% dedicado a un sistema de puesta a tierra se esta asegurando que el personal y equipo se encuentran protegidos contra cualquier tipo de descargas y sobre tensiones. A su vez, se tiene que por pérdidas de componentes ya sea por robo o mal funcionamiento se requiere un 2.5% de los ingresos mensuales como máximo, para tener a salvo los sistemas de telecomunicaciones, se concluye completamente factible su instalación, mantenimiento y reposición.

RECOMENDACIONES

1. Es importante el estudio previo del sitio a la instalación del sistema de puesta a tierra, para no tener inconvenientes durante y después de la instalación de la puesta a tierra, como lo son las variantes del terreno, topología, resistividad, medidas con las que se cuentan para la instalación de la torre de comunicación, condiciones climáticas imperantes en la zona.
2. Los sistemas de puesta a tierra ayudan a mantener un ambiente libre de peligro, evitando sobretensiones peligrosas para el personal que se encuentra en el área de trabajo, como las demás personas que circulan cerca del lugar, por lo que nos reduce el riesgos a causas de sobretensiones y descargas atmosféricas y manteniendo al mínimo las pérdidas.
3. Verificar que los equipos que se utilizan cumplen las normas y estándares establecidos de sistemas de puesta a tierra, reduciría los riesgos de daños a los mismos. La mano de obra calificada y adecuado seguimiento de las instrucciones dan como resultado un sistema óptimo de puesta a tierra, así como el funcionamiento del sistema electrónico desarrollado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pablo Díaz. **Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.** Ed. Mc Graw Hill, México, 2001.
2. Joseph Balcells, Francesc Daura, Rabel Esparza y Ramón Pallás. **Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicas.** Ed. Alfaomega Barcelona, España, 1992.
3. José Raúll Martín. **Diseño de subestaciones eléctricas.** 2da. Edición México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.
4. Manual de curso. **Puesta a tierra para sistemas eléctricos de CA.,** 2000.

E-GRAFÍA

1. <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html>
18 de septiembre del 2006.
2. <http://www.ffii.nova.es/puntoinfomcyt/Archivos/rbt>
18 de septiembre del 2006.
3. <http://www.um.es/docencia/mmc/pdf>
25 de septiembre del 2006.
4. <http://www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/instalacelectricas>
2 de noviembre del 2006.
5. <http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS>
2 de noviembre del 2006.
6. <http://www.andinalink.com>
14 de enero del 2007.
7. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Climatologico
18 de enero del 2007.