

55
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROTECCION DE EQUIPO SENSIBLE
MEDIANTE SISTEMAS DE TIERRA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
ELECTRICA-ELECTRONICA
P R E S E N T A N
ESTRADA HERNANDEZ ERICK
FLORES PEÑA ARMANDO
RAMIREZ JIMENEZ GUSTAVO**

ASESOR DE TESIS: ING. GUILLERMO LOPEZ MONROY



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**A NUESTROS PADRES Y HERMANOS,
GRACIAS POR SU APOYO Y COMPRENSIÓN.**

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1.- Descargas Atmosféricas	5
Ocurrencia natural de rayos	6
Formación de una nube eléctrica	6
Tipos de descargas de rayos	9
Capítulo 2.- Medios de Protección	14
Historia de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas	14
Protección de estructuras contra descargas atmosféricas	16
Dispositivos de protección	17
Métodos de protección contra descargas	21
Efectos de descargas atmosféricas	25
Protección contra sobretensiones en líneas de distribución	26
Capítulo 3.- Equipo Sensible a las Sobretensiones	34
Calidad de la energía	35
Perturbaciones en la energía eléctrica	37
Clasificación de disturbios	38
Origen de los disturbios	40
Sobretensiones inducidas por rayos	41
Cambios fundamentales en el tipo de carga	43
Daño a microprocesadores	48

Capítulo 4.- Normas	52
Estructura de la norma	52
Métodos de puesta a tierra	57
Sistemas de electrodos de puesta a tierra	58
Artículos referentes a apartarrayos	64
 Capítulo 5.- Sistemas de Tierra	 65
Objetivos del sistema de tierra	66
Elementos del sistema de tierra	66
El suelo como conductor de la electricidad	68
Resistividad del suelo	69
Medición de resistividad	72
Resistencia a tierra	77
Medición de resistencia a tierra	77
Valor de resistencia a tierra	79
Potenciales peligrosos para el cuerpo humano	80
Electrodo de puesta a tierra	87
Electrodos fabricados especialmente para puesta a tierra	88
Sistemas de tierra en terrenos de alta resistividad	89
Conductor de puesta a tierra	93

Capítulo 6.- Diseño de Sistemas de Tierra	97
Influencia mutua entre dos sistemas de tierra	106
Distancia mínima entre sistemas de tierra	108
Sistemas de puesta a tierra en redes de distribución	110
Sistemas de tierra para control de electricidad estática	111
Puesta a tierra de pararrayos	113
Puesta a tierra para computadoras y equipo sensible	114
Sistemas de tierra en hospitales	120
Ejemplo de diseño	127
Conclusiones	130
Bibliografía	133

INTRODUCCIÓN

En la actualidad son de extrema importancia los sistemas de tierras para la seguridad de la vida humana, la operación normal y confiable del equipo eléctrico y electrónico, líneas de fuerza, pararrayos de edificios altos, apartarrayos, etc. Los buenos sistemas de tierra protegen al personal y equipo durante las condiciones de falla.

Todo el conjunto de elementos constituyentes del sistema eléctrico está prácticamente a la vista y es de fácil acceso; pero existe una sección del sistema que va enterrada, a la cual es conveniente dirigir nuestra atención, ésta es el sistema de tierra. Es necesario aplicar nuestros conocimientos teórico prácticos para seleccionar el mejor sistema, para poder descargar segura y adecuadamente las corrientes resultantes de una falla o una descarga atmosférica, y no permitir sobretensiones peligrosas para el personal y los equipos conectados al sistema eléctrico.

En el pasado, prevalecía el criterio de que cualquier objeto puesto a tierra, ya fuera que formara parte de un sistema de tierras, o que por opinión propia era parte de una "buena tierra" podría ser tocado con toda seguridad. Aparentemente este punto de vista era sólido, ya que si una estructura metálica, estaba conectada a una red hidráulica en amplio contacto con el terreno, uno podía con plena seguridad apoyarse en ella, porque cualquier línea de cualquier tensión que cayera sobre ella, automáticamente igualaría su nivel de potencial al de tierra; es decir, cero, y el ser humano, estaba a salvo de diferencias de potenciales peligrosos.

La experiencia de varios años arrojó resultados diferentes a los esperados, muchas vidas fueron cegadas en forma totalmente "extraña"; caminando en un terreno abierto con una "buena red de tierras" a sus pies, caían fulminadas, o

recargadas en una estructura metálica, morían electrocutadas. Después de un tiempo se vió que solamente se había analizado el peligro de tensiones peligrosas de línea a tierra, ya fuera transitorias por descargas atmosféricas, o por caídas de líneas, más no se habían analizado los efectos secundarios de tales circunstancias; no se había contemplado el efecto de la corriente de falla al circular por el terreno.

Uno de los fenómenos que provocan el mayor número de fallas de equipo en las instalaciones eléctricas, son las descargas eléctricas de origen atmosférico. La descarga atmosférica es un fenómeno que se presenta con mucha frecuencia y nos afecta de distintas formas. Todos conocemos la ocurrencia de descargas atmosféricas sobre edificios o casas y su efecto destructivo. Este fenómeno causa daños muy grandes a nivel mundial anualmente, y en particular a los sistemas eléctricos.

Los disturbios más comunes y que más afectan al usuario ocurren en su mayoría en los sistemas de distribución y son causados por fenómenos naturales (descargas atmosféricas), accidentes o por operación (maniobras) misma de la red.

En los últimos años han tenido lugar cambios fundamentales en la naturaleza de carga del usuario y del sistema de potencia que afectan directamente la calidad de la energía:

La microelectrónica ha producido una creciente categoría de cargas residenciales comerciales e industriales que son muy sensibles a las variaciones de la calidad de energía. Los esquemas de diseño de integración a gran escala (LSI) y a muy gran escala (VLSI) son dispositivos cada vez más rápidos, más complejos y con mayor capacidad de memoria.

En la actualidad los procesos automáticos de producción, controlados por computadora, son indispensables. Los equipos utilizados en plantas industriales modernas (controladores de procesos, controladores de velocidad, robótica, cómputo, comunicaciones, etc.) se está volviendo cada vez más sensible a variaciones en los niveles de voltaje al elevarse su grado de complejidad. Los microprocesadores, y los circuitos C-MOS, contenidos en todos aquellos dispositivos y aparatos, trabajan con niveles de señal bajísimos, y por lo tanto reaccionan a los más pequeños impulsos de perturbación. Estos componentes, pueden quedar destruidos por sobretensiones de tan solo algunos cuantos microsegundos. Incluso si este tipo de destrucción en los circuitos electrónicos carece de espectacularidad, y no deja, por lo general, huellas, las interrupciones en el servicio y en el funcionamiento, que se derivan de aquellas destrucciones, suelen durar largo tiempo, y en consecuencia, los daños secundarios suelen ser mucho más elevados que los daños de hardware, propiamente dichos.

El equipo digital es sensible a transitorios y "picos" que pueden generar información falsa. Si una magnitud equivocada es introducida en un procesamiento de datos, esta puede tener efectos en el control del proceso y provocar un mal funcionamiento del equipo. Una precaución especial, es requerida entonces para prevenir que señales falsas afecten el control de procesos.

Por otra parte, el auge de la electrónica de potencia ha dado lugar a una nueva generación de dispositivos con mayor capacidad y bajo costo. Sin embargo, estos dispositivos producen perturbaciones en la calidad de energía a la que la microelectrónica es sensible.

A continuación presentamos algunos resultados de encuestas realizadas a diferentes industrias :

En la actualidad los procesos automáticos de producción, controlados por computadora, son indispensables. Los equipo utilizados en plantas industriales modernas (controladores de procesos, controladores de velocidad, robótica, computo, comunicaciones, etc.) se está volviendo cada vez más sensible a variaciones en los niveles de voltaje al elevarse su grado de complejidad. Los microprocesadores, y los circuitos C-MOS, contenidos en todos aquellos dispositivos y aparatos, trabajan con niveles de señal bajísimos, y por lo tanto reaccionan a los más pequeños impulsos de perturbación. Estos componentes, pueden quedar destruidos por sobretensiones de tan solo algunos cuantos microsegundos. Incluso si este tipo de destrucción en los circuitos electrónicos carece de espectacularidad, y no deja, por lo general, huellas, las interrupciones en el servicio y en el funcionamiento, que se derivan de aquellas destrucciones, suelen durar largo tiempo, y en consecuencia, los daños secundarios suelen ser mucho mas elevados que los daños de hardware, propiamente dichos.

El equipo digital es sensible a transitorios y " picos " que pueden generar información falsa. Si una magnitud equivocada es introducida en un procesamiento de datos, esta puede tener efectos en el control del proceso y provocar un mal funcionamiento del equipo. Una precaución especial, es requerida entonces para prevenir que señales falsas afecten el control de procesos.

Por otra parte, el auge de la electrónica de potencia ha dado lugar a una nueva generación de dispositivos con mayor capacidad y bajo costo. Sin embargo, estos dispositivos producen perturbaciones en la calidad de energía a lo que la microelectrónica es sensible.

A continuación presentamos algunos resultados de encuestas realizadas a diferentes industrias :

- Aproximadamente el 21% de las perturbaciones fueron impulsos de voltaje transitorios. Las causas más comunes que originan dichos impulsos son conexión y desconexión de cargas, descargas atmosféricas cercanas, descargas estáticas y arqueo entre contactos. Normalmente no representan un problema hasta que sobrepasan el 200% de voltaje rms.

- Las interrupciones constituyeron el 14%. Estas interrupciones son ocasionadas por corto circuitos, descargas atmosféricas, accidentes, etc.

Regresando a los sistemas de tierra podemos decir que éstas contribuyen a que no existan diferencias de potencial peligrosas y que al mismo tiempo, permitan el paso a tierra de las corrientes de falla o de la descarga de origen atmosférico.

Como consecuencia de la cada vez más intensa presencia de sistemas y aparatos electrónicos, en todos los sectores de la industria, se ha constatado una intensificación considerable de los daños causados por sobretensiones en instalaciones eléctricas. Las incalculables consecuencias de las descargas de rayos, debido a malos diseños de sistemas de tierra.

Es por todo esto que decidimos estudiar la manera de proteger adecuadamente los equipos electrónicos contra sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas, ya que en la actualidad existe muy poca información sobre este tema.

CAPITULO 1.- DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Desde las más antiguas civilizaciones, hasta hoy, el hombre ha estado fascinado con las luces en el cielo. El relámpago, el rayo para la mitología, fue muy temido como un resplandor atmosférico de orígenes sobrenaturales: la gran arma de los dioses. Los griegos se asombraban y temían a los rayos que eran lanzados por Zeus. Para los vikingos, los rayos eran producidos por Thor con su martillo el cual golpeaba contra un yunque para después montar su carro a través de las nubes.

En el Este, antiguas estatuas de Buda mostraban una flecha en cada extremo del rayo. Las tribus indígenas de Norte América creían que los rayos eran las brillantes plumas del místico pájaro de trueno, el cual aleteaba sus alas produciendo el sonido del trueno. Ahora los científicos, más que usar las técnicas místicas para explicar los relámpagos, han reemplazado esos métodos por procedimientos experimentales.

Las fuerzas asociadas con los rayos son enormes, e impredecibles. Controlar la energía del rayo para proteger la vida, construcciones y equipo en general, es tarea del Ingeniero Eléctrico.

Para seleccionar adecuadamente un sistema para proteger edificios y estructuras del daño del rayo, necesitamos conocer los tipos de interacción que ocurren entre la nube y la tierra.

Ocurrencia Natural de Rayos

El único disturbio natural que da como resultado el sonido del trueno es el rayo. Las tormentas de rayos están compuestas de fuertes vientos y lluvia, con posible granizo y nieve, y son usualmente nubes convectivas cúmulo-nimbus. Cerca de 1000 tormentas eléctricas están activas al mismo tiempo, sobre la superficie terrestre.

La mayoría de las investigaciones de la estructura eléctrica de la nube se ha enfocado a la cúmulo-nimbus, debido a que este tipo de nube produce la mayoría de las descargas atmosféricas o rayos.

El modelo clásico de la estructura eléctrica de la nube fue desarrollado en las décadas de 1920's y 1930's . En este modelo la nube forma un dipolo, a finales de 1930's se verificó la validez de dicha estructura mediante mediciones. Subsecuentes mediciones y experimentos confirmaron la existencia del dipolo en la nube.

El origen más común de las descargas atmosféricas es la separación de la carga eléctrica durante las tormentas. Para que la descarga se realice se necesita un gradiente de potencial lo suficientemente grande como para romper la rigidez del aire, ya sea entre nubes o entre nubes y tierra.

Formación de una Nube Eléctrica

El calentamiento solar produce un movimiento vertical del aire que transporta vapor, este vapor al encontrarse a determinada altura y con condiciones atmosféricas propicias se condensa y forma gotas de agua.

La rotación de la tierra da como resultado el surgimiento de nuevas tormentas moviéndose hacia el oeste conforme el día vaya avanzando debido al calentamiento del sol sobre la tierra. Las corrientes ascendentes de aire, acarrean vapor de agua, el cual contribuye a la formación de la nube eléctrica. La mayor actividad de las tormentas tiene lugar en zonas templadas, y su frecuencia disminuye entre más se aproxime a los polos.

La duración de una tormenta es de aproximadamente dos horas. En la duración de una tormenta influyen varios factores, tales como: la localización, el calentamiento solar, el vapor de agua, etc.

La superficie de la tierra está cargada negativamente, en el orden de 5×10^5 C, resultando una intensidad de campo eléctrico de, aproximadamente, 0,13 kV/m. A una distancia de 100 km a 150 km sobre la superficie de la tierra se encuentra una capa de aire que representa el electrodo positivo. La carga es acarreada a la tierra por gotas de lluvia. Como mencionamos anteriormente la nube de tormenta podemos considerarla como un dipolo, con la parte superior cargada positivamente y la inferior negativamente (figura 1.1). Cuando la energía del campo excede 1,5-2 kV/m se inicia el punto de descarga de iones.

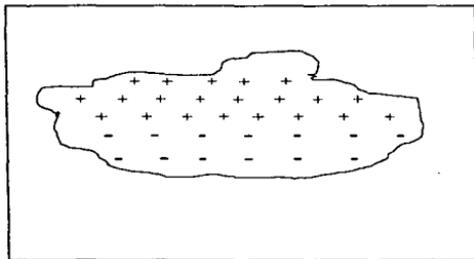


Figura 1.1.- Estructura eléctrica de una nube

Punto de Descarga

El rayo es la descarga del campo eléctrico entre la nube la superficie de la tierra o con otra nube. El campo eléctrico debajo de la nube es considerado con un rango de 10,000 a 30,000 V/m. Esta energía estática es dispersada o disipada cuando la nube es descargada mediante un rayo.

El proceso del punto de descarga puede iniciar naturalmente, al caer gotas de la nube sobre los árboles o puntas salientes de metal. Cuando la energía del campo es suficientemente fuerte los electrones son acelerados, y se colisionan con moléculas de gas ionizándolas.

Los electrones en exceso dan lugar a la formación de una avalancha que origina la descarga eléctrica, para iniciar este proceso se requiere de un electrón inicial. La descomposición de rayos cósmicos o radioactivos puede proveer el electrón inicial.

El aire ionizado produce un flujo de corriente que debilita el campo eléctrico. Esto ocurre cuando la energía del campo es menor a 2 kV m^{-2} . Densidades de corriente de 10 nA m^{-2} han sido observadas cuando la energía del campo eléctrico es de 10 kV m^{-1} . En 1925, Wilson demostró que estas corrientes del punto de descarga actúan para limitar la energía del campo eléctrico cercano a la tierra.

Punto de Descarga

El rayo es la descarga del campo eléctrico entre la nube la superficie de la tierra o con otra nube. El campo eléctrico debajo de la nube es considerado con un rango de 10,000 a 30,000 V/m. Esta energía estática es dispersada o disipada cuando la nube es descargada mediante un rayo.

El proceso del punto de descarga puede iniciar naturalmente, al caer gotas de la nube sobre los árboles o puntas salientes de metal. Cuando la energía del campo es suficientemente fuerte los electrones son acelerados, y se colisionan con moléculas de gas ionizándolas.

Los electrones en exceso dan lugar a la formación de una avalancha que origina la descarga eléctrica, para iniciar este proceso se requiere de un electrón inicial. La descomposición de rayos cósmicos o radioactivos puede proveer el electrón inicial.

El aire ionizado produce un flujo de corriente que debilita el campo eléctrico. Esto ocurre cuando la energía del campo es menor a 2 kV^{-2} . Densidades de corriente de 10 nA m^{-2} han sido observadas cuando la energía del campo eléctrico es de 10 kV m^{-1} . En 1925, Wilson demostró que estas corrientes del punto de descarga actúan para limitar la energía del campo eléctrico cercano a la tierra.

TIPOS DE DESCARGAS DE RAYOS

Existen cuatro clasificaciones de las descargas de rayos que son las siguientes:

- Descarga en el interior de la nube (IC).
- Nube - Nube (C-C).
- Nube - Aire (C-A).
- Nube - Tierra (C-G).

Arriba del 50% de los descargas de los rayos ocurren en el interior de la nube (IC). Otros cuantos inician en interior de la nube y terminan en una nube adyacente (C-C) o en el aire (C-A). Otros que inducen campos y el cambio de carga en la ubicación de la tierra; lo cual puede generar voltajes adversos en circuitos eléctricos. Para poder proteger los sistemas electrónicos, contra descargas atmosféricas, es necesario conocer las características de las descargas nube-tierra (C-G), ya que son las que afectan directamente las instalaciones. A continuación describiremos las características más importantes de este tipo de descarga.

Descarga Nube-Tierra

El 90% de los destellos nube - tierra o el 45% de todos los destellos, están en la categoría 1 de la tabla 1.1. La descarga inicia con una guía negativa desde la nube.

La nube está cargada positivamente en su parte superior. El 10% de las descargas nube-tierra, son iniciados desde lo alto de la nube con una guía positiva moviéndose hacia la tierra; categoría 3 de la tabla 1.1 y constituyen el 5 % del total de las descargas.

La descarga tierra - nube es muy poco común. Categorías 2 y 4 de la tabla 1.1. La mayoría de las descargas tienen guías negativas desde la nube hacia la tierra.

CATEGORÍA	ORIGEN	CARGA DE LA GUÍA
1	Nube	Negativa
2	Tierra	Positiva
3	Nube	Positiva
4	Tierra	Negativa

Tabla 1.1.- Clasificación de descargas entre nube y tierra.
Guía Negativa Nube-Tierra

Una descarga negativa CG comienza en la nube. La guía negativa descendente comienza como una serie de pasos. El primer paso se logra después de ionizar el aire cercano a la nube, posteriormente la guía tiene que reagruparse y volver a ionizar el aire produciendo otro paso.

Un rayo tiene varios componentes, los más significativos son tres o cuatro pulsos de alta corriente, Cada descarga (pulso) dura aproximadamente 1 ms, y la separación entre descargas es de varias decenas de milisegundos. Generalmente se piensa que el rayo es una sola descarga, debido a que el ojo humano es incapaz de distinguir la luminosidad producida por cada uno de los pulsos.

Algunos valores típicos de la guía negativa nube-tierra son:

- El tiempo para que la guía se mueva al siguiente paso es de 1 ms.
- La longitud de la guía es de unas decenas de metros.
- El tiempo entre pasos es de 20 - 50 ms.
- Una guía completamente desarrollada puede bajar hasta una carga negativa de 10 C.
- La carga baja en decenas de milisegundos.
- La velocidad descendente de propagación está alrededor de 2×10^5 m/s.
- La corriente guía esta entre 100 y 1000 A.
- Los pasos de la guía tienen pulsos pico de corriente de 1 kA.
- El inicio y la terminación de la guía producen ramas descendentes.
- La diferencia de potencial entre la guía y la tierra es de 10^7 V.

Cuando la punta de la guía está cerca de la tierra, el campo eléctrico en objetos afilados o en irregularidades de la superficie de la tierra se incrementa hasta romper la rigidez del aire. En un momento dado, uno o más movimientos ascendentes de descarga son iniciados en esos puntos. Cuando uno de los movimientos ascendentes de la descarga entra en contacto con la guía descendente, a algunas decenas de metros de la superficie de la tierra, la guía es efectivamente conectada al potencial de la tierra. La guía es entonces descargada por una onda ionizante del potencial de tierra que se propaga hacia arriba por el canal previamente ionizado. Este proceso se denomina: primera corriente de retorno. El campo eléctrico debido a la diferencia de potencial entre la corriente de retorno, que tiene el potencial de tierra, y la guía, que tiene un potencial cercano al de la nube, producen la ionización adicional.

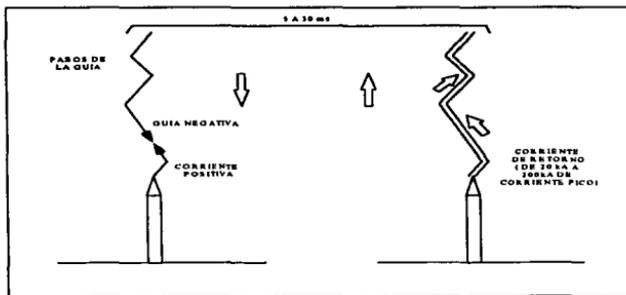


Figura 1.2.- Descarga del Rayo.

Algunos valores típicos para la corriente de retorno, son:

- La velocidad hacia arriba de la corriente de retorno es típicamente de 1/3 a 1/2 de la velocidad de la luz cerca de la tierra y va decrecientandose conforme se acerca a la nube.
- El tiempo total entre tierra y nube esta sobre el orden de 100 μ s.
- Los valores pico que alcanza la corriente de retorno son de 30 kA.
- El tiempo del cero al pico se da en unos pocos μ s.
- Cientos de amperes pueden fluir desde unos pocos ms, hasta cientos de ms.
- El canal guía es calentado hasta unos 30,000 K.
- Toda la carga contenida en la guía, ramas y la carga de la nube es depositada en tierra.

A continuación se presentan algunos parámetros adicionales:

- La carga total transferida es de 2 a 200 C.
- El rango de la corriente va de 20 a 400 kA.
- El tiempo entre la corriente de retorno es de 3 a 100 ms.
- El número de corrientes de retorno va de 1 a 30 con un promedio de 4.
- Si queda carga adicional contenida en la nube otra guía puede utilizar el trayecto ionizado y más corriente de retorno puede desarrollarse.

CAPITULO 2.- MEDIOS DE PROTECCIÓN

HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La primera mención de las varillas de rayo, fue una nota publicada en el Gentleman's Magazine, en mayo de 1750; y en la edición de Londres de este libro, sobre electricidad, publicado en 1751, donde Franklin recomendaba el uso de varillas de rayo para proteger las casas contra rayos.

En 1774, Franklin reportó su intento por atraer el "fuego eléctrico" fuera de la nube, es decir, atrayendo una alta cantidad de energía. Para esto, Franklin propuso dos métodos para la protección contra rayos; la varilla para atraer y controlar el golpe del rayo y el método de disipación. Él mismo descartó el método de disipación y se puso en favor de la varilla.

En 1876, James Clerk Maxwell sugirió que cualquier edificación que está completamente encerrada con metal, formando una "jaula de Faraday" y si el rayo golpea al metal que encierra a la construcción, entonces no fluirán corrientes dentro del edificio.

Desde 1904, la National Fire Protection Association's (NFPA) tiene en existencia la norma número 78 (renumerada a la norma 780) para "especificaciones para la protección de edificios contra rayos". En 1945, ocurrió una reorganización, y el American Institute of Electrical Engineers (ahora IEEE) juntó el combinado de promociones de la norma.

En 1947, la NFPA asumió el control de la norma 78 y a partir de entonces es periódicamente revisada.

NFPA 78 cubre los requerimientos en estructuras ordinarias para protección contra rayos; diversas estructuras, y ocupados especiales; ductos para trabajos pesados; y estructuras que contienen vapores flamables, gases, etc. El principal propósito es salvaguardar a la personas contra exposiciones a rayos.

La NFPA ha dividido la norma 78 en dos normas y las ha renumerado:

NFPA 780, titulada "el código contra la protección de rayos".

NFPA 781 titulada "sistemas de protección contra rayos".

El método de ionización para la protección contra rayos, viene de la inspiración de J. B. Szillard, quien presentó su idea en un artículo que leyó a la Academia de Ciencias, en París, en marzo 9 de 1914.

Gustav P. Carpat, quién fue también un colega de madame Curie, patentó el primer método de ionización contra rayos en 1931.

Alphonse Carpat, hijo de Gustav, mejoró el dispositivo en 1953 liderando el desarrollo comercial.

El método de descarga multipuntos de protección contra rayos, fue patentado en 1930.

En 1955, el Lightning Protection Institute (LPI) fue formado y genera normas sobre la instalación, el LPI 175 es similar a la NFPA 78.

El último evento significativo fue el reporte de la Federal Aviation Administration sobre las pruebas de 1989 "protección contra rayos con sistemas de descarga multipuntos", realizadas en Orlando Sarasota y Tampa, Florida.

PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Las descargas directas no son frecuentes en líneas de distribución o en casas habitación en las ciudades, donde hay edificios elevados que brindan un blindaje natural; de aquí que hay que hacer una evaluación de la necesidad de protección, tomando en consideración los siguientes parámetros:

- Seguridad del personal y del equipo.
- Ocurrencia de las descargas.
- Tipo de construcción.
- Contenido.
- Riesgo económico.
- Grado de blindaje.
- Tipo de terreno.
- Altura de la estructura.
- Exigencia de aseguradoras.

Riesgos de descarga atmosférica

El riesgo o la susceptibilidad de atraer descargas atmosféricas está determinado por:

- 1) Tipo de estructura
- 2) Tipo de construcción
- 3) Posición relativa
- 4) Topografía
- 5) Ocupación y contenido
- 6) Frecuencia de descargas.

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

Existen varios dispositivos para captar, apartar y controlar los rayos, los cuales son:

- Varilla de Franklin (pararrayos)
- Jaula de Faraday
- Terminal aérea ionizada

Pararrayos de Franklin y Jaula de Faraday

Aunque la varilla de Franklin y la Jaula de Faraday son dos métodos diferentes, la mayoría de las veces son instalados juntos.

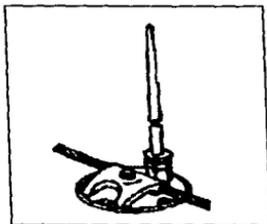


Figura 2.1.- Pararrayos

Franklin eligió la punta afilada de la varilla para interceptar los rayos y mandar la carga eléctrica a tierra.

En 1901 el British Lightning fue formado. Se estudió el área de protección que una varilla vertical proporciona, y se concluyó que dicha área debería ser el ángulo formado de la punta de la varilla a una distancia sobre la tierra igual a la altura de la varilla, es decir, un ángulo de 45°. Esta área bajo una línea recta de la punta de la varilla a la tierra fue llamada "zona o cono de protección". Sin embargo la experiencia de los años indicó que la línea para el cono de protección no es exactamente una recta. Esto fundamentó el porque los rayos en algunas ocasiones golpean los lados y no la parte superior de las estructuras altas.

Los rayos con guías negativas avanzan en pasos de aproximadamente 45 m de la nube a la tierra. Cuando la guía del rayo está a 45 m de la tierra, esta guía puede ser atraída por un objeto. Esto explica el porqué las estructuras altas son golpeadas debajo de la punta. Esto condujo en los 70's a un nuevo concepto: la teoría del "rolling ball".

Necesitamos para visualizar este concepto una esfera de 45 m de radio tangente a la terminación aérea y girar esta esfera sobre la superficie de la tierra. La superficie descrita por el giro de la esfera nos va a delimitar dos zonas, todas las cosas bajo la superficie de la esfera estarán protegidas y las que se encuentren arriba quedan expuestas a las descargas atmosféricas.

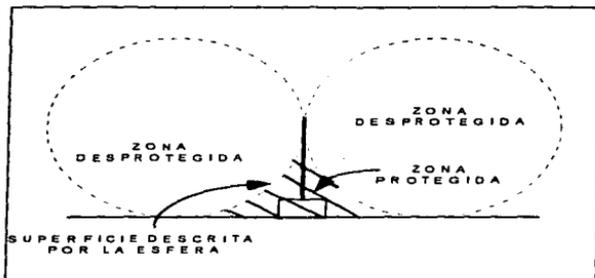


Figura 2.2.- Rolling Ball Concept

Jaula de Faraday

La jaula de Faraday consiste en un material metálico rodeando al objeto, lo cual da por resultado un escudo electrostático alrededor de dicho objeto. Cuando la usamos en el contexto de protección contra rayos, los conductores están espaciados y forman una malla a través de la estructura de arriba a abajo de cada lado.

Entre menos espacio exista entre los conductores mayor será la efectividad de la jaula de Faraday atenuando señales de radio frecuencia (RF) o interferencia electrostática. Por otro lado, si el espaciamento entre conductores aumenta, la eficiencia disminuye. La combinación de los conductores atravesados conectados a la varilla de Franklin dio por resultado un nuevo concepto en la protección contra descargas atmosféricas.

El costo de construcción de una jaula de Faraday efectiva es mayor que si se construyera una combinación.

Terminal Aérea Ionizada

La terminal ionizada consiste de una varilla de Franklin con material radioactivo para la generación de iones conectado con un conductor especial al sistema de tierra.

Hay varias formas disponibles para este tipo de terminal aérea. Una tiene en la punta la forma de esfera o elipse aproximadamente de 300 mm de diámetro conteniendo material radioactivo. Otros diseños contienen una placa debajo de la esfera la cual contiene el material radioactivo.

Varios materiales radioactivos han sido usados. En 1962 Müller-Hillebrand probaron los dos tipos de terminales bajo tormentas naturales y concluyeron que no había ventajas con el uso de dispositivos con radio 226.

La potencia de los materiales radioactivos ha sido limitado a aproximadamente 1 mCi (mili Curie) lo cual es seguro para los seres humanos.

Hasta 1977 las conclusiones eran que la adición de material radioactivo en las terminales aéreas no daba mejor resultado que las varilla de Franklin estandar. Para reforzar esta conclusión ocurrió un evento en Roma, donde la cúpula del Vaticano fue golpeada por un rayo aunque ésta estaba protegida por dos varillas con material radioactivo de 22 m de altura. Sin embargo, la distancia más cercana entre los conductores radioactivos y la cúpula era de 150 m. Un

mástil de 22m de altura tiene una zona de protección de acuerdo a la "rolling ball theory" de 33.5 m.¹

Finalmente la conclusión alcanzada usando radio con 72 μCi y/o torio de 0.72 μCi en las terminales aéreas bajo alta humedad relativa fue que usando terminales ionizadas es mas probable la atracción de rayos que en una terminal no ionizada.

MÉTODO DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS

La protección contra descargas atmosféricas se logra con dispositivos que captan y derivan los rayos a tierra por una o mas trayectorias facilitando el paso de la corriente. Lograr una protección al 100% no es posible, de acuerdo con experiencias obtenidas hasta ahora. La protección consiste básicamente en tres elementos:

- I.- Punta o electrodo.
- II.- Conductor desnudo de bajada.
- III.- Electrodo de puesta a tierra.

I.- PUNTA O ELECTRODO

También llamado terminal aérea, es el elemento encargado de interceptar la descarga ya que se encuentra por encima de los objetos a proteger. Esta punta es metálica y puede ser hueca o sólida.

¹ D. W. Zipse, Fellow, "Lightning Protection Systems: Advantages and Disadvantages" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 5, Sept/Oct 1994

Es el único sistema generalmente aceptado por la comunidad científica y los comités de protección contra rayos, aunque existen otros diseños de electrodos como son: los radioactivos, los activos, etc.

La zona protegida por la punta es en forma de cono, con ligeros arcos de circunferencia de concavidad hacia arriba, el ángulo de apantallamiento se considera de 45 grados por la NFPA, y en el código británico es de 45 grados para estructuras ordinarias y 30 grados para casos especiales (figuras 2.3 y 2.4).

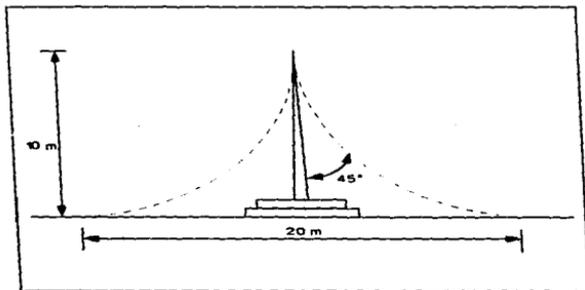


Figura 2.3.- Zona de protección del pararrayos.

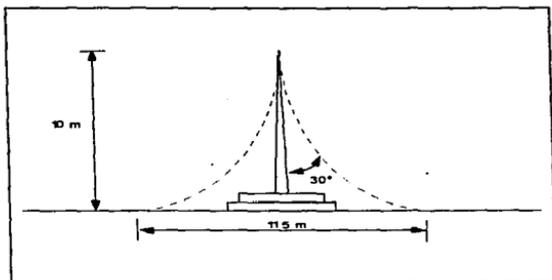


Figura 2.4.- Zona de protección del pararrayos.

La altura de la terminal aérea no debe ser menor a 25 cm y con intervalos máximos de 6 a 7 m como se muestra en la figura 2.5., además de que debe contar por lo menos con dos bajadas a tierra.²

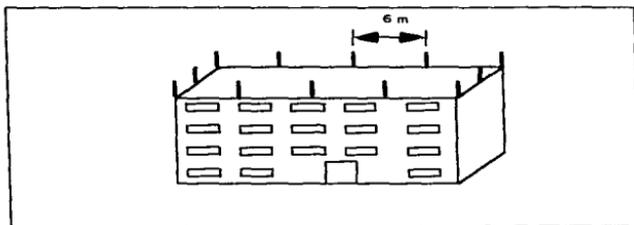


figura 2.5.- Forma de proteger un edificio.

² Protección de Estructuras Contra Descargas Atmosféricas.
Espinosa y Lara Roberto, López Monroy Guillermo.
Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A.

II.- EL CONDUCTOR DE BAJADA

Conductor de bajada: Es el encargado de conducir la corriente de la descarga a tierra, por lo que debe tener un calibre específico, que se utilizará según sea el caso. La trayectoria a tierra, es decir, los conductores de bajada por lo menos deben de ser dos.

La conexión de la bajada debe de ser buena en ambos extremos, en la punta y en el electrodo de tierra ya que se dan casos en que esta conexión se corroe, corta o se rompe, etc.

La localización de las bajadas depende de la ubicación de las terminales aéreas, el tamaño de la estructura protegida, la ruta mas directa, la seguridad contra daño o desplazamiento, la localización de cuerpos metálicos, tuberías de agua, el electrodo de tierra y las condiciones del terreno, fachadas, estética, etc.

La distancia promedio entre bajadas no debe exceder de 30 m y no debe presentar dobleces con ángulos de 90 grados o menos, como se ilustra en la figura 2.6.

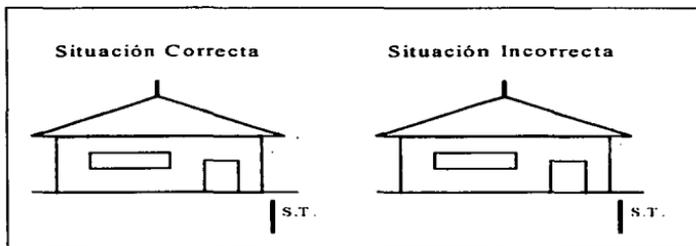


Figura 2.6 Forma de dobleces al conductor de bajada

III.- ELECTRODO DE TIERRA

Este elemento es tan importante como los anteriores y desgraciadamente no se da la atención que requiere ya que va enterrado y por lo tanto oculto y difícil de revisar, si a esto le agregamos en algunos casos existen terrenos de resistividad elevada, el problema se agrava aún más (este elemento se desarrolla ampliamente en los capítulos 5 y 6).

EFFECTOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Las sobretensiones de origen atmosférico son las de mayor importancia en las líneas de distribución.

La mayor parte de las descargas atmosféricas no ocurren directamente en las líneas de transmisión o distribución sino en puntos adyacentes produciendo voltajes inducidos que se comportan como ondas viajeras. Las ondas de sobretensión pueden producirse también por un fenómeno de inducción debido a la presencia de nubes cargadas cercanas a las líneas.

Cuando una descarga atmosférica incide sobre una línea eléctrica, existe una zona que conduce a cada lado de la descarga donde el voltaje del rayo puede exceder considerablemente el nivel de aislamiento de la línea, y el flameo ocurrirá en forma instantánea. Al mismo tiempo se generan ondas viajeras en los conductores en cualquiera de los lados del punto de incidencia.

Un sobrevoltaje típico ocasionado por un rayo cuenta con un frente de onda muy escalonado, lo cual significa que su voltaje está aumentando a una tasa de millones de volts por microsegundo. Después de que se ha alcanzado el

voltaje de cresta, el voltaje disminuye hasta la mitad del valor de cresta en aproximadamente 50 microsegundos y que se disipa por completo en 100 o 200 microsegundos. En la figura 2.7 se muestra la gráfica de un descarga atmosférica.

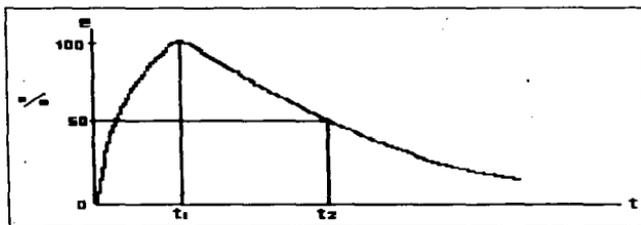


Figura 2.7.- Curva típica de una descarga atmosférica

La magnitud de las corrientes de las descargas atmosféricas depende de la energía concentrada en las nubes y la diferencia de potencial existente entre estas y la tierra.

PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

APARTARRAYOS

Es el elemento de protección usado en los circuitos eléctricos que se encarga de interceptar las sobretensiones drenándolas a tierra. Los apartarrayos poseen la cualidad de mantener la continuidad del sistema de distribución debido a que drenan a tierra las sobretensiones presentadas y no permitiendo la operación de la protección debido a que su operación es mucho más rápida.

El apartarrayos es un elemento no lineal que a tensiones normales se comporta como un aislador, debido a su resistencia variable, que a mayor tensión menor resistencia.

En la actualidad existen dos tipos de apartarrayos; autovalvulares y de óxido de metal. El apartarrayos autovalvular está compuesto por pastillas de carburo de silicio en serie con entrehierros internos, cuando ocurre una sobretensión se hace funcionar el apartarrayos, la tensión de la línea se va a tierra a través de éste, pero al pasar onda senoidal por cero se restablece y no causa interrupción en el servicio, la resistencia que presenta el apartarrayos no es cero por lo que existe una caída de tensión que es conocida como tensión residual. El apartarrayos de óxido de metal no necesita entrehierros y la tensión residual es menor que la de los autovalvulares. Sin embargo, como veremos más adelante, los equipos electrónicos son muy sensibles y detectan la falta de potencial.

Un apartarrayos efectivo debe tener las siguientes características:

- Comportarse como un aislador mientras la tensión aplicada no exceda cierto valor determinado,
- Comportarse como conductor al alcanzar la tensión un valor determinado.
- Conducir a tierra la onda de sobrecorriente producida por la onda de sobretensión.

- Una vez desaparecida la sobretensión y restablecida la tensión normal, el dispositivo debe ser capaz de interrumpir la corriente.

CLASIFICACIÓN DE APARTARRAYOS

Las clasificaciones y características de los apartarrayos deben entenderse para proporcionar protección a transformadores y equipo de distribución.

AUTOVALVULARES

El apartarrayos tipo autovalvular consiste básicamente de entrehierros y una serie de resistencias no lineales de carburo de silicio. En la figura 2.8 se presenta una fotografía de este apartarrayos y en la figura 2.9 podemos apreciar la construcción interna de estos equipos.

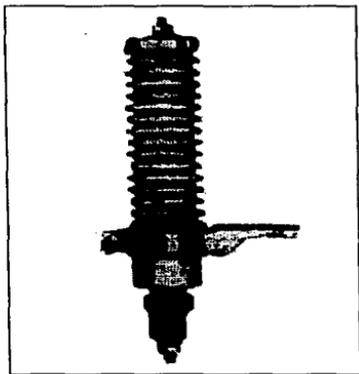


Figura 2.8.- Apartarrayos autovalvular

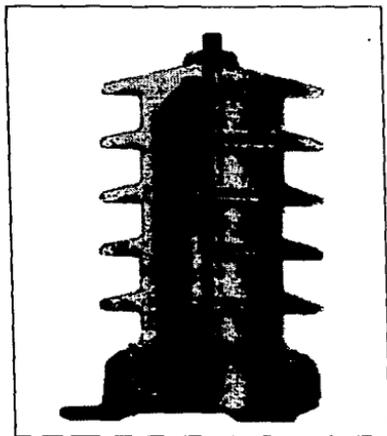


Figura 2.9.- Vista interna de un apartarrayos autovalvular

Cuando un impulso provocado por un rayo alcanza a un apartarrayos, genera un arco eléctrico en su explosor. El cual somete a los bloques de válvulas a un voltaje extremadamente elevado, y su resistencia se reduce instantáneamente a un valor muy bajo. El impulso instantáneo de corriente ocasionada por el rayo, que puede ser de miles de amperes, fluye hacia tierra a través de los bloques de válvulas. El voltaje que aparece entre las terminales del equipo protegido depende de modo del producto de la resistencia interna del apartarrayos y de la cantidad de corriente de impulso. Tanto mas bajo sea este voltaje, conocido como voltaje de descarga, menor será el daño para el aislamiento del equipo.

El arqueo en los elementos del explosor originados por una descarga ioniza la atmósfera en las cámaras de arqueo, y una corriente del sistema de 60 Hz continuará circulando a través del apartarrayos. Esta corriente se conoce como corriente de descarga a frecuencia del sistema. El voltaje del impulso de rayo se habrá disipado en este tiempo y ahora el voltaje entre los bloques de válvulas corresponde aproximadamente al voltaje instantáneo de línea a tierra del sistema. Bajo tales condiciones los bloques de válvulas vuelven a recuperar su elevada resistencia original, en forma tal que la corriente residual de 60 Hz, se reduce a un valor que los elementos del explosor en serie pueden interrumpir en el siguiente cruce por cero de la corriente del sistema.

La norma ANSI C62.1-1981 designa la clase de apartarrayos autovalvulares como, de distribución, intermedia y de estación. En cada clase hay muchas variaciones de importancia que se relacionan con los requerimientos de la aplicación.

Los apartarrayos de la clase distribución son diseñados para proteger el equipo del sistema de distribución contra los impulsos de sobretensiones causados por las descargas atmosféricas. Por lo común, se encuentran instalados en la parte superior de los postes adyacentes a las boquillas del transformador de distribución. Los apartarrayos de distribución, en número, superan en forma considerable al resto de las clases.

Los voltajes nominales comunes de estos apartarrayos, van desde 3 kV hasta 36 kV en incrementos de 3 kV. El nivel nominal del apartarrayos que se selecciona se establece con base en el máximo voltaje de fase a tierra, de las fases sin falla durante una falla monofásica a tierra.

Los apartarrayos clase intermedia proporcionan en forma sustancial mejor protección y característica de durabilidad que los de clase distribución, y cuentan con muchos de los rasgos de seguridad de los de clase estación, que son bastante mas costosos, y pueden emplearse en muchos casos en las mismas aplicaciones. El apartarrayos clase intermedia frecuentemente proporciona la respuesta a las necesidades crecientes de protección contra sobrevoltajes dentro limitaciones razonablemente económicas.

Los apartarrayos intermedios se emplean en una extensa gama de aplicaciones incluso en subestaciones industriales, centros de carga suburbanos, bahías de distribución y en instalaciones de transformadores comerciales. Este tipo de apartarrayos son especialmente populares para aplicaciones en donde el poste es de transición (con terminales de cables) y la inversión adicional relativa a la protección contra sobretensiones puede justificarse para instalaciones subterráneas, tales como las que alimentan a los centros comerciales y deportivos, conjuntos habitacionales y centros de negocios.

Clase estación. Los requerimientos para incrementar la durabilidad se han desarrollado rápidamente en proporción al crecimiento total de los sistemas de transmisión de alta tensión, de la tendencia universal hacia niveles de aislamiento reducido, y por las adiciones extensivas en bancos de capacitores de potencia y circuitos de cables subterráneos.

Las características de respuesta consistentes y predecibles de los apartarrayos clase estación se extienden por todo el espectro de sobretensiones resultando de una descarga atmosférica de frente escalonado hasta aquellas ocasionadas por maniobras de crecimiento lento, e incluye capacidades sobresalientes para el manejo de las sobretensiones del sistema. Los apartarrayos de clase estación se fabrican en todos los valores nominales de voltaje desde 3 kV, hasta los valores mas altos requeridos. Para valores nominales menores a 60 kV, la construcción es en una sola columna. A partir de dicho valor, la estructura interna de columnas múltiples mantiene la altura total del apartarrayos en línea con el resto del equipo de la estación.

APARTARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO (ZnO)

La alta no linealidad de sus pastillas de óxido metálico, principalmente óxido de zinc, permite que este dispositivo siempre este conduciendo ya que no tiene entrehierros y su corriente es muy pequeña, aproximadamente de 1 mA.

En la actualidad este tipo de apartarrayos es el último desarrollo en dispositivos de protección para sobretensiones.

El material con que se fabrican los bloques en este caso es de óxido de zinc (ZnO), el cual tiene mejores características de no linealidad que los de carburo de silicio (SiC).

Sus características tensión - corriente permiten a este apartarrayos descargar únicamente a un valor de corriente predeterminado, lo que hace posible mantener un nivel de protección adecuado al sistema.

En la tabla siguiente se resumen las características de los apartarrayos de óxido de zinc comparados con los de carburo de silicio (Tabla 2.1).

Carburo de Silicio	Óxido de Zinc
Requiere entrehierros	No requiere entrehierros
Debe llegar a una tensión de chispeo para descargar la energía debida a una sobretensión.	Al no tener entrehierros conduce la corriente de descarga inmediatamente después que se presenta una sobretensión.
Bajo condiciones normales de operación es insensible al medio ambiente.	Es relativamente insensible al medio ambiente, sin embargo, es muy sensible a la temperatura, siendo ésta una variable muy importante en su diseño.

Tabla 2.1.- Características de los apartarrayos de SiC y ZnO.

En forma general pueden resumirse a continuación las ventajas que estos dispositivos tienen con respecto a los de tipo autovalvular:

- Mejoran los márgenes de protección.
- Mayor capacidad térmica.
- Construcción más sencilla al no tener entrehierros.
- Tamaño y peso reducido.
- Mejor comportamiento, en zonas contaminadas.

En la figura 2.10 se muestra la respuesta normalizada de estos dos materiales.

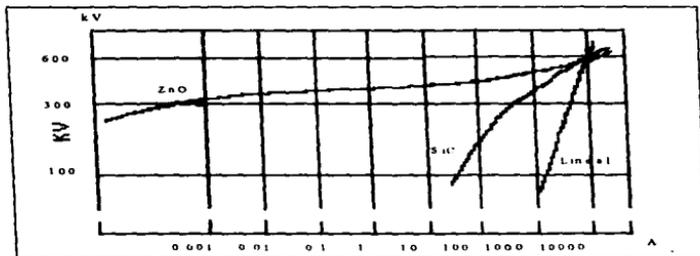


Figura 2.10.- Características de operación de válvulas de ZnO y SiC.

CAPITULO 3.- EQUIPO SENSIBLE A LAS SOBRETENSIONES

En los 60's la ingeniería electrónica modificó el ambiente industrial, con lo cual surgió el cuarto de computación. La tecnología de los sistemas de tierras tuvo momentos difíciles, pero raramente ésta resultó en discusiones de puesta a tierra entre los ingenieros eléctricos y electrónicos.

Sin embargo, en los 70's llegó una nueva tecnología de lógica a alta velocidad envuelta en microprocesadores y circuitos integrados de soporte. Esta tecnología, aplicando sensores y controladores a la industria química, incorporó nuevas manufacturas de producción, la cual se empezó a conocer como control distribuido, y se ponían computadoras " donde la acción está ". El resultado fue una telaraña de equipo sensible y un alto complejo industrial con un ambiente eléctrico hostil.

Hoy en día, la puesta a tierra de los sistemas de distribución, puede dificultarse, ya que éste varía de ocupación en ocupación, debido a la distribución física del equipo, la cual varía según se vayan presentando los requerimientos.

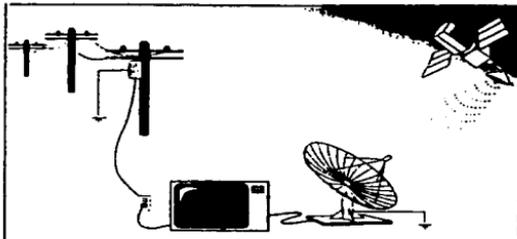


Figura 3.1.- Protección a equipo sensible contra sobretensiones mediante sistemas de tierra

CALIDAD DE LA ENERGÍA

En todo sistema eléctrico ocurren perturbaciones y problemas inesperados y en algunos casos inevitables por causa de fenómenos naturales como las descargas atmosféricas, el clima, el viento, factores humanos o por la operación misma de la red. Lo anterior provoca variaciones en el suministro de la energía eléctrica: interrupciones del servicio, depresiones o impulsos de voltaje, variaciones en la frecuencia y la generación de armónicas.

Esta situación afecta la continuidad de las actividades productivas, en particular de las industrias que emplean equipos electrónicos cada vez más avanzados pero a la vez más sensibles. Para contrarrestar este problema las empresas eléctricas están considerando no solo el mejoramiento de sus instalaciones y procesos, sino la participación del propio usuario, que debe diseñar sus instalaciones eléctricas de manera que sus procesos de producción

resulten lo menos afectados posibles por las alteraciones en la calidad de la energía eléctrica.

Desde que la electricidad se empezó a usar en forma masiva con fines domésticos e industriales, se han venido desarrollando equipos cada vez mas sofisticados. Debido a que los equipos electrónicos utilizados actualmente, tales como computadoras, conmutadores, robótica, etc., son muy sensibles a las variaciones de frecuencia, tensiones transitorias y otras variaciones de la onda senoidal, así como interrupciones momentáneas en el suministro de energía, la calidad del servicio debe ser cada vez más eficiente.

El suministro de energía eléctrica debe realizarse con una calidad adecuada de manera que los aparatos que la utilizan funcionen correctamente. La calidad del suministro queda definida por los siguientes factores: continuidad del servicio, regulación del voltaje y control de la frecuencia. Un alto nivel en la calidad de energía podemos entenderlo como un bajo nivel de disturbios.

Continuidad del servicio

La energía eléctrica ha adquirido tal importancia en la vida moderna, que una interrupción de su suministro causa trastornos y grandes pérdida económicas.

Regulación del Voltaje

Los aparatos que funcionan con energía eléctrica están diseñados para operar a un voltaje determinado y su funcionamiento será satisfactorio siempre que el voltaje aplicado no varíe mas allá de ciertos límites.

El equipo electrónico está diseñado generalmente para operar con una tolerancia de $\pm 5\%$ del voltaje. La vida del equipo electrónico se reduce notablemente al funcionar con voltajes superiores a los de su diseño.

Lo anterior hace ver la importancia de la regulación del voltaje en un sistema eléctrico. Un aumento del 5% del voltaje en los puntos de utilización con respecto al voltaje nominal se considera satisfactoria y una disminución del 10% se considera tolerable.

Control de la Frecuencia

Los sistemas de energía eléctrica funcionan a una frecuencia determinada, dentro de cierta tolerancia.

El rango de las variaciones de frecuencia que pueden tolerarse dentro de un sistema dependen tanto de las características de los aparatos de utilización, como del funcionamiento del sistema mismo.

PERTURBACIONES EN LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Hasta hace algunos años el único problema que se presentaba a los usuarios en el suministro de energía se debía a la interrupción del servicio, las fallas instantáneas o momentáneas a la gran mayoría poco les afectaba, solo en aquellos servicios, donde los procesos requerían continuidad.

Actualmente la mayoría de los procesos industrializados cuentan con equipo computarizado, los cuales requieren de un alto grado de continuidad, por

otro lado se presentan deformaciones en la onda de voltaje, por el uso de cargas electrónicas, entre otros por armónicas, ruido electromagnético, abatimiento en la onda de voltaje, sobretensiones, etc.

El concepto de compatibilidad de fuente y carga no es nuevo, la necesidad de proveer potencia con un voltaje y frecuencia estables ha sido reconocida desde los inicios del uso de la electricidad en forma industrial.

La definición de "estable" ha ido cambiando con los años conforme han ido en aumento el uso de cargas electrónicas.

CLASIFICACIÓN DE DISTURBIOS

Existen cuatro parámetros en un sistema eléctrico que nos sirven como marco de referencia para clasificar los disturbios de acuerdo a su impacto en la calidad de energía:

1) Variaciones de Frecuencia:

En general se tiene una frecuencia de 60 ciclos por segundo (60 Hz), estas variaciones son muy raras y pueden deberse a variaciones de carga y mal funcionamiento del equipo.

2) Variación de Amplitud:

Ocurren de diferentes formas, la variación puede ser hacia arriba o hacia abajo y están muy asociadas con su duración.

Sobretensiones.- Son aumentos en el voltaje nominal con duración de 0.01 s a 2.5 s (0.6 a 150 ciclos). Estas son generalmente ocasionadas por descargas atmosféricas, por operación de interruptores, ferresonancia, fallas a tierra (en las fases no falladas), desplazamiento del neutro, operación de fusibles, etc.

Alto voltaje.- Un incremento en el voltaje nominal por mas de 2.5 s.

Impulso.- Pulso unidireccional con duración menor a 2 ms. La magnitud es el valor absoluto del pulso después de filtrar la componente fundamental.

Depresiones de Voltaje (voltage sags).- Significa una reducción breve en el voltaje nominal, con una duración que va desde 10 ms hasta 2.5 s (0.6 a 150 ciclos).

Bajo voltaje.- Es una reducción del voltaje nominal por más de 2.5 s.

3) Asimetría:

También conocida como desbalanceo, ocurre cuando cargas desiguales son conectadas en las fases de un sistema trifásico (desbalanceo de las fases).

4) Variaciones en la Forma de Onda:

Se da con cargas no lineales, modificándose la forma de onda senoidal. Este tipo de disturbio se puede decir que es una distorsión de la onda por armónicas.

Por muchos años, las corrientes armónicas, originadas principalmente por grandes fuentes, tales como: hornos de arco, y terminales de transmisión de alto voltaje de D.C; fueron anuladas con relativa facilidad colocando grandes y costosos filtros entre la fuente y la línea principal de energía.

Hoy en día, un considerable número de armónicas están siendo causadas por pequeñas cargas de los usuarios; entre las que podemos mencionar los controles de estado sólido para ajustar la velocidad de los motores. Al mismo tiempo, también existe un gran incremento en el número de clientes que están utilizando equipo sensible, como las computadoras, las cuales pueden ser seriamente afectadas por las armónicas. No sería económicamente factible detectar y colocar un filtro en cada pequeña fuente de armónicas o aislar cada carga sensible de todos los disturbios de la línea.

ORIGEN DE LOS DISTURBIOS:

La tendencia general de los usuarios es atribuir la mayoría de sus problemas por disturbios a la fuente utilizada. Muchas otras fuentes de disturbios, sin embargo, son localizadas dentro del edificio, tales como: descargas electrostáticas, interferencia de radiación electromagnética, diferencias en el potencial de tierra, y errores de operación.

SOBRETENSIONES POR RAYOS

Son el resultado de descargas directas o indirectas de rayos al sistema de potencia. Un golpe directo inyecta toda la corriente del rayo en el sistema. El rango de la amplitud de corriente va desde cientos hasta unos cientos de miles de amperes.

Cuando algún rayo alcanza el circuito primario de un transformador de distribución, la corriente es descargada a través del apartarrayos colocado en el primario del transformador. La corriente que descarga se divide entre la tierra del transformador y la tierra de la entrada del suministro, de acuerdo a sus

impedancias. El voltaje de circuito abierto, en la entrada del suministro, causado por la corriente que fluye a través del cable de bajada, puede fácilmente alcanzar de 7 a 10 kV, para corrientes de rayo y longitudes de cable típicas. Este voltaje puede causar daños significantes al equipo que se le está suministrando la energía. El problema es peor cuando la tierra en la entrada del suministro tiene una resistencia significativamente menor que la tierra del transformador; ya que esto causa que un gran porcentaje de la corriente, por sobretensión, fluya hacia el servicio. El primer problema ocurre debido a que, como la corriente fluye dentro de la tierra del servicio, el potencial de tierra es elevado. El potencial de la carga podría elevarse con el potencial a la entrada del suministro; por esto es que algunas veces la carga tiene otra tierra. Si este es el caso, la falla se puede presentar debido a la diferencia de potencial entre las dos tierras.

SOBRETENSIONES INDUCIDAS POR RAYOS:

Hemos hablado abundantemente sobre la mecánica de corriente de rayo y su formación. Aquí es suficiente mencionar que el desarrollo de una gran carga negativa en la región mas baja de las nubes; causa una correspondiente carga positiva inducida sobre la superficie de la tierra. Esto da como resultado una diferencia de potencial entre la nube y la tierra. Conforme la carga continua desarrollándose llega un momento en el cual el gradiente de potencial, dentro de la base de nube, excede la rigidez dieléctrica del aire. El resultado es una baja corriente de descarga (flujo piloto). El flujo piloto es inmediatamente seguido por una altísima corriente de descarga, (corriente de paso), la cual es seguida por una o más corrientes de retorno (tierra-nube).

Tantas como cuarenta descargas de retorno han sido observadas. Su rango de magnitud va desde unos cientos hasta mas de 500 kiloamperes, como se muestra en la siguiente figura:

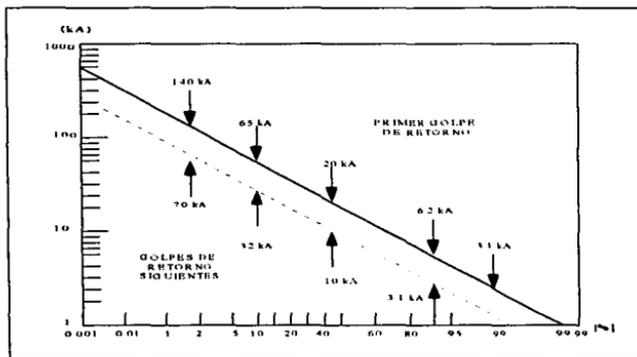


Figura 3.2.- Magnitud de las corrientes de retorno

Estos niveles de corriente crean una región ionizada; dentro de esta región la energía de rayo brinca directamente a algún elemento altamente conductor (cables). Esto causa aumento en el voltaje; en áreas que están fuera de la región ionizada. La forma y tamaño de la región están en función de la resistividad del suelo, y la corriente del rayo. Esta región es de particular importancia en la supresión del impacto causado por el rayo hacia el equipo electrónico y/o cables conductores.

CAMBIOS FUNDAMENTALES EN EL TIPO DE CARGA

Existen varios cambios fundamentales en la naturaleza de la carga del usuario y del sistema de potencia que conciernen a la calidad de la energía:

- Cargas Sensibles
- Cargas No Lineales

Cargas Sensibles

- La microelectrónica ha producido una creciente categoría de cargas residenciales, comerciales e industriales que son muy sensibles a las variaciones del suministro de energía. Los esquemas de diseño de integración a gran escala (LSI) y a muy gran escala (VLSI) de los circuitos integrados modernos (chips) han dado por resultado dispositivos más rápidos, más complejos y con mayor capacidad de memoria para una misma superficie. La lógica para estos circuitos requiere de niveles de tensión y energía menores, reduciendo el consumo de potencia y por lo tanto los requerimientos de ventilación. Desafortunadamente estos niveles de tensión son más fáciles de perturbar.

El uso de la electrónica de potencia y microprocesadores para controlar y mejorar diferentes trabajos, es lo que nos conduce a tener una alta calidad en la energía.

Computadoras, controladores de velocidad ajustable (ASD), y controladores lógicos programables (PLC) están siendo muy utilizados en el proceso de producción industrial. Al mismo tiempo, estos elementos presentan gran sensibilidad a cortas variaciones de voltaje, las cuales anteriormente no habían sido detectadas.

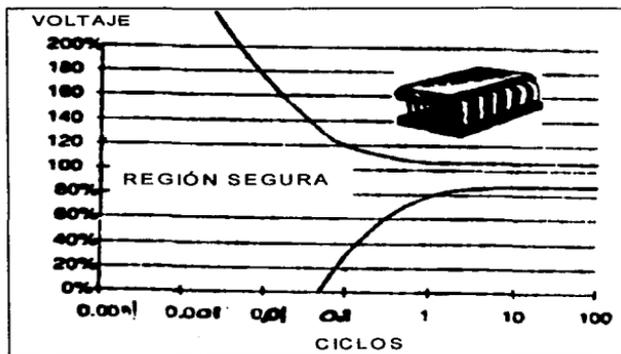


Figura 3.3.- Curva de susceptibilidad de circuitos electrónicos

La figura 3.3 muestra las características de funcionamiento, para un elemento de computación, cuando está sujeto a cortas variaciones de voltaje. Por ejemplo, un abatimiento del 80% del voltaje nominal con una duración de diez ciclos puede dar como resultado un mal funcionamiento del equipo. Esta gráfica se define como curva CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association), y es una pauta sugerida, ya que en la actualidad no existen normas para el funcionamiento de este equipo relativas a cortas variaciones de voltaje.

Para cargas sensibles, los requerimientos aceptables de la calidad de energía a la entrada, varían con el tipo de equipo y su manufactura. Algunos límites típicos para equipo de computación, por lo general, deben incluir lo siguiente:

- Frecuencia dentro del ± 0.5 Hz.
- Voltaje con una regulación del ± 8 %.
- Condiciones transitorias de voltaje que no exedan más del 15 %, o menos del 18% nominal. y regresen al voltaje normal de operación dentro de 0.5 segundos.
- Desbalanceo en el voltaje de línea a línea, para un sistema trifásico, que no difiera por más del 2.5% del promedio de los tres voltajes (en cada fase).
- Contenido de armónicas abajo del 5%.

Impulsos transitorios, de uno a cien veces el voltaje nominal, con una duración de 0.01 milisegundo, pueden destruir datos, y componentes de estado sólido. Estos impulsos son el resultado de rayos, trabajos por conmutación, o liberación de energía por los capacitores.

CARGAS NO LINEALES

Cuando la corriente de carga instantánea es discontinua, o no es proporcional al voltaje instantáneo de c. a., la carga se considera como no lineal. El efecto es equivalente a la presencia de componentes de corrientes armónicas que se suman a la corriente sinusoidal nominal, todas las componentes agregadas distorsionan la forma de onda. Estas componentes de corriente no están en fase con la forma de onda del voltaje de distribución e interactúan con la impedancia de la línea, creando voltajes de distorsión.

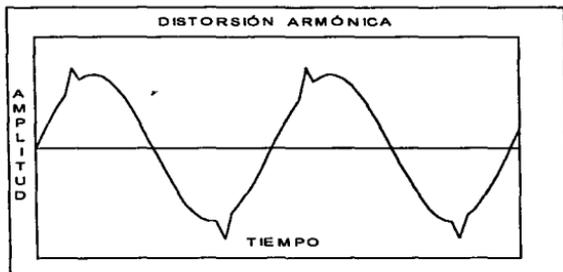


FIGURA 3.4. Distorsión Armónica.

Muchas cargas sensibles exhiben características no lineales. Fuentes de c.a./ c.d. que utilizan diodos rectificadores y capacitores, son ejemplos comunes de cargas no lineales. éstas son a menudo usadas por los fabricantes de equipo electrónico sensible.

Todas las cargas electrónicas tienen en común la generación de corrientes armónicas. Estas corrientes circulan dentro del sistema de distribución, el cual provee la energía necesaria. Las corrientes armónicas contribuyen al calentamiento i^2R dentro del sistema; y pueden causar considerables distorsiones en la forma de onda del voltaje de c.a.

Las cargas lineales, son caracterizadas por presentar una impedancia constante para todos los valores de voltaje posible, a una frecuencia específica constante, de tal manera que al graficar el voltaje aplicado a la carga contra la

corriente que por ella circula, se obtiene una línea recta. A este grupo de cargas pertenecen los inductores, capacitores y resistores.

En la práctica, existen diferentes tipos de carga, que presentan una impedancia que varía con diferentes valores de voltaje a una frecuencia dada y constante, de tal manera que al graficar la tensión aplicada a una carga de éstas, contra la corriente, se obtiene una línea que dista mucho de ser recta, por lo cual se les nombra cargas no lineales. A este grupo pertenecen los siguientes tipos de carga.

a) Ferromagnéticos:

- Rotatorios (motores y generadores).
- Estáticos (transformadores).

b) Arqueo

- Lámparas de descarga.
- Hornos de arqueo.
- Plantas de soldar.

c) Electrónico

- Rectificadores.
- Inversores.
- Controladores.

Las cargas no lineales de tipo ferromagnético en condiciones normales de operación, no presentan una variación significativa de su impedancia en función de la variación del voltaje, sin embargo, cuando suceden fenómenos transitorios y/o cuando operan fuera de los rangos de su diseño como en el caso de sobrecarga, pueden presentarse variaciones considerables de su impedancia.

Electrónica de Potencia

- La electrónica de potencia ha producido una nueva generación de dispositivos de alta capacidad y bajo costo, lo que ha extendido su utilización. Sin embargo, estos mismos dispositivos producen perturbaciones en la calidad de la energía, a lo que la microelectrónica es muy sensible. Se estima que la porción de la energía eléctrica total generada para aquellas cargas procesadas por electrónica de potencia se incrementará de un nivel actual de 10-20% al 50-60% en el año 2010.

La proliferación de las cargas y fuentes no lineales (electrónica de potencia) se ha dado en ausencia de normas completas que limiten las señales armónicas que el sistema de potencia debe ser capaz de soportar y que las empresas eléctricas puedan absorber. Esta situación conduce a problemas de calidad de energía tanto para las empresas eléctricas como para sus clientes.

DAÑO A MICROPROCESADORES

La mayor causa de falla de equipo electrónico es generalmente causada por descargas atmosféricas, switcheo de cargas o descargas electrostáticas. Este peligro se manifiesta con picos de voltaje con un rango de amplitudes de decenas de volts a algunos miles de volts con duración de decenas de nanosegundos a cientos de microsegundos. Estos voltajes transitorios son letales para la microgeometría de los circuitos.

En la actualidad la instrumentación de los sistemas industriales tales como los controladores lógicos programables (PLC) tienen algunos niveles de protección interna, pero la protección adicional es usualmente especificada para ambientes con mayor susceptibilidad a descargas severas. La integración de

sistemas usando computadoras personales (PC) con interfases de telecomunicación incrementa el riesgo, debido a que los puertos de entrada/salida (I/O) de la PC no son usualmente protegidos y puede fácilmente ser dañada por picos de voltaje causados por descargas atmosféricas en un rango de 40 a 90 V.

Los protectores de las estaciones de telecomunicación generalmente dejan pasar picos de 500 volts o más. Los módem's y otros equipos de interfase puede que no tengan una protección interna capaz de resistir picos de 500 V, lo que los hace susceptibles a daños.

Las descargas atmosféricas son una de las mas formidables predecibles e impredecibles fuerzas de la naturaleza. El promedio de descargas tiene un pulso electromagnético de 20 billones de watts.

La energía de un rayo puede entrar en un sistema por inyección directa, la cual es la más severa, o por acoplamiento electromagnético, siendo este el más frecuente. El acoplamiento se disminuye cuando las líneas son subterráneas, debido a la atenuación de la tierra cuando está a una profundidad mínima. El acoplamiento electromagnético puede ser bastante intenso para altos niveles de energía de las descargas, se han reportado voltajes 150 kV inducidos en cables de 460 m de longitud, a 10 m de altura sobre la superficie terrestre, causados por rayos a 2.5 km de distancia. Si trasladamos esto a distancias de 10 km, 1 km y 0.1 km en un cable de 1m de longitud, el voltaje inducido puede ser bastante alto y peligroso para el equipo. Esto es mostrado en la tabla 3.1.

Distancia km	Campo Eléctrico (V/m)	Voltaje inducido en un cable (V)
10	110	20
1	1100	200
0.1	11000	2000

Tabla 3.1.- Valores de voltaje inducido

Hoy en día los microcircuitos están constituidos de miles de componentes en un solo circuito integrado (chip) los cuales son bastante vulnerables a una descarga electrostática. Los niveles típicos de falla a causa de las descargas electrostáticas (ESD) se muestran en la tabla 3.2.

Tipo de Dispositivo	Rango de vulnerabilidad a ESD (volts)
VMOS	30-1800
MOSFET	100-200
GaAsFET	100-300
EPROM	100
JFET	140-7000
OP-AMP	190-2500
CMOS	250-3000
Diodos Schottky	300-2500
Film Resistors	300-3000
Transist. Bipolares	380-7000
ECL	500-1500
SCR	680-1000
Schottky TTL	1000-2500

Tabla 3.2

Las descargas eléctricas no tienen que caer directamente para causar daños, los sistemas pueden ser dañados por la actividad de las descargas a 3 ó 5 km de distancia.

La mayoría de las fallas de componentes o sistemas de estado sólido se encuentran en una de las siguientes categorías:

- Físicos
- Perturbaciones
- Latentes.

Las fallas físicas son daños permanentes en alguna parte del circuito . Hay que reemplazar la pieza dañada para lograr que el sistema regrese a la normalidad . Su apariencia puede ser engañosa, el área dañada del microcircuito puede ser más pequeña que una décima parte de la sección transversal de un cabello humano.

Las perturbaciones son un mal funcionamiento temporal, con un potencial capaz de causar serios daños . Los transitorios han sido causantes de la interrupción de rutinas de trabajo y la degradación del rendimiento de los subsistemas, sin inducir daños en los componentes de tales subsistemas.

Las fallas latentes son cuando el dispositivo sigue trabajando aun dañado. Esos dispositivos han sido ligeramente dañados, pero continúan funcionando. En alguna fecha posterior estos circuitos pueden llegar a convertirse en fallas físicas permanentes, tal vez meses o años después, es decir que los equipos se degradan y envejecen rápidamente a causa de estas perturbaciones.

CAPITULO 4.- NORMAS

El NEC, que es patrocinado por la National Fire Protection Association (NFPA), es el código más adoptado en el mundo. El código NEC es utilizado por autoridades federales, estatales, locales y por la industria privada. Para la NFPA el NEC es solo una recomendación. Sin embargo se vuelve obligatorio como ley cuando lo adopta una autoridad oficial competente.

En la República Mexicana la norma relativa a las instalaciones destinadas al suministro y uso de la energía eléctrica es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMP-1994 que entró en vigor a partir de 15 de octubre de 1994.

El principal objetivo de la norma NOM-001-SEMP-1994 es:

- Establecer las especificaciones de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas al suministro y uso de energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de servicio y seguridad para las personas y su patrimonio.

Estructura de la Norma

La norma consta de una introducción y 14 capítulos subdivididos en dos partes; en la primera, se establecen disposiciones técnicas que deben observarse en las instalaciones eléctricas de aplicación general, para locales, equipos y condiciones especiales, en sistemas de comunicación y en alambrado público.

En la segunda parte se incluyen las disposiciones técnicas que se deben aplicar a la instalación de subestaciones de líneas eléctricas de suministro público, transportes eléctricos y otras líneas eléctricas y de comunicación ubicadas en la vía pública, así como a instalaciones similares propiedad de los usuarios.

Es esencial para el entendimiento de la norma el conocimiento del orden y el sistema usado en su numeración. El sistema usado en la norma consiste de una introducción, artículo 90 y capítulos numerados del 1 al 10 formando una primera parte (donde el capítulo 10 es de tablas), y la segunda parte del capítulo 21 al 24. Los capítulos están divididos en varios artículos identificados por centenas. Todos los artículos del capítulo 1 empiezan por 100, los del capítulo 2 con 200, etc.

Algunos artículos tienen diferentes partes que están en secuencia alfabética, tal como A, B, C, etc. Los requerimientos comunes son agrupados en incisos. Por ejemplo: A Disposiciones Generales, usualmente contiene previsiones que aplican a todos los incisos del artículo. Otros incisos contienen previsiones que son independientes de todos los demás incisos, excepto del inciso A.

Artículos de Interés Referentes a Sistemas de Tierra

La puesta a tierra en las instalaciones eléctricas es desarrollada en el artículo 250 y 2103 de la **NOM-001-SEMP-1994**. El artículo 250 se divide en varios incisos, a continuación se mencionan los incisos más importantes relacionados con este trabajo.

- A.- Disposiciones generales.
- B.- Puesta a tierra de circuitos y sistemas eléctricos.
- C.- Ubicación de las conexiones de puesta a tierra de los sistemas.
- D.- Puesta a tierra de gabinetes.
- E.- Puesta a tierra de los equipos.
- F.- Métodos de puesta a tierra.
- H.- Sistemas de electrodos de puesta a tierra.
- J.- Conductores de puesta a tierra
- K.- Conexión del conductor de puesta a tierra.

Sin embargo, en el artículo 250 se maneja la puesta a tierra para equipo en general. En caso de requerirse información más precisa para determinado equipo o instalación tal como equipo de cómputo, equipo médico, de comunicaciones, etc. se debe consultar el índice de la norma, enseguida se presentan los números de los principales artículos que refieren a tal equipo:

517.- Instalaciones en lugares de cuidados de salud.

- 517-13.- Conexión a tierra de contactos y equipos eléctricos fijos.
- 517-62.- Puesta a tierra.

E.- Instalaciones de Rayos X

- 517-78.- Protección y puesta a tierra.

645.- Equipos de procesamiento de datos y cómputo electrónico.

- 645-15.- Puesta a Tierra

800.- Circuitos de comunicación

- 800-33.- Puesta a tierra del cables.
- D.- Métodos de puesta a tierra.
- 800-40.- Puesta a tierra del cable y del protector primario.

A continuación presentamos los principales artículos de interés de la NOM-001-SEMP-1994 referentes a la puesta a tierra de equipo sensible a sobretensiones:

ARTICULO 250: " PUESTA A TIERRA "

250-1.- ALCANCE. Este artículo abarca los requisitos generales para la puesta a tierra y el puentado de las instalaciones eléctricas y, además, las disposiciones específicas que se dan en (a) a (f) a continuación:

- a) Sistemas, circuitos y equipo requeridos, cuya puesta a tierra sea permitida o no.
- b) Conductor del circuito que debe ponerse a tierra en los sistemas puestos a tierra.
- c) Ubicación de las conexiones de los sistemas de puesta a tierra.
- d) Tipos y calibres de los conductores, electrodos de puesta a tierra de los puentes de unión.
- e) Métodos para la puesta a tierra y ejecución de los puntos de unión (puentado).
- f) Condiciones en las cuales los resguardos, la separación, y el aislamiento pueden sustituirse por la puesta a tierra.

Los sistemas y circuitos conductores son puestos a tierra para limitar las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas a fenómenos transitorios en el propio circuito o a contactos accidentales con líneas de mayor tensión, así como para estabilizar la tensión a tierra en condiciones normales de operación. Los sistemas y circuitos conductores se ponen a tierra de manera sólida para facilitar la acción de los dispositivos de sobrecorriente en caso de fallas a tierra.

La puesta a tierra de los materiales conductores que encierran a los conductores y equipos o que forman parte de estos se hace para limitar la tensión a tierra de tales partes conductoras, y para facilitar la acción de los dispositivos de protección contra sobrecorriente, en caso de falla a tierra.

250-2. OTROS ARTÍCULOS APLICABLES. En otros artículos que se aplican a casos particulares de instalación de conductores y equipos, existen requisitos que son adicionales a los de este artículo o que los modifican:

	ARTICULO	SECCIÓN
Circuitos o equipo que operan con 50 V o menos	720	
Circuitos de comunicación	800	
Sistemas de distribución en radio y antenas comunes de TV		820-33 820-40 820-41
Computadoras electrónicas / Equipo procesador de datos		645-15
Facilidades para la salud	517	
Equipo de radio y TV	810	
Equipo de rayos X	660	517-77

250-25 Conductor que debe ser puesto a tierra en sistemas de corriente alterna. Para sistemas con circuitos principales en corriente alterna se pondrá a tierra el conductor que se especifica a continuación:

- 1) Sistemas monofásicos de dos hilos: un conductor.
- 2) Sistemas monofásicos de tres hilos: el conductor neutro.

- 3) Sistemas polifásicos que tienen un conductor común a todas las fases: el conductor común.
- 4) Sistemas polifásicos que requieran tener una fase puesta a tierra: el conductor de una fase.
- 5) Sistemas polifásicos en el cual una fase es empleada como se especifica en (2) : el conductor neutro.

MÉTODOS DE PUESTA A TIERRA

250-50 Conexiones del conductor de puesta a tierra de equipos.

a) Para sistemas puestos a tierra. La conexión se hará puentando la conexión de puesta a tierra del equipo al conductor puesto a tierra de la acometida y al conductor del electrodo de puesta a tierra.

b) Para sistemas no puestos a tierra la conexión se hará puentando el conductor de puesta a tierra del equipo al conductor del electrodo de puesta a tierra.

Excepción para (a) y (b) arriba indicadas: para reemplazo de contactos de tipo sin conexión a tierra por contactos del tipo con conexión a tierra (polarizados) y para extensiones del circuito derivado solo en instalaciones existentes que no tengan un conductor de equipo con conexión a tierra en el circuito derivado, el conductor con conexión a tierra de un contacto del tipo polarizado a tierra se podrá conectar a la tierra del sistema de acuerdo con la sección 250-81.

250-51 Trayectoria efectiva de puesta a tierra. La trayectoria a tierra desde circuitos, equipos y cubiertas debe (1) ser permanente y continua; (2) tener suficiente capacidad de conducción de corriente para transportar con toda seguridad cualquier corriente de falla que pueda circular por él y (3) tener una

impedancia suficientemente baja para limitar el potencial respecto a tierra y asegurar el funcionamiento de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes del circuito.

La tierra no deberá ser usada como un único conductor del equipo como conexión a tierra.

SISTEMAS DE ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.

250-81 Sistemas de electrodos de puesta a tierra. En cada inmueble o estructura a servirse, el sistema de electrodos de puesta a tierra se formará interconectando cada una de las partes que se indican en este artículo de la sección de (a) a (e) . Los puentes de unión se dimensionarán según la sección 250-94, se instalarán de acuerdo con la sección 250-92 (a) y (b) y se conectarán como se especifica en la sección 250-115. El conductor del electrodo de puesta a tierra sin ningún empalme podrá llevarse a cualquiera de los electrodos disponibles del sistema de electrodos de puesta a tierra y será dimensionado tomando el mayor calibre requerido para todos los electrodos disponibles.

Se recomienda el uso de electrodos fabricados especialmente para la puesta a tierra, como se menciona en el inciso (a) siguiente, sin embargo si no se dispone de alguno de ellos se puede recurrir a otros medios de puesta a tierra, como se menciona en los incisos (b) a (e) siguientes; dependiendo de la importancia del servicio.

Excepción: Se permitirá la unión del conductor del electrodo de puesta a tierra si se hace por procesos irreversibles como lo es con conectores de tipo compresión o procesos de soldadura exotérmica.

a) Electrodo de acero con cubierta de cobre. Consiste en una varilla redonda con una longitud de 3 m o más, con diámetro de 13 mm, 16 mm, 19 mm, el acero le da dureza y el cobre resistencia a la corrosión y mejor conductividad, el espesor de cobre debe tener 0.25 mm como mínimo.

b) Tubería metálica de agua enterrada. Una tubería metálica de agua enterrada, con 3m o más en contacto directo con la tierra (incluyendo cualquier cubierta metálica de pozos efectivamente conectada al tubo) y que sea eléctricamente continua hasta los puntos de conexión del electrodo de puesta a tierra, (o que se haga eléctricamente continua puentear las uniones y tramos de tubería aislantes).

La continuidad eléctrica de la trayectoria de puesta a tierra o la conexión a la tubería interior no podrá basarse en la conexión a través de medidores de agua. La tubería subterránea para agua se complementará con un electrodo adicional de uno de los tipos especificados en las secciones 250-81 (a) ó 250-83.

El electrodo complementario se podrá puentear en un punto conveniente al conductor de puesta a tierra de la acometida, la canalización y la cubierta de acometida de puesta a tierra, o de la tubería metálica de agua enterrada.

Cuando el electrodo complementario esté construido de acuerdo con la sección 250-83 (c) y (d), esa porción del puente de unión, la cual es la única conexión al electrodo complementario de puesta a tierra, no se requerirá que sea mayor que la sección transversal del conductor de cobre de sección transversal de 13.30 mm^2 (6 AWG) o el conductor de aluminio de sección transversal de 21.15 mm^2 (4 AWG).

c) Estructura metálica del inmueble. La estructura metálica del inmueble, cuando está puesta a tierra.

Nota: Efectivamente puesta a tierra significa una conexión, o conexiones a tierra, de una impedancia lo suficientemente baja y una capacidad de conducción de corriente suficiente para prevenir la elevación de tensión que resulta en condiciones de falla y que puede poner en peligro a los equipos o a las personas.

d) **Electrodo empotrado en concreto.** Un electrodo es aceptable si está formado por lo menos de 6m de una o mas barras o varillas de acero reforzado de no menos de 1.25 cm de diámetro; o consistente en una barra desnuda de cobre de al menos 6m de longitud y de sección transversal de 21.15 m^{m2} (4 AWG), embutido al menos 5 cm dentro de una plancha o base de concreto directo con la tierra.

e) **Anillo de tierra.** Un anillo de tierra que consiste en un conductor de cobre desnudo, de sección transversal no menor de 33.6 mm² (2 AWG) de longitud no menor de 6m, enterrado en contacto directo con la tierra a una profundidad de 80 cm del nivel del terreno y que rodee al inmueble o estructura.

250-83 **Electrodos artificiales (electrodos construidos especialmente).** Donde no se disponga de alguno de los electrodos indicados en los artículos precedentes o que no cumplan con los requisitos especificados en la sección 250-84, sobre todo en lugares donde el terreno es muy seco, arenoso, rocoso, se puede recurrir a los siguientes métodos de electrodos especiales.

a) **Electrodos profundos.** Este tipo de electrodos consiste de un conductor de baja impedancia instalado en perforaciones profundas, hasta encontrar terrenos de baja resistividad o niveles de mayor humedad.

b) **Electrodos horizontales.** Consiste en instalar un conductor de cobre desnudo enterrado en forma horizontal a una profundidad que va de 50 cm a 100

cm de diferentes configuraciones, los más usuales son: ángulo recto, estrella, en cruz, en cuadro, etc.

c) Electrodo químicos. En este método se modifica el medio que rodea el electrodo, bajando la resistividad del suelo, los más recomendables son:

1) Bentonita. Es una arcilla cuya virtud principal radica en absorber agua y retenerla, se coloca alrededor del electrodo y forma un buen camino para las corrientes eléctricas que se drenan a tierra, no es corrosiva.

2) Carbón mineral (coke). Se extrae de minas y se usa también en hornos de fundición.

3) Otros. Existen otros electrodos químicos que dan resultados satisfactorios, pero que por tener patente se consiguen en ciertas casas comerciales.

Nota: no se recomienda el uso de sal ya que se disuelve con la lluvia, a menos que el espacio que ocupa el electrodo esté controlado o se le dé el mantenimiento constante, tampoco el uso de sulfatos ya que corroen el electrodo con mucha facilidad.

d) Electrodo múltiples. Consiste en colocar electrodos en diferentes cantidades y configuraciones, espaciados una distancia determinada uno de otro, generalmente 3m, las configuraciones más usadas son: dos electrodos en línea, tres en línea, tres en delta, etc.

Nota: Se permite el uso de una combinación de electrodos múltiples con químicos por ejemplo una delta con bentonita. Siempre que las condiciones del caso lo permitan, los electrodos deben enterrarse hasta sobrepasar el nivel de humedad permanente, cuando se encuentre un lecho de roca, puede enterrarse horizontalmente a la mayor profundidad que permite el terreno. Cuando se usan sistemas de electrodos para distintos fines, como los circuitos de comunicación, pararrayos de edificios, etc., cada electrodo de un sistema debe estar, por lo menos 1.80 m de los otros sistemas.

Si el terreno está compuesto por tepetate, terreno duro, se recomienda excavar y luego introducir el electrodo.

e) Sistema de tubería metálica enterrada para gas no debe usarse como electrodo de puesta a tierra.

f) Electrodo de placa. Cada electrodo de placa no deberá tener menos de 0.186 m^2 de superficie en contacto con el suelo. Las placas de hierro o acero deberán tener por lo menos 6.35 mm de espesor. Las placas de metal no ferrosos deben tener por lo menos 1.52 mm de espesor.

h) Electrodo de aluminio. No se permite el uso de electrodos de aluminio ya que se corroe fácilmente.

250-84 Resistencia de electrodos artificiales. El valor de la resistencia a tierra de los electrodos no debe ser mayor de 25 ohms para casas habitación, comercio, oficinas o locales considerados como de concentración pública con acometidas en baja tensión. En las condiciones mas desfavorables (época de estiaje). Cuando no se puede lograr este valor de resistencia con un electrodo se debe acudir a los métodos descritos anteriormente, los sistemas de tubería metálica continua y subterránea para conducir agua fría, tienen, en general, una resistencia a tierra menor de 3 ohms.

Las armazones metálicas de edificios, la tubería metálica de edificios, la tubería metálica de revestimiento de pozos y otros sistemas locales de tubería metálica subterránea, tienen en general, una resistencia a tierra considerablemente menor a 25 ohm. Se deben efectuar mediciones periódicas para verificar el estado del electrodo. En sitios especiales donde se requiera una resistencia a tierra menor, como pueden ser edificios que contengan equipos de cómputo, de comunicaciones o equipo electrónico en general se debe recurrir a los electrodos artificiales indicados en el artículo 250-83 de (a) a (d).

Para subestaciones de distribución de edificios de uso industrial o comercial véase la sección 2403-2 (c). Para las bajadas de tierra de los pararrayos un valor recomendable es de 10 ohms.

Excepción: Para terrenos con resistividad mayor a 3000 ohms-metro se permite que los valores anteriores sean el doble para cada caso.

250-86 Uso de los electrodos de pararrayos. Los electrodos de puesta a tierra de los pararrayos no se deben de usar como puesta a tierra de equipos y sistemas. Esta prohibición no está en contra de la unión de los diferentes sistemas de puesta a tierra.

Nota: La unión de los diferentes sistemas de tierra limita las diferencias de potencial entre ellos y los sistemas involucrados.

ARTÍCULOS REFERENTES A APARTARRAYOS

Este tema se desarrolla en la **NOM-001-SEMP-1994** en el artículo 280, que se compone de los siguientes incisos:

- A) Disposiciones generales**
- B) Instalaciones**
- C) Conexión de apartarrayos**

A) Este inciso se refiere los requisitos de instalaciones y conexiones de apartarrayos, así como su selección.

B) Se refiere a los lugares donde es permitido la instalación de apartarrayos.

C) Características de los conductores de conexión, lugares permitidos y puesta a tierra de apartarrayos.

CAPITULO 5.- SISTEMAS DE TIERRA

En este capítulo nos referimos a los componentes que forman un sistema de tierra, su finalidad, los principales parámetros que influyen en su diseño, así como su aplicación sujeta a normas existentes en los diferentes equipos sensibles susceptibles a sobretensiones y descargas atmosféricas, como puede ser equipo de cómputo, conmutadores, equipo médico, etc.

El conocimiento de valores tales como la resistividad del terreno es un dato fundamental por lo que se presentan varios métodos para su medición, los factores físicos que la afectan, se incluye también el comportamiento de la tierra como conductor de las corrientes y los peligros que pueden presentarse para el ser humano al caminar sobre el terreno o tocar una estructura energizada.

OBJETIVOS DEL SISTEMA DE TIERRA

- Protección al personal de los peligros de descarga eléctrica, producida durante la falla del equipo eléctrico.
- Proporcionar un medio para disipar las corrientes eléctricas de falla a tierra.
- Proporcionar un punto de conexión para el neutro de los equipos que lo requieran.
- Proveer un medio de protección al equipo electrónico del lado de baja tensión contra descargas y sobretensiones.
- Estabilizar la tensión a tierra en condiciones normales de operación.

ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TIERRA

Un sistema de tierra esta compuesto por los siguientes elementos:

- Conductores.
- Varillas o electrodos de tierra.
- Conectores o juntas.

Conductores

Sirven para formar el sistema de tierra y para la conexión a tierra de los equipos.

Los conductores empleados en los sistemas de tierra son generalmente cables formados por varios hilos y los materiales empleados en su fabricación pueden ser cobre, aluminio o hierro, en sí, cualquier elemento metálico, sin embargo, la mayoría de los metales comunes se corroen fácilmente, por lo que el cobre ha destacado en este aspecto ya que es muy resistente a la corrosión, sin embargo existen zonas cercanas a canales de aguas residuales en el que el cobre es atacado por ácidos empleados en tratamiento de aguas, en estos sitios se puede estudiar el caso y cambiar el material del sistema de tierras.

Varillas o Electrodo de Tierra

Estos elementos se clavan en el terreno y sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica. Los materiales empleados para la fabricación de los electrodos de tierra son generalmente acero, acero galvanizado, acero inoxidable y cobre. La varilla copperweld es la más usada debido a que combina las ventajas del acero por tener una alta resistencia mecánica y el cobre por su conductividad y resistencia a la corrosión. Al igual que en los conductores la selección del material de las varillas o electrodos dependerá de las condiciones corrosivas del terreno.

Conectores o Juntas

Son los elementos que nos sirven para unir los conductores al sistema de tierra, para conectar las varillas a los conductores y para la conexión de los equipos.

Los conectores usados en los sistemas de tierra son generalmente de dos tipos:

- a) Conectores a compresión
- b) Conectores soldables

Los conectores a compresión son todos aquellos que mediante presión mantienen en contacto a los conductores. Este tipo de conectores pueden ser atornillados o a compresión.

Los conectores soldables son aquellos que mediante una reacción química exotérmica, los conductores y el conector se sueldan en una conexión molecular. Este tipo de conector, por su naturaleza soporta la misma temperatura de fusión del conductor. Los conectores se seleccionarán con el mismo criterio con que se seleccionan los conductores y varillas o electrodos.

EL SUELO COMO CONDUCTOR DE LA ELECTRICIDAD

En la tierra las corrientes se esparcen por todo el espacio y su distribución depende de la conductividad de los materiales en la superficie terrestre que es mucho menor que la conductividad de los metales. De hecho dos de los constituyentes principales de la tierra, el óxido de silicio y óxido de aluminio son excelentes aisladores. La conductividad eléctrica de la tierra se debe en gran medida a las sales y a la humedad que contiene. Por otro lado aún los semiconductores son capaces de conducir cantidades apreciables de corriente con solo poseer un área suficientemente grande. En este aspecto la tierra no presenta limitaciones dada su gran extensión.

Debido a la gran resistividad eléctrica de la tierra todas las corrientes que fluyen por ella producen una caída de tensión considerable y por lo tanto es necesario romper el concepto popular que el potencial de la tierra es siempre cero. Por el contrario, pueden desarrollarse en su seno fuertes intensidades de campo eléctrico o gradientes de potencial que afecten a extensas regiones de la superficie terrestre.

Las características del suelo son tan diferentes en este aspecto, que hay suelos que no conducen la electricidad, es decir, son aislantes, por otro lado hay suelos que son buenos conductores de electricidad como los suelos húmedos.

Para conocer que tan buen conductor de la electricidad es el suelo es necesario conocer su resistividad o su resistencia específica, las rocas, la arena y suelos secos tienen una alta resistividad, es decir, no conducen la electricidad.

RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistividad también conocida como resistencia específica, es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad, la cual está determinada por el tipo de suelo, el contenido de humedad del mismo, su composición química y la temperatura entre otros factores.

Para determinar la resistividad eléctrica es conveniente hacer mediciones directamente en el terreno, con métodos y aparatos apropiados para estos fines.

La resistividad eléctrica se mide en ohms-metro, ohms-cm., etc.

La tabla 5.1 nos da una idea de los valores medios de resistividad dependiendo del tipo de suelo:

Tipo de Suelo	Resistividad (ohms-metro)
Tierra orgánica húmeda	10
Tierra húmeda	100
Tierra seca	1000
Roca	5700

Tabla 5.1 Resistividad según el tipo de suelo

FACTORES DETERMINANTES DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Contenido de Humedad.

La resistividad de la mayoría de los suelos se incrementa bruscamente cuando el contenido de humedad se reduce al menos del 15% del peso del suelo. Sin embargo como se muestra en la curva 2 de la fig. 5.1, la resistividad varía muy poco una vez que el contenido de humedad es mayor al 22%.

El por ciento de agua del suelo depende del contenido de arcilla, materia orgánica, clima, lugar, época del año, etc. La arena no retiene la humedad y por lo tanto tiene una resistividad muy alta, las arcillas retienen la humedad y son conductoras de la electricidad, por ejemplo, el caso de la bentonita, que es una arcilla que retiene agua varias veces su volumen.

Contenido Químico.

La composición y la cantidad de sales solubles, ácidos o álcalis, presentes en el suelo, pueden afectar considerablemente su resistividad. La curva 1 de la fig. 5.1, ilustra el efecto de las sales sobre la resistividad del suelo que contiene 30% de humedad del peso del suelo.

El agua con alto contenido de sales es buena conductora de la electricidad, por el contrario el agua sin sales es poca conductora, por lo que podemos concluir que entre mayor contenido de sales tenga un suelo húmedo, será mejor conductor de la electricidad.

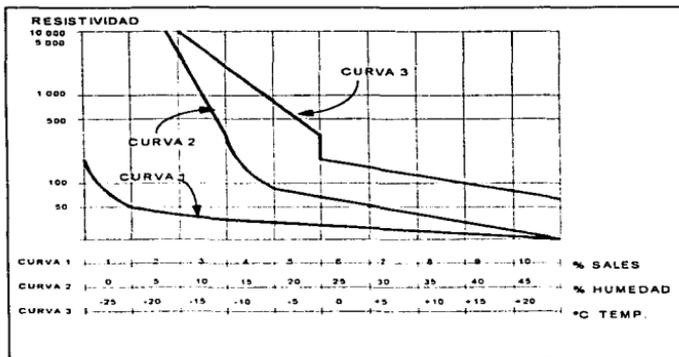


Figura 5.1.- Curvas de resistividad de acuerdo con la temperatura, humedad y contenido químico.

Tamaño del Grano y su Distribución

El tamaño del grano que compone el suelo y su distribución, es importante en la conducción eléctrica, ya que si se tienen granos con grandes espacios se reduce el área de contacto, mientras que si se tiene granos con diferente tamaño los espacios son pequeños y se aumenta el área de contacto.

Temperatura.

La curva 3 de la fig. 5.1, muestra la variación típica de la resistividad del suelo con respecto a la temperatura para un suelo arcilloso que contiene 15% de humedad por peso. El efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo

para temperaturas arriba del punto de congelación. A cero grados centígrados el agua en el suelo se empieza congelar e incrementar su resistividad rápidamente.

El agua a temperaturas bajas es mala conductora y la resistividad de un terreno está en función del contenido de humedad, por lo que en zonas frías la resistividad puede ser grande.

MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD

Existen varios métodos para medir la resistividad del terreno, a continuación describiremos los más usados:

Método de Wenner.

Para efectuar la medición de resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, el método mas usual es el de Frank Wenner denominado también "de los 4 electrodos". El equipo de medición utilizado es el Megger de tierra y la medición se efectúa como se ilustra en la fig. 5.2.

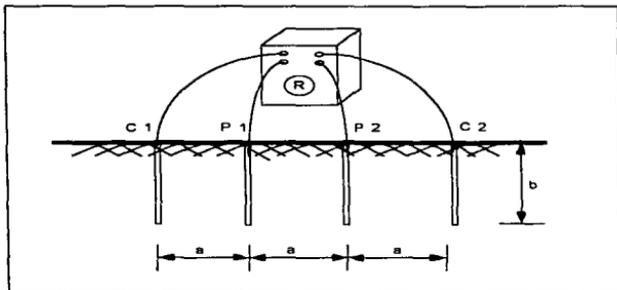


Figura 5.2.- Método de Wenner o de los 4 electrodos.

Una vez que tenemos el valor dado por el megger (R) y con los datos de la medición, podemos calcular la resistividad con el uso de la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{(a^2 + 4b^2)^{1/2}} - \frac{a}{(a^2 + b^2)^{1/2}}}$$

Donde:

- ρ = Resistividad (en ohm-metro)
- a = Separación entre electrodos (en metros)
- b = Profundidad
- R = Lectura del megger (en ohms).

La formula anterior se utiliza cuando "a" no es mucho mayor que "b".

En caso de tener una relación: $a/b \geq 20$ podemos usar la siguiente formula:

$$\rho = 2\pi aR$$

Donde "b" es generalmente de 50 cm y "a" de 10 m.

Nota: Se deben efectuar varias mediciones dependiendo del tamaño del terreno.

Cabe aclarar que este método es para un suelo homogéneo, esto quiere decir que cuando el suelo es de una sola capa se pueden efectuar mediciones de resistividad con diferentes separaciones de electrodos y el valor de resistividad será el mismo.

Si el suelo es heterogéneo, es decir, cambia sus características a cierta profundidad en dos o más capas, entonces la medición de resistividad cambiará con la separación de los electrodos.

Método de Lee

Este método consiste en enterrar 5 electrodos como se muestra en la fig. 5.3, en la medición solo se utilizan 4, circulando una corriente en los extremos y midiendo la caída de potencial en A y B ó en B y C, la resistividad estará dada por:

$$\rho = 4\pi aR_{AB}$$

$$\rho = 4\pi aR_{BC}$$

Este método tiene la ventaja de poder efectuar dos mediciones y si los resultados difieren, el suelo no es homogéneo en la parte superficial.

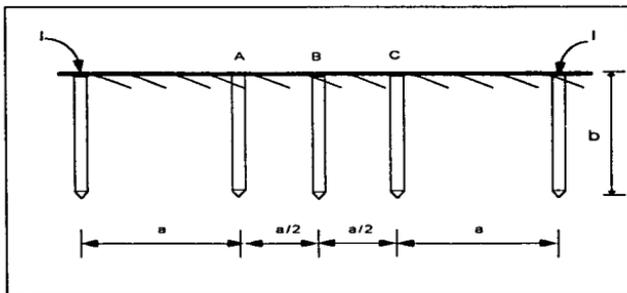


Figura 5.3 Método de Lee.

Método del Electrodo Central

Es una variante del método de Wenner, y si hay que efectuar varias mediciones solo se mueven dos electrodos, mientras que en el de Wenner se mueven los 4. La resistividad esta dada por:

$$\rho = (2\pi a(a+b)R) / b$$

El arreglo se muestra en la fig. 5.4.

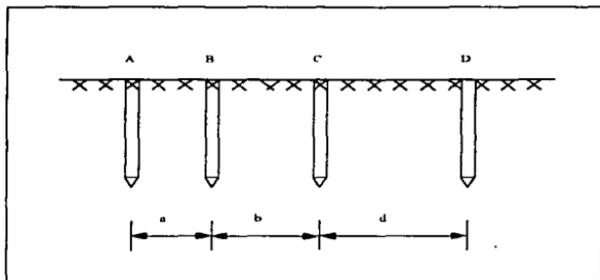


Figura 5.4. - Método del electrodo central.

En la configuración de Wenner el arreglo de electrodos usual se basa en circular una corriente por los extremos midiendo un potencial en los electrodos centrales (C P P C). Sin embargo, se puede tener otro arreglo de electrodos como se muestra en la tabla 5.2.

Arreglo de Electrodos	Formula de Resistividad
CPPC	$\rho_1 = 2\pi a R_1$
PCCP	
CCPP	$\rho_2 = 6\pi a R_2$
PPCC	
CPCP	$\rho_3 = 3\pi a R_3$
PCPC	

Tabla 5.2.- Resistividad de acuerdo el arreglo de electrodos.

RESISTENCIA A TIERRA.

El suelo es un conductor eléctrico pero su conductividad es baja comparada con los metales que son buenos conductores.

La resistencia a tierra de un electrodo está dada por la suma de varias resistencias: la de contacto en las conexiones, las propias del electrodo, la del electrodo y el medio que lo rodea y por último la que presenta el terreno. De todos éstos factores solo la que presenta el terreno es apreciable, ya que las tres primeras son muy bajas.

MEDICIÓN DE RESISTENCIA A TIERRA.

El método aquí descrito es el de " la caída de tensión". Consiste en circular una corriente entre dos electrodos fijos: uno el de prueba (C_1) y el otro auxiliar (C_2), midiendo la caída de tensión entre otro electrodo auxiliar (P_2) y el electrodo bajo medición (P_1), este segundo electrodo auxiliar (P_2) se va desplazando y conforme se mueve se van tomando lecturas y graficando hasta obtener una curva como se muestra a continuación (fig. 5.5).

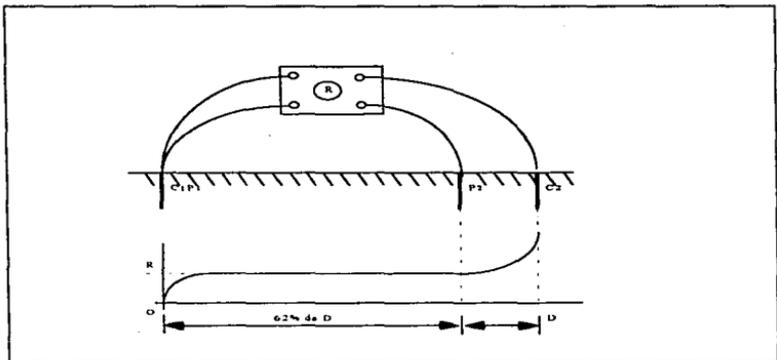


Figura 5.5 Método de la caída de tensión.

El valor de resistencia a tierra de la red es el que se obtiene en la intersección del eje de resistencia (R) con la parte paralela de la gráfica al eje de las distancias (D).

Si la curva no presenta un tramo paralelo quiere decir que la distancia escogida no es suficiente.

VALOR DE RESISTENCIA A TIERRA

El valor de resistencia a tierra pedido por la NOM-001-SEMP-1994 se encuentra en varios artículos, de los cuales escribimos lo referente al tema a continuación:

250-84 Resistencia de electrodo artificial. El valor de resistencia a tierra de los electrodos no debe ser mayor de 25 Ω para casa habitación, comercio, oficinas o locales considerados como de concentración pública, con acometidas de baja tensión, en las condiciones más desfavorables (época de estiaje). Cuando no se pueda lograr este valor con un electrodo se debe acudir al uso de métodos descritos anteriormente (art. 250-83).

Excepción: Para terrenos con resistividad mayor a 3000 Ω -m, se permite que los valores anteriores de resistencia de tierra sean del doble para cada caso.

2103- Métodos de Puesta a Tierra

E.- Resistencia a Tierra de Electroodos

2103-32 General. El sistema de tierras debe consistir de uno o más electrodos conectados entre sí. Este sistema debe tener una resistencia a tierra suficientemente baja para minimizar los riesgos al personal en función de la tensión de paso y de contacto (se considera bueno un valor de 10 Ω , en terrenos con alta resistividad éste valor puede llegar a ser hasta de 25 Ω ; si la resistividad es mayor a 3000 Ω -m se permiten 50 Ω) y para permitir la operación de los dispositivos de protección.

Capítulo 24. Subestaciones

2403- Sistemas de Tierras

2403-2 Características de sistema de tierras

c) Resistencia a tierra de la malla. La resistencia total de la malla con respecto a tierra debe determinarse tomando en cuenta los siguientes parámetros:

-Longitud total de los elementos enterrados.

-Resistividad del terreno.

-Área de la sección transversal de los conductores, la mínima aceptable es 107.2 mm^2 de cobre (4/0 AWG).

-Profundidad.

La resistencia eléctrica del sistema de tierra debe conservarse en un valor (incluyendo todos los elementos que forman el sistema) menor a 25Ω para subestaciones hasta 250 kVA y 34.5 kV, 10Ω en subestaciones mayores de 250 kVA y hasta 34.5 kV y de 5Ω en subestaciones que operen con tensiones mayores a 34.5 kV.

Excepción: Para terrenos con resistividad mayor a $3000 \Omega\text{-m}$, se permite que los valores anteriores de resistencia de tierra sean del doble para cada caso.

POTENCIALES PELIGROSOS PARA EL CUERPO HUMANO

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas, debidas a disturbios atmosféricos o fallas del equipo obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan un peligro a operadores, trabajadores o personas en general que se encuentren en el lugar. Intensidades de algunos miles de amperes producen gradientes eléctricos elevados en la vecindad del punto o puntos de contacto a tierra y si se da la circunstancia de que alguna persona puentee dos regiones a la distancia de un paso normal, puede sufrir una descarga de magnitud que sobrepase el límite de su contracción muscular y que provoque su caída, abarcando superficies con

mayor diferencia de potencial, de tal manera que la corriente que circule por su cuerpo aumente, y de pasar esta por algún órgano vital como el corazón, puede resultar en fibrilación ventricular y la muerte. Lo que regula el engarrotamiento muscular que no permite soltar el objeto electrizado, es la intensidad de la corriente, pero la tensión aplicada está relacionada con ésta a través de la resistencia óhmica de las partes del cuerpo que quedan en contacto con los potenciales diferentes. Esta resistencia es muy variable y depende de si el contacto es con piel húmeda o seca, si es a través de zapatos o ropa, de la parte del cuerpo que fomen el circuito y de circunstancias momentáneas como estados del cuerpo. La digestión, el estado de ánimo, como el miedo, que influye notablemente a abatir la resistencia del cuerpo humano. Además el tejido humano tiene una característica negativa de resistencia, es decir, la resistencia del cuerpo disminuye al aumentar la corriente y el tiempo de contacto, con el resultado de que al aumentarse al doble la tensión aplicada, la corriente sube a más del doble. No obstante está circunstancia en los diseños trata de limitarse las tensiones a las que pueden quedar sometidas las personas a valores razonables.

El umbral de percepción se acepta generalmente como de aproximadamente de 1 mA. Si el camino de la corriente incluye la mano y el antebrazo, las contracciones musculares, el malestar y el dolor aumentan al crecer la corriente y bastan intensidades de unos cuantos miliamperes para evitar que la persona pueda soltar la parte energizada agarrada con la mano, que es la condición de engarrotamiento indicada anteriormente. Llamaremos a la corriente límite que permite soltar la parte energizada como "corriente de soltar". Magnitudes de corriente solo ligeramente superiores a la corriente de soltar de una persona son muy dolorosas, causantes de miedo y difíciles de soportar aún en tiempos de corta duración. De no interrumpirse rápidamente la corriente puede acarrear un rápido descenso de la fuerza muscular causado por el dolor y la fatiga asociada a las severas contracciones musculares involuntarias. La exposición

prolongada a corrientes en exceso a la de soltar puede producir extenuación, asfixia, colapso e inconsciencia, seguida por la muerte.

La figura 5.6 nos muestra los efectos fisiológicos de las corrientes eléctricas.

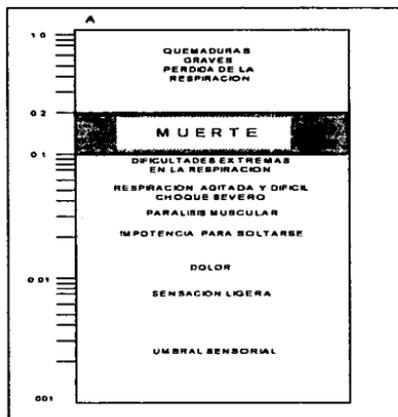


Figura 5.6.- Efectos Fisiológicos de la Corriente.

CORRIENTE DE FIBRILACIÓN.

Es aquella que se produce al existir una diferencia de potencial entre dos partes del cuerpo. El potencial tolerable del cuerpo humano está en función de esta corriente, que al circular por el corazón, primero le produce una arritmia cardiaca, procediendo a detenerlo por completo causándole la muerte.

La corriente de fibrilación está en función del tiempo y del peso del cuerpo humano, la cual podemos expresar mediante las siguientes fórmulas experimentales:

Para un cuerpo de hasta 50 Kg. tenemos:

$$I = 0.116 / t^{1/2}$$

Para un cuerpo de 70 Kg. tenemos:

$$I = 0.157 / t^{1/2}$$

donde:

I= Corriente de fibrilación.

t = Tiempo que circula la corriente.

Estas ecuaciones no son validas para tiempos largos o muy cortos.

Las condiciones que pueden provocar un posible accidente son:

1.- Corriente de falla a tierra muy elevada en relación con el área que ocupa el sistema de tierras y su resistencia a una tierra remota.

2.- La resistividad del suelo y la distribución de la corriente que puede generar gradientes de potencial elevados en la superficie.

3.- La posición de un individuo entre dos puntos con una alta diferencia de potencial.

4.- Duración de la falla, el flujo de corriente a través del cuerpo humano por un tiempo suficiente puede causar quemaduras y hasta la muerte.

POTENCIALES PELIGROSOS

Cuando ocurre una falla a tierra se pueden presentar potenciales peligrosos que pueden dañar a las personas o a los equipos cercanos a la falla. Estos potenciales son:

Potencial de toque o contacto

Potencial de paso

Potencial transferido

Potencial de Toque o Contacto

Este potencial se presenta cuando se toca una estructura por la cual circula una corriente de falla, como se ilustra en la 5.7. Tomando las consideraciones de corriente de fibrilación y de resistencia del cuerpo humano, el potencial que podemos soportar esta expresado por las siguientes ecuaciones:

$$E_{T50} = \frac{116 + 0.170s}{t^{1/2}} \quad \text{Potencial de toque para 50 kg.}$$

$$E_{T70} = \frac{157 + 0.240s}{t^{1/2}} \quad \text{Potencial de toque para 70 kg.}$$

Donde:

ρ_s = Resistividad de la superficie del suelo en ohms-metro.

t = Duración de la falla en segundos.

La mayoría de los accidentes de electrocución que ocurren en el hogar son debidos a este potencial.

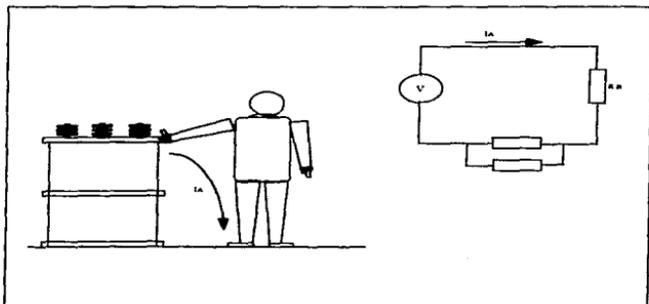


Figura 5.7.- Potencial de Toque

Potencial de Paso

Es el potencial que puede soportar un individuo que se encuentra parado o caminando cerca del lugar de la falla (figura 5.8). Si se rebasa este potencial, se produce una contracción muscular en las piernas, es decir, no responde a los impulsos del cerebro y el individuo cae al piso, donde queda expuesto a las corrientes que circulan por el corazón. Este potencial lo podemos calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{P50} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{t^{1/2}} \quad \text{Potencial de paso para 50 kg.}$$

$$E_{P70} = \frac{157 + \rho_s}{t^{1/2}} \quad \text{Potencial de paso para 70 kg.}$$

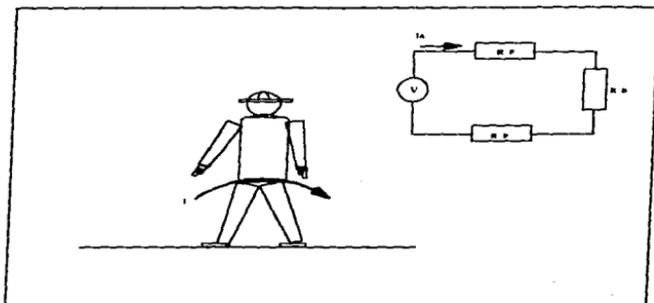


Figura 5.8.- potencial de Paso

Potenciales Transferidos

Estos se producen cuando existen elementos metálicos que salen del lugar de la falla, como son: rieles, hilo de guarda, tuberías, etc.

Bajo condiciones normales el equipo eléctrico que está puesto a tierra opera a nivel de voltaje cero o cercano a cero y este potencial es idéntico al de

una red remota. Durante una condición de falla se eleva el potencial con respecto a la red remota, existiendo una diferencia de potencial, que es proporcional a la magnitud de la corriente en la malla de tierras y a su resistencia.

No es práctico e incluso es casi imposible diseñar un sistema de tierras en base a los potenciales transferidos, es más práctico aislar las tuberías o elementos metálicos que salen de la subestación.

ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA

Un electrodo puede ser una varilla enterrada, sin embargo, puede consistir también en un conductor enterrado en forma horizontal o vertical, una placa enterrada, una varilla con relleno químico, varias varillas en paralelo, mallas de cables enterrados, etc.

Lo que importa en un electrodo de puesta a tierra es el valor de resistencia a tierra y como mencionamos anteriormente, para tensiones elevadas, también se incluyen los potenciales peligrosos: de paso, de contacto y transferidos.

Se recomienda el uso de electrodos fabricados especialmente para la puesta a tierra, sin embargo, si no se dispone de algunos de ellos se puede recurrir a otros medios de puesta a tierra, como se mencionan en los incisos (b) a (e) del artículo 250-81 de la NOM-001-SEMP-1994 que son los siguientes:

- b) Tubería metálica de agua, enterrada.
- c) Estructura metálica del inmueble.
- d) Electrodo empotrado en concreto.
- e) Anillos de tierra.

ELECTRODOS FABRICADOS ESPECIALMENTE PARA PUESTA A TIERRA

Electrodo de acero con cubierta de cobre. Consiste en una varilla redonda con una longitud de tres metros o más, con un diámetro de 13, 16, 19 mm, el acero le da dureza y el cobre resistencia a la corrosión y mejor conductividad, el espesor del cobre debe tener 0.25 mm como mínimo.

Electrodos profundos Este tipo de electrodos consiste de un conductor de baja impedancia instalado en perforaciones profundas hasta encontrar terrenos de baja resistividad o niveles de mayor humedad.

Electrodos horizontales. Consiste en instalar un conductor de cobre desnudo enterrado en forma horizontal a una profundidad que va de 50 cm a 100 cm de diferentes configuraciones, los más usuales son: ángulo recto, estrella, en cruz, en cuadro, etc.

Electrodos químicos. En este método se modifica el medio que rodea al electrodo, bajando la resistividad del suelo, los más recomendables son:

1) Bentonita. Es una arcilla cuya virtud principal radica en absorber agua y retenerla, se coloca alrededor del electrodo y forma un buen camino para las corrientes eléctricas que se drenan a tierra, no es corrosiva.

2) Carbón mineral (coke). Se extrae de las minas, y al igual que la bentonita, se coloca alrededor del electrodo.

SISTEMAS DE TIERRA EN TERRENOS DE ALTA RESISTIVIDAD

Se considera terrenos de alta resistividad a aquellos en los que en épocas de estiaje no se logra un valor máximo de 25Ω con un electrodo normal; generalmente son terrenos de roca, tepetate, arena o relleno.

En terrenos de alta resistividad podemos utilizar los siguiente métodos para disminuir la resistencia a tierra del sistema:

- a) Electrodo múltiples
- b) Electrodo horizontales
- c) Electrodo químicos
- d) Electrodo Profundos

a) Electrodo Múltiples

Consiste en colocar electrodo en diferentes cantidades y configuraciones, espaciados una distancia determinada uno de otro y unidos entre si por un conductor desnudo. Las configuraciones más usadas: dos electrodo en línea, tres en línea, tres en delta, etc.

En la tabla 5.3 se muestran los principales arreglos de electrodo múltiple:

VALORES ESPERADOS	ARREGLO
Dos electrodo en paralelo reducen al 55% la resistencia de uno.	
Tres electrodo en línea recta reducen al 35%.	

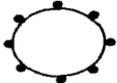
<p>Tres electrodos en delta reducen al 38%.</p>	
<p>Cuatro electrodos en cuadro reducen al 28%.</p>	
<p>Ocho electrodos en cuadro reducen al 17%.</p>	
<p>Ocho electrodos en círculo reducen al 16%.</p>	
<p>Nueve electrodos en cuadro sólido reducen al 16%.</p>	
<p>Doce electrodos en cuadro reducen al 12%.</p>	

Tabla 5.3.- Resistencia de electrodos múltiples.

b) Electrodo Horizontales

Cuando no es posible enterrar electrodos en forma vertical, se recurre a otros métodos, uno de los cuales es el de electrodos horizontales, consiste en la instalación de un conductor de cobre desnudo a una profundidad que va de 0.5 a 1 m. Se aplica en fraccionamientos y conjuntos habitacionales y lugares donde existe suficiente área. La tabla 5.4 muestra los principales arreglos de electrodos horizontales.

Arreglo	Característica
	Cable enterrado horizontalmente
	Cable en ángulo recto.
	Estrella con tres lados.
	Estrella con cuatro lados.
	Estrella con seis lados.
	Estrella con ocho lados.

Tabla 5.4.- Configuración de electrodos horizontales.

c) Electrodo Químicos

La resistencia de puesta a tierra puede disminuirse incrementando la conductividad del suelo cercano al electrodo. Esto puede conseguirse por medio del uso de agentes químicos, los cuales se vierten en orificios realizados alrededor de los electrodos, aumentando su radio efectivo. Las reducciones de la resistencia que pueden obtenerse son considerables.

Los dos principales compuestos utilizados en este método son el carbón mineral (coke) y la bentonita. La tabla 5.5 muestra el porcentaje al que se reduce la resistencia con el uso de electrodos químicos.

Electrodo Químico	% al que se reduce la resistencia a tierra de un electrodo
Carbón Mineral	60
Bentonita	40

Tabla 5.5.- Uso de electrodos químicos

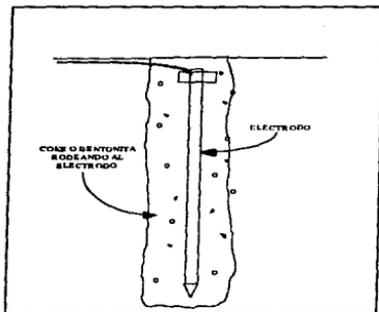


Figura 5.9.- Electrodo químicos

d) Electrodo Profundos

Consiste en efectuar perforaciones profundas hasta encontrar capas de terrenos con mayor humedad y por lo tanto de baja resistividad.

CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA

De acuerdo con la norma NOM-001-SEMP-1994 y los artículos:

250-94 Sección transversal del conductor del electrodo de puesta a tierra de sistemas de corriente alterna.- El tamaño del conductor de puesta a tierra de un sistema, puesto o no a tierra, de corriente alterna no debe ser menor que lo indicado en la siguiente tabla.

Área de la sección transversal del conductor mas grande de acometida o su equivalente para conductores en paralelo.		Área de la sección transversal del conductor para electrodo de puesta a tierra.	
Cobre mm ²	Aluminio mm ²	Cobre mm ²	Aluminio mm ²
Hasta 33.62	Hasta 53.48	8.367	13.30
más de 33.62 hasta 53.48	más de 53.48 hasta 85.01	13.30	21.15
más de 53.48 hasta 85.01	más de 85.01 hasta 126.7	21.15	33.62
más de 85.01 hasta 177.3	más de 126.7 hasta 253.4	33.62	53.48
más de 177.3 hasta 304.0	más de 253.4 hasta 456.0	53.48	85.01
más de 304.0 hasta 557.4	más de 456.0 hasta 886.5	67.43	107.2
más 557.4	más de 886.5	85.01	126.7

Tabla 250-94.- Conductor para electrodo de puesta a tierra en sistemas de c. a.

Nota 1: Ver las restricciones para la aplicación en la sección 250-92(a).

Nota 2: Para calibre de conductores de puesta a tierra en sistemas de corriente alterna que van al equipo de acometida ver la sección 250-23(b).

250-95.- Sección transversal de los conductores de puesta a tierra de equipos.- El calibre de los conductores de cobre, aluminio, aluminio con recubrimiento de cobre, para la puesta a tierra de equipos no deberá ser menor que lo indicado en la siguiente tabla.

Capacidad de conducción nominal o ajuste del dispositivo automático de sobrecorrientes ubicado antes del equipo, tubería, etc.	Sección transversal cobre		Sección Transversal Aluminio	
	mm ²	AWG KCM	mm ²	AWG KCM
15	2.082	14	3.307	12
20	3.307	12	5.260	10
30	5.260	10	8.367	8
40	5.260	10	8.367	8
60	5.260	10	8.367	8
100	8.367	8	13.30	6
200	13.30	6	21.15	4
300	21.15	4	33.62	2
400	27.67	3	42.41	1
500	33.62	2	53.48	1/0
600	42.41	1	67.43	2/0
800	53.48	1/0	85.01	3/0
1000	67.43	2/0	107.2	4/0
1200	85.01	3/0	128.7	250
1600	107.2	4/0	177.3	350
2000	128.7	250	202.7	400
2500	177.3	350	304	600
3000	202.7	400	304	600
4000	253.4	500	405.4	800
5000	354.7	700	612	1200
6000	405.4	800	612	1200

Tabla 250-95.- Sección transversal mínima de los conductores de puesta a tierra para canalización y equipos.

Quando los conductores estén en paralelo y en canalización múltiple, como está permitido en la sección 310-4, el conductor de puesta a tierra del equipo, cuando se usa, deben de ir juntos. El tamaño de cada uno de los conductores de puesta a tierra del equipo que están en paralelo debe de estar basado en la capacidad nominal de corriente de los dispositivos contra sobrecorriente que protegen los conductores de circuito en la canalización y deben de estar de acuerdo con la tabla 250-95.

Quando las secciones transversales de conductores se dimensionan para la compensación de caída de tensión los conductores de puesta a tierra de equipo, cuando son requeridos, deberán ajustarse proporcionalmente de acuerdo con la escala de las secciones transversales (AWG).

Quando se instale un solo conductor de puesta a tierra de equipos para varios circuitos en la misma canalización se le dimensionará con el mayor de los dispositivos de protección contra sobrecorriente de los circuitos dentro de la canalización.

Quando los dispositivos de protección contra sobrecorriente consiste de un interruptor con circuito de disparo o un motor protector de cortocircuito como se menciona en la sección 430-52, el calibre del conductor de puesta a tierra de un equipo se debe basar en el dispositivo de protección de sobrecarga del motor pero no debe ser menor que la sección transversal que se menciona en la tabla 250-95.

CAPITULO 6.- DISEÑO DE UN SISTEMA DE TIERRA

En este capítulo desarrollamos los pasos a seguir para lograr una adecuada puesta a tierra en sistemas de media y baja tensión de acuerdo a los requerimientos del equipo y para la seguridad del personal, como medio de protección contra descargas atmosféricas, sobretensiones causadas por estas y fallas.

Mencionamos además los sistemas de tierras aisladas, con los cuales, además de proteger, logramos en cierto modo eliminar el ruido en la línea de tierra, presentamos también algunas de sus ventajas y desventajas

A continuación se muestra el diagrama de flujo (figura 6.1) para el diseño de una red de tierras en mediana y alta tensión.

En lo referente a baja tensión se describirá también el método de diseño, ya que como lo hemos visto en capítulos anteriores es de suma importancia para la protección del equipo electrónico sensible.

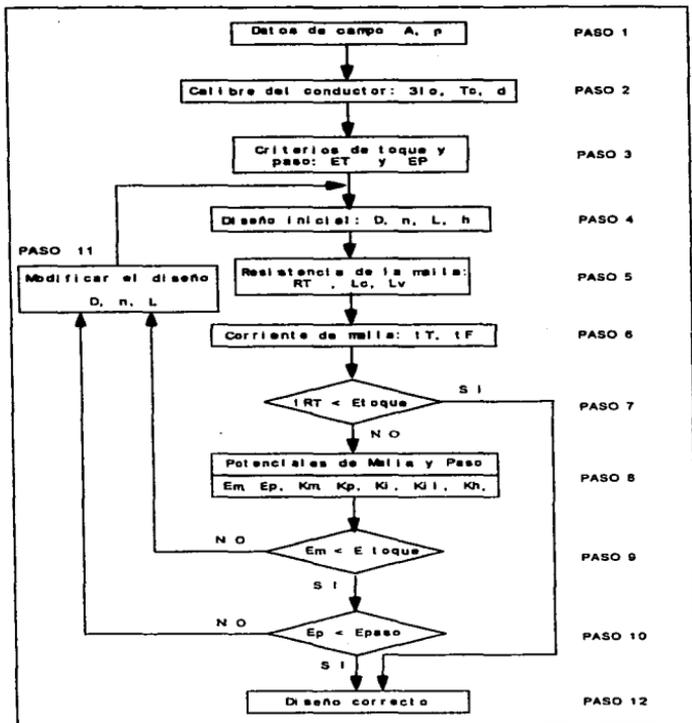


Figura 6.1.- Diagrama de flujo para el diseño de una malla de tierra para alta tensión.

La explicación para desarrollar cada uno de los pasos del diagrama de flujo anterior se presenta ahora:

PASO 1.- En este paso obtenemos los datos de campo, tales como:

A= Área del local donde se construirá la malla.

ρ = Resistividad del terreno, este dato lo podemos obtener con cualquier método descrito anteriormente.

PASO 2.- Calibre del conductor.

En este punto tenemos que seleccionar tanto el material, como el calibre del conductor.

En cuanto al material, como mencionamos en páginas anteriores puede ser cobre aluminio o fierro.

En lo referente al calibre del conductor, debemos considerar principalmente la capacidad térmica, es decir, que el conductor sea capaz de soportar la máxima corriente de falla sin deteriorarse, además de soportar los esfuerzos mecánicos a los que se ve sometido en ciertas situaciones.

Con la ecuación siguiente podemos conocer la ampacidad del conductor de acuerdo con las características del material.

$$I = A \sqrt{\left[\frac{T_{CAP} \times 10^{-4}}{t_{CORP}} \right] \ln \left[\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right]}$$

Donde:

I = Corriente rms en kA.

A = Sección del conductor en mm².

T_{CAP} = Factor de capacidad térmica en $J/cm^3/^{\circ}C$.

T_m = Máxima temperatura permisible en $^{\circ}C$.

T_a = Temperatura ambiente en $^{\circ}C$

t_c = Tiempo que dura el flujo de corriente en seg.

T_r = Temperatura de referencia para la constante del conductor en $^{\circ}C$.

r = Resistividad del conductor a la temperatura de referencia T_r en $\mu\Omega/cm^2$.

$K_0 = 1/\alpha_0$

α_0 = Coeficiente térmico de resistividad a $0^{\circ}C$.

DESCRIPCIÓN	CONDUC- TIVIDAD DEL MATERIAL (%)	α_r FACTOR A $20^{\circ}C$	K_0 ($1/\alpha_0$) A $0^{\circ}C$	TEMPE- RATURA DE FUSIÓN ($^{\circ}C$)	ρ_r A $20^{\circ}C$ ($\mu\Omega/cm^2$)	T_{CAP} ($J/cm^3/^{\circ}C$)
Alambre de cobre suave estándar	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Alambre de cobre duro comercial	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Cobre estañado con alma de acero	40.0	0.00378	245	1084 a 1300	4.397	3.846
Alambre de aluminio comercial	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Alambre de aluminio estañado con alma de acero	20.3	0.00360	258	660 a 1300	8.4805	2.670
Alambre de acero cubierto con zinc	8.5	0.00320	293	419 a 1300	20.1	3.931
Acero	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.032

Tabla 6.1.- Constantes del material.

Para conocer la sección transversal requerida en función de la corriente de corto circuito, podemos usar la formula siguiente:

$$A \text{ (mm}^2\text{)} = I \sqrt{\frac{I_c \alpha_f P_r 10^4}{T_{CAP}} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_o + T_a} \right) \right]}$$

PASO 3.- Calculo de los Potenciales de Paso y de Toque.

En este paso se calcularan los potenciales tolerables para el ser humano tales como:

E_{T50} = Potencial de toque para 50 kg.

E_{T70} = Potencial de toque para 70 kg.

E_{P50} = Potencial de paso para 50 kg.

E_{P70} = Potencial de paso para 70 kg.

Para el calculo de todos estos potenciales, consultar las fórmulas en la sección correspondiente de este mismo capítulo.

PASO 4.- Diseño Inicial.

El diseño inicial consta de una malla formada por un conductor rodeando el área del local, además de dos conductores que crucen la malla (uno en cada dirección) y varillas en las esquinas, tal como se muestra en la figura 6.2.

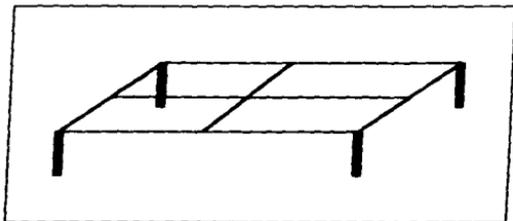


Figura 6.2.- Diseño inicial de la malla de tierra.

PASO 5.- Resistencia de la malla.

Calcularemos la resistencia a tierra (R) de la malla o red, para lo cual podemos usar la fórmula general dada a continuación:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln(4L/d)$$

Donde:

$L = L_c + L_v$ = Longitud total del conductor más la longitud total de las varillas

[m].

d = diámetro del conductor [m].

ρ = resistividad del terreno.

PASO 6.- Corriente de la malla.

En este paso se deberá calcular por cualquier método, ó consultando datos de la compañía suministradora, la corriente de corto circuito.

La corriente de malla deberá reflejar la peor condición de falla, su duración y el factor de crecimiento futuro.

Paso 7. Comparación de Potenciales.

$$IR_T \leq E_{T50}$$

Si el producto de la corriente de falla por la resistencia a tierra de la malla es menor o igual al potencial de toque mas desfavorable, (en este caso E_{T50}), el diseño es correcto.

Si no se cumple esta condición continuamos con el paso 8.

Paso 8. Cálculo de Potenciales de Paso y Contacto en la malla.

El potencial de paso esta dado por la siguiente ecuación.

$$E_m = \rho K_m K_i I_{cc} / L$$

Donde:

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

$K_1 = 0.656 + 0.172 n$ = Factor de corrección por geometría de la malla.

$K_4 = 1$ (con electrodos en las esquinas)

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

h = Profundidad de la malla.

$h_0 = 1$ m (Profundidad de referencia de la malla).

d = diámetro del conductor en (m)

D = Espacio máximo entre conductores paralelos de la malla en (m).

n = Número de conductores paralelos en una dirección. En caso de tener diferente número de conductores en las dos direcciones, n será la media geométrica del número de conductores.

$$n = \sqrt{n_A n_B}$$

El potencial de paso esta dado por la ecuación siguiente:

$$E_p = \rho K_p K_1 K_4 I_{cc} / L$$

Donde:

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} w \right]$$

$$w = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n-1}$$

Si n es mayor o igual a 6 podemos usar la formula siguiente:

$$w = \frac{1}{2(n-1)} + \text{Ln} (n-1) - 0.423$$

Paso 9. Comparación de Potenciales de Paso y Toque con los Potenciales de la Malla.

En este paso comparamos los voltajes máximos que soporta el cuerpo humano (para 50 kg) contra los voltajes máximos que se presentan en la malla.

Voltajes máximos que soporta el cuerpo humano (50 kg)	Voltajes máximos que se presentan en una falla a tierra
E_{P50}	E_p
E_{T50}	E_m

Comparamos:

$$E_{P50} > E_p$$

Si se cumple continuamos con el paso 10.

Si no se cumple, procedemos a modificar el diseño original (paso 11).

Paso 10. Comparación del Voltaje de Toque con el potencial de malla.

El potencial de malla es el potencial mas alto que se presenta durante una falla.

Comparamos:

$$E_{T50} > E_m$$

Si se cumple este paso el diseño es correcto y finaliza el proceso. (Paso 12).De no cumplirse procedemos a rediseñar el sistema original (Paso 11).

INFLUENCIA MUTUA ENTRE DOS SISTEMAS DE TIERRA

Un sistema de tierra transmite al terreno una corriente eléctrica y crea un campo eléctrico en el terreno circundante. La zona de influencia del electrodo podemos representarla gráficamente mediante un cono de tensiones como se ilustra en la figura 6.3.

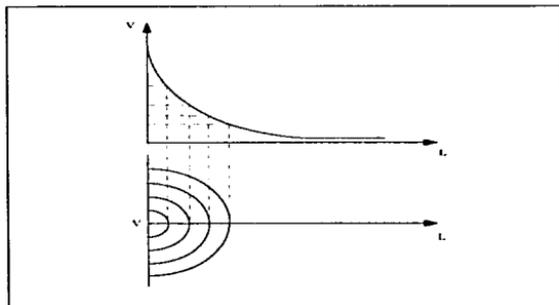


Figura 6.3.- Zona de influencia de un electrodo de tierra.

Sistemas de Tierra Unidas

Dos sistemas de tierra unidas eléctricamente mediante un conductor, están formando realmente un solo sistema de tierra.

Sistemas de Tierra Eléctricamente Independientes

Podemos considerar que dos tomas de tierra son independientes eléctricamente cuando los dos sistemas están lo suficientemente alejadas entre sí, de tal manera que la corriente máxima pueda ser difundida por una de ellas y no modifique sensiblemente el potencial de la otra (figura 6.4).

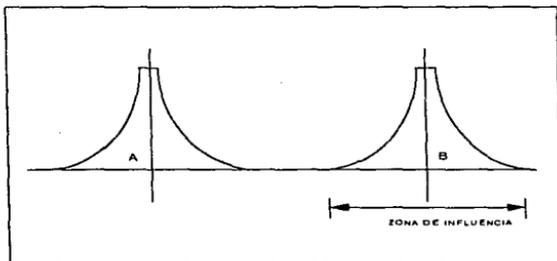


Figura 6.4.- Sistemas de tierra independientes

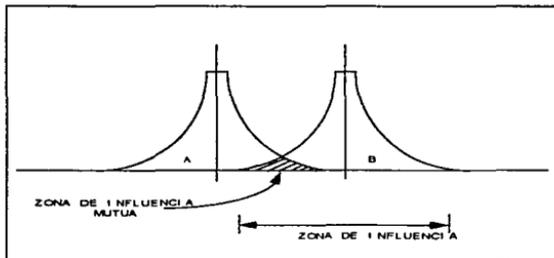


Figura 6.5.- Zonas de Influencia Común entre Electrodo.

DISTANCIA MÍNIMA ENTRE SISTEMAS DE TIERRA

De acuerdo con la NOM-001-SEM-1994 en el artículo 250-83. Electrodo Artificiales, la nota del inciso (d) Electrodo múltiples, nos indica que cuando se usan sistemas de electrodo para distintos fines como los circuitos de comunicación, pararrayos de edificios, etc., cada electrodo de un sistema debe distar por lo menos 1.80 m (6 pies) de los otros sistemas.

Sin embargo, existen recomendaciones publicadas en la IEEE Transactions on Industry Application (Enero/Febrero 1995), en los cuales nos menciona que en caso de tener una baja resistividad del suelo, las varillas de tierra de diferentes sistemas deben estar separadas, por una distancia dependiente de su longitud. Aproximadamente el 91% de la resistencia de la varilla de tierra esta dentro de un hemisferio con radio de aproximadamente 1.1 veces la longitud L de la varilla, por lo que el diámetro de separación del hemisferio de protección esta dado por la distancia "D" (fig. 6.6), la cual podemos obtener mediante la siguiente relación:

$$D = 2.2 L$$

Por ejemplo, si los electrodos verticales de un sistema de tierra tienen una longitud de 3 m, entonces la distancia mínima a la que podremos colocar otro sistema de tierra está dada por:

$$D = 2.2L = 2.2(3 \text{ m}) = 6.6 \text{ m}$$

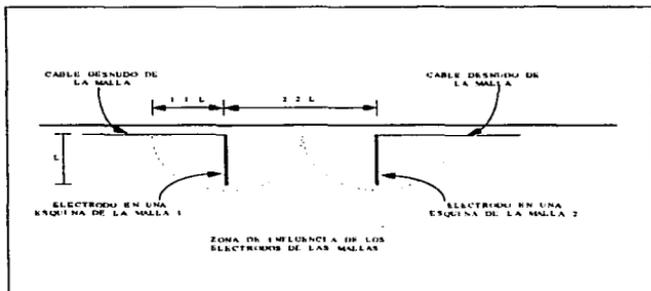


Figura 6.6.- Distancia mínima entre sistemas de tierra.

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Un buen sistema de aterrizamiento es indispensable para reducir el índice de fallas. Por ejemplo, reducir el riesgo de flameos de estructuras o cables aterrizados a las fases en caso de rayos directos. De igual manera reduce la probabilidad de daños al secundario del transformador con neutro aterrizado.

En redes de distribución aérea debe conectarse a tierra:

- 1) El neutro de la baja tensión.
- 2) El tanque de transformadores, seccionadores y restauradores.
- 3) Los apartarrayos.
- 4) El neutro de los bancos de capacitores.
- 5) Los soportes metálicos de equipos que puedan energizarse bajo condiciones anormales.

En redes de distribución subterránea debe conectarse a tierra:

- 1) Las cubiertas o armaduras de cables o empalmes y terminales.
- 2) las pantallas electrostáticas de cables en empalmes y terminales.
- 3) El tanque de equipos como transformadores, interruptores, desconectores, interruptores de transferencia, protectores de red y cajas de derivación.
- 4) Los gabinetes de subestaciones blindadas y los soportes metálicos que puedan quedar energizados bajo condiciones anormales.

El uso de electrodos de tierra es comúnmente utilizado en terrenos de conductividad media y alta, para puesta a tierra de transformadores y otros equipos en líneas de distribución. En terrenos de alta resistividad se pueden utilizar varios electrodos en paralelo, conectados en diversas configuraciones entre sí o podemos usar algún otro método descrito en este mismo capítulo, e

incluso podemos combinarlos, de tal manera que se disminuya la resistencia a tierra del sistema.

SISTEMA DE TIERRA PARA CONTROL DE ELECTRICIDAD ESTÁTICA

Como sabemos, la carga estática es debida a un exceso o deficiencia de electrones. El potencial desarrollado debido a la carga eléctrica está relacionado con la cantidad de carga depositada en un cuerpo y a la capacitancia de dicho cuerpo. La relación puede expresarse a través de la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{C}$$

Donde:

V = Potencial en V

Q = Carga en C

C = Capacitancia en F

La electricidad estática en equipos puede producir potenciales peligrosos.

La descarga de una acumulación de electricidad estática de un objeto a otro con diferente potencial puede dañar los equipos electrónicos, causar fuego o una explosión.

La electricidad estática no puede ser evitada, pero si puede ser controlada. Los principales métodos de control son los siguientes:

1) Conexión a tierra de partes conductoras que no tengan la finalidad de usarse para transportar corriente.

- 2) Control de la humedad.
- 3) Pisos adecuados.
- 4) precauciones especiales.

El método del que nos ocupamos en este trabajo es el de conexión al sistema de tierra, sin embargo éste puede combinarse con algún otro para lograr un mejor control.

En lo referente a pisos, más adelante veremos la utilización de pisos conductivos en áreas especiales como son quirófanos y otros sitios.

Algunos problemas de la electricidad estática pueden solucionarse mediante la unión de varias partes de los equipos mediante conductores conectados al sistema de tierra minimizando la diferencia de potencial entre objetos y tierra. En las figuras siguientes (6.7 y 6.8) se ilustra la diferencia entre objetos aterrizados y objetos aislados.

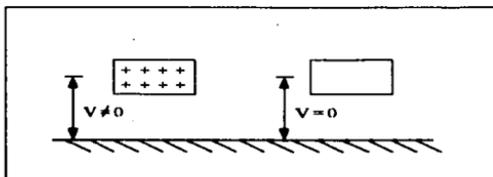


Figura 6.7.- Objetos cargado y descargado aislados de tierra.

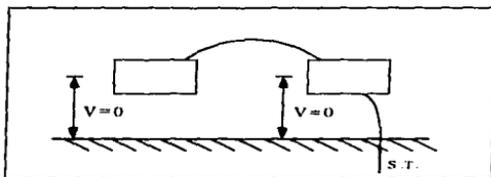


Figura 6.8. - Objetos conectados y puestos a tierra.

PUESTA A TIERRA DE PARARRAYOS

El número de electrodos de tierra está en función del número de bajadas del pararrayos. Cada conductor de bajada debe terminar en un electrodo de tierra ya que la trayectoria debe ser la más directa posible. Los conductores de tierra y los electrodos no se deben usar en otras aplicaciones, es decir, deben ser exclusivamente para los pararrayos.

La Norma Mexicana (NOM-001-SEMP-19994) hace referencia a las puestas a tierra de los pararrayos en los siguiente artículos:

250-86 Uso de electrodos de pararrayos. Los electrodos de puesta a tierra de los pararrayos no se debe usar como puesta a tierra de equipos y sistemas. Esta prohibición no está en contra de la unión de los diferentes sistemas de puesta a tierra.

250-46 Separación a los pararrayos. Las canalizaciones metálicas, cubiertas, estructuras u otras partes metálicas de equipos eléctricos que no transportan corriente, se mantendrán a 1.80 m de distancia, por lo menos, de los

conductores de bajada de los pararrayos, si esto no es posible, deben tener puentes de unión a los electrodos o varillas.

En cuanto al valor de resistencia a tierra del electrodo para apartarrayos la norma no maneja un valor, por lo que como máximo se recomienda 10 Ω .

PUESTA A TIERRA PARA COMPUTADORAS Y EQUIPO SENSIBLE

En lugares especiales donde se requiera una resistencia a tierra con un valor bajo, como pueden ser edificios que contengan equipos sensibles (de cómputo, de comunicaciones, equipo médico, etc.) o equipo electrónico en general, se debe recurrir al uso de electrodos contruidos especialmente para tal función, dichos electrodos han sido descritos anteriormente.

El valor de la resistencia a tierra de los electrodos para equipo sensible es bastante menor al que la NOM-001-SEMP-1994 pide para instalaciones de baja tensión, los valores solicitado por los fabricantes generalmente son 1, 3 ó 5 Ω .

Los fabricantes de computadoras y otros equipos sensibles piden que sus equipos sean puestos a tierra a través de un sistema de tierra aislado (STA), separado del sistema de tierra general (ST). Con el propósito de aislar el equipo contra el ruido eléctrico que se presenta.

El problema principal que se presenta en conectar el equipo sensible al ST no viene del ruido, si no de conectarlos al sistema en varios puntos; como se muestra en la figura 6.9, al aterrizar el equipo en diferentes puntos formamos un circuito por el cual van a fluir corrientes, que pueden generar fallas en el equipo debido a las diferencias de potencial que se van a presentar entre los puntos de conexión.

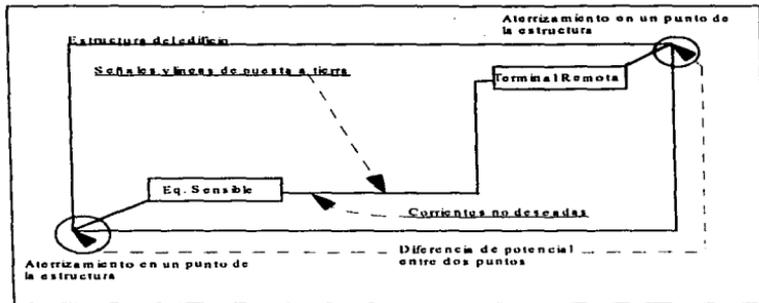


Figura 6.9.- Diferencias de potencial entre varios puntos en el sistema de tierra.

Sistema de Tierra Aislado

En un STA para equipo sensible se pueden presentar las siguientes condiciones:

- Cuando el equipo sensible es conectado en un punto común, aislado del ST, como se muestra en la figura 6.10, el ruido no se introduce en nuestro equipo.
- Si ocurre algo que eleve el potencial de la tierra del edificio con respecto a una tierra remota, se presentarán diferencias de potencial importantes entre el equipo y la tierra del edificio. Esto puede presentarse debido a descargas atmosféricas sobre el edificio o las líneas de suministro de energía. Esta descarga y la capacitancia entre el edificio y el equipo, se combinan y desarrollan un voltaje

apreciable en el equipo y sus componentes, destruyendo varios de los semiconductores del equipo electrónico.

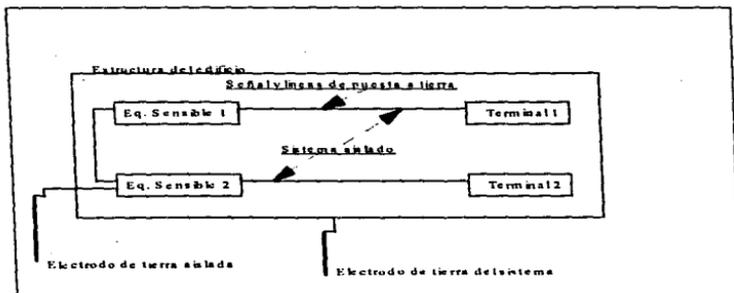


Figura 6.10.- Sistema de Tierra Aislado.

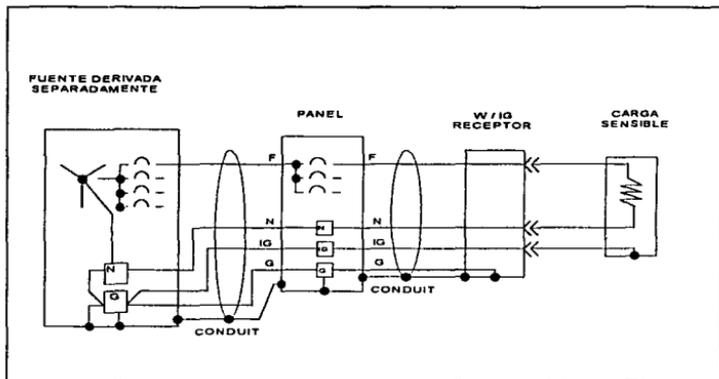


Figura 6.11.- Conductor de tierra aislado (IG) a través del tablero de control.

Sistema de Tierra Común

Al conectar los diferentes sistemas de tierra se limitan las diferencias de potencial entre ellos y los sistemas involucrados.

Los circuitos de tierra de la unidad principal y de las unidades remotas de algún otro sistema, se conectan con cable aislado, en un punto común del sistema de tierra del edificio. El punto preferido es el punto en el cual se deriva el sistema eléctrico o el secundario del transformador que alimenta a las computadoras o al equipo sensible, pero puede ser algún otro punto en el sistema de tierras del edificio.

Los conductores de puesta a tierra de los sistemas separados de la unidad principal y de las terminales, son conectados juntos, aislados de todos los demás sistemas, excepto de la terminal de tierra de la unidad principal de todos los sistemas que estén aterrizados con cable aislado en un punto del ST. Este punto puede ser el mismo en el cual los otros sistemas están puestos a tierra, o este puede ser un punto diferente. Esto se ilustra en la figura 6.12.

La unidad remota, del circuito de puesta a tierra del equipo está aterrizado a través del sistema de tierra del edificio.

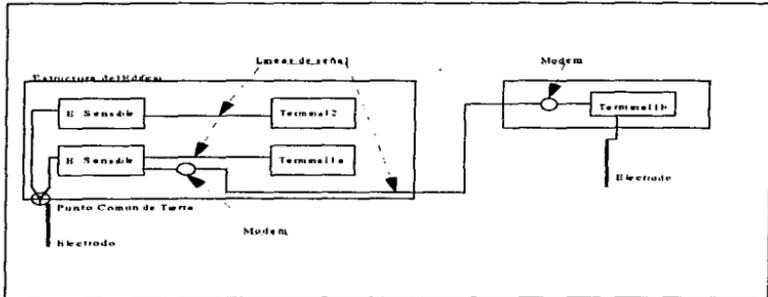


Figura 6.12.- Sistema de tierra común.

Transformador de Aislamiento.

Los transformadores de aislamiento proveen un punto de tierra local y atenúan los disturbios en modo común que se presentan en los conductores de la fuente. Los transformadores de aislamiento son capaces de eliminar las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales, utilizando una conexión en delta en el primario con lo cual dichas corrientes no son vistas en el secundario, conectado en estrella. Los transformadores de aislamiento instalados con interruptores de distribución tienen la ventaja de estar muy cerca de la carga sensible; esta configuración provee longitudes cortas de cable que limitan la cantidad de ruido que puede ser acoplado en los conductores. En la figura 6.13 se ilustra la conexión de un transformador de aislamiento.

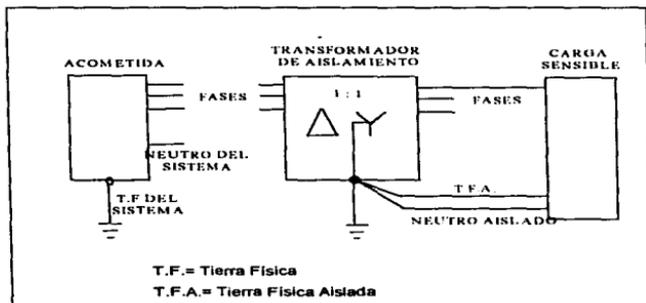


Figura 6.13.- Transformador de aislamiento.

SISTEMAS DE TIERRA EN HOSPITALES

La seguridad en el manejo de la energía eléctrica necesaria en todas las instalaciones de hospitales, requiere de un grado mayor de cuidado en ciertas áreas, siendo las más importantes y de mayores medidas de control sin duda los quirófanos, terapia intensiva, ya que de los instrumentos e instalaciones eléctricas depende la seguridad tanto de los pacientes como del personal médico.

Los quirófanos, sin embargo, no son las únicas áreas que deben contar con un buen sistema de tierra, debemos incluir también el equipo de cómputo, de comunicación, de aire acondicionado, los sistemas de protección contra descargas atmosféricas como pararrayos, etc.

Los sistemas de pararrayos son muy importantes para la protección del equipo contra descargas atmosféricas, ya que en la actualidad los equipos médicos están compuestos por microcircuitos que son muy vulnerables a las sobretensiones, por lo que es necesario contar con una protección con alto porcentaje de confiabilidad.

Quirófanos

El sistema de puesta a tierra de los quirófanos requiere de atención especial ya que la vida de las personas está de por medio. Corrientes de 20 μA o menores en circuitos que monitorean y regulan funciones fisiológicas de los pacientes, puede ser fatal. Para dar seguridad debemos diseñar el sistema, de tal manera que las corrientes inducidas no excedan los 10 μA .

Las salas de quirófanos necesitan contar con sistemas de tierra separadas y métodos de control de cargas electrostáticas. Es decir, que los niveles de producción de electricidad estática sean casi nulos, ya que en estos

lugares se usan comúnmente sustancias altamente inflamables, como son el éter etílico, ciclopropano, etileno, oxígeno, etc.

Para controlar la electricidad debemos tomar en cuenta los siguientes medios:

- Instalación de Pisos Conductivos
- Puesta a tierra de las partes metálicas de los equipos

Se deben poner a tierra aparatos eléctricos y electrónicos como:

- Electrocardiogramas
- Osciloscopios
- Desfibriladores
- Radios
- Televisores
- Generadores de Vapor
- Cauterizadores Eléctricos

Pisos Conductivos

Cuando el piso es conductor o semiconductor, la acumulación de cargas electrostáticas se reduce considerablemente, por lo que en caso de quirófanos y de lugares especiales dentro de los hospitales como son salas de aislamiento, salas de trasplantes, etc. es recomendable instalar este tipo de pisos.

En la mayoría de los casos se usa piso falso, no así en los hospitales, en los cuales el piso está directamente sobre el firme de cemento.

Los pisos conductivos pueden ser de dos tipos:

- **Linóleo Conductivo.** Es un tejido formado con una base de tela de algodón con impermeabilizante termoplástico integrado, empleado para transmitir cargas electrostáticas.

- **Terrazo Conductivo.** Es una mezcla de granos de mármol, sales de magnesio, pigmentos y cemento blanco, empleado para transmitir cargas electrostáticas.

Linóleo Conductivo

En caso de Linóleo Conductivo el proceso de instalación será el siguiente:

- 1.- Instalación de cintas de cobre sobre el cemento.
- 2.- Instalación de loseta conductiva.

El piso base debe ser de firme de concreto pulido a máquina, libre de grietas, grasas y materia suelta. Una vez preparado el piso se recortan sobre el las cintas de cobre de acuerdo a las dimensiones del lugar, cuidando que las uniones del linóleo queden en el centro de la cinta. Para unir las cintas con el piso base, se usa adhesivo de contacto (Resistol 5000) y en caso de ser necesario tornillos. La unión entre cintas se debe hacer mediante soldadura metálica cuya composición sea de 5% plomo y 95% estaño.

Para la colocación del linóleo, se extienden los lienzos en el área donde se va a instalar, debiendo cubrir el zocio hasta el paño de recubrimiento vertical. Los lienzos se unen por la parte central de la cinta, las orillas de las juntas se dejan al final con objeto de facilitar la colocación de grapas entre lienzos y pegarlos después con adhesivo de contacto tipo Resistol 5000.

La cinta de cobre del piso debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Dimensiones mínimas de la cinta: 5 cm de ancho y 0.5 mm de espesor.
- Separación máxima de la cinta de 60 cm.

En el caso de piso de linóleo debe cumplirse los siguientes requisitos:

- Resistencia máxima de 1 M Ω entre dos electrodos distanciados 91 cm.
- Resistencia máxima de 25 k Ω entre un punto cualquiera y la barra de tierra.
- Se debe evitar el uso de ceras, solventes o aceites en el piso.
- La unión de las losetas debe quedar sobre la cinta de cobre.

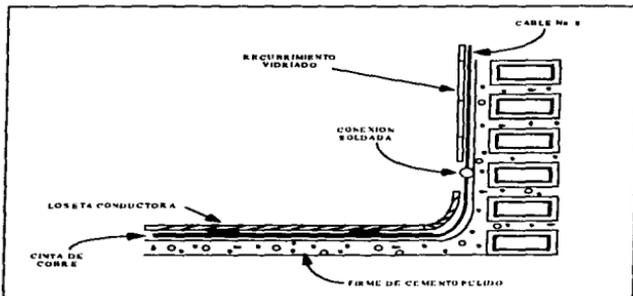


Figura 6.14.- Instalación de piso de linóleo.

Terrazo Conductivo

El piso base debe estar constituido por un firme de concreto con acabado áspero. Sobre el firme de concreto se aplica una capa de adhesivo impermeabilizante (látex, que contiene arena sílica y sulfato de magnesio) de aproximadamente 3 mm de espesor y se deja secar.

Una vez seco el adhesivo, se coloca alambre de cobre desnudo No. 10 AWG en forma perimetral, pegándolo con adhesivo de contacto tipo Resistol 5000, quedando ahogado en el terrazo.

La preparación de agua para la mezcla de un metro cuadrado es la siguiente:

5.5 litros de agua natural con cloruro de calcio y 0.33 litros de agua natural con 11.6 g de pigmentos colorantes, finalmente se revuelven las dos muestras anteriores.

La preparación del mortero para un metro cuadrado es la siguiente:

14 kg de mármol del número 2 o 2 1/2, 3.3 kg de sales de magnesio, 3.3 kg de cemento fraguado rápido tipo 3; se agrega la solución de agua descrita anteriormente. El vaciado se realiza en franjas de 1 m de ancho y se hará de manera que se incluyan zoclos integrales del terrazo.

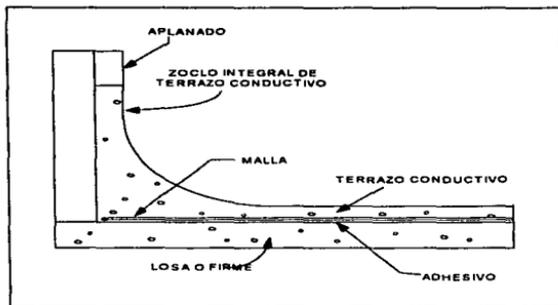


Figura 6.15.- Instalación de piso con terrazo conductivo.

DISEÑO DE SISTEMAS DE TIERRA PARA EQUIPO SENSIBLE

El diseño de este sistema de tierra que describiremos a continuación se utiliza en equipos de cómputo, comunicaciones, robótica, equipo médico, etc.

Los sistemas de tierra en baja tensión no se diseñan en base a potenciales de paso o contacto, por lo que el número de pasos de diseño se reduce a los siguientes:

Paso 1.- Resistividad y área que ocupara la malla.

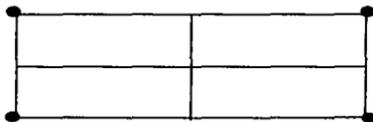
En este paso se obtiene el valor de resistividad del terreno por alguno de los métodos descritos anteriormente. También necesitamos conocer el área disponible para nuestra malla.

Paso 2.- Calibre del conductor.

El calibre del conductor mínimo de acuerdo a la norma es 4/0.

Paso 3.- Diseño inicial.

El diseño inicial es en base a una malla como se muestra en la siguiente figura:



Paso 4.- Cálculo de la resistencia a tierra de la malla

La resistencia a tierra de la malla la podemos calcular mediante las formula de Laurent Niemann:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L_T}$$

Donde:

r = Radio de una circunferencia con un área igual a la de la malla.

L_T = Longitud total ($L_c + L_v$).

L_v = Longitud total de las varillas.

L_c = Longitud total del conductor que forma la malla.

Paso 5.- Comparar el valor de resistencia a tierra solicitado con el obtenido

$$R_{\text{Teobtenida}} \leq R_{\text{Tsolicitada}}$$

Si esto se cumple el diseño es correcto, de no cumplirse procederemos a rediseñar la malla, de tal manera que cumplamos la condición anterior.

EJEMPLO DE DISEÑO

- Se requiere diseñar una malla de tierra para un sistema de computo, la resistencia a tierra máxima requerida por los fabricantes del equipo es de 1Ω .

Paso 1

La resistividad del terreno que resulto de las mediciones usando alguno de los métodos descritos anteriormente es de $25 \Omega\cdot\text{m}$. El área disponible para nuestra malla es de $8 \times 4 = 32 \text{ m}^2$.

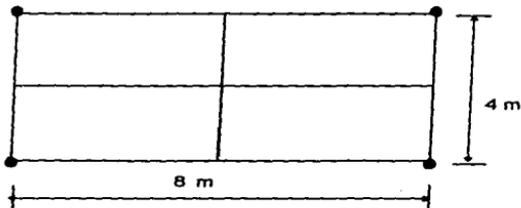
Paso 2

El conductor a usar en la construcción de la malla es $4/0$.

La longitud de cada varilla es de 3 m.

Paso 3

Diseño inicial:



Paso 4.- Cálculo de la resistencia a tierra

$$\text{Área} = 8\text{m} \times 4\text{m} = 32 \text{ m}^2$$

El radio de un círculo con un área de 32 m² es:

$$r^2 = A/\pi \quad r = \sqrt{A/\pi} \quad r = \sqrt{32/\pi} = 3.2 \text{ m}$$

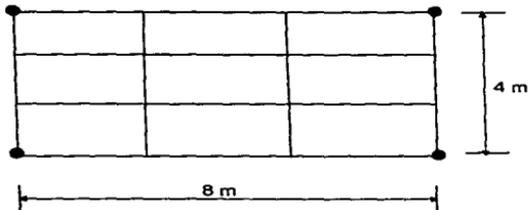
$$LT = Lc + Lc = (24+12) + (3 \times 4) = 48 \text{ m}$$

$$R_T = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L_T} = \frac{25}{(4)(3.2)} + \frac{25}{48} = 1.95 + 0.52 = 2.47$$

Paso 5

Como podemos ver, la resistencia a tierra es mayor que la que nos piden, por lo que debemos modificar el diseño.

Paso 3¹.- Diseño nuevo



Paso 4¹.- Cálculo de resistencia a tierra

$$\text{Área} = 8\text{m} \times 4\text{m} = 32 \text{ m}^2$$

El radio de un círculo con un área de 32 m² es:

$$r^2 = A/\pi \qquad r = \sqrt{A/\pi} \qquad r = \sqrt{32/\pi} = 3.2 \text{ m}$$

$$L_T = L_c + L_c = (32+16) + (3 \times 4) = 60 \text{ m}$$

$$R_T = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L_T} = \frac{25}{(4)(3.2)} + \frac{25}{60} = 1.95 + 0.41 = 2.36 \Omega$$

Si agregamos bentonita reducimos el valor de resistencia a tierra a aproximadamente el 40%, por lo que queda:

$$R_T = 0.4 \times 2.36 = 0.94 \Omega$$

Como podemos ver, este valor es menor que el solicitado por lo que: el diseño es correcto.

CONCLUSIONES

Como hemos podido ver en el desarrollo de este trabajo, los sistemas de tierra tienen una función muy importante, tanto en los sistemas de generación, transmisión y distribución como del lado del usuario que necesita proteger sus equipos electrónicos sensibles a sobretensiones.

Los equipos modernos son muy sensibles debido a que la microelectrónica cada vez en una misma área concentra más circuitos, que requieren niveles de voltaje y energía bajos, por lo tanto, fáciles de dañar. En la actualidad este tipo de tecnología produce cada vez más cargas industriales, comerciales y residenciales.

La mayor causa de las fallas de equipo electrónico son generalmente causadas por descargas atmosféricas, descargas electrostáticas y por maniobras en el sistema. Debido a esto no podemos olvidarnos de la instalación de sistemas de tierra para la protección en baja tensión, ya que en el sistema de distribución le concierne a la compañía suministradora la protección de dicho sistema.

En la actualidad se emplean diversos métodos de puesta a tierra para la protección en baja tensión, entre los cuales se han mencionado en este trabajo son: los de tierra aislada, tierra común.

En cuanto al uso de sistemas de tierra aislada y sistema de tierra común existen ventajas y desventajas de cada una de ellas, sin embargo, no existen estudios ni estadísticas suficientes que nos puedan decir cual es mejor. Incluso existen diferencias de criterios, mientras que en el NEC y la NOM-001-SEMP-1994 recomiendan tener tierras comunes, los fabricantes de equipos sensibles piden para sus productos sistemas de tierra aislados.

La tierra aislada puede ser efectiva o no en la eliminación, o reducción de ruido eléctrico indeseable. Su efectividad depende principalmente del diseño y la forma de conectarla al neutro del sistema. Si se opta por una tierra aislada al momento de realizar una instalación eléctrica se deben tomar en cuenta varias consideraciones para el buen funcionamiento de ésta. Es necesario saber a que distancia podemos colocar una de otra para evitar la influencia mutua y que se presenten potenciales peligrosos que puedan dañar nuestros equipos. El artículo 250-83 inciso d) de la NOM nos indica la distancia que debe existir entre los sistemas de tierra, sin embargo, algunos textos de la IEEE dan algunas fórmulas para el cálculo de tal distancia.

Algunas de las principales desventajas del uso de los sistemas de tierra común son: el ruido presente en la red de tierra debido a que suelen conectarse diversos equipos a ésta en diferentes puntos, por tal motivo los fabricantes no aceptan conectar sus equipos a dicha tierra.

En lo que respecta a los valores de resistencia a tierra, la NOM nos recomienda un valor de 10 ohms para el sistema de pararrayos y subestaciones; por otro lado, los fabricantes de equipos de comunicación nos exigen valores de 3 a 5 ohms, los de cómputo solicitan valores de 1 a 3 ohms, además de que sus equipos deben de estar puestos a tierra de forma independiente. Esto nos trae problemas importantes, ya que nos crean diferencias de potencial entre un sistema y otro, y al existir diferentes valores de resistencia fluirán corrientes al sistema que tenga menor valor de resistencia que generalmente es nuestro equipo sensible, ocasionándole daños.

Después de haber analizado el problema del daño a nuestros equipos sensibles debido a sobretensiones proponemos que todos nuestros sistemas de tierra del edificio, industria, fábrica, instalaciones médicas, etc., sean del mismo valor de resistencia, siendo éste el valor más bajo posible, de acuerdo a las

condiciones del lugar, y utilizando los métodos para disminuir la resistencia a tierra descritos en el presente trabajo; sin olvidar que el aspecto económico es un factor fundamental en cualquier proyecto de ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book)

IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment (IEEE Emerald Book)

**Lightning Protection Code
NFPA 78**

NOM-001-SEMP-1994

Norma Oficial Mexicana

Relativa a las instalaciones destinadas al suministro y uso de la energía eléctrica.

**Guillermo Lopez Monroy
Sistemas de Tierra en Redes de Distribución**

**Roberto Espinosa y Lara
Sistemas de Distribución
Editorial Noriega-Limusa**

**D. W. Zipse, Fellow, IEEE
Lightning Protection Systems: Advantages and Disadvantages
IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, Sept/Oct 1994**

**M. O. Durham, Fellow, IEEE
Lightning, Grounding and Protection for Control Systems
IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, Ene/Feb 1995**

Rives García Raul, Gonzales Enrique Segura
Evaluación del Contenido de Armónicas en el Sistema de Distribución de
Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A.
Departamento de laboratorio, CLyFC

R. G. Black
Protección Contra Descargas Atmosféricas Mediante Apartarrayos.

Espinosa y Lara Roberto, Lopez Monroy Guillermo
Aplicación de Apartarrayos de Oxido de Zinc en Sistemas de Distribución.
CLyFC

J. Majumdar
Conexión a Tierra de Sistemas y Equipos Eléctricos

Sistema de Puesta a Tierra en Redes de Distribución
Norma CLyFC

Gonzales Sánchez Baldomero
Técnicas de Protección contra el Riesgo Eléctrico en Instalaciones de Baja
Tensión.
Metalurgia y Electricidad, No.602 Jul/Agos 1988

J. V. Schmill
Cálculo de Redes de Tierra
CLyFC

R. H. Lee, Fellow
Grounding of Computers and Other Similar Sensitive Equipment
IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 1A-23, May/Jun 1987

R. J. Buschart

Computer Grounding and the National Electrical Code

IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 1A-23, May/June 1987

H. G. Sarmiento Uruchurtu, R. Velázquez Sánchez

Aspectos de la calidad de la Energía Suministrada a Industrias con Equipo Sensible

Boletín IIE Nov/Dic 1993

R. Espinosa y Lara, G. Lopez Monroy, A. López santamaria

Perturbaciones en la Energía Eléctrica en Mediana y Baja Tensión CLyFC

Espinosa y Lara Roberto, Lopez Monroy Guillermo

Protección de Estructuras contra Descargas Atmosféricas CLyFC

O. Melville Clark, R.E. Gaverder

Lightning Protection for Microprocessor Based Electronic Systems

IEEE, Paper No. PCIC 89-44

Warren H. Lewis

The Use and Abuse of Insulated/Insolated Grounding

IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.25, No.6 Nov/Dic 1989

Victor J. Maggioli

Grounding and Computer Technology

IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-23, No.3, May/June 1987.