ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

"Criterios de seguridad en la aplicación de Puesta a tierra en instalaciones eléctricas de edificios"

INFORME DE MATERIA DE GRADUACION

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Presentada por:

Michael Patricio Villa García

GUAYAQUIL - ECUADOR
2010

AGRADECIMIENTO

A Dios porque gracias a él podemos alcanzar nuestros objetivos.
A mis padres por brindarme todo su apoyo incondicional en este largo trayecto hasta poder cumplir esta importante meta.
A mis hermanos por creer en mí en todo momento.
A ¡¡Ethan Joel, mi sobrino!! por recordarme que esta vida es una constante lucha por conseguir lo que queremos y darlo todo sin cansancio, fortaleciendo así las ganas de lograr mis metas.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, hermanos, amigos; y en especial a una personita que se ganó mi admiración: Mi sobrinito ¡¡ Ethan Joel!!

TRIBUNAL DE SUSTENTACION

Ing. Juan Gallo Galarza	Ing. Damián Larco
PROF. MATERIA DE GRADUACION	PROF. DELEGADO DEL DECANO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Michael Patricio Villa García

RESUMEN

Este trabajo consiste en crear consciencia de la importancia de los sistemas de puesta a tierra en edificios, para lo cual empezamos definiendo en si el concepto de sistema de tierra y su objetivo principal el cual es reducir en lo mas posible los efectos negativos de la corriente sobre el cuerpo humano.

Analizamos detenidamente cada uno de los elementos que participan en el sistema utilizando los criterios de seguridad aplicables según las normas y reglamentaciones internacionales vigentes, con la finalidad de que en nuestro país se tome con más cautela la utilización de un SPAT en las instalaciones eléctricas.

Presentamos varios esquemas de SPAT para demostrar las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, dependiendo del tipo o cantidad de cargas que puede presentar el edificio a diseñarse, o también para rectificación del SPAT en edificios existentes

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

INTRODUCCION

La puesta a tierra constituye una parte intrínseca del sistema eléctrico, aunque permanece en general como un tema mal comprendido y a menudo se refiere a él como un "arte oscuro"- algunas veces incluso por bien calificados ingenieros. En los años recientes han existido rápidos desarrollos en el modelamiento de sistemas de puesta a tierra, principalmente facilitados por los nuevos recursos y procedimientos computacionales. Esto ha incrementado nuestra comprensión del tema, al mismo tiempo que la actividad de diseño ha llegado a ser significativamente más difícil y las nuevas normas están requiriendo un diseño seguro y más detallado.

En la actualidad existen muchas publicaciones sobre este aspecto de puesta a tierra que sobre cualquier otro y el propósito de esta tesina es proporcionar solo una visión global de los más importantes aspectos de puesta a tierra en el interior de edificios. Quién requiera una revisión más detallada puede referirse a las normas y libros que se indicaran posteriormente.

El principal objetivo de las normas referentes al tema es proteger a las personas, la propiedad y otros seres vivos contra riesgos que provengan de la instalación eléctrica. La puesta a tierra es fundamental en la mayoría de las prácticas para obtener seguridad. El sistema de puesta a tierra debe proporcionar un camino directo a tierra para las corrientes de falla a la vez que minimizar potenciales de paso y contacto. La función secundaria es contribuir a reducir perturbaciones y servir como una referencia de voltaje común para equipo electrónico sensible. Sin embargo, con el creciente uso de este tipo de equipo, particularmente computadores, hay una mayor conciencia de la importancia de esta función secundaria del sistema de puesta a tierra. Esto está conduciendo a un consenso de opinión de que el sistema de puesta a tierra debe diseñarse como un sistema global tal que satisfaga los requisitos de seguridad y de comportamiento.

Normas y Reglamentacion

Las normas proporcionan los límites de diseño que deben satisfacerse y (conjuntamente con los reglamentos de práctica), explican cómo pueden diseñarse los sistemas de puesta a tierra para ajustarse a ellos. Los sistemas de puesta a tierra en general y más aun esta tesina deben cumplir con las partes aplicables de la última edición de las normas y reglamentaciones internacionales que se indican a continuación:

- En el ámbito internacional, es muy conocido y empleado el grupo de estándares del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers)

- National Electrical Manufactures Association (NEMA)

- Norma Eléctrica Mexicana (NOM-001, SEDE 2005)

    - 210-8. Protección de las personas mediante interruptores de circuito por falla a tierra
    - 215-9. Protección de las personas mediante interruptores de circuito por falla a tierra.
    - Artículo 250 Puesta a tierra
    - 250-74. Conexión de la terminal de puesta a tierra de un receptáculo a la caja.
    - 250-42. Equipo fijo o conectados de forma permanente.

- NCH Eléc. 4/84 Electricidad. Instalaciones interiores en baja tensión - Punto 10 Puesta a tierra.(Norma reglamentaria chilena)

- Recomendaciones del IEEE-80 STD-2000 Guide for safety in AC Substation Grounding

- Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2 345

- Reglamento de seguridad del trabajo contra riesgos en instalaciones de energía eléctrica (acuerdo No. 013) Ministerio de Trabajo Ecuatoriano.

CAPITULO I

1. SISTEMAS DE TIERRA

1.1. DIFERENCIA ENTRE NEUTRO Y TIERRA

La diferencia de estos dos elementos es que el neutro lo usamos como regreso de nuestra línea de alimentación o en otras palabras es por donde pasa la corriente de regreso a los postes de suministro eléctrico.

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

1.2. CONCEPTO Y OBJETIVOS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La definición de la IEEE de puesta a tierra es:

"Tierra (sistema de tierra). Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra". {1}

Es posible operar un sistema eléctrico sin una tierra, sin embargo las razones que más frecuentemente se citan para tener un sistema aterrizado, son:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.

- Asegurar que seres vivos presentes en la vecindad de las subestaciones eléctricas de un edificio no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.

- Mantener los voltajes del sistema dentro de límites razonables bajo condiciones de falla (tales como descarga atmosférica, ondas de maniobra o contacto inadvertido con sistemas de voltaje mayor), y asegurar que no se excedan los voltajes de ruptura dieléctrica de las aislaciones.

• Limitar el voltaje a tierra sobre materiales conductivos que circundan conductores o equipos eléctricos.

Otras razones citadas menos frecuentemente, incluyen:

- Estabilizar los voltajes fase a tierra en líneas eléctricas bajo condiciones de régimen permanente, por ejemplo, disipando cargas electrostáticas que se han generado debido a nubes, polvo, aguanieve, etc.

• Una forma de monitorear el aislamiento del sistema de suministro de potencia.

• Para eliminar fallas a tierra con arco eléctrico persistente.

• Para asegurar que una falla que se desarrolla entre los enrollados de alto y bajo voltaje de un transformador pueda ser manejada por la protección primaria.

• Proporcionar una trayectoria alternativa para las corrientes inducidas y de tal modo minimizar el “ruido” eléctrico en cables.

• Proporcionar una plataforma equipotencial sobre la cual pueda operar equipo electrónico. Para desempeñarse adecuadamente cumpliendo cualquiera de las funciones anteriores, el sistema de tierra debe generalmente tener una baja impedancia, de modo que ya sea dispersando o recogiendo corriente desde el terreno, no se produzca un aumento de voltaje excesivo.

Por supuesto en el interior de edificaciones es también necesaria una conexión a tierra, para asegurar la correcta operación del equipo por ejemplo dispositivos electrónicos, donde puede ser necesaria una pantalla a tierra. Es esencial considerar la puesta a tierra en una instalación global como un sistema completo y, por lo tanto, diseñarla e instalarla correspondientemente.

La puesta a tierra de instalaciones eléctricas está relacionada en primer lugar con la seguridad. El sistema de puesta a tierra se diseña normalmente para cumplir dos funciones de seguridad. La primera es establecer conexiones equipotenciales. Toda estructura metálica conductiva expuesta que puede ser tocada por una persona, se conecta a través de conductores de conexión eléctrica. La mayoría de los equipos eléctricos se aloja en el interior de cubiertas metálicas y si un conductor energizado llega a entrar en contacto con éstas, la cubierta también quedará temporalmente energizada.

La conexión eléctrica es para asegurar que, si tal falla ocurriese, entonces el potencial sobre todas las estructuras metálicas conductivas expuestas sea virtualmente el mismo. En otras palabras, la conexión eléctrica iguala el potencial en el interior del local, de modo que las diferencias de potencial resultantes son mínimas. De este modo, se crea una "plataforma" equipotencial.

Si una persona está en contacto simultáneamente con dos piezas diferentes de una estructura metálica expuesta, el conductor de conexión eléctrica debiera garantizar que la persona no reciba un choque eléctrico, haciendo que la diferencia de potencial entre los equipos sea insuficiente para que esto ocurra. El mismo principio se aplica en el interior de grandes subestaciones eléctricas, industrias y edificaciones. En la casa, la conexión eléctrica garantiza que si ocurriese una falla a la cubierta metálica de una máquina lavadora u otro electrodoméstico, cualquier persona que estuviese tocando en el momento de falla simultáneamente uno de estos equipos y el estanque metálico, no experimentaría un choque eléctrico.

La segunda función de un sistema de puesta a tierra es garantizar que, en el evento de una falla a tierra, toda corriente de falla que se origine, pueda retornar a la fuente de una forma controlada. Por una forma controlada se entiende que la trayectoria de retorno está predeterminada, de tal modo que no ocurra daño al equipo o lesión a las personas. La conexión a tierra no es de capacidad infinita e impedancia nula. Sin embargo, la impedancia del sistema de tierra debiera ser lo bastante baja de modo que pueda fluir suficiente corriente de falla a tierra para que operen correctamente los dispositivos de protección, los cuales a su vez provocarán la operación de interruptores o fusibles para interrumpir el flujo de corriente. El diseñador de la protección calcula normalmente el valor requerido de impedancia a través de programas de análisis de fallas y este valor debe comunicarse a los responsables del diseño del sistema de puesta a tierra. Además, la elevación de potencial que experimentará el sistema de puesta a tierra mientras ocurre la falla, debiera ser limitada a un valor pre-establecido.

1.3. EFECTOS FISIOLOGICOS DE LA CORRIENTE ELECTRICA SOBRE EL CUERPO HUMANO

Los fenómenos fisiológicos que produce la corriente eléctrica en el organismo humano dependen del valor de la intensidad de la corriente, tiempo de duración del contacto, callosidad, sexo, estado de epidermis, peso, altura, estado de animo, estado del punto de contacto a tierra.

Respecto al concepto de alta o baja tensión, se debe de tener en cuenta que la corriente eléctrica provoca la muerte por fibrilación ventricular, al contrario de la de alta tensión, que lo hace por la destrucción de los órganos o por asfixia, debido al bloqueo del sistema nervioso.

Estos efectos fisiológicos sobre el cuerpo humano varían en función del valor de la intensidad, de acuerdo a la tabla 1.1:

INTENSIDAD	EFECTOS FISIOLOGICOS
1 a 3 mA	Prácticamente imperceptibles. No hay riesgo
De 5 a 10 mA	Contracciones involuntarias de músculos y pequeñas alteraciones del sistema nervioso
De 10 a 15 mA	Principio de tetanización muscular, contracciones violentas e incluso permanentes de las extremidades
De 15 a 30 mA	Contracciones violentas e incluso permanentes de la caja toráxica. Alteración del ritmo cardiaco
Mayor de 30 mA	Fibrilación ventricular cardiaca

Tabla 1.1 Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica

Fuente: www.procobre.org/archivos/pdf/download_biblioteca/PE/f_sist.conexion.pdf

Todos estos valores y efectos pueden variar según el tiempo que dure el paso de la corriente eléctrica.

Los valores máximos de intensidad y corriente son:

- Para tiempos inferiores a 150 milisegundos no hay riesgo, siempre que la intensidad no supere los 300 mA.
- Para tiempos superiores a 150 milisegundos no hay riesgo,

siempre que la intensidad no supere los 30 mA.

1.3.1 CAUSAS DE ACCIDENTES ELECTRICOS

- Falta de prevención
- Exceso de confianza
- Fallas técnicas
- Fallas humanas
- Imprudencia
- Ignorancia

Hay una fórmula que puede usarse para calcular la cantidad de corriente que pasa a través del cuerpo y es la siguiente:

I = K/t

En donde:

K = es una constante para hombres y mujeres y sus valores son los siguientes

K = 0.116 para mujeres (50Kg)

K = 0.157 para hombres (70Kg)

t = tiempo en segundos

Son por estos motivos que resulta necesario tomar las medidas de seguridad necesarias para evitar este tipo de accidentes y; contar con un sistema de puesta a tierra eficiente podemos evitar muchas lesiones ocasionadas por la corriente eléctrica, ya que en la actualidad casi todas nuestras actividades están vinculadas con el uso de la electricidad.

CAPITULO II

2. METODOLOGIAS DE APLICACIÓN DE PUESTA A TIERRA

2.1. RESISTIVIDAD DEL TERRENO

2.1.1. ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad del terreno se define como la resistencia que presenta 1m3 de tierra, y resulta de un interés importante para determinar en donde se puede construir un sistema de puesta a tierra.

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

NATURALEZA DEL TERRENO:

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

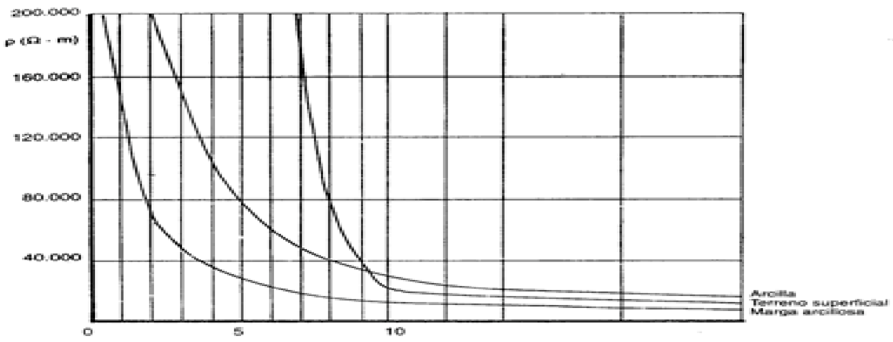
Tabla 2.1 Valores medios de la resistividad

Fuente: Resistividad del terreno y electrodos de puesta a tierra (U.P.S.)

NATURALEZA DEL TERRENO	VALOR MEDIO DE LA RESISTIVIDAD Ω.m
Terrenos cultivables, fértiles, terrenos compactos y húmedos	50
Terrenos cultivables poco fértiles	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

HUMEDAD:

Aquí varía la resistividad según la humedad del terreno, mientras mas húmedo sea éste mas baja será la resistividad del terreno y mientras mas seco esté el terreno mayor será la resistividad de éste, es por esta razón que debe procurarse un terreno un poco más húmedo para obtener mejores valores.



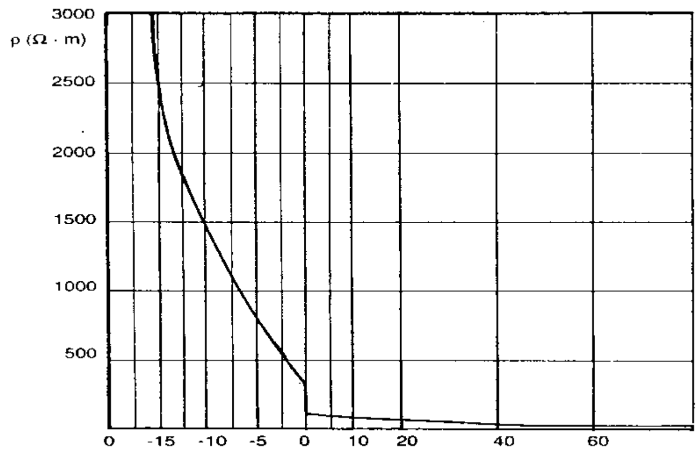
HUMEDAD EN % REFERIDA A TERRENO SECO

Figura 2.1 Variación de la resistividad en función de la humedad del terreno

Fuente: Resistividad del terreno y electrodos de puesta a tierra (U.P.S)

<u>TEMPERATURA:</u>

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



TEMPERATURA DEL TERRENO °C

Figura 2.2 Variación de la resistividad en función de la temperatura.

Fuente: Resistividad del terreno y electrodos de puesta a tierra (U.P.S)

SALINIDAD:

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

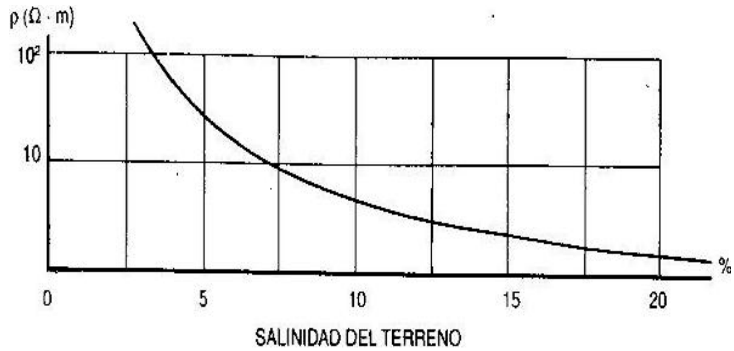


Figura 2.3 Variación de la resistividad en función de la Salinidad en %

Fuente: Resistividad del terreno y electrodos de puesta a tierra (U.P.S)

ESTRATIGRAFIA:

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

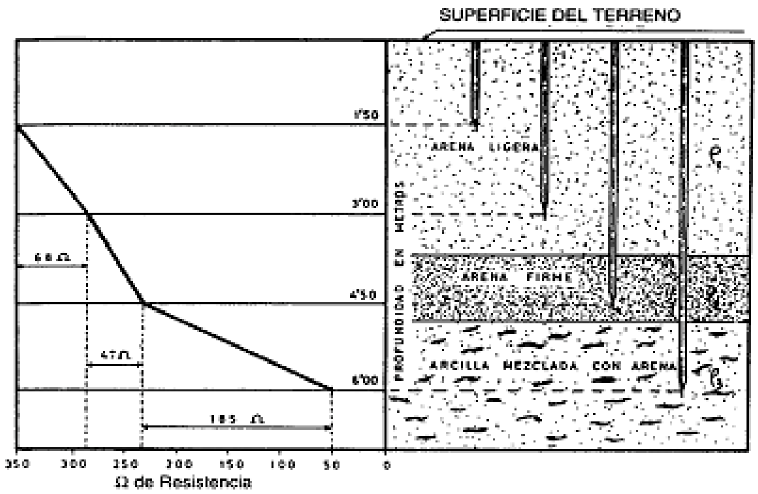


Figura 2.4 Variación de la resistividad en función de la Estratigrafía del Terreno

Fuente: Resistividad del terreno y electrodos de puesta a tierra (U.P.S)

COMPACTACION:

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

VARIACIONES ESTACIONALES:

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

Debido a la uniformidad del terreno, cuando se mide la resistividad del terreno en un punto, por cualquier método, el valor que se obtiene es llamado resistividad media o aparente.

Por esto se recomienda hacer varias mediciones en el terreno en diferentes posiciones y después sacar un promedio de estas para obtener un valor de resistividad más exacto.

2.2. METODO DE MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DE LOS TERRENOS

Hay que medir la resistencia de puesta a tierra de una instalación, y por lo tanto el valor de la resistividad del terreno, antes de dar el visto bueno de la instalación, pero también hay que comprobarla periódicamente en la época mas desfavorable.

Si conocemos el valor de la resistividad del terreno con anterioridad a instalar o decidir el tipo de electrodo que vamos a utilizar, tendremos la ventaja de elegir el sistema que técnico-económicamente pueda ser más rentable.

Existen varios métodos para calcular la resistividad del terreno del cual destacamos el método de Wenner. En este método el material necesario para hacer las mediciones es el siguiente:

- Instrumentos de medida de resistividades de cuatro bornes.
- Cuatro varillas para utilizarlas de electrodos.
- Cuatro cables aislados para conectar las picas a los bornes del aparato de medida, de una sección mínima de 1,5 mm^2.

La longitud de los cables es variable dependiendo de la profundidad a la que se quiere medir la resistividad.

2.2.1. METODO DE WENNER

Este método consiste en calcular la resistividad aparente del terreno colocando los cuatro electrodos, a distancias iguales, simétricamente separados de un punto central O debajo del cual queremos medir la resistividad el terreno.

El espesor de la capa de terreno de la que estamos midiendo la resistividad es directamente proporcional a la separación entre los electrodos, como se puede apreciar en la figura, y su valor es:

$$h = (3/4)\ a$$

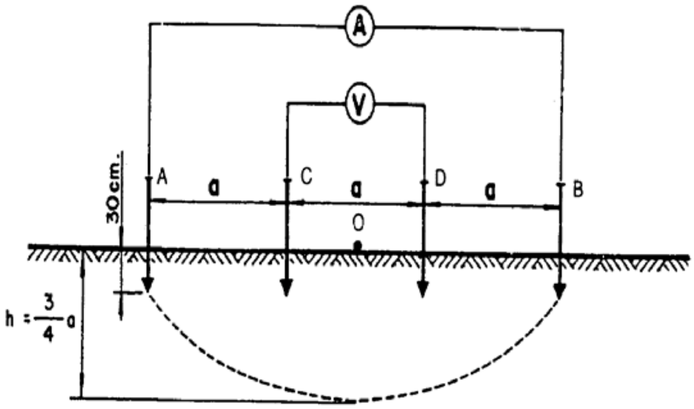


Figura 2.5

Fuente: Resistividad del terreno y electrodos de puesta a tierra (U.P.S)

Donde:

h= profundidad para la medida de la resistividad media

a= separación entre electrodos.

2.3. ELEMENTOS Y DISPOSITIVOS DE PUESTA A TIERRA

El sistema de puesta a tierra consta, principalmente, de:

a. Tomas de tierra.

b. Anillos de enlace.

c. Punto de puesta a tierra.

d. Líneas principales de tierra.

ESQUEMA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

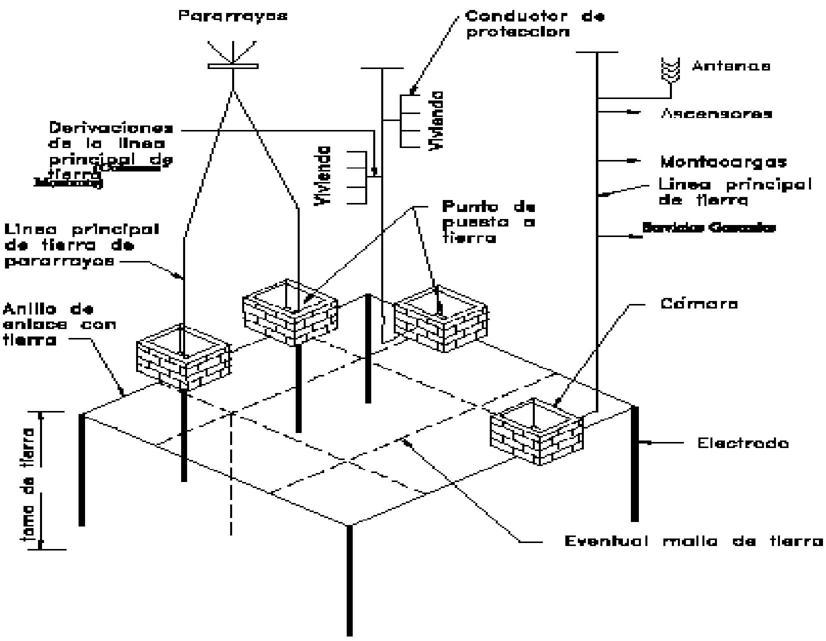


Figura 2.6

Fuente: curso de instalación de puesta a tierra (Pro-cobre)

a) **Tomas de tierra:**

Las tomas de tierra están formadas por los siguientes elementos:

Electrodos:

Los electrodos son elementos metálicos que permanecen en contacto directo con el terreno.

Los electrodos estarán construidos con materiales inalterables a la humedad y a la acción química del terreno. Por ello, se suelen usar materiales tales como el cobre, el acero galvanizado y el hierro zincado.

Según su estructura, los electrodos pueden ser:

- **Placas:** Serán placas de cobre o hierro zincado, de al menos 4 mm de grosor, y una superficie útil nunca inferior a 0.5 m^2. Se colocarán enterradas en posición vertical, de modo que su arista superior quede, como mínimo, a 50 cm bajo la superficie del terreno. En caso de ser necesarias varias placas, están se colocarán separadas una distancia de 3 m.

- **Varillas:** Pueden estar formadas por tubos de acero zincado de 60 mm de diámetro mínimo, o de cobre de 14 mm de diámetro, y con unas longitudes nunca inferiores a los 2 m. En el caso de ser necesarias varias varillas, la distancia entre ellas será, al menos, igual a la longitud.

- **Conductores enterrados:** se usarán cables de cobre desnudo de al menos 35 mm^2 de sección, o cables de acero galvanizado de un mínimo de 2.5 mm de diámetro. Estos electrodos deberán enterrarse horizontalmente a una profundidad no inferior a los 50 cm.

- **<u>Mallas metálicas:</u>** formadas por electrodos simples del mismo tipo unidos entre sí y situados bajo tierra.

En todos los casos, la sección del electrodo debe ser tal que ofrezca menor resistencia que la del conductor de las líneas principales de tierra. Puesto que la resistencia del electrodo depende de su forma, de sus dimensiones y de la resistividad del terreno, podemos usar como una primera aproximación los valores de las siguientes tablas.

Naturaleza del terreno	**Resistividad media, ρ_a (Ω x m)**
Terrenos cultivables fértiles y húmedos	50
Terrenos cultivables poco fértiles	500
Suelos pedregosos desnudos y arenas secas	3000

Tabla 2.2

Fuente: curso de instalación de puesta a tierra (Pro-cobre)

Tipo de electrodo	**Resistencia de Tierra (Ω)**
Placa vertical	$R = 0.8 \times \rho_a / P$
Pica vertical	$R = 2 \times \rho_a / L$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = 2 \times \rho_a / L$
$\square_a$ = resistividad media del terreno ($\square$ x m) P = perímetro de la placa L = longitud de la pica o cable (m)	

Tabla 2.3

Fuente: curso de instalación de puesta a tierra (Pro-cobre)

Como la tierra no tiene la misma resistividad en todos los puntos, pueden existir distintos potenciales entre dos placas de metal enterradas.

Por eso en un sistema de protección formado por múltiples placas, conectadas entre sí mediante una malla, se pueden originar campos electromagnéticos generados por la corriente de descargas a través del pararrayo y los electrodos de la toma de tierra. Además, con la caída de un rayo en las inmediaciones de un edificio, y fluir la corriente de descarga por la tierra, esta diferencia de potencial entre las tomas de tierra hará que por la malla circule una corriente, que puede crear campos eléctricos y magnéticos que afectarán negativamente a los aparatos electrónicos que se encuentren en el edificio. Para intentar reducir estos efectos, será necesario hacer uso de protecciones secundarias.

b) <u>Anillos de enlace con tierra</u>

El anillo de enlace con tierra está formado por un conjunto de conductores que unen entre sí los electrodos, así como con los puntos de puesta a tierra. Suelen ser de cobre de al menos 35 mm^2 de sección.

c) <u>Punto de puesta a tierra</u>

Un punto de puesta a tierra es un punto, generalmente situado dentro de una cámara, que sirve de unión entre el anillo de enlace y las líneas principales de tierra.

d) <u>Líneas principales de tierra</u>

Son los conductores que unen al **pararrayos** con los puntos de puesta a tierra. Por seguridad, deberá haber al menos dos trayectorias (conductores) a tierra por cada pararrayo para asegurarnos una buena conexión.

Así mismo, se deben conectar a los puntos de toma de tierra todas las tuberías metálicas de agua y gas, así como canalones y cubiertas metálicas que pudieran ser alcanzadas por un rayo.

Para reducir los efectos inducidos, estos conductores estarán separados un mínimo de 30 m, y cualquier parte metálica del edificio no conductora de corriente estará a un mínimo de 1,8 m.

2.4. DETALLES DE CALCULOS PARA UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Para efectuar un cálculo aproximado de la resistencia de puesta a tierra, se utiliza la expresión de Laurent {6}:

$$R = \frac{\rho}{4\sqrt{s/\pi}} + \frac{\rho}{L}$$

Donde:

ρ : Resistividad equivalente del terreno [Ohm-m]

S: superficie que cubre la malla [m2]

L: longitud total de conductor de la malla [m]

Ejemplo:

En un terreno de 100 [Ohm-m] de resistividad equivalente, una malla de 10x10 m2, con cuatro retículos (3 conductores en cada dirección, igualmente espaciados) y enterrada a 0,8 metros de profundidad, tiene una resistencia aproximada de:

R= 6,1 Ohm

La ecuación de Onderdonk permite seleccionar el conductor de cobre y la unión adecuada para evitar la fusión:

$$Acon = \frac{1mm^2}{1550 * 1.27324} * \frac{IG * amp^{-1}}{\sqrt{\frac{log\left[\left(\frac{Tm - Ta}{234 + Ta}\right) + 1\right]}{33ts}}}$$

IG= Corriente de corto circuito

Tm= Temperatura admisible en conexiones (ºC)

Ta = Temperatura ambiente (ºC)

Ts= tiempo de duración de la falla (s)

Acon= Área del conductor (mm)

Donde:

Ta= temperatura ambiente

Tm= 1083 ºC, temperatura de fusión del cobre

Tm= 450 ºC, temperatura permisible para la soldadura de latón.

Tm= 250 ºC, temperatura permisible para las uniones con conectores.

A partir de la tabla que se muestra a continuación se selecciona el calibre del conductor basándose en el tiempo de duración de la falla.

Tiempo de duración de la falla (s)	CM por Amperios		
	Cable solo	Con uniones de soldadura	Con uniones de conectores
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

Tabla 2.4

Calibre de conductores de Cu mínimos que previenen la fusión

Fuente: Algoritmo para el diseño de una malla de tierras en subestaciones (Unidad Zacatecno)

Sobre este tema, la norma oficial mexicana (NOM-001-SEDE-2005), señala en su articulo 924, que el área de la sección transversal mínima de los conductores para una malla de tierra es de 107.2mm2 (4/0 AWG)

Voltaje de paso o voltaje pie-pie

Corresponde a la diferencia de potencial entre dos puntos ubicados sobre la superficie del suelo, separados una distancia de un metro {6}:

$$V_P = \frac{k_s \times k_i \times \rho \times I_{CC}}{L_T}$$

Donde:

V_P = Voltaje de paso o de malla.

L_T = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

k_s = Factor que.

k_i = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

ρ = Resistividad del terreno.

Icc = Corriente de corto circuito trifásica en Amp.

Donde:

$$k_i = 0.65 + 0.172n$$

Donde:

Ki = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

n = Número de conductores transversales paralelos.

$$k_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{2D} + \ldots + \frac{1}{(n-1)D}\right]$$

Donde:

k_s = Factor que.

D = Espaciamiento entre conductores en la malla.

h = Profundidad de enterramiento del conductor.

n = Número de conductores transversales paralelos.

<u>Voltaje de contacto o mano-pie máximo, o voltaje de retículo</u>

El voltaje de contacto o mano-pie corresponde a la diferencia existente entre el potencial de un punto sobre la superficie del terreno, y el potencial que adquiere un conductor metálico unido a la malla. Para su estimación, se utiliza la expresión correspondiente al máximo posible, o voltaje de retículo. {6}

$$V_C = \frac{k_m \times k_i \times \rho \times I_{CC}}{L_T}$$

Donde:

V_C = Voltaje de contacto o de malla.

L_T = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

km = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

Ki = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

ρ = Resistividad del terreno.

Icc = Corriente de corto circuito trifásica en Amp.

Donde:

$$k_m = \frac{1}{2\pi}\ln\left(\frac{D^2}{16hd}\right) + \frac{1}{\pi}\ln\left(\frac{3\times5\times7\times\ldots\times(2n-3)}{4\times6\times8\times\ldots\times(2n-2)}\right)$$

Donde:

Km = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

D = Espaciamiento entre conductores en la malla.

d = Diámetro de los conductores.

h = Profundidad de enterramiento del conductor.

n = Número de conductores transversales paralelos.

Estos voltajes presentes en la superficie del terreno, sobre una malla de tierra que difunde una corriente de falla, no deben superar en ningún caso, los voltajes tolerables por el cuerpo humano. La Guía N0 80 de

IEEE define la máxima diferencia de potencial a que puede ser sometido el cuerpo humano, en base a los posibles puntos de contacto, mediante las expresiones:

a) Máximo voltaje de paso tolerable:

$$E_{PT} = \frac{116 + 0.7\rho_s}{\sqrt{t}}$$

E_{PT}	=	Voltaje de paso tolerable para el cuerpo humano.
t	=	Duración máxima de la falla.
ρ_s	=	Resistividad en la superficie del terreno.

b) Máximo voltaje de contacto tolerable:

$$E_{CT} = \frac{116 + 0.17\rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

E_{CT}	=	Voltaje de contacto tolerable para el cuerpo humano.
t	=	Duración máxima de la falla.
ρ_s	=	Resistividad en la superficie del terreno.

Los límites de diseño se han establecido como voltajes y, para llegar a los límites apropiados, es necesario considerar la impedancia a través del cuerpo humano, la resistencia de contacto de la mano, la resistencia del calzado y la resistividad del material superficial bajo el calzado.

Suponiendo:

100 Ohm-metro la resistividad del suelo

1000 Ohm para la impedancia del ser humano

4000 Ohm de impedancia para el calzado

300 Ohm resistencia de contacto de la mano. {6}

CAPITULO III

3. REQUERIMIENTOS DE PUESTA A TIERRA DE EDIFICIOS

3.1. CONFIGURACION DE SISTEMAS DE TIERRA

Para la correcta operación del sistema eléctrico y dado que se involucran equipos electrónicos, se construirán cuatro tipos de sistema de tierras:

- ✓ Sistema de Tierras para Electrónica.
- ✓ Sistema de Tierras para Fuerza.
- ✓ Sistema de Tierras de Pararrayos:
- ✓ Sistema de tierras para señales electromagnéticas y cargas estáticas.

3.1.1. SISTEMA DE TIERRAS PARA ELECTRONICA

Utilizado para la puesta a tierra de los equipos electrónicos y de control, dado que en este sistema no se considera la conducción a tierra de grandes corrientes de falla, para su elección se considera la resistividad existente en el terreno, el tipo de electrodo instalado y lo estipulado en la NOM-001-SEDE-2005, relativo a la sección de conductores utilizados para la puesta a tierra de equipos, seleccionados en función de la capacidad del interruptor que protege a los circuitos en cuestión.

Este sistema debe estar completamente aislado del sistema de tierras de pararrayos y enlazado al sistema de tierras para fuerza, por medio de un puente de conexión en el edificio de distribución. Los equipos electrónicos no trabajan satisfactoriamente cuando se presentan transitorios o interferencias. Las interferencias o perturbaciones de alta energía pueden causar fallas catastróficas o mal funcionamiento de algunos componentes, las perturbaciones menores tal vez no dañen los equipos, pero pueden corromper las señales de lógica y causar errores en los datos o señales de control. La causa mayor de fallas de los componentes electrónicos de los puertos de interconexión de datos, y los de control en bajo voltaje, es el sobre-esfuerzo eléctrico que usualmente se origina en los transitorios causados por: (1) las descargas atmosféricas; (2) por las maniobras de interrupción de cargas inductivas, o; (3) por descargas electrostáticas. Este tipo de interferencias los retomaremos mas adelante.

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

- ✓ Esquema convencional.
- ✓ Esquema de tierra aislada.
- ✓ Esquema de tierra aislada total.
- ✓ Esquema de malla de referencia. {3}.

ESQUEMA CONVENCIONAL

El esquema convencional utiliza únicamente las recomendaciones de la NOM−001−SEDE−2005 -artículo 250 pero no incluye el uso de los contactos de tierra aislada de la sección {250−74 Excepción 4}

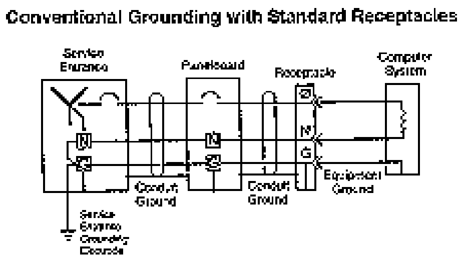


Figura 3.1

Fuente: Teoría y diseño de sistemas de puesta a tierra (Ruelsa)

Este esquema encuentra su uso en las instalaciones de PCs y de PLCs, donde sus alambrados están distribuidos en áreas muy pequeñas.

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

- ✓ Puede resultar excesivamente ruidoso el sistema de tierra (formación de lazos de tierra).

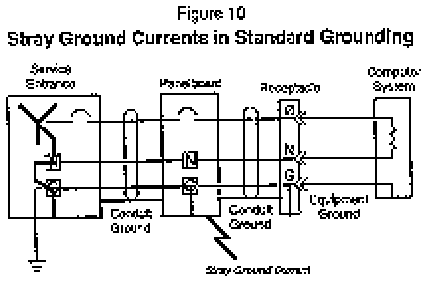


Figura 3.2

Fuente: Teoría y diseño de sistemas de puesta a tierra (Ruelsa)

- ✓ Los transitorios pueden sobrepasar el nivel de aislamiento.
- ✓ No es compatible con las recomendaciones de la mayoría de los fabricantes de equipos electrónicos.
- ✓ No puede ser fácilmente re-alambrado para cumplir con esquemas de aterrizado de redes de cómputo.
- ✓ El alambrado puede ser obsoleto cuando se cambien las tarjetas y equipos por otros de una tecnología de mayor velocidad.

ESQUEMA DE TIERRA AISLADA

Este esquema es el más socorrido por la mayoría de los proveedores de equipos electrónicos, porque reduce el ruido de modo común {3}, y está descrito en la NOM−001−SEDE−2005 {250-74 Excepción 4}.

En él, la puesta a tierra del equipo es separada de la puesta a tierra de las canalizaciones, así cualquier corriente espúrea no afecta a los equipos así conectados.

El ruido de modo común es toda señal no deseada que aparece en todos los conductores de señal al mismo tiempo con respecto a la tierra.

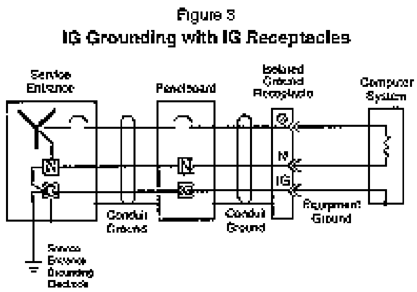


Figura 3.3

Fuente: Teoría y diseño de sistemas de puesta a tierra (Ruelsa)

El tipo de receptáculo (contacto) para este esquema es diferente, y, tiene un triángulo de color naranja pintado en la placa para diferenciarlo de los receptáculos normales.

Figura 3.4

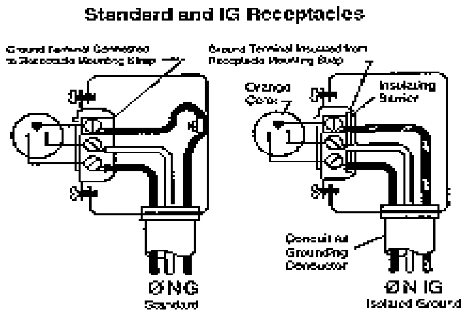


Figura 3.5

Fuente: Teoría y diseño de sistemas de puesta a tierra (Ruelsa)

Los terminales del contacto de tierra son eléctricamente aislados de la caja de tomacorrientes metálica y ductos metálicos. La frase "tierra aislada" ha sido interpretada equivocadamente como de una tierra separada, provocando en caso de falla precisamente un voltaje a tierra inseguro para las personas y para los equipos.

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

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

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

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

ESQUEMA DE TIERRA AISLADA TOTAL

Este esquema consiste en conectar todos los aparatos e instrumentos a tierra usando una configuración de estrella a partir de un solo punto físico, el cual es un cabezal o placa de conexión {3} −Existen fabricantes de ellas−, el o la cual a su vez está conectada mediante un conductor apropiado a la red general de tierra, de acuerdo con la norma NOM-001-SEDE-2005

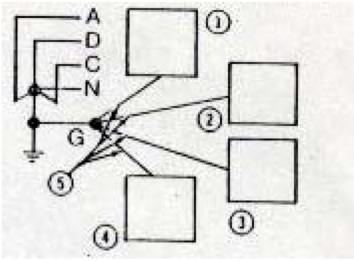


Figura 3.6

Fuente: IEEE Std 142-1991

Esta configuración es utilizada en los transmisores de comunicaciones (radiodifusión, sitios celulares, etc.), donde es posible tener un mismo punto de puesta a tierra para todos los equipos y para todas las pantallas de los cables.

Sin embargo, también tiene sus limitaciones:

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

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

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

ESQUEMA DE MALLA DE REFERENCIA

La figura 3.7 muestra esta configuración para una sala o centro de cómputo, con piso falso de tipo celular. Observar que adicionalmente a la estrella mencionada en el punto anterior, los equipos y partes metálicas estructurales se conectan a este tipo de piso mediante trencillas, y que al ofrecer un plano de referencia de tierra, baja la impedancia a tierra en todas las frecuencias.{3}

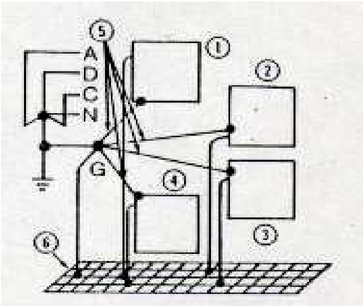


Figura 3.7

Fuente: IEEE Std 142-1991

En el mercado se conoce dicha malla como *Signal Reference Grid (SRG).*

La rejilla de referencia de señal (SRG) es una red de cables de cobre típicamente instalados debajo de un piso levantado en un centro de datos. Un SRG también puede ser construido de correas planas de cobre, cables de aluminio, la subestructura de suelo levantada, o en casos extremos, una cubierta sólida de metal de hoja. La instalación de rejillas de referencia de señal ha sido la práctica común durante más de 30 años.

El SRG proporciona una impedancia baja para proteger el equipo electrónico sensible de transientes. Como voltajes de señal típicos son bastante bajos, el equipo puede ser muy sensible al ruido transitorio.

El SRG'S puede ser usado para la vinculación de sistemas electrónicos sensibles, como telecomunicaciones, RF e instalaciones de ordenador.

Sus limitantes son:

a) Muchos fabricantes de equipos electrónicos industriales no están de acuerdo con su empleo.
b) En ambientes industriales, es difícil su implementación.

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

Los equipos en racks deben conectarse a tierra no obstante se supondría que los perfiles del rack los pondrían a tierra, lo que no siempre es real porque existen problemas de pintura y de montaje.

Para ellos, es mejor la conexión mediante un solo cable y, la punta sobrante conectarla al sistema interno de tierras ya descrito. Este cable es mejor que sea aislado para que no cortocircuiten otros cables que pueda aterrizar el equipo.

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

3.1.2. SISTEMA DE TIERRAS PARA FUERZA

Utilizado para conectar a tierra todos los elementos de la instalación que en condiciones normales de operación no están sujetos a tensiones, pero que pueden tener diferencia de potencial con respecto a tierra a causa de fallas accidentales en los circuitos eléctricos, así como los puntos de la instalación eléctrica en los que es necesario establecer una conexión a tierra para dar mayor seguridad, mejor funcionamiento y regularidad en la operación y en fin, todos los elementos sujetos a corrientes eléctricas importantes de corto circuito y sobretensiones en condiciones de falla.

La puesta a tierra de los elementos se hará mediante cable de cobre desnudo a las concentraciones de tableros para cada nivel de cada modulo, los tableros para el sistema normal – emergencia de energía se conectaran con cables paralelos de calibre adecuado a la capacidad del interruptor termo-magnético principal de cada tablero.

Bajo cualquiera de las siguientes condiciones, las partes metálicas que no conduzcan electricidad y que estén expuestas y puedan quedar energizadas, serán puestas a tierra:

a. Donde el equipo está localizado a una altura menor a 2.4 m, y a 1.5 m horizontalmente de objetos aterrizados y al alcance de una persona que puede hacer contacto con alguna superficie u objeto aterrizado.
b. Si el equipo está en un lugar húmedo y no está aislado, o está en contacto con partes metálicas.
c. Si el equipo está en un lugar peligroso o, donde el equipo eléctrico es alimentado por cables con cubierta metálica.
d. Si el equipo opera con alguna terminal a más de 150 V a tierra, excepto en:

    1. Cubiertas de Interruptores automáticos que no sean el interruptor principal y, que sean accesibles a personas calificadas únicamente {250-42 Exc. 1 }.
    2. Estructuras metálicas de aparatos calentadores, exentos mediante permiso especial y si están permanentemente y efectivamente aisladas de tierra {250-42 Exc. 2}.

3. Carcazas de transformadores y capacitores de distribución montados en postes de madera a una altura mayor de 2.4 m sobre nivel del piso {250-42 Exc. 3}.
4. Equipos protegidos por doble aislamiento y marcados de esa manera {250-42 Exc. 4}.

Un sistema de puesta a tierra bien diseñado, considera:

1. Emplear las tuberías metálicas roscadas como conductores de puesta a tierra.
2. Usar los interruptores automáticos con detector de falla a tierra en las cocheras, cocinas, y obras en construcción.
3. Colocar el conductor de puesta a tierra de equipos junto con los cables de líneas y del neutro del mismo circuito, por dentro de la misma canalización metálica.

Como parte demostrativa de esta sección podemos hacer un análisis de un edificio céntrico de Guayaquil donde se alojara una subestación eléctrica constituidas por tres transformadores de 750 KVA, con relación de transformación de 13800-208/120 Volts, conexión Delta - Estrella enfriamiento a base de silicón líquido.

La limitación de sobretensiones son particularmente importantes en sistemas que operan a voltajes mayores a los 1,000 volts, ya que los equipos para esta clase de voltaje están diseñados con menor margen que los de baja tensión, refiriéndose a las pruebas de 60 Hz y al voltaje de operación.

Determinación de la corriente de corto circuito de falla a tierra.

Para el cálculo de la intensidad primaria de cortocircuito se tendrá en cuenta una potencia de cortocircuito de 350 MVA en la red de distribución, dato proporcionado por la Cía. suministradora.

$$I_{CC} = \frac{MVA}{\sqrt{3} \times KV}$$

Donde:

Icc	=	Corriente de corto circuito trifásica en Amp.
MVA	=	Potencia de cortocircuito trifásica en MVA.
KV	=	Tensión de suministro en KV. (13,8 KVA).

De las condiciones del problema en datos basado en el sector céntrico de Guayaquil, tenemos:

$$I_{CC} = \frac{350}{\sqrt{3} \times 13.8}$$

$$I_{CC} = 14642.9416 Amp.$$

Ajuste de la corriente de falla.

Cualquier ampliación que sufra este sistema posterior a lo este factor es igual a uno (A = 1).

Por tiempo de duración de la falla.

Se considera que al ocurrir una falla a tierra, los interruptores operan eliminando la falla del sistema, lógicamente tendremos un tiempo de duración de la falla menor a 0.1 segundos que equivale a 6 ciclos, por esta razón aplicaremos un factor de 1.25 (D = 1.25) según la siguiente tabla:

TABLA 3.1

Duración de la Falla (ciclos)	**Factor de Decremento (D)**
0.5	1.65
6	1.25
15	1.10
30 ó más	1.10

Entonces la corriente de falla quedará:

$$I_{CC} = I_{CC} \times A \times D$$

Donde:

Icc = Corriente de corto circuito trifásica en Amp.

A = Factor de seguridad

D = Factor de decremento.

De las condiciones del problema tenemos:

$$I_{CC} = 14642.941 \times 1.0 \times 1.25$$

$$I_{CC} = 18303.677 Amp.$$

Diseño de malla propuesto.

Ver anexo A.

Radio Equivalente (r)

$$r = \sqrt{\frac{Ar}{\pi}}$$

Donde:

r = Radio equivalente en m.

Ar = Área total encerrada por el la malla propuesta m^2

De las condiciones del problema tenemos:

$$r = \sqrt{\frac{750}{\pi}}$$

$$r = 15.45095 m.$$

Resistencia esperada en la malla:

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

De las condiciones del problema tenemos:

Características del terreno:

ρ terreno (Ωm.): 100

ρ H hormigón (Ωm.): 5000

$$R = \frac{100}{4 \times 15.45095} + \frac{100}{600}$$

$$r = 1.7846 Ohms.$$

<u>Cálculo de la Sección del Conductor:</u>

De la tabla de Onderdonk, considerando conexiones soldadles y una falla con duración menor a los 0.1 segundos, tenemos que el calibre mínimo recomendado para evitar la fusión del cable se determina con la constante 6.5 c.m./amp., por lo que la sección mínima del conductor será:

$$S = I_{CC} \times K_{ON}$$

Donde:

S = Sección del conductor en c m.

K_{ON} = Constante de Onderdonk.

De las condiciones del problema tenemos:

$$S = 18303.677 \times 6.5$$

$$S = 118.973 cm$$

Equivalente al calibre 1/0 AWG, pero se utilizará el mínimo recomendable por la norma de Cal. 4/0 AWG, con sección 107.2 mm 211,600 c m.

Cálculo de la longitud necesaria de conductor:

La longitud se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$L = \frac{k_m \times k_i \times \rho \times I_{CC} \times \sqrt{t}}{116 + 0.17 \times \rho_s}$$

Donde:

L = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

km = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

Ki = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

ρ = Resistividad del terreno.

t = Duración máxima de la falla.

ρ_s = Resistividad en la superficie del terreno.

Cálculo de km.

$$k_m = \frac{1}{2\pi}\ln\left(\frac{D^2}{16hd}\right) + \frac{1}{\pi}\ln\left(\frac{3\times 5\times 7\times\ldots\times(2n-3)}{4\times 6\times 8\times\ldots\times(2n-2)}\right)$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$k_m = \frac{1}{2\pi}\ln\left(\frac{3^2}{16\times 0.60\times 0.01168}\right) + \frac{1}{\pi}\ln\left(\frac{3\times 5\times 7\times 9\times 11\times 13\times 15\times 17\times 19}{4\times 6\times 8\times 10\times 12\times 14\times 16\times 18\times 20}\right)$$

$$k_m = 0.365948$$

Cálculo de Ki :

$$k_i = 0.65 + 0.172n$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$k_i = 0.65 + 0.172\times 11$$

$$k_i = 2.542$$

La longitud mínima de cable enterrado debe ser:

$$L = \frac{0.365948\times 2.542\times 100\times 18303.677\times\sqrt{0.1}}{116 + 0.17\times 5000}$$

$$L = 557.3861m$$

Cálculo del potencial tolerable.

Máximo aumento de potencial E en la red.

$$E = I_{CC} \times R$$

Donde:

E	=	Potencial máximo de la malla.
Icc	=	Corriente de corto circuito trifásica en Amp.
R	=	Resistencia de la malla esperada en Ohms.

De las condiciones del problema tenemos:

$$E = 18303.677 \times 1.7846$$

$$E = 32664.7419 Volts$$

Potencial soportable por el cuerpo humano Voltaje de paso.

$$E_{PT} = \frac{116 + 0.7\rho_s}{\sqrt{t}}$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$E_{PT} = \frac{116 + 0.7 \times 5000}{\sqrt{0.1}}$$

$$E_{PT} = 11434.8 \text{ Volts}$$

Potencial soportable por el cuerpo humano Voltaje de contacto.

$$E_{CT} = \frac{116 + 0.17\rho_s}{\sqrt{t}}$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$E_{CT} = \frac{116 + 0.17 \times 5000}{\sqrt{0.1}}$$

$$E_{CT} = 3054.80 \text{ Volts.}$$

<u>Cálculo del potencial de contacto o de malla.</u>

Emplearemos la siguiente fórmula:

$$V_C = \frac{k_m \times k_i \times \rho \times I_{CC}}{L_T}$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$V_C = \frac{0.365948 \times 2.542 \times 100 \times 18303.677}{600}$$

$$V_C = 2837.80$$

Cálculo del potencial de paso.

$$V_P = \frac{k_s \times k_i \times \rho \times I_{CC}}{L_T}$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$V_P = \frac{0.5583 \times 2.542 \times 100 \times 18303.677}{600}$$

$$V_P = 4329.78399$$

Cálculo de Ks:

$$k_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{2D} + \ldots + \frac{1}{(n-1)D}\right]$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$k_s = \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{2\times 0.6} + \frac{1}{3.+0.6} + \frac{1}{2\times 3} + \frac{1}{3\times 3} + \frac{1}{4\times 3} + \frac{1}{5\times 3} + \frac{1}{6\times 3} + \frac{1}{7\times 3} + \frac{1}{8\times 3} + \frac{1}{9\times 3} + \frac{1}{10\times 3}\right]$$

$$k_s = 0.5583$$

Numero mínimo de varillas requerido:

$$N_V = 0.60 \times \sqrt{A_r}$$

Donde:

Ar = Área total encerrada por el la malla propuesta m^2

N_V = Numero mínimo de varillas.

De las condiciones del problema tenemos:

$$N_V = 0.60 \times \sqrt{750}$$

$$N_V = 16.43$$

El número de electrodos colocados en la malla, son 22.

Verificación de las condiciones de seguridad.

$$V_P \langle E_{PT}$$

$$V_C \langle E_{CT}$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$4329.7839 \langle 11434.8$$

$$2837.80 \langle 3054.76$$

Como el potencial tolerable por el cuerpo humano V_{CH} es superior a la elevación del potencial de malla calculado, el arreglo seleccionado en este punto es aceptable.

3.1.3. SISTEMA DE TIERRAS DE PARARRAYOS

Como su nombre lo indica, se destina para drenar a tierra las corrientes producidas por descargas atmosféricas.

La distancia del edificio con respecto al hincado del electrodo, no debe ser menor a 2.50 Mts. y debe quedar totalmente aislado de los sistemas de tierras para fuerza y para electrónica.

La protección de estructuras es más tolerante que una protección electrónica. Así, un edificio puede tolerar hasta 100,000 V mientras que componentes electrónicos a 24 V se dañarán con voltajes sostenidos de 48 volts!

Los rayos ocurren con diferentes intensidades y un sistema que proteja contra su efecto deberá ser diseñado tomando en cuenta los rayos promedio o mayores del área en cuestión. Las descargas no pueden ser detenidas, pero la energía puede ser desviada en una forma controlada. El intentar proteger contra descargas directas puede ser excesivamente caro.

Un sistema de protección contra descargas, llamado de pararrayos, debe:

- Capturar el rayo en el punto diseñado para tal propósito llamado terminal aérea.
- Conducir la energía de la descarga a tierra, mediante un sistema de cables conductores que transfiere la energía de la descarga mediante trayectorias de baja impedancia, y;
- Disipar la energía en un sistema de terminales (electrodos) en tierra.

3.1.3.1. ESTIMACION DE RIESGO

Una estimación probabilística toma en cuenta los siguientes factores:

- Resistividad del suelo.
- Las dimensiones externas de la estructura y de cualquier estructura adyacente conectada eléctricamente.
- La longitud de los cables aéreos que salen de la estructura.
- La densidad de descargas en la localidad - asociada con el número de días de tormenta del año.
- El tipo de construcción -principalmente la altura, tipo de techo, y esquema de protección (si existe) en el lugar. En general, mientras más grande es, mayor es la probabilidad de ser impactada.

- Factores geográficos -la altura vertical sobre el nivel del mar y la relación con otras estructuras, por ejemplo cuán cerca está de árboles altos.

- Perfil de tierra y terreno.

Estos factores toman en cuenta el área de exposición formada por la estructura y los cables conectados a ella y la metodología capacita para calcular el riesgo de impacto. Si el riesgo es menos que 1 en 100.000 entonces generalmente no se requiere protección. Sin embargo, con el propósito de realizar una estimación formal del riesgo, éste necesita estimarse en relación a las consecuencias de un impacto directo. Si el edificio está asociado con una refinería de petróleo o depósito de explosivos, entonces se necesitará un esquema de protección contra descarga atmosférica que ofrezca el mayor grado posible de protección, aún si el riesgo de un impacto es pequeño.
Los índices de riesgo son:

$$Ir = A + B + C + D + E + F + G$$

Este índice debe ser interpretado de la forma siguiente:

- 0 - 30: Sistema de protección opcional.
- 31- 60: Se recomienda una protección.
- Más de 60: La protección es indispensable. {2}

TABLA 3.2 INDICE DE RIESGO A

USO AL QUE SE DESTINA LA ESTRUCTURA	VALOR DEL ÍNDICE A
Casas y otras construcciones de tamaño similar.	2
Casas y otras construcciones de tamaño similar con antenas exteriores.	4
Industrias, talleres y laboratorios.	6
Edificios de oficina, hoteles, edificios de apartamentos.	7
Lugares de reunión, como iglesias, auditorios, teatros, museos, salas de exposición, tiendas por departamentos, oficinas de correos, estaciones, aeropuertos y estadios.	8
Escuelas, hospitales, guarderías infantiles y ancianatos.	10

TABLA 3.3 INDICE DE RIESGO B

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	VALOR DEL ÍNDICE B
Estructura de acero con techo no metálico.	1
Concreto forzado con techo no metálico	2
Ladrillo, concreto liso o albañilería, con techo no metálico de material incombustible.	4
Estructura de acero o concreto armado con techo metálico.	5
Estructura de madera o con revestimiento de madera con techo no metálico de material incombustible.	7
Ladrillo, concreto liso, albañilería, estructura de madera con techo metálico.	8
Cualquier construcción con techo de material combustible.	10

TABLA 3.4 INDICE DE RIESGO C

CONTENIDO O TIPO DEL INMUEBLE	VALOR DEL ÍNDICE C
Inmuebles residenciales oficinas, industrias y talleres con contenido de poco valor, no vulnerable al fuego.	2
Construcciones industriales o agrícolas que contienen material vulnerable al fuego.	5
Plantas y subestaciones eléctricas y de gas, centrales telefónicas y estaciones de radio y televisión.	6
Plantas inductriales importantes, monumentos y edificios históricos, museos, galerías de arte y construcciones que contengan objetos de especial valor.	8
Escuelas, hospitales, guarderías y lugares de reunión.	10

TABLA 3.5 INDICE DE RIESGO D

GRADO DE AISLAMIENTO	VALOR DEL ÍNDICE D
Inmuebles localizados en un área de inmuebles o árboles de la misma altura, en una gran ciudad o bosque.	2
Inmuebles localizados en un área con pocos inmuebles de la misma altura.	5
Inmueble comlpletamente aislado que excede al menos dos veces la altura de las estructuras o árboles vecinos.	10

TABLA 3.6 INDICE DE RIESGO E

TIPO DE TERRENO	VALOR DEL ÍNDICE E
Llanura a cualquier altura sobre el nivel del mar.	2
Zona de colinas.	6
Zona montañosa entre 300 y 1000 m.	8
Zona montañosa por encima de 1000 m.	10

TABLA 3.7 INDICE DE RIESGO F

ALTURA DE LA ESTRUCTURA	VALOR DEL ÍNDICE F
Hasta 9 m.	2
de 9 m a 15 m.	4
de 15 m a 18 m.	5
de 18 m a 24 m.	8
de 24 m a 30 m.	11
de 30 m a 38 m.	16
de 38 m a 46 m.	22
de 46 m a 53 m.	30

TABLA 3.8 INDICE DE RIESGO G

NÚMERO DE DÍAS DE TORMENTAS POR AÑO	VALOR DEL ÍNDICE G
Hasta 3.	2
de 3 a 6.	5
de 6 a 9.	8
de 9 a 12.	11
de 12 a 15.	14
de 15 a 18.	17
de 18 a 21.	20
más de 21.	21

Fuente: Puesta a tierra en edificios (Universidad de Mérida)

Ejemplo práctico para obtener el índice de riesgo:

Un edificio residencial de 10 pisos, de 32m de altura, ubicado en Mérida (1600m sobre el nivel del mar), con estructura de concreto, paredes de bloque y arcilla frisado con mampostería, ubicado en un área donde hay pocos inmuebles de su tamaño.

Según las tablas anteriormente expuestas se obtiene lo siguiente:

A = 7 para edificio residencial.

B = 2 para edificio de concreto, paredes de bloque de arcilla.

C = 2 para edificio residencial.

D = 5 para área con pocos inmuebles de su tamaño.

E = 10 para altura sobre el nivel del mar mayor a 1000m.

F = 16 para altura del edificio entre 30 y 38m.

G = 11 para los días de tormenta en el año, 12 estimados.

Ir = 53. Resultando entre 30 y 60. Por consiguiente es recomendado instalar protección con pararrayos.

3.1.3.2. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PROTECCION CONTRA DESCARGA ATMOSFERICA.

El diseño global está basado en el concepto de esfera rodante, que se aplica a la estructura para asegurar que todas las áreas expuestas son protegidas por el esquema.

Las componentes individuales se describen abajo. Los materiales utilizados son generalmente cobre de alta pureza o aluminio (99% + de pureza) de un grado similar al empleado para conductores eléctricos. El sistema de protección contra rayo debe diseñarse para proporcionar una impedancia suficientemente baja de modo que la energía de la descarga siga la ruta ofrecida. Esto requiere un diseño integrado y uso de materiales con impedancia suficientemente baja. Los diversos componentes del sistema se describen con más detalle a continuación.

Terminaciones en aire

Estas consisten en varas verticales y/o una malla de conductores en el techo y bordes superiores de la estructura.

Los conductores de la malla típicamente forman un enrejado de 10 m por 20 m, más pequeño en edificios de alto riesgo. A ella se conectan proyecciones metálicas, incluyendo varas. Una recomendación señala que todas las partes del techo estén a menos de 5 metros de un conductor de terminación en aire. Esta distancia se reduce a 2,5m en edificios de alto riesgo. Nuevamente el material más ampliamente usado es el cobre. Las varas tradicionalmente eran aguzadas, pero los diseños modernos normalmente tienen ahora una punta roma, alisada. Las varas, si se usan, están ubicadas cerca de aquellas posiciones donde es más probable el impacto, es decir, puntas de techo, esquinas de edificios, etc.

Conductores de bajada y de conexión

Se requiere que estos conductores proporcionen una trayectoria de baja impedancia hacia abajo de la estructura, de modo que minimice diferencias de potencial y corrientes inducidas. El arreglo ideal sería un edificio metálico, donde la corriente fluyera por una película exterior del edificio. El diseño para construcciones tradicionales apunta a usar las ventajas de esto, es decir, proporcionando diversas trayectorias paralelas para reducir la corriente de falla en cada una de ellas. Estas deberían estar simétricamente ubicadas alrededor del edificio, idealmente incluyendo las esquinas. El equipo electrónico sensible no debería ubicarse cerca de estas trayectorias de bajada en el interior del edificio, ya que existe un riesgo de interferencia inductiva. La corriente fluirá en todas las trayectorias, pero fluirá mayor corriente en la trayectoria más próxima al punto de impacto.

Se requiere que los conductores de bajada sean tan cortos y directos como sea posible, con cambios de dirección graduales en lugar de ser en ángulo recto. Deben ser de construcción robusta y fijados en forma segura con el propósito de soportar las fuerzas mecánicas significativas que acompañan el flujo de corrientes de rayo. Además de los conductores de bajada formales, se usan también vigas metálicas, blindajes metálicos y reforzados metálicos de la estructura.

Se usan conductores de enlace para conectar los conductores de bajada a cualquier estructura metálica expuesta sobre o cerca de la estructura. Esto es para asegurar que no ocurra una descarga secundaria. Cuando la corriente circula por el conductor de bajada, puede generarse un potencial. Si la estructura metálica (tal como ductos de calefacción central, tuberías, etc.) no estuviera conectada, podría inicialmente estar a un potencial próximo al de tierra y así podría ofrecer una trayectoria a tierra más atractiva. Si la diferencia de potencial excede el valor de ruptura del aire o del medio intermedio, entonces puede aparecer una descarga secundaria, acompañada de un daño severo.

El cobre y el aluminio son los materiales más ampliamente utilizados. Se prefiere normalmente el conductor en hebra en lugar de cinta ya que es más fácil de instalar y su efecto pelicular a altas frecuencias provoca un mejor comportamiento. El cobre se considera que es el más resistente a la corrosión en áreas con contenido de sal, aire húmedo, cerca de concreto, en corteza de árbol y donde hay contaminación ambiental. Algunas veces el cobre se recubre de plomo para mejorar su resistencia a la corrosión cuando se usa en chimeneas y cerca de otras estructuras de gases combustibles. Por razones estéticas se recubre algunas veces con mangas de PVC.

Cada conductor de bajada debe conectarse a una terminación de tierra y si éstas no están interconectadas, entonces los conductores de bajada deben interconectarse a través de un conductor horizontal en anillo instalado cerca del nivel de tierra. Se ajusta normalmente una tenaza de prueba para permitir la revisión de continuidad de conductores de bajada a nivel de suelo y proporcionar un medio de aislar el electrodo de tierra.

Terminal de tierra

Este puede consistir de un anillo de cobre enterrado (designado en EE.UU. como contrapeso) que rodea la estructura y/o barras de tierra verticales. Se requiere que la impedancia del terminal de tierra (es decir, después de una conexión de bajada) sea máximo de 10 Ohm. El aluminio no se permite para uso bajo tierra. Cada conductor de bajada debe tener su propio electrodo de tierra terminal y estos normalmente están conectados entre sí para formar un anillo, con electrodos horizontales usados para interconectarlos y ayudar a reducir la impedancia global. Los terminales de tierra más comunes son barras de al menos 1,5 m de longitud, con un mínimo para cada sistema de 9 m. El anillo ayuda a lograr una ecualización de potencial en la superficie del suelo, además de controlar el potencial.

Esto último ayuda a reducir el voltaje de contacto que puede experimentar una persona en contacto con el conductor de bajada durante una descarga atmosférica.

Aunque las otras partes del sistema de protección pueden diseñarse eléctricamente aisladas, el arreglo de electrodos no debe serlo. La instalación completa debe subir conjuntamente su potencial, para evitar diferencias de voltajes excesivos y esto significa que el terminal de tierra debe ser conectado al resto de los electrodos de tierra y en lo posible diseñado como una entidad. En el interior de edificios, es necesario contactar a la compañía eléctrica si el sistema de protección contra descarga atmosférica se conecta al terminal de tierra. Aunque esto puede causar un potencial más elevado en el sistema de puesta a tierra externo, la conexión generalmente es necesaria para asegurar que todas las estructuras metálicas expuestas estén conectadas.

Normalmente la protección contra descarga atmosférica y las tierras del sistema de potencia deben interconectarse. Donde esto no es deseable por razones técnicas, entre ellas puede instalarse un "ecualizador de potencial de tierra". Este interconectará los sistemas de puesta a tierra si el voltaje entre ellos excede un determinado valor, típicamente varios cientos de voltios.

Dispositivos de protección de onda

Habiendo ya diseñado el sistema de protección contra descarga atmosférica, pueden identificarse rápidamente las áreas principales de riesgo y tomar precauciones adicionales, donde sea necesario, para proteger equipo electrónico.

La puesta a tierra, el apantallamiento y la conexión equipotencial no pueden garantizar siempre inmunidad frente a una interferencia. Así, los dispositivos de protección de onda complementan esta protección donde sea necesario y forman la última parte de la defensa formal. Existe un amplio rango de dispositivos disponibles para este propósito.

Generalmente, están diseñados para derivar la energía asociada con un sobre-voltaje hacia el sistema de puesta a tierra para evitar que éste provoque ruptura de la aislación en el interior de algún equipo. El voltaje de operación esta bajo el nivel al cual se puede producir daño al equipo protegido. Estos son dispositivos limitadores de voltaje, normalmente varistores de óxido metálico, que se conectan entre fase y tierra.

Otros dispositivos manejados por voltaje bruscamente cambian de alta a baja resistencia cuando se supera un voltaje umbral. Estos incluyen chisperos y tubos de descarga de gas. Otros dispositivos empleados incluyen filtros de atenuación de onda (para dar protección adicional a equipo electrónico sensible) y barreras de onda (donde penetran o salen cables del edificio).

3.1.4. SISTEMA DE TIERRAS PARA SEÑALES ELECTRO MAGNETICAS Y CARGAS ESTATICAS

El principio utilizado para este sistema es el de una jaula de Faraday, que es en pocas palabras un cuarto blindado contra interferencias de radiofrecuencias. Esta jaula aísla al receptor de las fuentes radiacionales y permite observar con precisión su funcionamiento con señales débiles calibradas que se generan cuidadosamente en el interior de la jaula, teniendo así un medio libre de interferencia en el cual es posible efectuar medidas a bajo nivel.

Para el blindaje de campos magnéticos, el material debe tener propiedades ferro magnéticas.

El hecho que exista una conexión de la jaula a una tierra directa no tiene el menor efecto sobre las propiedades de un blindaje.

Las características principales que deben cuidarse en la construcción de una jaula de Faraday son: La atenuación, en su valor mínimo garantizado, la gama de frecuencia protegida, el tipo de interferencias que debe blindarse, ventilación adaptabilidad para hacer modificaciones, tipo de entrada y alambrado.

En caso de ser necesario una gran atenuación, el blindaje puede constar de varias paredes que formen casquetes concéntricos aislados entre si.

Como se están considerando campos magnéticos de muy alta frecuencia y microondas se utilizara lámina sólida perforada de acero, fija sobre un marco de madera. La construcción de la jaula de Faraday se realizara de manera que el blindaje interior y el exterior se conecten en un solo punto. A fin de reducir los efectos de antena debido a las penetraciones de elementos metálicos como grapas clavos, etc., para la fijación de las laminas en el bastidor de madera, se procura evitarlas y si es preciso se aplica soldadura para que formen una sola pieza con el blindaje, o bien la utilización de clavos de plástico de diámetro inferior a la abertura normal de la malla.

Para evitar los efectos de inducción de campo magnético por la penetración del blindaje por partes metálicas, ya sea del interior al exterior o viceversa, se utilizaran filtros en las entradas de todo alambre que penetre, incluyendo tierras, y preferiblemente se localizan cerca del punto de conexión entre el blindaje interior y exterior.

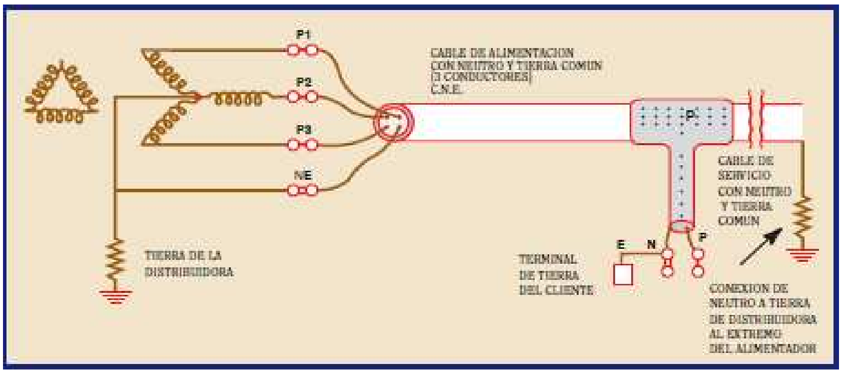
Se acostumbra emplear un transformador de aislamiento antes del filtro para tener la alimentación desconectada de la tierra y evitar accidentes a personas en el interior de la jaula

Se recomienda que se instalen entradas herméticas de doble puerta, para mantener el blindaje todo el tiempo.
Este sistema se constituye de dos o más mallas de tierras conformando un blindaje concéntrico del cuarto eléctrico localizada en la zona del sitio.

3.2. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO PARA CONSTRUCCION DE EDIFICIOS.

Las normas establecen tiempos máximos de desconexión para diferentes tipos de equipos. Para decidir qué tiempos son apropiados, tiene que considerarse también el arreglo de puesta a tierra externo a la propiedad, es decir, el de la red de alimentación. Esto es porque cualquier corriente de falla a tierra normalmente tiene que retornar al transformador de la fuente.

La impedancia del bucle por tierra esta formada por la impedancia del sistema de puesta a tierra en el transformador de fuente, los conductores de tierra entre el transformador y la propiedad y la impedancia desde el punto de falla al punto de alimentación en la propiedad.

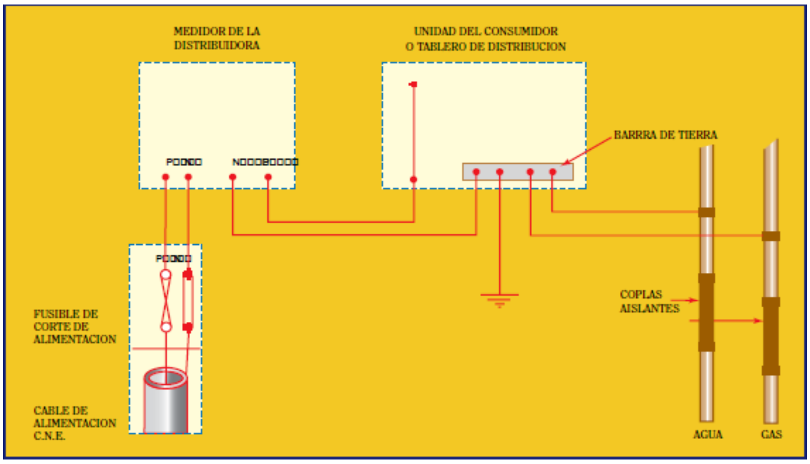


Suministro TN-C-S tìpico (tierra de proteccion multiple)
Neutro puesto a tierra por el proveedor en varias ubicaciones

Figura 3.8

Fuente: Sistemas de puesta a tierra (Pro-cobre)

La Figura 3.8 ilustra una alimentación TN-C-S típica y es el arreglo más común para nuevas y recientes alimentaciones de energía a instalaciones domésticas. En este arreglo los conductores neutro y de tierra se combinan en la red de alimentación. Sin embargo, ellos deben estar separados en el interior de locales.



Arreglo de puesta a tierra TN-C-S en edificio (CDA)

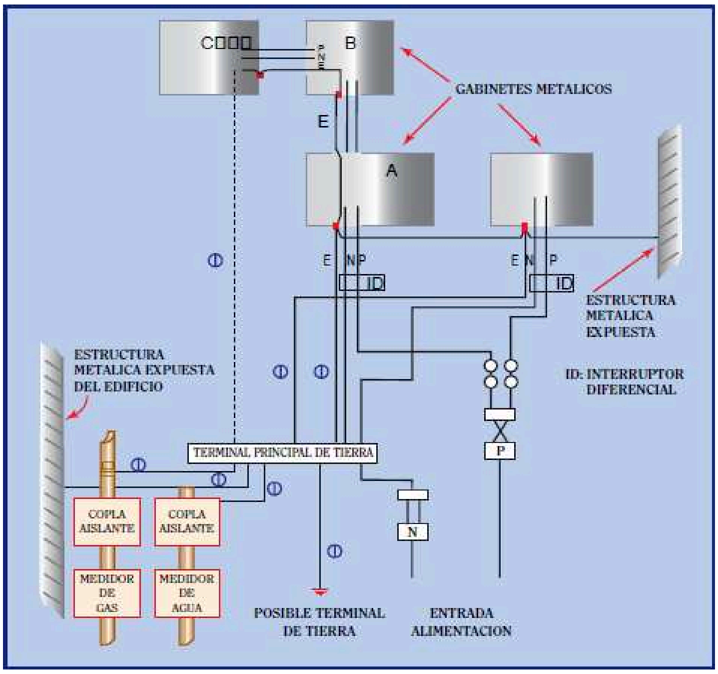
Figura 3.9

Fuente: Sistemas de puesta a tierra (Pro-cobre)

En la Figura 3.9, el terminal de tierra principal se instala a la llegada de la alimentación de energía. Este se conecta al neutro de la alimentación y a la barra de tierra en el tablero de distribución del consumidor. Además, las tuberías de gas, agua y otros servicios que ingresan a la propiedad se conectan al terminal de tierra principal.

La conexión eléctrica directa de tubería de gas o de agua, que se extienda fuera de los límites de una instalación, a pesar de ser una práctica autorizada en otros países. La ordenanza señala que en estas condiciones "... deben insertarse partes aislantes en los elementos conductores unidos a la conexión equipotencial, por ejemplo coplas o uniones aislantes en sistemas de cañería, a fin de evitar las transferencias de tensiones a puntos alejados de la conexión".

Ahora consideremos una instalación más compleja, por ejemplo parte de aquella en el interior de una oficina o pequeña industria. En la Figura 3.10 se ilustra una disposición, con énfasis en el esquema de puesta a tierra.



Instalacion TN-S tipica en el interior de una propiedad comercial o industria pequeña (CDA)

Figura 3.10

Fuente: Sistemas de puesta a tierra (Pro-cobre)

La disposición que muestra la Figura 3.10 es propuesta por la Copper Development Association, (CDA). La alimentación es TN-C, mientras que la instalación es TN-S. Hay un terminal de puesta a tierra principal que está conectado al neutro de la alimentación. Los conductores de protección y conexiones equipotenciales principales se regresan al terminal de tierra principal.

El terminal de tierra principal actúa como el punto único de referencia y puede ser una barra, una placa o aún un conductor interno de cobre tipo anillo. Este debiera conectarse directamente a un electrodo de tierra efectivo y esta conexión debe ser de cobre ya que las normas no permiten el uso de aluminio o aluminio recubierto de cobre pues involucra riesgo de corrosión. El electrodo de tierra debe ubicarse tan cerca como sea posible del terminal de tierra principal.

Un conductor de protección acompaña a todos los conductores que llevan corriente. Si este conductor tiene una sección transversal de 10 mm2 o menos, debe ser de cobre. Las conexiones equipotenciales principales se usan para conectar servicios que ingresan a la propiedad (tales como tuberías metálicas de gas o de agua). Similar al caso de la instalación doméstica, en esta situación igualmente no está autorizada la conexión eléctrica directa con tuberías de gas o agua. Debe instalarse una copla aislante, de extensión no inferior a un metro, al ingresar las tuberías al recinto de la instalación.

El diseñador debe asegurarse que la impedancia del conductor de protección esté coordinada con las características del equipo de protección de modo que durante una falla a tierra, cualquier voltaje sobre equipo expuesto que pueda ser tocado simultáneamente sea de magnitud y duración tal que no produzca peligro. La elevación de voltaje en un área durante una falla tiene que limitarse a un valor establecido en las normas y este valor se determina colocando un valor mínimo de impedancia del bucle de tierra. Es esencial que los conductores de protección de cobre usados tengan área transversal suficientemente grande.

Note que las conexiones a tierra de carcazas metálicas deben ser agrupadas en un punto, para evitar que la corriente tenga que fluir por el metal de la misma carcaza. Esto puede crear interferencia. Donde van cables entre edificios, ellos deben entrar y salir en un punto y si es posible encaminarlos por ductos metálicos eléctricamente continuos. La armadura del ducto debe ser conectada al terminal de tierra principal. En este punto también puede requerirse protección contra ondas.

Se ha encontrado ahora que equipos, tales como fuentes de potencia de computadores, son causantes de problemas particulares con arreglos de puesta a tierra del tipo tradicional. Este tipo de equipo tiene una conexión permanente a tierra y es una fuente de corriente de fuga a tierra que tiene un alto contenido de armónicas. Cargas rectificadas monofásicas producen armónicas impares, algunas de las cuales son aditivas en los conductores de neutro y tierra. Si suponemos que tal equipo está situado en las posiciones A, B y C en la Figura 3.10, entonces la ruta a lo largo del conductor de protección desde C al terminal de tierra principal puede ser larga, tendrá una impedancia y aparecerá una diferencia de voltaje entre la tierra y C y de ahí a otras partes. La inductancia del conductor de protección será especialmente importante cuando la diferencia de voltaje sea mayor para las corrientes armónicas que aquella a la frecuencia industrial. Esta diferencia de voltaje es probable que genere ruido (o interferencia) y finalmente un riesgo de choque eléctrico. Se producirá calentamiento y campos electromagnéticos radiados que también pueden causar interferencia. Una manera de reducir el voltaje en C es rutear un conductor de protección separado, adicional, directamente hacia el terminal de tierra principal o tan cerca de él como sea práctico. Este conductor preferiblemente debiera ser aislado y no instalarse en paralelo con cables o estructuras de acero. Una ruta tan directa como sea posible minimizará su impedancia. Además de la reducción de voltaje ganada por esta impedancia reducida, habría una reducción adicional debido a que la corriente de fuga asociada con el equipo en A y en B ya no seguiría la misma ruta.

Esto se llama una tierra “limpia” y se muestra en la Figura 3.10. La tierra “limpia” podría sólo tomarse de un electrodo de tierra separado si éste a su vez esta conectado al terminal de puesta a tierra principal. Si este enlace no existe, el arreglo no cumple las normas y puede ser peligroso. Otros métodos de producir una tierra limpia incluyen el uso de transformadores de aislación y acondicionadores de fase.

Como se mencionó previamente, es esencial seleccionar la sección transversal apropiada y para reducir interferencia no deseada hay una tendencia creciente a aumentar el tamaño de los conductores de protección para ayudar a reducir la interferencia en tales instalaciones. El costo de pérdida de datos y falla de equipo para los clientes a menudo es mucho mayor que el costo del capital inicial para mejorar el sistema de puesta a tierra.

3.2.1. ARREGLOS PARA REDUCIR INTERFERENCIAS

La interferencia ocurre en todo momento en circuitos eléctricos, pero afortunadamente en la mayoría de los casos no se percibe. Esto puede deberse al diseño de la instalación o al grado de inmunidad del equipo que se usa, tal que sigue su operación a pesar de la interferencia. Las consecuencias de la interferencia pueden ser desde golpecitos audibles en sistemas de alta fidelidad, parpadeo de la luz (flicker), pérdida de datos en sistemas de procesamiento de información, operación incorrecta de equipo. Estos últimos ejemplos pueden ser muy costosos en términos de pérdidas de producción, además del costo debido al daño del equipo.

La interferencia es particularmente problemática para circuitos de comunicación y de procesamiento de datos, los cuales requieren alto grado de calidad. Parte de la razón para esto es porque el equipo electrónico del cual provienen estos cables tiene un “plano de referencia de tierra” al cual se refieren las señales digitales. Para evitar voltajes excesivos en el interior del equipo, el plano de referencia de tierra se conecta normalmente al gabinete metálico del equipo. Este a su vez se conecta al sistema de puesta a tierra principal. Los cables de comunicación tienen normalmente una pantalla puesta a tierra, pero también contienen un conductor de referencia de señal que se conecta a la tierra de referencia. Los problemas surgen cuando se hacen arreglos especiales para evitar la conexión de equipo adyacente a través de la pantalla de cable o blindaje. Sin embargo, ellos pueden estar conectados inadvertidamente por medio del conductor de la tierra de referencia.

Los mecanismos a través de los cuales surge interferencia son:

- Acoplamiento resistivo (también conocido como galvánico)
- Acoplamiento capacitivo
- Acoplamiento inductivo

Estos efectos serán cubiertos ahora con un poco más de detalle. A menudo se necesita efectuar mejoramientos en el sistema de puesta a tierra para reducir tal interferencia y los aspectos de blindaje pueden requerir un valor de puesta a tierra menor que el determinado según los criterios de seguridad y de operación de las protecciones.

<u>Acoplamiento resistivo</u>

Este acoplamiento se produce cuando existe una conexión eléctrica directa entre la fuente de la perturbación y el circuito afectado, o a través de un medio resistivo (tal como el terreno) {1}. Una condición de falla a tierra puede provocar la elevación de potencial de un sistema de puesta a tierra. El voltaje que aparece en la pantalla del cable que pasa cerca del sistema de puesta a tierra, se debe al acoplamiento resistivo (o galvánico o conductivo). Las implicancias que surgen del acoplamiento resistivo pueden verse con referencia a la Figura 3.11

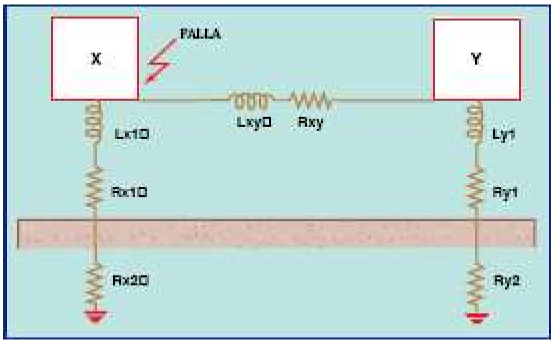


Figura 3.11

Ejemplo de interferencia resistiva

Fuente: Sistemas de puesta a tierra (Pro-cobre)

Supongamos que el equipo ubicado en X es afectado por una onda de rayo y el exceso de voltaje se ha reducido derivando la energía a tierra por un derivador de onda conectado en paralelo (es decir, entre fase y tierra). Cuando la corriente fluye hacia el terreno, debe pasar a través de la impedancia del sistema sobre tierra (*Lx*1 y *Rx*1) y del electrodo bajo tierra (*Rx*2). Aparecerá un voltaje en el equipo puesto a tierra en X. Si el equipo está conectado a otro ubicado en Y, por la pantalla de un cable que tiene una impedancia constituida por una resistencia (*Rxy*) y una inductancia (*Lxy*), entonces habrá una diferencia de voltaje entre los equipos puestos a tierra en X y en Y. La magnitud de esta diferencia de voltaje dependerá de los valores de impedancia a tierra en X y en Y, conjuntamente con la impedancia de la conexión entre ellos (Lxy y *Rxy)*. La diferencia de potencial en este ejemplo se llama interferencia resistiva (galvánica) y puede reducirse:

- disminuyendo las impedancia de puesta a tierra (*Rx*2 y *Ry*2)
- reduciendo la impedancia de la conexión entre X e Y, es decir *Lxy* y *Rxy.*
- reduciendo la impedancia de las conexiones del sistema de tierra, sobre tierra, en X e Y.

Normalmente la forma más efectiva es conectar estrechamente el equipo mediante las pantallas de cables, ductos, etc., y el alambre de tierra.

Acoplamiento capacitivo

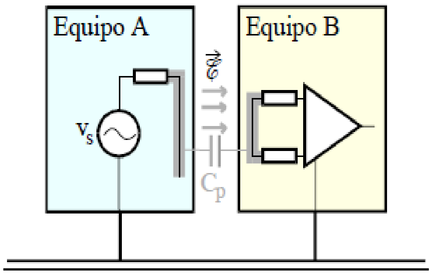


Figura 3.12

Interferencia capacitiva entre sistemas

Fuente: Instrumentación Electrónica de Comunicaciones (Escuela Técnica de Ing. Industriales)

Cualquier par de componentes metálicos conductivos que estén separados en un medio, tendrán entre ellos una capacitancia. Si un componente se carga, entonces aparecerá una carga en el segundo. {1}

Este mecanismo se usa beneficiosamente en ingeniería eléctrica y electrónica, pero cuando crea voltajes no deseados, se llama interferencia. Este tipo de interferencia puede experimentar un conductor metálico ruteado cerca de una línea aérea de alta tensión y se debe al campo eléctrico.

El conductor aéreo se muestra como en la Figura 3.13. Se asume que en un momento el conductor está cargado positivamente, entonces (debido a la capacitancia entre ellos) se creará una carga negativa en la placa. La corriente capacitiva que fluye es directamente proporcional a la frecuencia y a la magnitud de voltaje. Por esta razón, la corriente de interferencia puede ser significativa si la línea aérea es impactada por un rayo, donde la magnitud, el contenido armónico y la tasa de cambio serán todas altas.

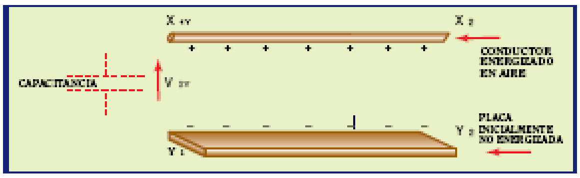


Figura 3.13

Ejemplo de interferencia capacitiva

Fuente: Sistemas de puesta a tierra (Pro-cobre)

Los métodos disponibles para reducir esta interferencia son:

- reducir el paralelismo entre los componentes (por ejemplo la distancia de paralelismo)
- incrementar la separación entre ellos.

Ambos métodos se usan tradicionalmente para cables de señal y comunicación, que son instalados a cierta distancia de los cables de potencia y si necesitan cruzarlos, los hacen en ángulo recto, donde sea posible.

El método más eficaz de reducir el acoplo capacitivo es introduciendo un blindaje de apantallamiento entre ambos conductores, y conectando este a tierra.

El blindaje de apantallamiento solo es efectivo si se encuentra conectado a tierra.

Un blindaje flotante puede incrementar la interferencia ya que puede incrementar el acoplamiento capacitivo entre los conductores que separa.

Para apantallamiento capacitivo se usan típicamente los siguientes materiales:

- Cinta o lámina hecha de cobre o aluminio
- Trenza única, de cobre estañado
- Recubrimiento único espiral de cobre estañado
- Doble trenza, hecha de cobre estañado.

Acoplamiento inductivo

Este es el tipo más común de interferencia, causada por acoplamiento electromagnético, particularmente a frecuencia (60Hz). Se debe a los campos magnéticos. {1}

La Figura 3.14 ayuda a ilustrar cómo se produce el acoplamiento inductivo. La corriente que fluye en el conductor X crea un campo magnético en torno a él, como se muestra. El campo magnético se produce debido a que la corriente en X es alterna. La intensidad del campo magnético se reduce a medida que aumenta la distancia desde X. El conductor Y puede estar a cierta distancia, pero algunas líneas de flujo desde X lo rodean tal como se muestra. Como la corriente en el conductor X cambia, el campo magnético que encierra el conductor Y también cambiará y esto a su vez, provocará un voltaje a lo largo de él. El voltaje que surge en el conductor Y es provocado por interferencia inductiva y aumenta con la tasa de cambio de la corriente en el conductor X.

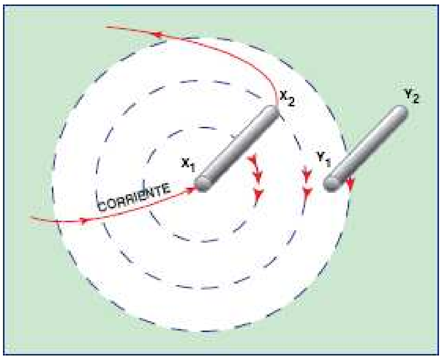


Figura 3.14
Interferencia inductiva
Fuente: Sistemas de puesta a tierra (Pro-cobre)

Proteger contra este tipo de interferencia es particularmente difícil y los métodos generales utilizados consideran:

- Incrementar la separación entre los cables (X a Y). Incrementar la separación no siempre se puede hacer y puede significar gastos considerables si no se consideran en la etapa inicial de construcción.
- Reducir el efecto de campo magnético en el circuito Y. Un método para obtener esto es usar cables de par trenzado pero esto sólo funciona para tipo de señalización diferencial balanceado.

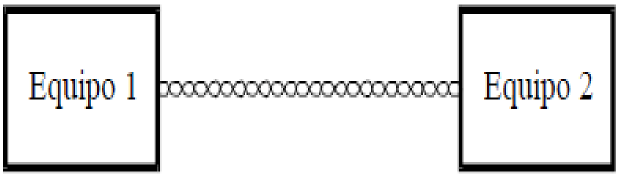


Figura 3.15

Interferencia inductiva (cables par trenzado)

Fuente: Instrumentación Electrónica de Comunicaciones (Escuela Técnica de Ing. Industriales)

- La utilización de un cable coaxial también elimina el acoplo magnético, no por el apantallamiento que supone, sino por la simetría de los conductores evita la presencia de bucles.

.

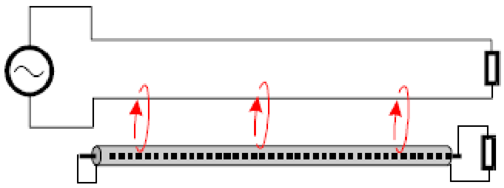


Figura 3.16

Reducción de interferencia inductiva usando una pantalla

Fuente: Instrumentación Electrónica de Comunicaciones (Escuela Técnica de Ing. Industriales)

Se ha planteado la necesidad de introducir blindajes de cables y apantallamientos de equipos para eliminar las interferencias eléctricas por acoplamiento capacitivo, y así mismo, la necesidad de que los blindajes y los apantallamientos estén conectados a tierra para que sean eficaces.

Los amplificadores de aislamiento son amplificadores en los que las etapas de entrada, de salida y de alimentación están eléctricamente aisladas. Esto supone que entre las entradas, salidas y alimentaciones, se pueden mantener diferencias de tensiones muy elevadas (cientos o millares de voltios).

Con los amplificadores de aislamiento se resuelven tres problemas:

1) Se asegura el aislamiento eléctrico entre diferentes equipos. Entre ellos solo fluye la señal. Esto es a veces requerido por normas de seguridad.

2) Permite operar con niveles en modo común muy elevados.

3) Aísla físicamente los diferentes equipos, y con ello se eliminan interferencias, conductivas y magnéticas.

También puede ser simplemente un transformador de aislamiento que proporciona solo rechazo de modo común y aislamiento de c.a.

Si se requiere un transformador puede tener un blindaje de faraday para la atenuación de ruido "en modo común", lo mismo que ser de voltaje constante para una mejor regulación de voltaje, o puede tener un acondicionador de línea, lo que proporciona regulación y atenuación de ruido. La razón primordial del uso del transformador es proporcionar una fuente separada de energía en el punto más cercano posible al equipo y aislado de otras fuentes de energía del edificio, véase anexo B.

Un "transformador dedicado" con aislamiento blindado, núcleo ferro-resonante y con derivación electrónica conmutada, etcétera, es considerada como una fuente derivada separadamente y debe conectarse a tierra conforme a la sección 250-30 del Código.

Este es un sistema aislado dedicado a la instalación de sistemas computarizados diseñado para ello. Todas las conexiones a tierra en este ambiente deben tener como referencia el nuevo punto único de unión neutro-tierra en el transformador.

El objetivo de la tierra aislada es reducir el ruido eléctrico o interferencia electromagnética, en el circuito de conexión a tierra.

Este conductor es la referencia de voltaje cero del sistema electrónico de cd y por consiguiente, la referencia de datos.

3.3. MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

3.3.1 LA FILOSOFIA DEL MANTENIMIENTO

Las instalaciones eléctricas de obra deberán diseñarse y realizarse de acuerdo con las exigencias del organismo competente y de normas técnicas aceptadas, estableciendo la calidad de los conductores, características de los tendidos a canalizaciones, dispositivos de corte y seguridad, incluyendo equipos, máquinas y herramientas.

Deberá existir en obra una memoria técnica donde se describa las características de la instalación eléctrica empleada en obra, los dispositivos de protección y maniobra existentes, sistemas de tableros principales y secundarios, instalación activa y del sistema de puesta a tierra, así como todos los elementos afines a las instalaciones relacionados con la seguridad de las personas.

El mantenimiento de los sistemas de tierra normalmente forma parte del mantenimiento de todo el sistema eléctrico en su conjunto. La calidad y frecuencia del mantenimiento debe ser suficiente para prevenir daño, en la medida que sea practicado razonablemente. {1}

La frecuencia del mantenimiento y la práctica recomendada en cualquiera instalación depende del tipo y tamaño de la instalación, su función y su nivel de voltaje. Por ejemplo, se recomienda que las instalaciones domésticas se prueben cada cinco años y las instalaciones industriales cada tres. Los locales con acceso de público requieren inspección más frecuente y dentro de los que requieren una inspección anual están los teatros, cines y lavanderías.

Todos los tipos de instalaciones deben ser objeto de dos tipos de mantenimiento:

• Inspección a intervalos frecuentes de aquellas componentes que son accesibles o que pueden fácilmente hacerse accesibles.

• Examen, incluyendo una inspección más rigurosa que aquella posible por el primer tipo, incluyendo posiblemente prueba.

INSPECCION

La inspección del sistema de tierra en una instalación normalmente ocurre asociada con la visita para otra labor de mantenimiento. Consiste de una inspección visual sólo de aquellas partes del sistema que pueden verse directamente, particularmente observando evidencia de desgaste, corrosión, vandalismo o robo.

En lo que sigue se resume el procedimiento en diferentes instalaciones:

• Instalaciones domésticas y comerciales. La inspección normalmente toma lugar asociada con otro trabajo en el local, por ejemplo, mejoramiento del servicio, extensiones, etc. El contratista eléctrico no sólo debe inspeccionar concienzudamente, sino también recomendar cambios donde quede claro que una instalación no satisface las normas correspondientes. La revisión particular recomendada, consiste en asegurar que la conexión entre los terminales de tierra del proveedor y del cliente es de dimensión suficiente para cumplir la reglamentación.

<u>EXAMEN</u>

El examen de un sistema de tierra normalmente es parte del examen del sistema eléctrico en su conjunto. El examen consiste de una muy rigurosa y detallada inspección del sistema de tierra global. Aparte de observar lo obvio y normal, el examinador revisará si el sistema satisface las normas de puesta a tierra vigentes. Además de esta inspección rigurosa, el sistema debe probarse, como se indica, de acuerdo al tipo de instalación:

• Instalaciones domésticas y comerciales. El examen de estas instalaciones por parte de un contratista eléctrico se hace normalmente a solicitud del cliente. La norma británica BS 7671 recomienda que este examen se realice con frecuencia no inferior a una vez cada 5 años. La misma norma también recomienda que todas las partes metálicas ajenas al sistema eléctrico, incluyendo tuberías de gas, agua fría y caliente, calefacción central, etc., deberían conectarse entre sí y luego conectadas al terminal de tierra del cliente, con conductor de tamaño adecuado.

Como parte del examen se requieren dos tipos de pruebas independientes:

• Una prueba de impedancia del circuito de tierra. Se dispone de instrumentos de prueba comerciales para este propósito.

• Una prueba de funcionamiento de todos los interruptores de corriente residual existentes en la instalación.

Se requieren las siguientes pruebas para el sistema de tierra:

• Una prueba de impedancia del circuito de prueba.

• Una prueba de funcionamiento de todos los interruptores de corriente residual.

• Una prueba de conexión de todas las partes metálicas ajenas al sistema eléctrico, es decir, tableros metálicos, gabinetes de control, distribuidores automáticos, etc. Esta prueba se realiza usando un óhmetro para medida de baja resistencia (microóhmetro), entre el terminal de tierra del cliente y todas las partes metálicas respectivas.

• Resistencia del electrodo de tierra. Si la instalación tiene su propio electrodo de tierra independiente, entonces como parte del examen debe medirse el valor de resistencia a tierra del electrodo y compararlo con su valor de diseño.

Esto puede significar aislar el electrodo de tierra y puede, por lo tanto, requerir que se desconecte la energía durante el período de prueba.

• Instalaciones con protección contra descarga de rayo. Se recomienda que el examen se realice confrontando con una norma relativa al tema, por ejemplo, la norma británica BS 6651. Luego de una inspección muy rigurosa, para asegurar que la instalación cumple con la reglamentación vigente, se requiere las siguientes pruebas:

• Valor de resistencia a tierra del electrodo. Esto significa previamente aislar el electrodo de los conductores de bajada del sistema de protección contra rayos. Esto no puede realizarse durante una tormenta eléctrica y además debe tomarse precauciones cuando se desconecta el electrodo de los conductores de bajada ya que es posible que aparezca un voltaje excesivo a través del enlace abierto y provocar una falla a tierra en la red de suministro de energía. Para evitar este problema, ahora existen instrumentos de medida de impedancia del tipo tenaza que no requieren desconectar el electrodo.

Una vez medido, el valor de resistencia a tierra del electrodo debe compararse con el valor de diseño, o aquél obtenido durante la prueba anterior.

• Recorrido del electrodo enterrado y examen de éste en algunos sitios para asegurar que no ha sufrido corrosión.

• Se revisa el valor del índice de acidez pH del suelo.

3.3.2 PRESCRIPCIONES

- El usuario deberá disponer del plano actualizado y definitivo de la instalación de toma de tierra, en el que queden reflejados los distintos componentes de la instalación: líneas principales de tierra, arqueta de conexión y electrodos de toma de tierra, mediante un símbolo y/o número específico.
- Ante cualquier modificación en la instalación o en sus condiciones de uso (ampliación de la instalación o cambio de destino del edificio) un técnico competente especialista en la materia deberá realizar un estudio previo.
- Todos los electrodomésticos y luminarias que incorporen la conexión correspondiente se conectarán a la red de tierra.
- El punto de puesta a tierra y su arqueta deberán estar libres de obstáculos que impidan su accesibilidad. Ante una sequedad extraordinaria del terreno, se realizará un humedecimiento

periódico de la red de tomas de tierra (siempre que la medición de la resistencia de tierra lo demande y bajo la supervisión de profesional cualificado).

3.3.3 PROHIBICIONES

- No se interrumpirán o cortarán las conexiones de la red de tierra.
- No se utilizarán las tuberías metálicas como elementos de puesta a tierra de aparatos.

3.3.4 MANTENIMIENTO POR EL PROFESIONAL CALIFICADO

Cada año:

En la época en que el terreno esté más seco y después de cada descarga eléctrica, comprobación de la continuidad eléctrica y reparación de los defectos encontrados en los siguientes puntos de puesta a tierra:

- Instalación de pararrayos.
- Instalación de antena colectiva de TV y FM.
- Enchufes eléctricos y masas metálicas de los aseos.
- Instalaciones de fontanería, gas y calefacción, depósitos, calderas, guías de aparatos elevadores y, en general, todo elemento metálico importante.

- Estructuras metálicas y armaduras de muros y soportes de hormigón.

Cada 2 años:

- Comprobación de la línea principal y derivadas de tierra, mediante inspección visual de todas las conexiones y su estado frente a la corrosión, así como la continuidad de las líneas. Reparación de los defectos encontrados.
- Comprobación de que el valor de la resistencia de tierra sigue siendo inferior a 20 Ohm. En caso de que los valores obtenidos de resistencia a tierra fueran superiores al indicado, se suplementarán electrodos en contacto con el terreno hasta restablecer los valores de resistencia a tierra de proyecto.

Cada 5 años:

- Comprobación del aislamiento de la instalación interior (entre cada conductor y tierra y entre cada dos conductores no deberá ser inferior a 250.000 Ohm). Reparación de los defectos encontrados.
- Comprobación del conductor de protección y de la continuidad de las conexiones equipotenciales entre masas y elementos conductores, especialmente si se han realizado obras en aseos, que hubiesen podido dar lugar al

corte de los conductores. Reparación de los defectos encontrados.

Podemos acotar que cuando un sistema eléctrico se expande, la que se creía era una baja resistencia a tierra, se hace mala.

Cuando la resistencia a tierra no es lo suficientemente baja, hay algunos métodos para bajarla.

Utilizar varillas más largas y, el uso de muchas varillas en paralelo, baja la resistencia a tierra, pero, cuando lo anterior ya no es posible, se tiene que mejorar el terreno mismo mediante productos químicos. Pero, tiene el inconveniente de ser una solución costosa y que bajo ciertas circunstancias se requiere de mantenimiento.

El problema de lograr una resistencia baja en la roca así como en otros suelos de alta resistividad, está asociada con el material en contacto con el electrodo y la compactación que éste recibe al rellenar el agujero.

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, ser no corrosivo y a la vez buen conductor eléctrico. La bentonita entre otros compuestos como el sulfato de magnesio o de sulfato de cobre, o de compuestos químicos patentados cumple con esos requisitos.

La bentonita es una arcilla consistente en el mineral montmorillonita, un silicato de aluminio, y tiene la particularidad de absorber hasta cinco veces su peso de agua y de hincharse hasta 13 veces su volumen seco. Y tiene una resistividad de 2.5 ohm-m con humedad del 300%.

Como resultado del mejoramiento del terreno se observa en las mediciones que la variación estacional de la resistencia de un electrodo es mucho menor a la que pudiera obtenerse en un terreno natural no mejorado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Con este trabajo se espera que se comprenda que un sistema de puesta a tierra sirve para proteger los aparatos eléctricos y electrónicos, pero el objetivo principal de este sistema es salvaguardar la vida de los seres vivos que se encuentren en el edificio, ya que la corriente eléctrica puede tener efectos parciales o totales, e incluso la muerte.

2. Para poder instalar un sistema de puesta a tierra, es imprescindible conocer el valor de resistividad que tiene el terreno. Es importante conocer el valor de la resistividad del terreno para que el sistema de puesta a tierra sea eficiente. El valor de la resistividad de un terreno puede variar de acuerdo a ciertos factores como los mencionados en este trabajo.

3. En un sistema de puesta a tierra el calibre del conductor que se utilice debe de ser el adecuado para poder soportar las altas corrientes de falla que podrían circular por dicho conductor. Para determinar el calibre de este conductor se tiene que tomar en cuenta la norma oficial mexicana para instalaciones eléctricas (NOM−001−SEDE−2005), ya que en esta se mencionan los calibres adecuados para cada tipo de instalación de puesta a tierra.

BIBLIOGRAFIA

1. Ing. Civil electricista Nelson Morales Osorio; Pro-cobre; Manual Técnico de sistemas de puesta a tierra; Primera edición;1999

2. Garcia Yohana; Universidad de Mérida ;Puesta a tierra en edificios;2003

3. RUELSA; Teoría y diseño de sistemas de puesta a tierra; Pagina HTML http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe30.html; 2010

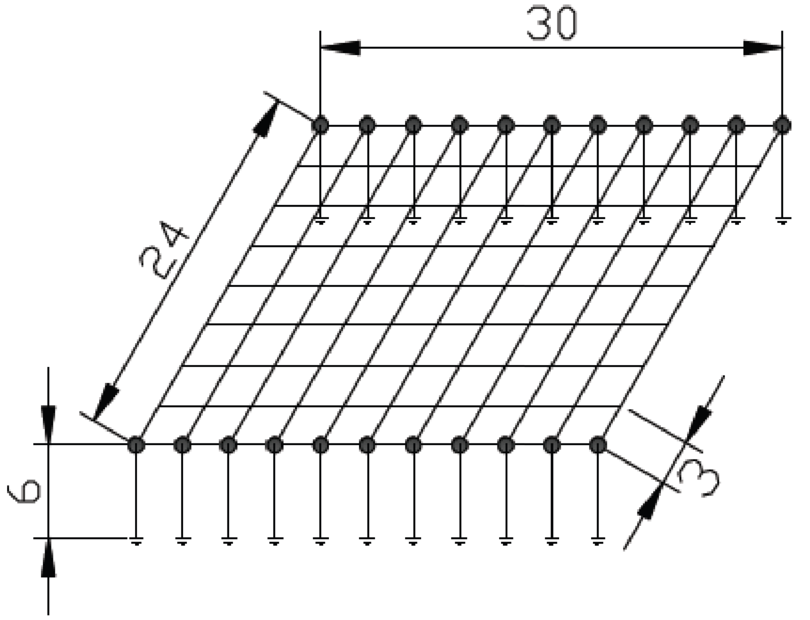
4. GB ELECTRICIDADCYPE -CYPE –;manual Puesta a tierra; Archivo PDF ;http://manualdeusoymantenimiento.generadordeprecios.info/IEP.html; 2010

5. Ing. Orly Guzmán Kure; U. Politécnica Salesiana; Resistividad del terreno y electrodos de puesta a tierra; U.P.S Ediciones 2005

6. Pro-cobre; Manual técnico de mallas de tierra; Archivo PDF; www.procobreecuador.org; 2010

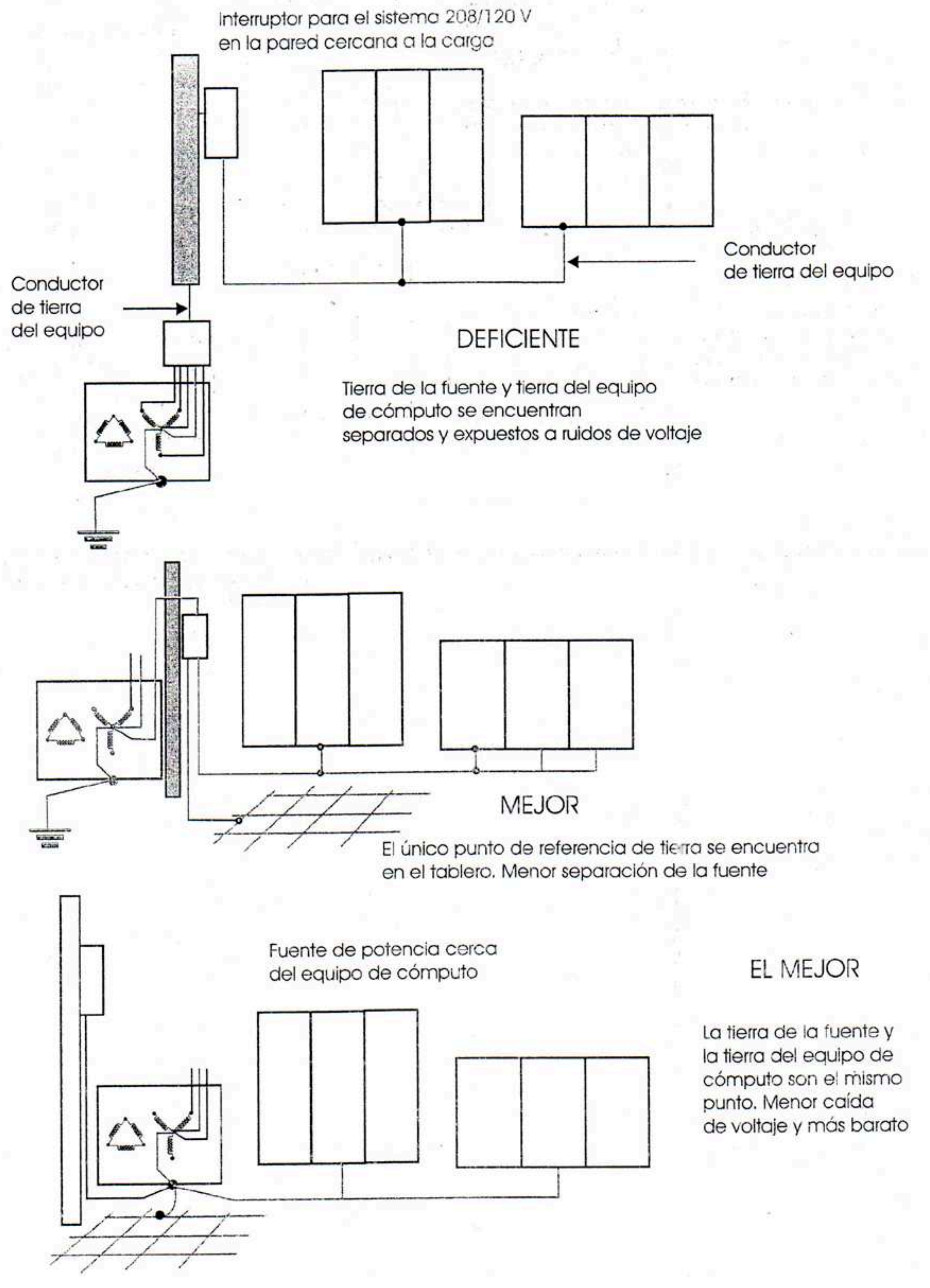
ANEXOS

ANEXO A



MALLA DE PUESTA A TIERRA **EJERCICIO PROPUESTO**	**Nombre :**	**Michael Villa Garcia**

Anexo B



Los transformadores de aislamiento deben colocarse tan cerca como sea posible del equipo computarizado y al sistema de tierra local

Fuente: Soluciones practicas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.