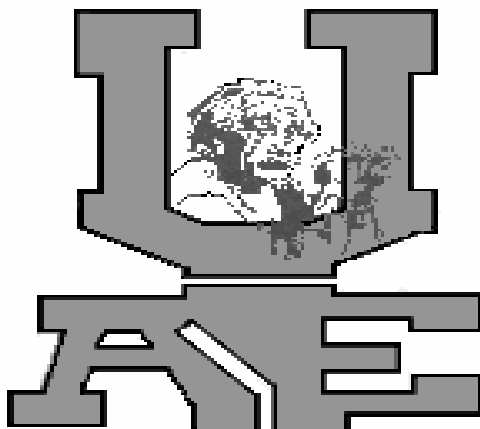


**UNIVERSIDAD ALBERT EINSTEIN  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**MANUAL PARA ATERRIZAJE EN  
SUBESTACIONES Y SISTEMAS ELÉCTRICOS**

**PREVIA OPCIÓN AL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO POR:**

**Christian José Barahona Abrego**

**Raúl Heber Cideos Morales**

**Carlos Roberto Marroquín Arévalo**

**MARZO 2003  
ANTIGUO CUSCATLAN, LA LIBERTAD, EL SALVADOR, C.A.**

# TEMARIO

1. Panorama
  - 1.1 Alcance
  - 1.2 Propósito
  - 1.3 Relación con otros estándares
2. Referencias
3. Definiciones
4. Seguridad en el aterrizaje
  - 4.1 El problema básico
  - 4.2 Condiciones de peligro
5. Rango de corriente tolerable
  - 5.1 Efecto de la frecuencia
  - 5.2 Efecto de la magnitud y duración
  - 5.3 Importancia de la velocidad alta en la limpieza de falla
6. Límite de corriente tolerable del cuerpo
  - 6.1 Fórmula de duración
  - 6.2 Suposiciones alternas
  - 6.3 Comparación de las ecuaciones de Dalziel y la curva de Biegelmeier
  - 6.4 Notas sobre el recierre (reclosing)
7. Circuito de tierra accidental
  - 7.1 Resistencia del cuerpo humano
  - 7.2 Trayectorias de corriente a través del cuerpo
  - 7.3 Circuitos equivalentes accidentales
  - 7.4 Efecto de una capa delgada del material superficial
8. Criterio del voltaje tolerable
  - 8.1 Definiciones
  - 8.2 Situaciones típicas de choque
  - 8.3 Criterios del voltaje de paso (step) y de toque (touch)
  - 8.4 Situaciones típicas de choque para subestaciones aisladas con gas
  - 8.5 Efecto de corrientes de tierra sostenidas
9. Consideraciones principales de diseño
  - 9.1 Definiciones
  - 9.2 Concepto general
  - 9.3 Electrodo de tierra primarios y auxiliares
  - 9.4 Aspectos básicos del diseño de rejillas
  - 9.5 Diseño en condiciones difíciles
  - 9.6 Conexiones a la rejilla

- 10. Consideraciones especiales para GIS
  - 10.1 Definiciones
  - 10.2 Características de GIS
  - 10.3 Encerramiento y corrientes circulantes
  - 10.4 Aterrizaje de encerramientos
  - 10.5 Cooperación entre fabricantes de GIS y usuarios
  - 10.6 Otros aspectos especiales del aterrizaje de GIS
  - 10.7 Notas sobre el aterrizaje de las fundaciones del GIS
  - 10.8 Criterios del voltaje de toque para GIS
  - 10.9 Recomendaciones
- 11. Selección de conductores y conexiones
  - 11.1 Necesidades básicas
  - 11.2 Selección del material para conductores y problemas relacionados de corrosión
  - 11.3 Factores del dimensionamiento del tamaño de conductores
  - 11.4 Selección de conexiones
- 12. Características del suelo
  - 12.1 El suelo como un medio de aterrizaje
  - 12.2 Efecto del gradiente de voltaje
  - 12.3 Efecto de la magnitud de la corriente
  - 12.4 Efecto de la humedad, temperatura y contenido químico
  - 12.5 Uso de capas de material superficial
- 13. Estructura del suelo y selección del modelo de suelo
  - 13.1 Investigación de la estructura del suelo
  - 13.2 Clasificación de los suelos y rango de resistividad
  - 13.3 Mediciones de la resistividad
  - 13.4 Interpretación de las mediciones de la resistividad del suelo
- 14. Evaluación de la resistencia de tierra
  - 14.1 Necesidades usuales
  - 14.2 Cálculos simplificados
  - 14.3 Ecuaciones de Schwarz
  - 14.4 Notas sobre la resistencia a tierra de los electrodos primarios
  - 14.5 Tratamiento del suelo para bajar la resistividad
  - 14.6 Electrodo embebidos en concreto
- 15. Determinación de la corriente máxima de rejilla
  - 15.1 Definiciones
  - 15.2 Procedimiento
  - 15.3 Tipos de fallas a tierra
  - 15.4 Efecto de la resistencia a tierra de la subestación
  - 15.5 Efecto de la resistencia de falla
  - 15.6 Efecto de los alambres aéreos de tierra y conductores neutro

- 15.7 Efecto de ductos y cables enterrados directamente
- 15.8 Tipos de falla peores y ubicación
- 15.9 Cálculo de la división de corriente
- 15.10 Efecto de la asimetría
- 15.11 Efecto de los cambios futuros
- 16. Diseño de sistemas de aterrizaje
  - 16.1 Criterios de diseño
  - 16.2 Parámetros críticos
  - 16.3 Índice de parámetros de diseño
  - 16.4 Procedimiento de diseño
  - 16.5 Cálculo de los voltajes escalón máximo y de malla
  - 16.6 Refinamiento del diseño preliminar
  - 16.7 Aplicación de ecuaciones para  $E_m$  y  $E_s$
  - 16.8 Uso del análisis de computadora en el diseño de rejilla
- 17. Áreas especiales de interés
  - 17.1 Áreas de servicio
  - 17.2 Aterrizaje de ejes de interruptores y manivela de operación
  - 17.3 Aterrizaje de cerca de subestación
  - 17.4 Aterrizaje de pantalla de cable de control
  - 17.5 Extensiones de barra de GIS
  - 17.6 Aterrizaje de aparta rayos (surge arrester)
  - 17.7 Tierras separadas
  - 17.8 Potenciales de transferencia
- 18. Construcción de un sistema de aterrizaje
  - 18.1 Construcción de la rejilla de tierra - método trinchera
  - 18.2 Construcción de la rejilla de tierra - método de **“conductor plowing”**
  - 18.3 Instalación de conexiones, “mechas” y barras de tierra
  - 18.4 Consideración de la secuencia de construcción para la instalación de rejillas de tierra
  - 18.5 Consideraciones de seguridad durante las excavaciones subsecuentes
- 19. Mediciones de campo de un sistema de aterrizaje ya construido
  - 19.1 Mediciones de la impedancia del sistema de aterrizaje
  - 19.2 Investigación de campo los contornos de potencial y voltajes de toque y de paso
  - 19.3 Valoración de las mediciones de campo para diseño seguro
  - 19.4 Prueba de integridad de la rejilla de tierra
  - 19.5 Verificaciones periódicas de los sistemas de aterrizaje que se instalan.
- 20. Modelos a escala física
- 21. Métodos de aterrizaje para Sistemas Eléctricos.

ANEXO A (informativo) Bibliografía

ANEXO B (informativo) Ejemplos de cálculo

ANEXO C (informativo) Análisis gráfico y aproximado de la división de corriente

ANEXO D (informativo) Ecuaciones simplificadas de paso y malla

ANEXO E (informativo) Modelo de suelo uniforme equivalente para suelos no uniformes

## INTRODUCCION

Este Trabajo de Graduación consiste en dar a conocer lo más importante para el Aterrizaje en Subestaciones y Sistemas Eléctricos, que se conoce como: **puesta a tierra.**

En este trabajo se cubren las subestaciones convencionales ó con aislamiento de gas. También se incluyen las subestaciones de distribución, transmisión y plantas de generación. Con el cuidado apropiado, los métodos que se describen también se aplican a las partes interiores de tales subestaciones ó las subestaciones que están completamente en el interior. No se pretende cubrir los problemas de aterrizaje peculiares de las subestaciones de C.D. y el análisis cuantitativo de los efectos de las descargas eléctricas esta fuera del alcance de este manual.

Como se puede invertir tanto dinero como se desee en un sistema de aterrizaje, se plantearán en los siguientes capítulos los puntos a considerar en un diseño adecuado. Con estos criterios se resolverán la mayoría de los problemas, pero en los casos complejos, es preferible consultar la bibliografía proporcionada.

Es importante tener presente que el NEC no es un libro de texto, no presenta ejemplos, antecedentes, ni ilustraciones, es solo un grupo de recomendaciones para realizar una instalación eléctrica.

Adherirse al código minimiza los riesgos de seguridad industrial y proporciona prácticas de instalación correcta de un sistema eléctrico. Estos reglamentos se han desarrollado a través de los años por las experiencias reales de todas las industrias, ámbitos residenciales, comerciales y en Estados Unidos desde 1895.

Es fundamental familiarizarse con el NEC, consideremos primero la gran cantidad de equipos, fabricados en Estados Unidos, que se instalan a diario en nuestro país y que requieren prácticas de instalación estadounidense, de acuerdo con el código de ese país. Otro factor importante para actualizar los conocimientos del código es el posible tratado de libre comercio con Estados Unidos, el cual traería una importación masiva de equipo eléctrico.

Es imprescindible tener presente que el NEC y los reglamentos eléctricos de cada país son normas obligatorias de seguridad y que el no cumplirlos en una instalación es violar prácticamente la ley de cada país.

En el nuevo comercio global, las empresas de seguros limitan sus responsabilidades financieras cuando en una instalación no se puede demostrar la “calidad del sistema” (aterrizaje adecuado) y lo primero que investigan es si se está cumpliendo el Código Eléctrico Nacional(NEC).

La política corporativa de las empresas de seguros es lograr seguridad y rentabilidad, tratando de evitar accidentes y de pagar considerables sumas de dinero por indemnización en caso de siniestro. En otros casos hay empresas que no han podido cobrar sus pólizas de seguros debido a simples violaciones del código.

El concepto y uso de los criterios de seguridad se describen en los capítulos 1 al 8, los aspectos prácticos del diseño de un sistema de aterrizaje se cubren en los capítulos 9 al 13, los procedimientos y técnicas de evaluación para la valoración de los sistemas de aterrizaje (en términos de criterios de seguridad) se describen en los capítulos 14 al 20 y el aterrizaje para sistemas eléctricos en el capítulo 21. El material de apoyo está organizado desde el anexo A hasta el anexo E.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la presente investigación se hará un Manual para Aterrizaje en Subestaciones y Sistemas Eléctricos, el cual está orientado a identificar los métodos más detallados y específicos para un buen aterrizaje. Con el propósito de evitar el daño serio a personas y equipos prematuramente, debido al inapropiado aterrizaje.

La red de tierra sirve para principalmente para protección de las personas que se encuentran dentro de ella como en sus alrededores y para la protección de equipos que se encuentran dentro de la misma.

Los procedimientos para desarrollar un sistema de aterrizaje se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja. Los conceptos son ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger.

El tema conexión a tierra es difícil, no por los conceptos intrínsecos de la materia, sino principalmente debido a la interpretación errónea y a la gran cantidad de términos usados en libros, artículos técnicos y otras publicaciones sobre el tema.

Los conocimientos sobre las prácticas correctas de conexión a tierra son necesarios para asegurar el funcionamiento correcto de los equipos modernos.

La instalación incorrecta de un sistema de aterrizaje implica desde lesiones menores hasta la muerte de una persona, lo mismo que operaciones erráticas ó daños costosos ó irreparables a los equipos e instalaciones. Los errores en el sistema de puesta a tierra representan un peligro de seguridad industrial.

Su forma de cálculo se basa en el rango de corriente, el límite de corriente tolerable por el cuerpo, circuito de tierra accidental y principalmente el criterio del voltaje tolerable (voltaje de toque y voltaje de paso).

El diseño del aterrizaje en subestaciones se debe realizar de manera tal, que limite el efecto del gradiente de potencial a tierra tanto en niveles de voltaje y corriente, para no poner en peligro la seguridad de las personas ó equipos bajo condiciones normales de falla.



## JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

Lograr un manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos, respetando las normas del IEEE y las recomendaciones del NEC para que facilite la medición, el cálculo, la construcción, el diseño y el mantenimiento de sistemas de aterrizaje.

En nuestro país, con relación al problema de la seguridad en el aterrizaje de subestaciones y sistemas eléctricos, no se encuentra documentado. Basándonos en el riesgo que actualmente afecta a las personas y a todos los dispositivos eléctricos y/o electrónicos, debido al mal concepto y subsecuentemente a la inapropiada instalación en lo que respecta al aterrizaje. Cada vez más, es fundamental la existencia de una puesta a tierra de características adecuadas, la cual proporcione a las instalaciones eléctricas y a las personas que las utilizan una seguridad apropiada, además de un buen funcionamiento y una vida útil prolongada de los equipos eléctricos.

Un factor que incide negativamente en nuestra cultura técnica sobre este tema es la falta ó escasez de información específica en el idioma español. La especialización sobre el tema es fragmentaria y se imparte comúnmente en los Estados Unidos, en ingles, lo que limita la capacitación del personal técnico que no habla este idioma.

El propósito de este manual no es enseñar el NEC ó ingeniería eléctrica, sino presentar las prácticas adecuadas para el aterrizaje en subestaciones, utilizando el IEEE y el NEC como autoridad indiscutible para la instalación de los sistemas de aterrizaje.

También se puede garantizar en forma absoluta que el Código Eléctrico Nacional es un libro muy difícil de leer y se presta a interpretaciones erróneas. Parte de la confusión sobre el sistema de tierra se basa en mitos e información incorrecta que circula en artículos, libros y otras publicaciones.

Este manual también clarifica el verdadero significado del Código, ya que siendo un texto muy difícil de leer se presta a toda clase de interpretaciones.

Por lo tanto, este Manual es un recurso que pretende cumplir las exigencias para una buena seguridad en el aterrizaje.

# **1. PANORAMA**

## **1.1 Alcance**

Este manual está relacionado, principalmente, con subestaciones exteriores de C.A., ya sean convencionales ó con aislamiento de gas. Se incluyen las subestaciones de distribución, transmisión y plantas de generación. Con el cuidado adecuado, los métodos que se describen, también se aplican a las partes interiores de tales subestaciones ó a las subestaciones que están totalmente en el interior<sup>1</sup>.

Los problemas peculiares de las subestaciones de C.D. y el análisis cuantitativo de los efectos de las descargas eléctricas (lightning surges) estarán fuera del alcance de este manual.

## **1.2 Propósito**

La intención de este manual es dar lineamientos e información pertinente para prácticas de aterrizaje seguro en el diseño de subestaciones de C.A.

Los propósitos específicos de este manual son:

- a) Establecer, como base para el diseño, los límites seguros de las diferencias de potencial que pueden existir en una subestación y sistemas eléctricos en condiciones de falla, entre los puntos que pueden entrar en contacto con el cuerpo humano.
- b) Revisar las prácticas de aterrizaje de subestaciones y sistemas eléctricos con referencia especial a la seguridad y desarrollar criterios para el diseño seguro.
- c) Dar un procedimiento para el diseño de sistemas prácticos de aterrizaje basados en esos criterios.
- d) Desarrollar métodos analíticos como ayuda para el entendimiento y solución de los problemas típicos de gradientes.

---

<sup>1</sup>Obviamente, los mismos problemas de gradientes de tierra que existen en el patio de una subestación podrían no existir dentro de un edificio. Esto será cierto, ya que cualquier superficie de piso dará aislamiento efectivo de los potenciales de tierra, o es equivalente efectivo a una placa conductiva o a una rejilla en malla cerrada que siempre está al potencial de tierra de una subestación, incluyendo la estructura del edificio y sus accesorios de fijación.

Por lo tanto, incluso en las subestaciones totalmente interiores puede ser esencial, considerar algunos de los peligros posibles desde los gradientes perimetrales (en la entrada del edificio) y desde los potenciales transferidos que se describen en el Capítulo 8. Además, en el caso de las instalaciones interiores aisladas con gas, el efecto de las corrientes circulantes en los encerramientos puede estar fuera de consideración, como se discute en el Capítulo 10.

El concepto y uso de los criterios de seguridad se describe en los capítulos 1 al 8, los aspectos prácticos del diseño de un sistema de aterrizaje se cubren en los capítulos 9 al 13, los procedimientos y técnicas de evaluación para la valoración de los sistemas de aterrizaje (en términos de criterios de seguridad) se describen en los capítulos 14 al 20 y el aterrizaje para sistemas eléctricos en el capítulo 21. El material de apoyo está organizado desde el anexo A hasta el anexo E.

Este manual está relacionado, principalmente, con prácticas de aterrizaje seguro para frecuencias de potencia en el rango de 50-60 HZ. Los problemas peculiares de las subestaciones de C.D. y los efectos de las descargas eléctricas están fuera del alcance de este manual. Sin embargo, un sistema de aterrizaje diseñado según se describe aquí da algún grado de protección contra picos de onda de frente escarpado que entran a la subestación y pasan a Tierra a través de sus electrodos de tierra<sup>2</sup>. Se debe consultar otras referencias para más información sobre esos temas.

---

<sup>2</sup>La impedancia grande ofrecida a un pico de frente escarpado incrementará un poco la caída de voltaje en los terminales de tierra al sistema de rejilla y disminuirá la efectividad de las partes más lejanas de la rejilla. A pesar de todo, en gran medida, está el hecho de que el cuerpo humano puede tolerar, aparentemente, grandes magnitudes de corriente en el caso de las descargas eléctricas, que en el caso de corrientes de 50 o 60 HZ.

### 1.3 Relación con otros estándares

Los siguientes estándares dan información sobre aspectos específicos de aterrizaje:

- ⇒ IEEE Std 81-1983<sup>3</sup> y IEEE Std 81.2 -1991 da procedimientos para la medición de la resistividad, la resistencia de sistemas de aterrizaje instalados, los gradientes de superficie y la continuidad de los conductores de la rejilla.
- ⇒ IEEE Std 142-1991, se conoce también como Green Book, cubre algunos de los aspectos prácticos de aterrizaje, tales como aterrizaje de equipos, trayectorias de cables para evitar corrientes de tierra inducidas, aterrizaje de cables de pantalla (protección contra estática y descargas) e instalaciones interiores, etc.
- ⇒ IEEE Std 367-1996 da una explicación detallada del fenómeno de la corriente asimétrica y de la división de la corriente de falla que se da en muchas trayectorias en paralelo. Por supuesto que se debe tener en cuenta que los riesgos de potencial de tierra calculados para propósitos de protección en telecomunicaciones y aplicaciones de relevo, se basan en un conjunto diferente de suposiciones relativas a las corrientes máximas de rejilla, en comparación con las que usamos para el propósito de este manual.
- ⇒ IEEE Std 665-1995 da una explicación detallada de las prácticas de aterrizaje de estaciones de generación.
- ⇒ IEEE Std 837-1989 da pruebas y criterios para seleccionar las conexiones que se usarán en los sistemas de aterrizaje.

---

<sup>3</sup>La información sobre las referencias se puede encontrar en el capítulo 2.

## 2. REFERENCIAS

Este manual se debe usar en combinación con las siguientes publicaciones. Cuando los siguientes estándares se actualicen con revisión aprobada, también se aplicará la revisión.

Accredited Standards Committee C2-1997, National Electrical Safety Code (NESC)

IEEE Std 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System (Parte 1).

IEEE Std 81.2-1992, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems (Parte 2).

IEEE Std 142-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book).

IEEE Std 367-1996, IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Substation Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault.

IEEE Std 487-1992, IEEE Recommended Practice for the Protection of Wire-Line and Communication Facilities Stations.

IEEE Std 525-1992 (Reaff 1999), IEEE Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations.

IEEE Std 665-1995, IEEE Guide for Generating Station Grounding.

IEEE Std 837-1989 (Reaff 1996), IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding.

IEEE Std 1100-1999, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment (IEEE Emerald Book).

IEEE Std C37.122-1993, IEEE Standard for Gas-Insulated Substations.

IEEE Std C37.122-1993, IEEE Guide for Gas-Insulated Substations.

### 3. DEFINICIONES

Muchas de las definiciones que se dan aquí sólo son pertinentes a la aplicación de este manual. No se hará referencia a ninguna de las definiciones que se dan a continuación, a menos que se necesite por claridad. Todas las demás definiciones están dentro del texto de las cláusulas individuales. Para definiciones adicionales refiérase al IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms [B21].

**3.1 Electrodo auxiliar de tierra:** es un electrodo de tierra con cierto diseño ó restricciones de operación. Su función primaria puede ser distinta a la de conducir la corriente de falla a tierra hacia el planeta Tierra.

**3.2 Encerramiento continuo:** es el encerramiento de barra en la cual las secciones continuas de la cubierta, a lo largo del mismo conductor de fase están empalmadas para dar una trayectoria eléctricamente continua a la corriente, en toda la longitud del encerramiento. Los empalmes cruzados, que conectan los encerramientos de las otras fases, se hacen sólo en los extremos de la instalación y en algunos pocos puntos intermedios seleccionados.

**3.3 Compensación de CD (dc offset):** es la diferencia entre la onda simétrica de corriente y la onda real de corriente durante una condición transitoria del sistema de potencia. Matemáticamente, la corriente real de falla se puede separar en dos partes, una componente alterna simétrica y una componente unidireccional (CD). La componente unidireccional puede ser de cualquier polaridad, pero no cambia de polaridad y decrecerá a alguna velocidad predeterminada.

**3.4 Factor de decremento:** es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de aterrizaje orientados con seguridad. Determina el equivalente rms de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada,  $t_f$ , tomado en cuenta para el efecto del “dc offset” inicial y su atenuación durante la falla.

**3.5 Corriente de falla asimétrica efectiva:** es el valor rms de la onda de corriente asimétrica, integrada sobre el intervalo de duración de la falla (*Fig. 1*)

$$I_F = (D_f) (I_f) \quad (1)$$

Donde

$I_F$  es el valor de la corriente asimétrica de falla efectiva en amperios.

$I_f$  es el valor rms de la corriente simétrica de falla a tierra en amperios.

$D_f$  es el factor de decremento.

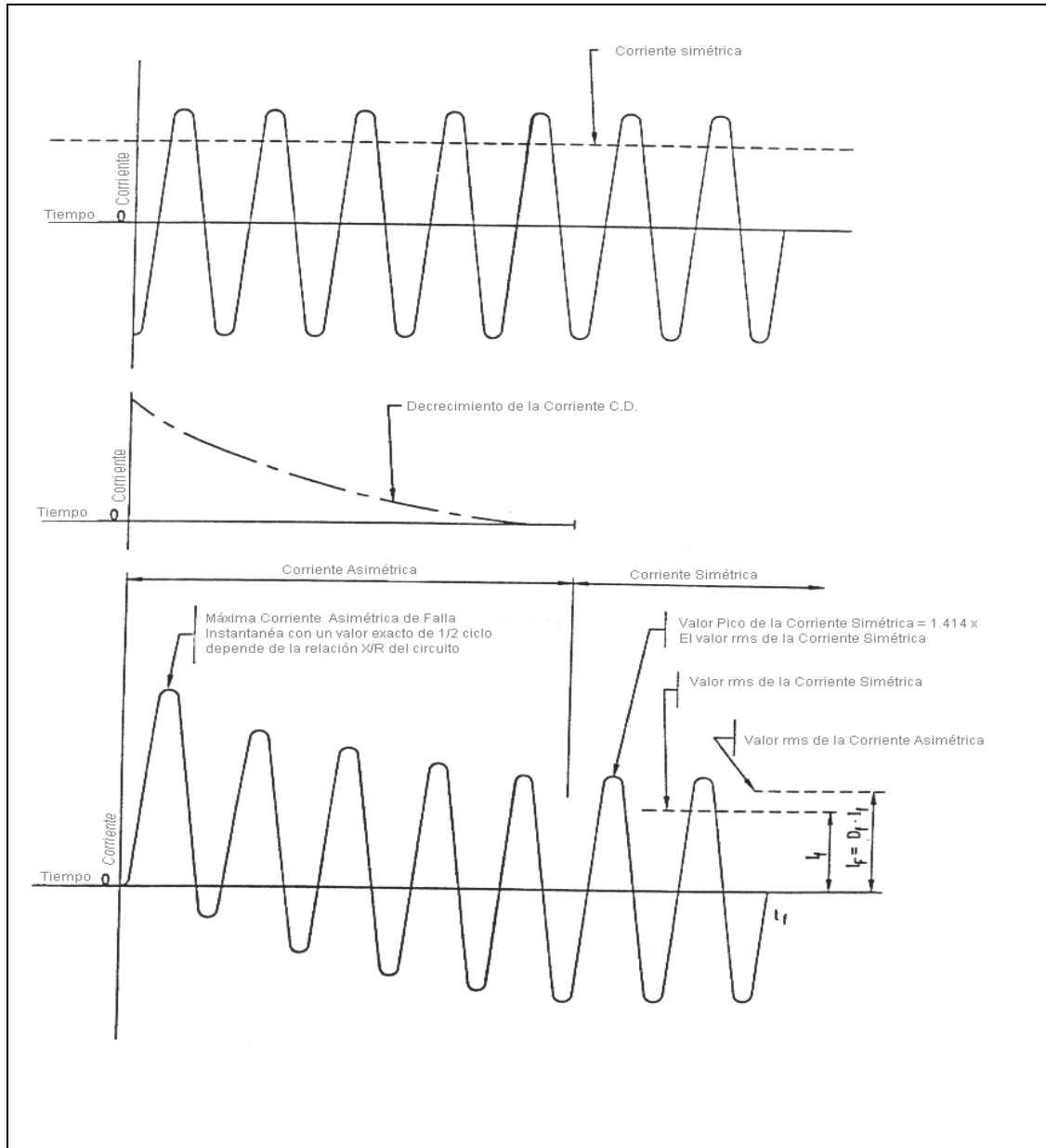


Figura 1 - Relaciones entre valores reales de la corriente de falla y valores de  $I_F$ ,  $I_f$  y  $D_f$  para la duración de la falla  $t_f$ .



**3.6 Corrientes de encerramiento:** son corrientes que resultan de los voltajes inducidos en el encerramiento metálico por corrientes que fluyen en los conductores encerrados.

**3.7 Factor de división de la corriente de falla:** es un factor que representa al inverso de la relación de la corriente simétrica de falla a la parte de la corriente que fluye entre la rejilla de aterrizaje y en los alrededores del planeta Tierra.

$$S_f = (I_g) / (3 I_0) \quad (2)$$

Donde

$S_f$  es el factor de división de la corriente de falla.

$I_g$  es el valor rms de la corriente simétrica de rejilla, en amperios.

$I_0$  es la corriente de falla de secuencia cero en amperios.

Nota.- En realidad, el factor de división de corriente podría cambiar durante la duración de la falla, por las diversas relaciones de decaimiento de las contribuciones a la falla y la secuencia de las operaciones de los dispositivos de interrupción. Sin embargo, para calcular el valor de diseño de la corriente máxima de rejilla y la corriente simétrica de rejilla, para definir la corriente simétrica de rejilla y la corriente máxima de rejilla, suponemos que la relación es constante durante la duración total de una falla dada.

**3.8 Subestación con aislamiento de gas:** es un ensamblaje de múltiples componentes, compacta, encerrada en una carcasa metálica, en el cual el aislante primario es un gas, y consiste normalmente de barras, interruptores mecanizados y equipos asociados (sub-ensamblajes).

**3.9 Aterrizaje:** es una conexión conductora, ya sea intencional ó accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico ó equipo se conecta a tierra ó en elementos conductores de, relativamente, extensión grande en vez del planeta Tierra.

**3.10 Aterrizado:** es un sistema, circuito ó aparato provisto(s) de una(s) tierra(s) con el propósito de establecer un circuito de retorno a tierra y mantener su potencial casi igual al potencial del planeta Tierra.

**3.11 Corriente a tierra:** es una corriente fluyendo dentro ó fuera del planeta Tierra ó su equivalente trabajando como aterrizaje.

**3.12 Electrodo de Tierra:** es un conductor introducido en la tierra y se usa para recoger ó disipar corriente, desde ó hacia el interior del planeta Tierra.

**3.13 Malla de tierra:** es una placa sólida metálica ó un sistema de conductores sin cubierta (forro) con espacios estrechos que se conectan y con frecuencia se colocan a pocas profundidades sobre una rejilla de tierra ó en otros sitios de la superficie de la Tierra. Se trata de obtener una medida extra de protección minimizando el peligro de la exposición a altos voltajes de paso ó toque en áreas ó lugares de operaciones críticas que frecuentemente utilizan las personas. Son formas comunes de una malla de tierra, el enrejado metálico aterrizado, colocado en ó sobre la superficie del suelo ó red (malla) de alambre colocada bajo el material superficial.

**3.14 Aumento del potencial de tierra (GPR):** es el máximo potencial eléctrico que una subestación de rejilla aterrizada puede alcanzar, relativo a una distancia de un punto aterrizado que se asume como el potencial de tierra remoto. Este voltaje, GPR, es igual a los máximos tiempos de corriente de rejilla y resistencia de rejilla.

NOTA – Bajo condiciones normales, el equipo eléctrico aterrizado opera con potencial de tierra cercano a cero. Esto es, el potencial de un conductor neutro aterrizado es casi idéntico al potencial de la tierra remota. Durante una falla de tierra la parte de la corriente de falla que es conducida por una subestación de rejilla aterrizada hacia la tierra causa el incremento del potencial de la rejilla con respecto a la tierra remota.

**3.15 Circuito de retorno de tierra:** es un circuito en el cual la tierra ó un cuerpo conductor equivalente, se utiliza para completar el circuito y permitir la circulación de corriente desde ó hacia la fuente de corriente.

**3.16 Rejilla aterrizada:** es un sistema horizontal de electrodos en la tierra que consiste de un número de interconexiones, conductores desnudos ocultos en la tierra, proporcionando una tierra común para los aparatos eléctricos ó estructuras metálicas, comúnmente en una instalación específica.

NOTA – Las rejillas enterradas horizontalmente cercanas a la superficie de las tierras son también efectivas en controlar los gradientes de potencial en la superficie. Una rejilla típica comúnmente se complementa con un número de varillas a tierra y pueden, además, conectarse a los electrodos de tierra auxiliares para reducir su resistencia con respecto a la tierra remota.

**3.17 Sistema de aterrizaje:** comprende todas las interconexiones aterrizadas instaladas en un área específica.

**3.18 Barras de tierra principal:** es un conductor ó sistema de conductores que facilitan la conexión de todos los componentes metálicos, diseñados en las subestaciones aisladas con gas a un sistema de subestación aterrizada.

**3.19 Corriente de rejilla máxima:** es un valor de diseño de la corriente de rejilla máxima, se define como sigue:

$$I_G = (D_f) (I_g) \quad (3)$$

Donde

$I_G$  es la corriente de rejilla máxima en amperios.

$D_f$  es el factor de decremento de la duración completa de la falla en segundos.

$I_g$  es el valor rms simétrico de la corriente de rejilla en amperios.

**3.20 Voltaje de malla:** es el voltaje máximo de toque dentro de una malla de una rejilla de tierra.

**3.21 Voltaje de toque metal con metal:** es la diferencia de potencial entre objetos metálicos ó estructuras dentro de los lugares de la subestación que puede establecer un puente por el contacto directo mano-mano ó mano-pie.

NOTA – El voltaje de toque metal con metal entre objetos metálicos o estructuras conectadas a la rejilla de tierra se asume despreciable en subestaciones convencionales. Sin embargo, el voltaje de toque metal con metal entre objetos metálicos o estructuras conectadas a la rejilla de tierra y objetos metálicos internos de la subestación, tal como un cerca aislada, pero no conectada a la rejilla de tierra puede ser considerable. En el caso de las subestaciones aisladas con gas (GIS), el voltaje de toque metal con metal entre objetos metálicos o estructuras conectadas a la rejilla de tierra es debido a las fallas internas ó a las corrientes inducidas en los encerramientos.

En una subestación convencional, el peor voltaje de toque se encuentra comúnmente en la diferencia de potencial entre una mano y el pie en un punto a la distancia máxima alcanzable. Sin embargo, en el caso de un contacto metal con metal desde mano con mano o desde mano con pie, ambas situaciones se deberían investigar para las posibles condiciones de alcance peores. La *figura 12* y la *figura 13* ilustran estas situaciones para subestaciones aisladas con aire, y la *figura 14* ilustra estas situaciones en la GIS (Subestaciones con aislamiento de gas).

**3.22 Encerramiento no continuo:** es una barra encerrada con las secciones consecutivas de la cubierta del conductor de la misma fase, aislado eléctricamente (ó aislado uno de otro), de manera que no puede haber circulación de corriente más allá de cada sección de encerramiento.

**3.23 Electrodo de tierra primario:** es un electrodo de tierra, específicamente diseñado ó adaptado, para descargar la corriente de falla a tierra hacia el planeta, normalmente en un patrón específico de descarga, como se necesita (ó implícitamente necesario para) en el diseño del sistema de aterrizaje.

**3.24 Voltaje de Paso:** es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pie sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado.

**3.25 Reactancia Subtransitoria:** es la reactancia de un generador al inicio de una falla. Esta reactancia se usa en los cálculos de la corriente de falla simétrica inicial. La corriente decrece continuamente, pero se asume que se llegará a estabilizar a este valor como en la primera etapa, tardando aproximadamente 0.05 segundos después de una falla.

**3.26 Material Superficial:** es un material instalado sobre el suelo que consta de roca, grava, asfalto ó materiales hechos por el hombre, etc. Los materiales superficiales, dependen de la resistividad del material, los cuales pueden impactar significativamente la corriente del cuerpo por los voltajes de toque y de paso, involucrando los pies de la persona.

**3.27 Corriente simétrica de rejilla:** es la parte de la corriente de falla a tierra simétrica la cual fluye entre la rejilla aterrizada y la tierra circundante, esto se puede expresar como:

$$I_g = (S_f) (I_f) \quad (4)$$

Donde

$I_g$  es el valor rms de la corriente de rejilla simétrica en amperios.

$I_f$  es el valor rms de la corriente de falla a tierra simétrica en amperios.

$S_f$  es el factor de división de la corriente de falla.

**3.28 Corriente simétrica de falla a tierra:** es el valor rms máximo de la corriente simétrica de falla, después del inicio de una falla a tierra. Como Tal se representan los valores rms de la componente simétrica en el primer medio ciclo de una onda de corriente que se desarrolla después del instante de una falla en un tiempo cero. Para las fallas de fase a tierra tenemos:

$$I_{f(0+)} = 3 (I_0'') \quad (5)$$

Donde

$I_{f(0+)}$  es el valor rms inicial de una corriente simétrica de falla a tierra.

$I_0''$  es el valor rms de una corriente simétrica con secuencia cero que se desarrolla un instante después del inicio de la falla, manifestándose en las reactancias subtransitorias de las maquinas en movimiento que contribuyen a la falla.

Este valor rms de corriente simétrica de falla se muestra en una notación abreviada  $I_f$ , ó solamente se refiere como  $3I_0$ . Para propósitos de este manual, la razón fundamental para la notación anterior es que el valor inicial de la

corriente simétrica de falla se supone como constante en la duración total de la falla.

**3.29 Voltaje de toque:** es la diferencia de potencial entre el aumento del potencial de la tierra y el potencial de la superficie en un punto donde una persona se encuentre de pie y al mismo tiempo tenga una mano en contacto con una estructura aterrizada.

**3.30 Voltaje de transferencia:** es un caso especial del voltaje de toque, donde se transfiere un voltaje dentro ó fuera de la subestación desde ó hacia un punto externo remoto al sitio de la subestación.

**3.31 Voltaje transitorio de carcasas metálicas (TEV):** es un fenómeno transitorio muy rápido, el cual se encuentra en las carcasas metálicas aterrizadas de los sistemas de las GIS. Típicamente, las tierras conducidas son demasiado grandes (inductivas) a la frecuencia de interés para prevenir efectivamente la ocurrencia de TEV. El fenómeno se conoce también como el aumento transitorio de tierra (TGR) ó como el aumento transitorio de potencial a tierra (TGPR).

**3.32 Transitorios súper rápidos (VFT):** es un tipo de transitorios generados internamente dentro de una subestación con aislamiento de gas (GIS) que se caracterizan por una duración corta y por una frecuencia muy alta. Los VFT se generan a través de los contactos de un aparato interruptor o una línea a tierra durante la falla por el decremento rápido de voltaje durante la ruptura del gas aislante. Estos transitorios pueden tener incrementos de tiempos en el orden de los nanosegundos implicando una capacidad de frecuencia cercana a los 100 MHz. Sin embargo, las frecuencias de oscilación dominantes, se relacionan con las longitudes físicas de barras de la GIS, que se encuentran generalmente en el rango de los 20 a 40 MHz.

**3.33 Sobrevoltaje de transitorios súper rápidos (VFTO):** es un sistema de sobrevoltaje que surge de la generación de los VFT. Ya que el VFT es uno de los componentes principales del VFTO, algunos componentes de frecuencia más baja ( $\cong 1$  MHz) se pueden presentar como un resultado de la descarga de la capacitancia acumulada (transformadores de voltaje). Generalmente, el VFTO no excederá 2.0 en por unidad, aunque, son posibles las magnitudes elevadas, en instantes específicos.

**3.34 Relación X/R:** es la relación entre la reactancia y la resistencia del sistema. Esto es un indicador de la disminución en el valor de cualquier compensación de DC. Un valor grande de X/R corresponde a una constante de tiempo grande y una razón baja de caída.

## 4. SEGURIDAD EN EL ATERRIZAJE.

### 4.1 El problema básico

En principio, un diseño seguro de aterrizaje tiene los dos objetivos siguientes:

- Proveer los medios para conducir corrientes eléctricas hacia el planeta Tierra bajo condiciones normales y de fallas, sin exceder el límite de los equipos y cualquier otra operación ó que afecten severamente la continuidad del servicio.
- Asegurar que una persona no esté expuesta a los peligros de un golpe eléctrico crítico en las cercanías de una instalación aterrizada.

Una aproximación práctica para el aterrizaje seguro en lo que concierne y que hace posible el control de la interacción de los dos sistemas de aterrizaje, es:

- La tierra intencional, que consiste de electrodos de tierra enterrados a una profundidad por debajo de la superficie de la tierra.
- La tierra accidental, establecida temporalmente por una persona expuesta a un gradiente de potencial en las cercanías de una instalación aterrizada.

Frecuentemente las personas asumen que cualquier objeto aterrizado se puede tocar con toda seguridad. Una subestación con resistencia baja a tierra no es, en sí misma, una garantía de seguridad. Esto no es simplemente una relación entre la resistencia del sistema de tierra como un todo y el golpe de corriente máxima al que una persona se puede exponer. Por lo tanto, una subestación de resistencia a tierra relativamente baja puede ser peligrosa, mientras que otra subestación con resistencia muy alta puede ser segura ó se puede hacer segura con un diseño adecuado. Por ejemplo, si una subestación se alimenta desde una línea aérea sin protección ó cable neutro, es importante una rejilla de resistencia baja. La mayoría ó todas las corrientes de falla a tierra entran al planeta causando frecuentemente un aumento del potencial a tierra local [ver figura 2(a)] Si se usa un conductor protegido, conductor neutro, barras con aislamiento de gas o cable alimentador subterráneo, etc. Una parte de la corriente de falla regresa a través de esta trayectoria metálica directamente a la fuente. Desde que esta unión metálica provee una impedancia baja con la trayectoria en paralelo del circuito de retorno, el aumento del potencial a tierra local es finalmente de magnitud baja [ver figura 2(b)] En cada caso, el efecto de esa parte de corriente de falla que entra al planeta dentro del área de la subestación debe ser además analizado. Si la geometría, localización de electrodos de tierra, características del suelo local, y otros factores contribuyen a un gradiente de potencial excesivo en la superficie terrestre, el sistema aterrizado puede ser

inadecuado a pesar de su capacidad para transportar la corriente de falla en magnitudes y duraciones permitidas por los relevadores de protección.

Del capítulo 5 al 8 se detallan algunas suposiciones y criterios principales que permiten la evaluación de todos los factores necesarios en la protección de vidas humanas, el elemento más valioso del circuito accidental.

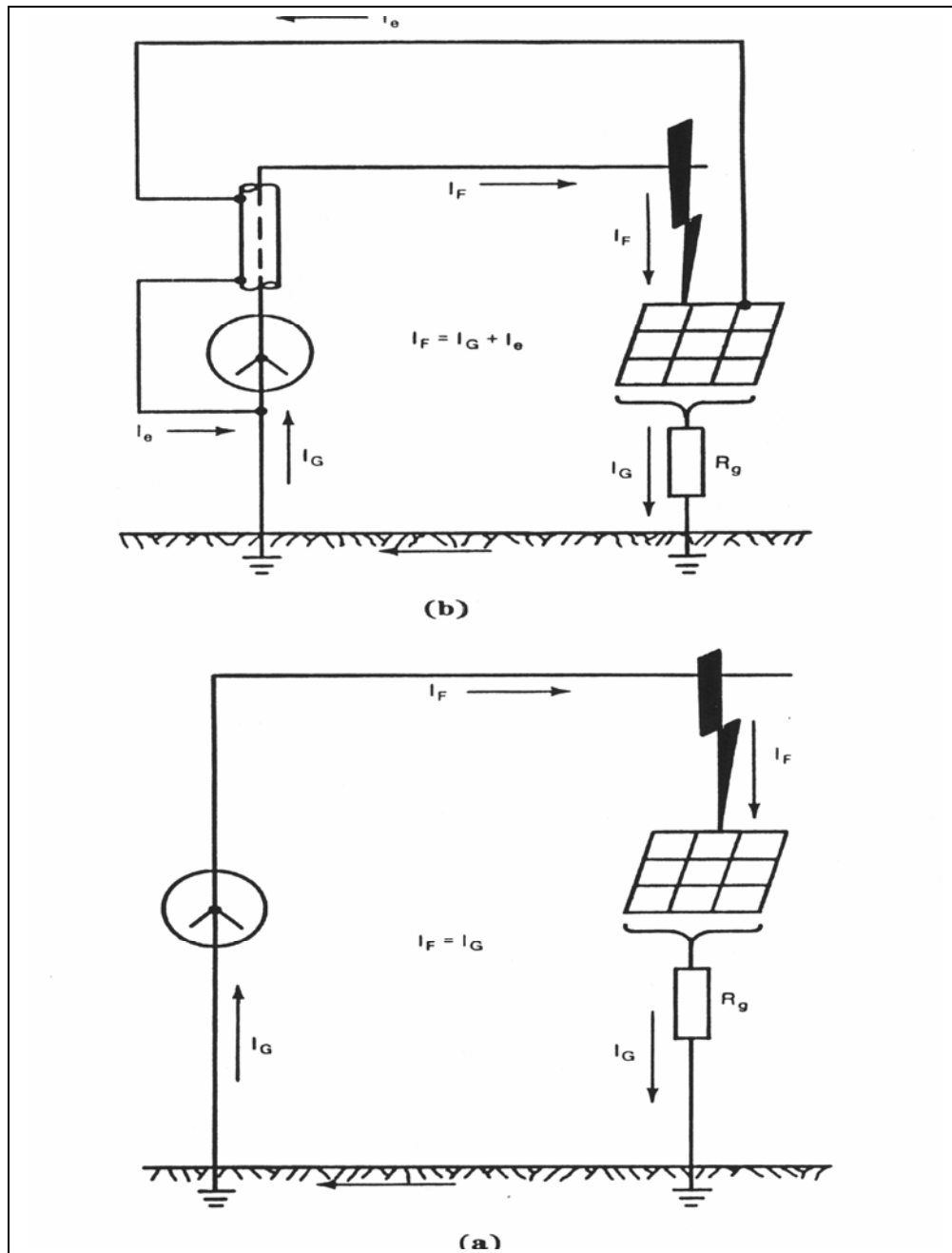
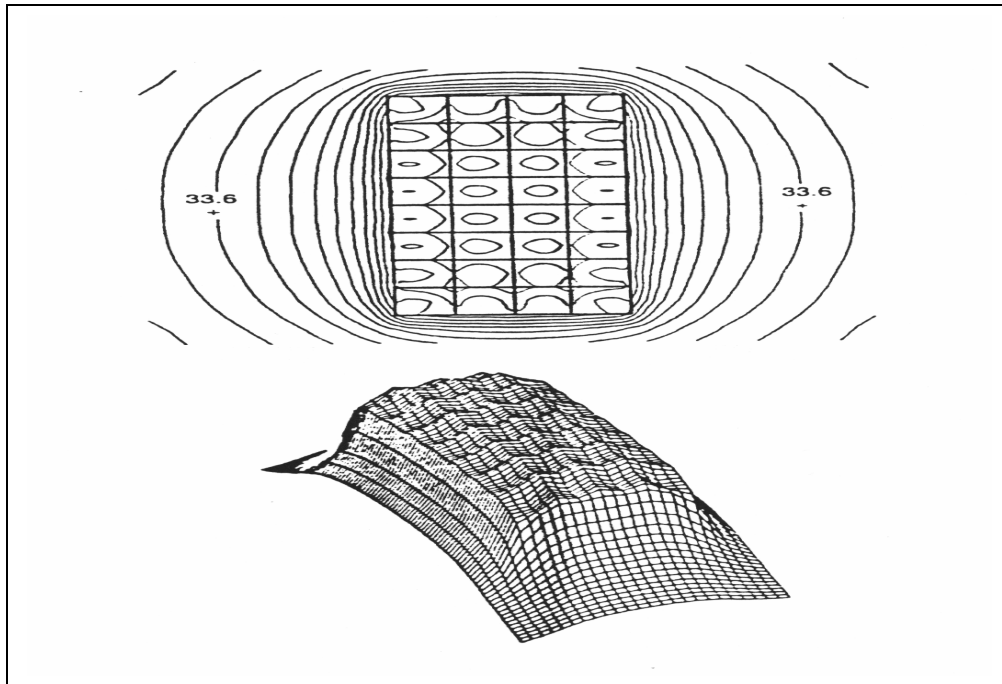


Figura 2 – Contorno Equipotencial de una rejilla a tierra típica con o sin varillas a tierra.

## 4.2 Condiciones de riesgo

Durante las condiciones típicas de falla a tierra, la circulación de corriente hacia el planeta generará gradientes de potencial dentro y en los alrededores de una subestación. La *figura 3* muestra este efecto para una subestación con una rejilla a tierra rectangular sencilla en un suelo homogéneo.



**Figura 3 – Contorno equipotencial de una rejilla a tierra típica con o sin varillas de tierra.**

A no ser que se tomen las precauciones apropiadas en el diseño, el gradiente de potencial máximo a lo largo de la superficie terrestre puede ser de magnitud suficiente, durante las condiciones de falla a tierra para poner en peligro a una persona en el área. Además, los voltajes peligrosos se pueden generar entre estructuras aterrizadas ó en el chasis de los equipos y la tierra cercana.

Las circunstancias que hacen posibles los accidentes al golpe eléctrico son las siguientes:

- Relativamente, la corriente alta de falla a tierra está en relación con el área del sistema de tierra y su resistencia a la tierra remota.
- La resistividad del suelo y la distribución de corrientes a tierra, es tal que, un alto gradiente de potencial podría ocurrir en puntos de la superficie terrestre.
- La presencia de un individuo en un punto, tiempo y posición tal, que el cuerpo este uniendo dos puntos de alta diferencia de potencial.



- d) La falta de resistencias suficientes de contacto o resistencias en serie que limiten la corriente a través del cuerpo, a un valor seguro, bajo las circunstancias anteriores del literal a) hasta el literal c).
- e) La duración de la falla y el contacto del cuerpo; consecuentemente el flujo de la corriente a través del cuerpo por un tiempo suficiente puede causar daños a una intensidad de corriente dada.

La poca frecuencia de accidentes se debe, en gran parte, a la baja probabilidad de coincidencia de todas las condiciones perjudiciales descritas anteriormente.

## **5. RANGO DE CORRIENTE TOLERABLE**

Los efectos de una corriente eléctrica que circula a través de las partes vitales del cuerpo humano dependen de la duración, magnitud y frecuencia de la misma. Al exponerse, la consecuencia más peligrosa, es: **La Fibrilación Ventricular**, que consiste en la restricción inmediata de la circulación sanguínea.

### **5.1 El efecto de la frecuencia**

Los seres humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica, en las frecuencias de 50 ó 60 Hz. Las corrientes, cerca de 0.1 amperio pueden ser mortales. Las investigaciones realizadas por (Dalziel and Mansfield[B12]; Dalziel, Ogden, and Abbott[B15]), Nos indican que el cuerpo humano puede soportar una corriente un poco mayor a 25 Hz y en corriente directa 5 veces más grande. Curiosamente, Dalziel y Mansfield afirman que corrientes más altas pueden soportarse a frecuencias comprendidas entre los 3,000 a 10,000 Hz. Es importante mencionar que en algunos casos el cuerpo humano es capaz de tolerar corrientes muy altas, debido a descargas eléctricas. La Comisión Internacional Electrotécnica, provee curvas de la tolerancia del cuerpo humano a la corriente eléctrica, en función de la frecuencia y las corrientes de descarga capacitiva [IEC 60479-2(1987-039[B20])] Se reportan otros estudios en Dalziel [B5][B7], de los efectos de ambas corrientes tanto directa como impulsos oscilatorios.

La información concerniente a los problemas especiales de los aterrizajes de C.D. la encontramos en el reporte de 1957 de El Comité de Subestaciones AIEE [B4] El peligro de un golpe eléctrico producido por el efecto de líneas de transmisión aéreas, se revisan en la primera parte del reporte de 1972 de El Subcomité General de Sistemas [B22] Otra información adicional de los efectos de las líneas de transmisión aéreas, la encontramos en el Capítulo 8 del Libro de Referencias para Líneas de Transmisión de 345 KV y superiores [B16].

## 5.2 El efecto de la duración y la magnitud.

Los efectos fisiológicos de la corriente eléctrica en el cuerpo establecidos en orden de incremento de la magnitud de corriente son: el umbral de percepción, contracción muscular, insensibilidad, fibrilación del corazón, obstrucción del nervio respiratorio y quemaduras (Geddes and Baker [B18]; IEC 60479-1 (1994-09) [B19]).

La corriente de 1 mA se reconoce generalmente como el umbral de percepción; que es, la magnitud de corriente en la cual una persona es capaz de sentir una sensación suave de hormigueo en sus manos o dedos, causado por la corriente que circula por su cuerpo en ese momento ( Dalziel [B7]).

Las corrientes de 1 a 6 mA, se catalogan a menudo como corrientes de soltura (liberación) Aun cuando son desagradables de soportar, generalmente no daña la habilidad de una persona en controlar sus músculos para liberar un objeto energizado que este sosteniendo. Un experimento clásico que realizó Dalziel (Dalziel y Massogilia[B13]) con 28 mujeres y 134 hombres, proporcionó un valor promedio de la corriente de liberación de 10.5 mA en las mujeres y 16mA en los hombres; Así también, el valor de umbral de percepción de 6 mA en las mujeres y 9 mA en los hombres.

Corrientes comprendidas en el rango de los 9 a 25 mA, son dolorosas y se dificulta es casi imposible liberar objetos energizados sujetados con la mano. Debido a las corrientes elevadas, las contracciones musculares dificultan la respiración. Este efecto no es permanente y desaparece cuando se interrumpe el flujo de corriente, a menos que la contracción sea muy severa y obstruya la respiración por minutos en lugar de segundos será necesaria aplicar la resucitación artificial (primeros auxilios) (Dalziel[B9]).

Hasta que el valor de la corriente se encuentre en el rango de los 60 a 100mA. La fibrilación ventricular, el paro del corazón ó la abstención de respiración, podría causar algún daño ó la muerte. Una persona capacitada en respiración cardiopulmonar (CPR) debe suministrar CPR hasta que la victima pueda ser atendida en una instalación médica. ( Dalziel [B25]; Dalziel and Lee[B10]).

Por consiguiente, este manual enfatiza la importancia del umbral de fibrilación. Con un sistema de aterrizaje diseñado cuidadosamente, los golpes eléctricos pueden mantenerse por debajo de este valor y así, evitar lesiones a personas ó su muerte.

Tal como indica Dalziel y Otros (Dalziel, Lagen and Thurston [B14]; Dalziel y Massogilia [B13]), la corriente de no-fibrilación de magnitud  $I_B$  en un rango comprendido desde 0.03 a 0.3 segundos de duración, se refiere a la energía absorbida por el cuerpo, tal como se especifica en la ecuación siguiente:

$$S_B = (I_B)^2 (t_s) \quad (6)$$

Donde

$I_B$  es el valor rms de la corriente que circula través del cuerpo en amperios.

$t_s$  es la duración a la exposición de corriente en segundos.

$S_B$  es la constante empírica relacionada al golpe eléctrico, tolerado seguramente por un porcentaje de la población.

Para mayores detalles de la ecuación (6) esta se puntualiza en el capítulo 6.

### 5.3 La importancia en eliminar una falla rápidamente

Considerando la importancia de la duración de la falla tanto en términos de la ecuación (6) e implícitamente como un factor de exposición-accidental, el eliminar rápidamente las fallas a tierra, es favorable por dos razones.

- a) Al eliminar rápidamente la falla, el riesgo de exponerse a un golpe eléctrico se reduce enormemente, a diferencia de situaciones en las cuales, las corrientes de falla persistan por varios minutos, que pueden llegar a ser horas.
- b) Varias pruebas y experimentos, muestran que si la duración del paso de corriente a través del cuerpo es corto, el riesgo de lesiones severas ó muerte se reducen enormemente.

El valor de corriente permitido, puede basarse por lo tanto en el tiempo de limpieza de las unidades de protección primaria o las protecciones de respaldo. Un buen proceso es utilizar el tiempo de limpieza, debido al mal funcionamiento de los relevadores, que coincidirá con todos los factores contraproducentes necesarios para ocasionar un accidente, tal como se especifica en el capítulo 4. Al Elegir el tiempo de desconexión de los relevadores de respaldo es más conservador en la ecuación (6), porque estos aseguran un margen superior de seguridad.

De la investigación hecha por Biegelmeier y Lee [B3] resultó un incentivo adicional, usar tiempos de interrupción menores a los 0.5 seg. Su investigación proporcionó la evidencia que un corazón humano, llega a ser susceptible cada vez más a una fibrilación ventricular, cuando el tiempo de exposición a la corriente se aproxima al tiempo del ritmo del corazón, pero ese peligro es mucho menor si el tiempo de exposición a la corriente es en el rango de los 0.06 a los 0.3 segundos.

En realidad, los altos gradientes a tierra debido a fallas no son frecuentes y los golpes eléctricos debido a los altos gradientes a tierra son menos frecuentes.

Además, ambos casos son comúnmente de muy corta duración. Así, no sería práctico hacer un diseño contra golpes eléctricos que son únicamente dolorosos y no ocasionan lesiones serias; esto corresponde, para corrientes abajo del umbral de fibrilación.

## 6. LIMITE DE CORRIENTE TOLERABLE POR EL CUERPO

La duración y la magnitud de la corriente, que circula a través del cuerpo humano a una frecuencia de 50Hz ó 60Hz, deben ser menores al valor que causa la fibrilación ventricular del corazón.

### 6.1 Formula de la magnitud y duración de la corriente

La Cantidad (duración) de corriente que puede soportar la mayoría de personas a 50Hz ó 60Hz, se refiere a su magnitud, de acuerdo a la ecuación (6) Que se fundamenta con los estudios realizados por Dalziel (Dalziel [B6]; Dalziel and Lee [B11]), y se asume que el 99.5% de todas las personas pueden soportarla con seguridad, sin sufrir una fibrilación ventricular. El paso de una corriente con magnitud y duración, se establece por la siguiente fórmula:

$$I_B = k \div \sqrt{t_s} \quad (7)$$

En donde, se agrega a los términos definidos anteriormente por la ecuación (6)

$$k = \sqrt{S_B}$$

Dalziel descubrió que el 99.5% de las personas que pesan 110 libras pueden sobrevivir a un golpe eléctrico, lo que da como resultado un valor de  $S_B = 0.01350$ . Así,  $k_{110} = 0.116$  y la fórmula para la corriente tolerable por el cuerpo es:

$$I_B = 0.116 \div \sqrt{t_s} \text{ para un peso corporal de 110 lbs} \quad (8)$$

La ecuación (8) da como resultado para un  $t_s = 1$  segundo, 116 mA y para un  $t_s = 0.1$  segundo, 367 mA.

Debido a que la ecuación (7) se fundamenta en pruebas de un rango limitado entre 0.03 segundos y 3.0 segundos, obviamente no es válido para duraciones menores a 0.3 segundos ó mayores a 3.0 segundos.

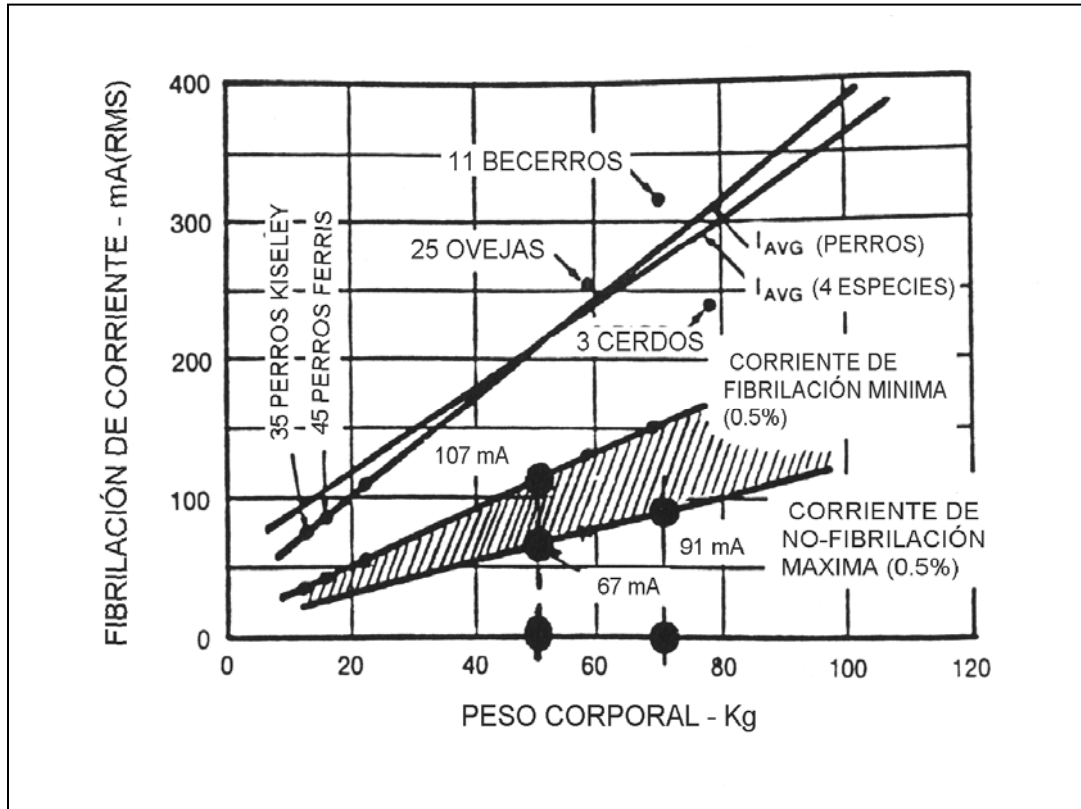
A través de los años, otros investigadores sugieren diferentes valores para  $I_B$ . Ferris et al. [B17] en 1936 propuso 100 mA como el umbral de fibrilación. El

valor de 100 mA resultó de las comprobaciones realizadas en la Universidad de Columbia. En las pruebas, animales con pesos corporales y corazones parecidos al ser humano se expusieron al máximo tiempo de 3 s. Las investigaciones más recientes muestran la existencia de dos umbrales diferentes: Uno es, donde la duración del golpe eléctrico es más pequeña que el tiempo de una palpitación y el segundo, donde la duración del golpe eléctrico es más grande que el tiempo de una palpitación. Biegelmeier [B1][B2] propuso los valores de 500 mA para el primer umbral y 50 mA para el segundo umbral, para un adulto con un peso de 110 lb. También, Lee y Kouwenhoven [B10] [B23] [B24] realizaron otros estudios en este tema. La ecuación para la corriente tolerable por el cuerpo humano, desarrollada por Dalziel, es la base para la derivación de voltajes tolerables que se usan en este manual.

## **6.2 Suposiciones alternas**

La corriente de fibrilación, se asume que es una función del peso corporal individual, tal como se ilustra en la *Figura 4*. Esta figura, muestra la relación entre la corriente crítica y el peso corporal, para las diversas especies de animales (cerdos, perros, ovejas y becerros), y en la zona del umbral se muestra un 0.5% común para los mamíferos.

Antiguamente en 1961 las constantes  $S_B$  y  $k$  en las ecuaciones (6) y (7) eran 0.0272 y 0.165; se suponía válido para el 99.5% de todas las personas con un peso promedio de 155 lb. Sin embargo, los estudios posteriores hechos por Dalziel [B8][B11], en que se basa la ecuación (7), llevan a que los valores de  $k = 0.157$  y de  $S_B = 0.0246$ , sean los que se deban aplicar a las personas con un peso estimado de 155 lb.



**Figura 4 – Corriente de fibrilación vrs el peso corporal para diferentes animales. Basado en el golpe eléctrico durante tres segundos.**

Por lo tanto,

$$I_B = 0.157 \div \sqrt{t_s} \quad \text{para un peso corporal de 155 lb.} \quad (9)$$

Al utilizar este manual pueden seleccionar  $k = 0.157$ , siempre que el peso promedio de la población sea al menos 155lb<sup>7</sup>.

La Ecuación (7) indica que se pueden permitir corrientes corporales muchos mayores, en donde se pueda confiar, en que los dispositivos de protección de operación rápida limiten la duración de falla. Se necesita una decisión apropiada, para usar el tiempo de apertura los relevadores primarios de alta velocidad ó la protección de respaldo, como la base para el cálculo.

<sup>7</sup> Típicamente, estas pruebas se hacen en lugares que no son accesibles al público, por ejemplo: Instalaciones protegidas por cercos ó muros. Dependiendo de las circunstancias, se hace una evaluación si el criterio para un peso de 110 lb. Según la ecuación (8) debería hacerse fuera de las instalaciones.

### 6.3 Comparación de la ecuación de Dalziel y la curva de Biegelmeier.

La comparación de la ecuación (8), la ecuación (9), y la curva de forma **Z** de la corriente corporal contra el tiempo, fue publicada por Biegelmeier y Lee [B3] y se expone en la *Figura 5*. La curva **Z** tiene un límite de 500 mA para tiempos breves superiores a los 0.2 segundos, luego desciende a los 50 mA en un tiempo más allá de los 2 segundos.

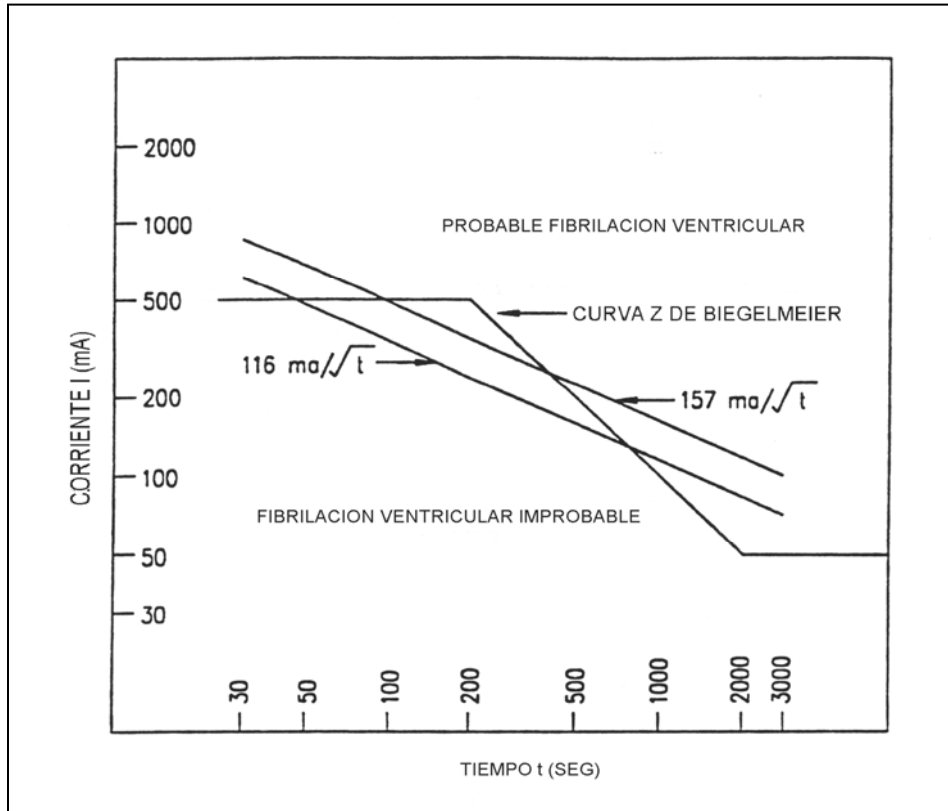


Figura 5 – Corriente corporal vrs el tiempo.

Utilizando la ecuación (8), la corriente permisible por el cuerpo será menor que la curva Z de Biegelmeier para tiempos a partir de 0.06 segundos hasta 0.7 segundos.

## **6.4 Notas sobre el recierre**

El recierre después de una falla a tierra es común en las prácticas de moderna operación. En circunstancias semejantes, una persona se puede exponer al primer golpe eléctrico sin daños permanentes. Luego entonces, un recierre instantáneo automático simple podría resultar en un segundo golpe eléctrico, iniciando en menos de 0.33 segundos a partir del comienzo del primero. Es este segundo golpe eléctrico, que ocurre después de un intervalo de tiempo relativamente corto y antes de que la persona se haya recuperado, él puede causar un accidente serio. Con el recierre manual, el peligro de exponerse a un segundo golpe eléctrico se reduce, porque el intervalo de tiempo de recierre puede ser significativamente mucho más grande.

El efecto acumulativo de dos o más golpes eléctricos seguidos no se ha valorado completamente, pero una asignación razonable se puede hacer al usar la suma de los golpes eléctricos individuales como el tiempo de una sola exposición.

## **7. CIRCUITO DE TIERRA ACCIDENTAL**

### **7.1 La resistencia del cuerpo humano**

Para corrientes en c.d y en c.a a frecuencias de 50 Hz ó 60 Hz, el cuerpo humano se puede tomar como una resistencia. Típicamente, la trayectoria de corriente se considera desde una mano a los pies ó de un pié hacia el otro. La resistencia interna del cuerpo es aproximadamente  $300\Omega$ , en donde los valores de la resistencia del cuerpo incluyen los rangos de la piel desde  $500\Omega$  a  $3000\Omega$ , tal como sugiere Dalziel [B26], Geddes y Baker [B74], Gieiges [B75], Kiselev [B75] y Osypka [B118]. La resistencia corporal disminuye cuando se daña ó se perfora la piel en el punto de contacto con la corriente.

Tal como se mencionó anteriormente en el efecto de la magnitud y duración de la corriente, las extensas pruebas de conductividad Dalziel (B34) utilizan agua salada para humedecer las manos y pies, para determinar las corrientes de soltura seguras con los pies y las manos húmedas. En los hombres, los valores que se obtuvieron utilizando una frecuencia de 60 Hz son los siguientes: La corriente fue de 9.0 mA; los voltajes correspondientes fueron 21.0 V de mano a mano y 10.2 V de manos a pies. Por lo tanto, basándonos en este experimento la resistencia de c.a para un contacto de mano a mano es igual a  $21.0/0.009$  ó  $2330\Omega$ , y la resistencia de mano a pies es igual a  $10.2/0.009$  ó  $1130\Omega$ .

Así, para los propósitos de este manual, las siguientes resistencias, en serie con la resistencia corporal, se asumen como:



- La resistencia de contacto de mano y pie es igual a cero.
- La resistencia del guante y un zapato es igual a cero.

Se utilizará en todo el desarrollo de este manual un valor de  $1000\ \Omega$  la cual representa la resistencia corporal desde las manos hasta los pies, también de mano a mano ó desde un pie hacia el otro, en la ecuación (10).

$$R_B = 1000\Omega \quad (10)$$

## 7.2 Trayectorias de corriente a través del cuerpo

Debemos de tener presente que al seleccionar una resistencia con un valor de  $1000\Omega$  se relaciona al paso de corriente, como, el paso de corriente entre la mano y el pie ó ambos pies, donde la mayor parte de ella pasa a través de los órganos vitales del cuerpo humano, incluyendo el corazón. Generalmente, se reconoce que la circulación de corriente que va de un pie hacia el otro es menos peligrosa. Refiriéndose a las pruebas hechas en Alemania por Loucks [B100] se menciona que se utilizan corrientes mucho más elevadas de pie a pie que de mano a pie para producir la misma corriente en la región del corazón. Loucks establece que la relación es tan alta como 25:1

Basándonos en estas conclusiones, los valores de resistencia mayores a  $1000\Omega$  posiblemente se podrían permitir, donde es concerniente el paso de corriente de un pie hacia el otro. Sin embargo, se deben considerar los siguientes factores:

- a) El voltaje entre los pies es doloroso pero no fatal, esto podría resultar en una caída de una persona, la cual puede causar la circulación de corrientes más grandes en el área del pecho. El grado de este daño dependerá completamente en la duración de la falla y de la posibilidad de otro choque sucesivo, tal vez en el recierre.
- b) Una persona podría estar en una posición propensa, ya sea que este trabajando ó descansando cuando se de la falla.

Aparentemente los daños provocados por el contacto de pie a pie son menores que los de otro tipo (mano-mano ó mano-pies). Sin embargo, han ocurrido muertes por el caso a) y el ignorarlo sería peligroso.

## 7.3 Circuitos equivalentes accidentales

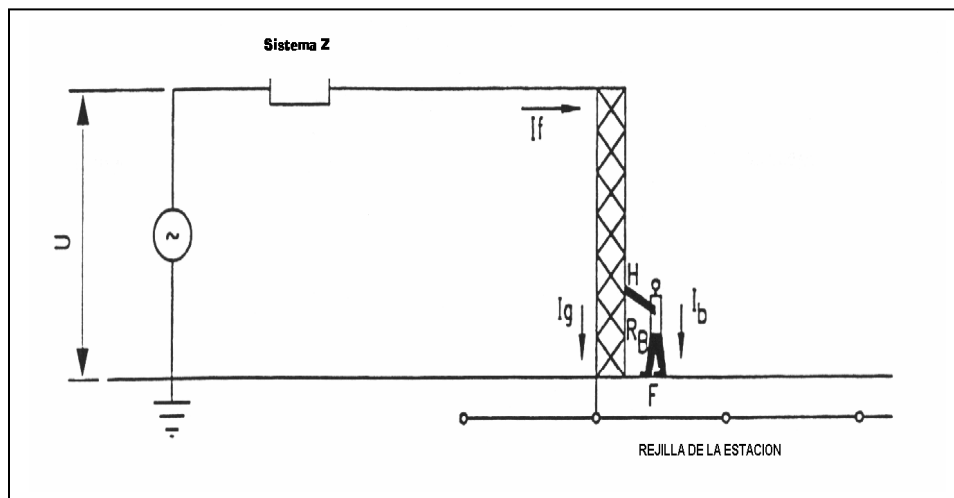
Al utilizar el valor de la corriente tolerable por el cuerpo, que se establece por la ecuación (8) ó la ecuación (9) y las constantes apropiadas del circuito, es muy posible determinar el voltaje tolerable entre cualquiera de los dos puntos de contacto.

Las siguientes constantes se utilizan para el circuito equivalente accidental, las cuales se muestran en la *figura 6*.

$I_b$  es la corriente corporal (El cuerpo es parte del circuito accidental) en amperios.

$R_A$  es la resistencia total efectiva del circuito accidental en  $\Omega$  (ohmios).

$V_A$  es el voltaje total efectivo del circuito accidental (voltaje de toque ó de paso) en Voltios.



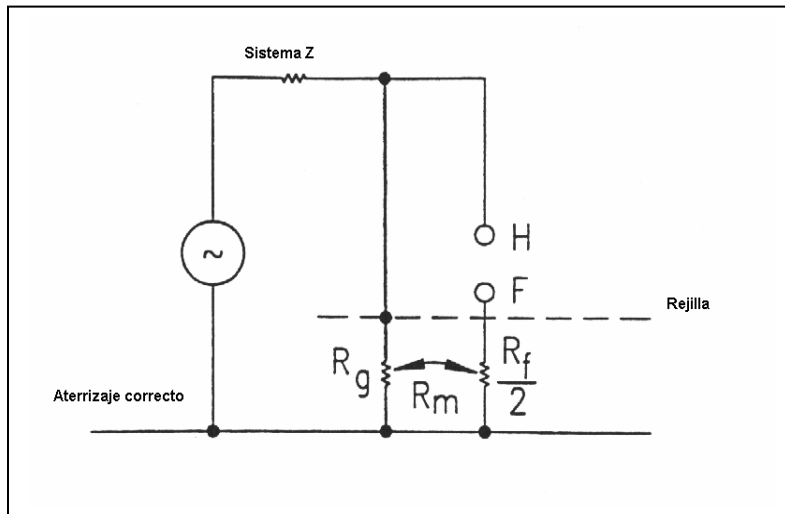
**Figura 6- Exposición al voltaje de toque.**

La corriente tolerable por el cuerpo humano,  $I_B$ , se define por la ecuación (8) ó la ecuación (9), y se utiliza para definir el voltaje tolerable efectivo total del circuito accidental (voltaje de toque ó voltaje de paso): el voltaje tolerable total efectivo del circuito accidental, es aquel voltaje que causará la circulación de una corriente corporal,  $I_b$ , igual a la corriente tolerable por el cuerpo humano  $I_B$ .

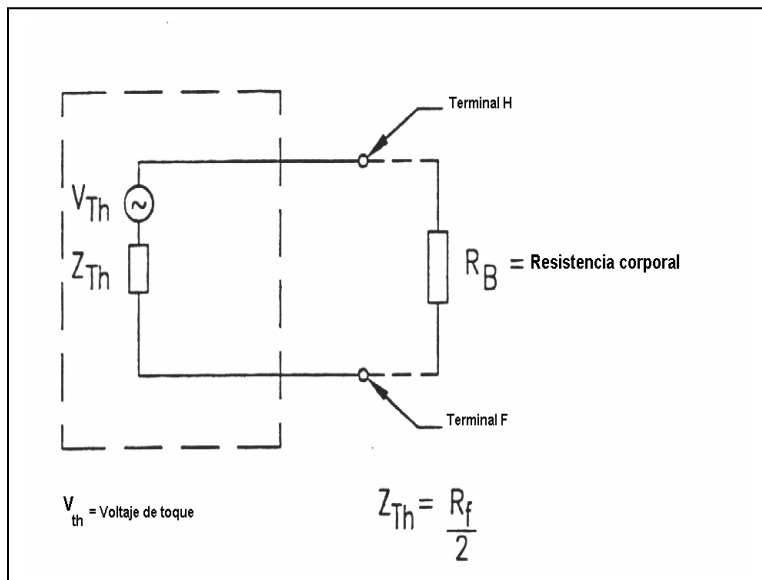
La *Figura 6* muestra a una persona tocando una estructura metálica aterrizada en el terminal H y la corriente de falla  $I_f$  que se descarga a tierra por el sistema de aterrizaje de la subestación. Las impedancias del circuito se muestran en la *figura 7*. El terminal H es un punto en el sistema que se encuentra al mismo potencial que la rejilla, hacia la cual fluye la corriente de falla y el terminal F es el área pequeña en la superficie del planeta que esta en contacto con ambos pies de una persona. La corriente,  $I_b$ , circula desde el terminal H a través del cuerpo de la persona hacia el aterrizaje (terminal F). El Teorema de Thevenin nos permite representar la red de estos dos terminales (H y F) de la *figura 7* por medio del circuito que se muestra en la *figura 8* (Dawalibi, Southey y Baishiki[B49]; Dawalibi, Xiong y Ma [B50]).

El voltaje Thevenin  $V_{Th}$  es el voltaje entre los terminales H y F, cuando la persona no está presente. La impedancia Thevenin  $Z_{Th}$  es la impedancia del sistema que se ve entre los terminales H y F con las fuentes de voltaje del sistema en corto circuito. La corriente  $I_b$  que circula a través del cuerpo de una persona en contacto con los terminales H y F, se expresa por la siguiente ecuación:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (11)$$



**Figura 7 – Circuito de impedancias para el voltaje de toque**



**Figura 8 – Circuito del voltaje de toque.**

Donde

$R_B$  es la resistencia del cuerpo humano en  $\Omega$  (ohmios).

La *figura 9* muestra la corriente de falla  $I_f$  que se descarga a tierra por medio del sistema de aterrizaje de la subestación. La corriente,  $I_b$ , circula desde un pie  $F_2$  a través del cuerpo de la persona hasta el otro pie,  $F_1$ . Los terminales  $F_1$  y  $F_2$  son las áreas en la superficie del planeta Tierra que están en contacto con ambos pies. El teorema de Thevenin permite representar en la *figura 10* la red de estos terminales ( $F_1$  y  $F_2$ ). El voltaje Thevenin  $V_{Th}$  es el voltaje entre los terminales  $F_1$  y  $F_2$  cuando la persona no está presente. La impedancia Thevenin  $Z_{Th}$  es la impedancia del sistema como se ve entre los terminales  $F_1$  y  $F_2$  con las fuentes de voltaje del sistema en corto circuito. La corriente  $I_b$  que circula a través de cuerpo de una persona se expresa por la ecuación (11).

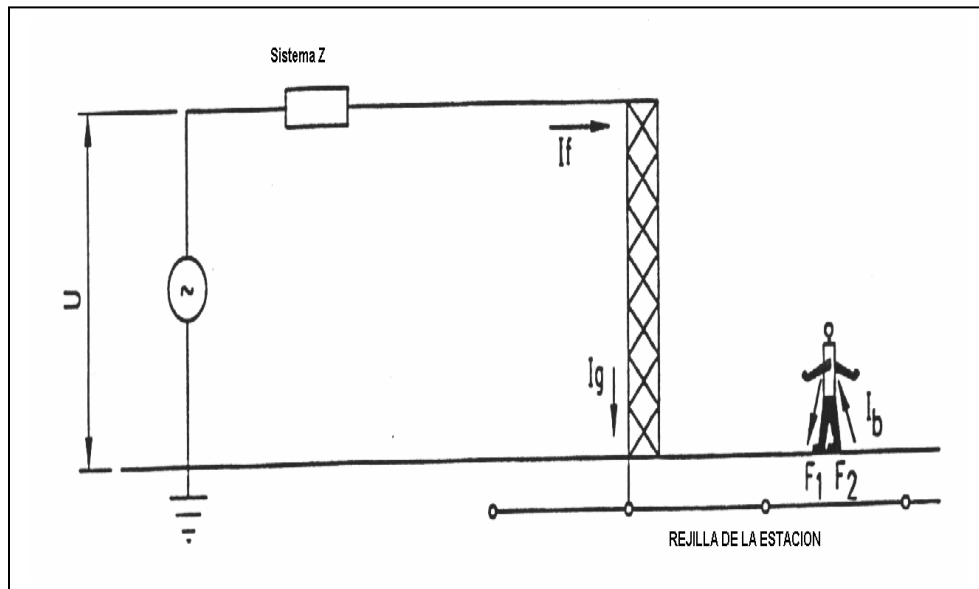
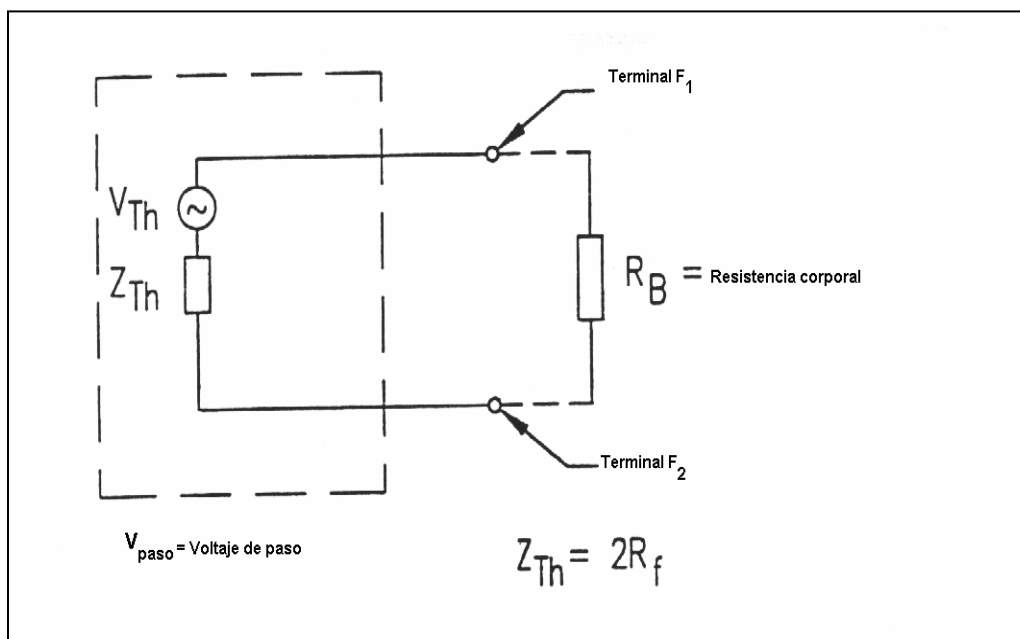


Figura 9 – Exposición al voltaje de paso.



**Figura 10 – Circuito del voltaje de paso.**

La impedancia equivalente de Thevenin,  $Z_{th}$ , se calcula con varios métodos (Dawalibi, Southey y Baishiki [B49]; Dawalibi, Xiong y Ma [B50]; ERPI EL-2699[B60]; Tapar, Gerez y Kejriwal[B143]; Laurent [B97]). En este manual, se utilizan las siguientes fórmulas conservativas para la impedancia Thevenin equivalente :

*Para el circuito accidental del voltaje de toque:*

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2} \quad (12)$$

Y para el circuito accidental del voltaje de paso:

$$Z_{Th} = 2R_f \quad (13)$$

Donde

$R_f$  es el valor de la resistencia a tierra de un pie [sin tomar en cuenta el sistema de aterrizaje de la subestación] en  $\Omega$ (ohmios).

Comúnmente, con el propósito de analizar el circuito, el pie humano se representa como un disco metálico conductor y la resistencia de contacto de los zapatos, calcetines, etc. se desprecia. El valor de la resistencia a tierra de un disco metálico conductor de radio  $b$  (m) en la superficie de un suelo homogéneo de resistividad  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ) se establece por la ecuación de Laurent [B97]

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (14)$$

Tradicionalmente, el disco metálico que representa el pie, se toma como una placa circular con un radio de 0.08m. Con una pequeña aproximación, las ecuaciones para  $Z_{Th}$  se pueden obtener numéricamente y expresarse en términos de la resistividad ( $\rho$ ), tal como se expresa:

Para el circuito accidental de voltaje de toque:

$$Z_{Th} = 1.5\rho \quad (15)$$

Para el circuito accidental de voltaje de paso:

$$Z_{Th} = 6.0\rho \quad (16)$$

Basados en investigaciones realizadas por Dawalibi, Xiong y Ma [B50]: Meliopoulus, Xia. Joy y Cokkonides [B107]: y Tapar, Gerez y Kejriwal [B143]. Las ecuaciones (15) y (16) se conservan en el sentido que sobre estiman la impedancia Thevenin equivalente y, por lo tanto, resultarán en grandes corrientes corporales.

Al utilizar las ecuaciones (15) y (16) el voltaje equivalente total permisible (Voltaje de toque tolerable y Voltaje de paso tolerable) es:

$$E_{toque} = I_B (R_B + 1.5\rho) \quad (17)$$

Y

$$E_{paso} = I_B (R_B + 6.0\rho) \quad (18)$$

#### 7.4 El efecto de una capa delgada de material superficial

La ecuación (14) se basa en suponer una resistividad de suelo uniforme. De cualquier manera, comúnmente una capa de material superficial de alta

resistividad con un espesor de 0.08-0.15 metros (3-6 pulgadas), como la grava, se esparce en la superficie terrestre sobre la rejilla de aterrizaje, para aumentar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de la persona en la subestación. La poca profundidad del material superficial se compara con el radio equivalente de un pie, evitando asumir una resistividad uniforme en la dirección vertical, cuando se calcula la resistencia a tierra de los pies. Sin embargo, para una persona en el área de la subestación, el material superficial se asume, por ser de extensión infinita en la dirección lateral.

Si la capa inferior del suelo tiene una resistividad más baja que el material superficial, solo algunas corrientes de rejilla ascenderán hacia la capa delgada del material superficial y el voltaje superficial será casi completamente igual que éste sin el material superficial. Entonces, al colocar el material superficial, la corriente a través del cuerpo disminuirá considerablemente debido a la gran resistencia de contacto que ofrece entre la tierra y los pies. De cualquier manera, esta resistencia puede ser considerablemente menor que una capa superficial, lo suficiente gruesa para suponer una resistividad uniforme en todas las direcciones. La reducción depende de los valores relativos del suelo, las resistividades del material superficial y en el espesor del material superficial.

Lo inverso del principio que reduce la capacidad normal, es también verdad. Si la capa inferior del suelo tiene una resistividad más alta que el material superficial, una porción muy grande de la corriente de rejilla subirá hacia la capa delgada del material superficial. Sin embargo, a diferencia del caso descrito en el párrafo anterior, los potenciales superficiales serán alterados sustancialmente debido a la concentración de corriente cercana a la superficie. De este modo, la resistividad efectiva del material superficial no debe mejorarse sin tomar en cuenta este cambio en el potencial superficial. Este problema se puede resolver de una mejor manera utilizando un análisis de suelo de capas múltiples (referirse a estructura del suelo y selección del modelo de suelo).

Una expresión analítica para la resistencia a tierra del pie en una capa delgada de material superficial, se puede obtener con el uso del método de imágenes (Sunde [B130]; Tapar. Gerez y Emmanuel [B142]; Tapar. Gerez y Kejriwal [B143])

De la ecuación (19) hasta la ecuación (21) se da la resistencia de aterrizaje del pie en el material superficial.

$$R_f = \left[ \frac{\rho_s}{4b} \right] C_s \quad (19)$$

$$C_s = 1 + \frac{16b}{\rho_s} \sum_{n=1}^{\alpha} K^n R_{m(2nh_s)} \quad (20)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (21)$$

Donde

- $c_s$  es el factor que reduce la capacidad normal de la capa superficial.
- $K$  es el factor de reflexión entre las diferentes resistividades del material.
- $\rho_s$  es la resistividad del material superficial en  $\Omega.m$
- $\rho$  es la resistividad de la Tierra abajo del material superficial en  $\Omega.m$
- $h_s$  es el grosor del material superficial en mts.
- $b$  es el radio del disco circular metálico que representa el pie en mts.
- $R_{m(2nh_s)}$  es la resistencia de aterrizaje mutua entre las dos placas paralelas, similares coaxiales, separadas por una distancia  $(2nh_s)$ , en un medio infinito de resistividad  $\rho_s$ , en  $\Omega.mts$ .

Para determinar el valor de  $R_{m(2nh_s)}$ , debemos considerar una placa circular delgada, D1, en el plano x-y con el eje z pasando por su centro. El radio de la placa es  $b$  y descarga una corriente  $I$  en un medio uniforme infinito de resistividad  $\rho_s$ . Utilizando coordenadas cilíndricas, el potencial en cualquier punto  $(r,z)$ , se da por las siguientes ecuaciones:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (22)$$

$$z = 2nh_s \quad (23)$$

$$V_{r,z} = \frac{I \cdot \rho_s}{4\pi b} \sin^{-1} \left[ \frac{2b}{\sqrt{(r-b)^2 + (z^q) + \sqrt{(r+b)^2 + z^2}} \right] \quad (24)$$

Considerando otra placa similar, D2, puesta en paralelo y coaxial a la placa circular, D1, y a una distancia  $(2nh)$  de ella. El potencial producido en D2 se puede determinar evaluando el potencial promedio sobre la superficie de la placa, por medio de la siguiente ecuación:

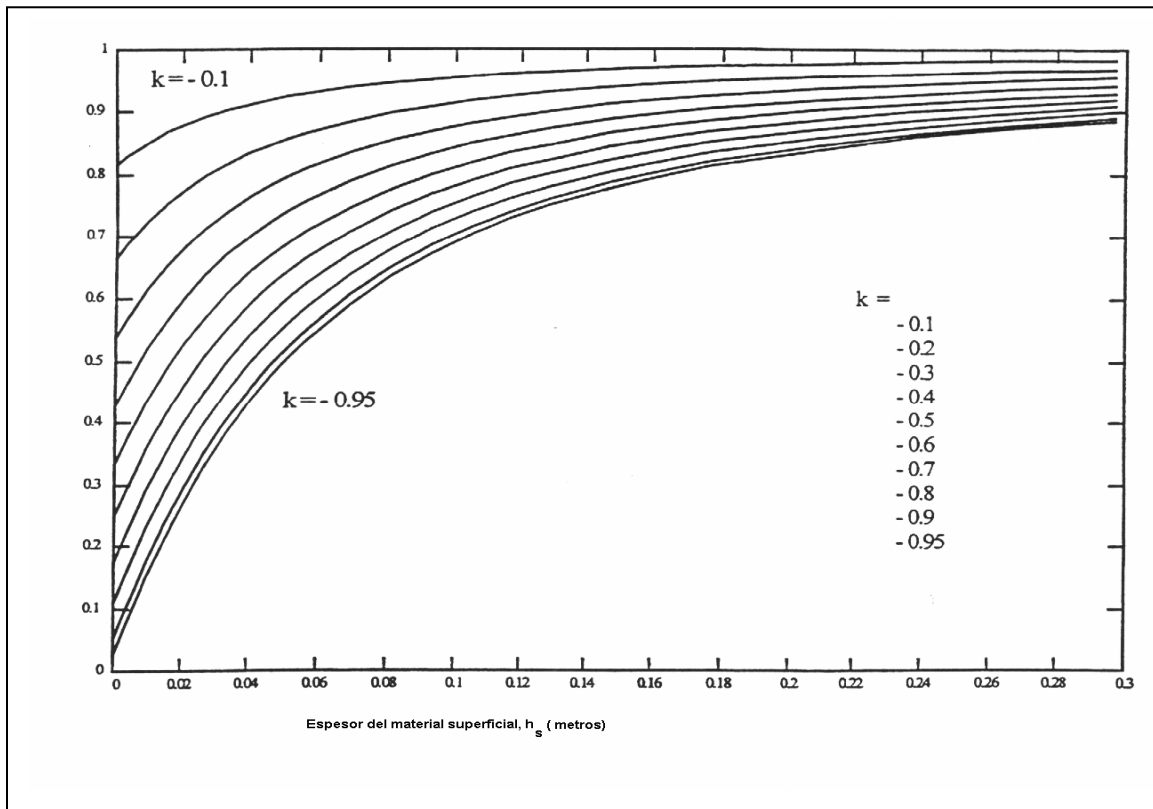
$$V_{D2} = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^h (2\pi x \cdot V_{r,z}) dx \quad (25)$$



La resistencia de aterrizaje mutua,  $R_{m(2nh_s)}$  entre las dos placas se da por la ecuación:

$$R_{m(2nh_s)} = \frac{V_{D2}}{I} \quad (26)$$

Comparando las ecuaciones (14) y (19),  $C_s$  se puede considerar como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva de un pie en presencia de una capa gruesa de material superficial. Debido a las cantidades de  $C_s$  es un poco tedioso evaluarla sin el uso de una computadora; estos valores son precalculados para  $b = 0.08$  mts y se dan en la de forma gráficos en la *figura 11*.



**Figura 11 –  $C_s$  versus  $h_s$**

Muchos tipos de computadoras se han utilizado para obtener los valores de  $C_s$  (Dawalibi, Xiong y Ma [B50]; Meliopoulos, Xia, Joy y Cokkonides [B107]). Hay una gran semejanza entre los valores que se obtienen del computador con los valores de la *figura 11*.

La siguiente ecuación empírica nos da el valor de  $C_s$ . Los valores de  $C_s$  se obtienen utilizando la ecuación (27) que están dentro del 5% de los valores que se obtienen con el método analítico.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (27)$$

## 8. CRITERIO DEL VOLTAJE TOLERABLE

### 8.1 Definiciones

Nota – Para un mejor entendimiento, se mencionan las definiciones más importantes.

**8.1.1 Aumento del potencial de tierra (GPR):** es el máximo potencial eléctrico que una subestación de rejilla aterrizada puede alcanzar, referente a una distancia de un punto aterrizado que se asume como el potencial de tierra remoto. Este voltaje,  $GPR^8$ , es igual a los máximos tiempos de corriente de rejilla y resistencia de rejilla.

NOTA – Bajo condiciones normales, el equipo eléctrico aterrizado opera con potencial a tierra casi cero. Esto es, el potencial de un conductor neutro aterrizado es casi idéntico al potencial de la tierra remota. Durante una falla a tierra la parte de la corriente de falla que se disipa por una subestación de rejilla aterrizada hacia la tierra causa el incremento del potencial de la rejilla con respecto a la tierra remota.

**8.1.2 Voltaje de malla:** es el máximo voltaje de toque dentro de una malla de rejilla aterrizada.

**8.1.3 Voltaje de toque metal-metal:** es la diferencia de potencial entre objetos metálicos ó estructuras dentro del lugar de la subestación que pueden establecer un puente por el contacto mano-mano ó mano-pies.

NOTA – El voltaje de toque metal con metal entre objetos metálicos ó estructuras conectadas a la rejilla de aterrizaje, se asume despreciable en subestaciones convencionales. Sin embargo, el voltaje de toque metal con metal entre objetos metálicos ó estructuras conectadas a la rejilla de tierra y objetos metálicos internos de la subestación, tal como un cerca aislada, pero no conectada a la rejilla de aterrizaje puede ser considerable. En el caso de las subestaciones con aislamiento de gas (GIS)<sup>9</sup>, el voltaje de toque metal con metal

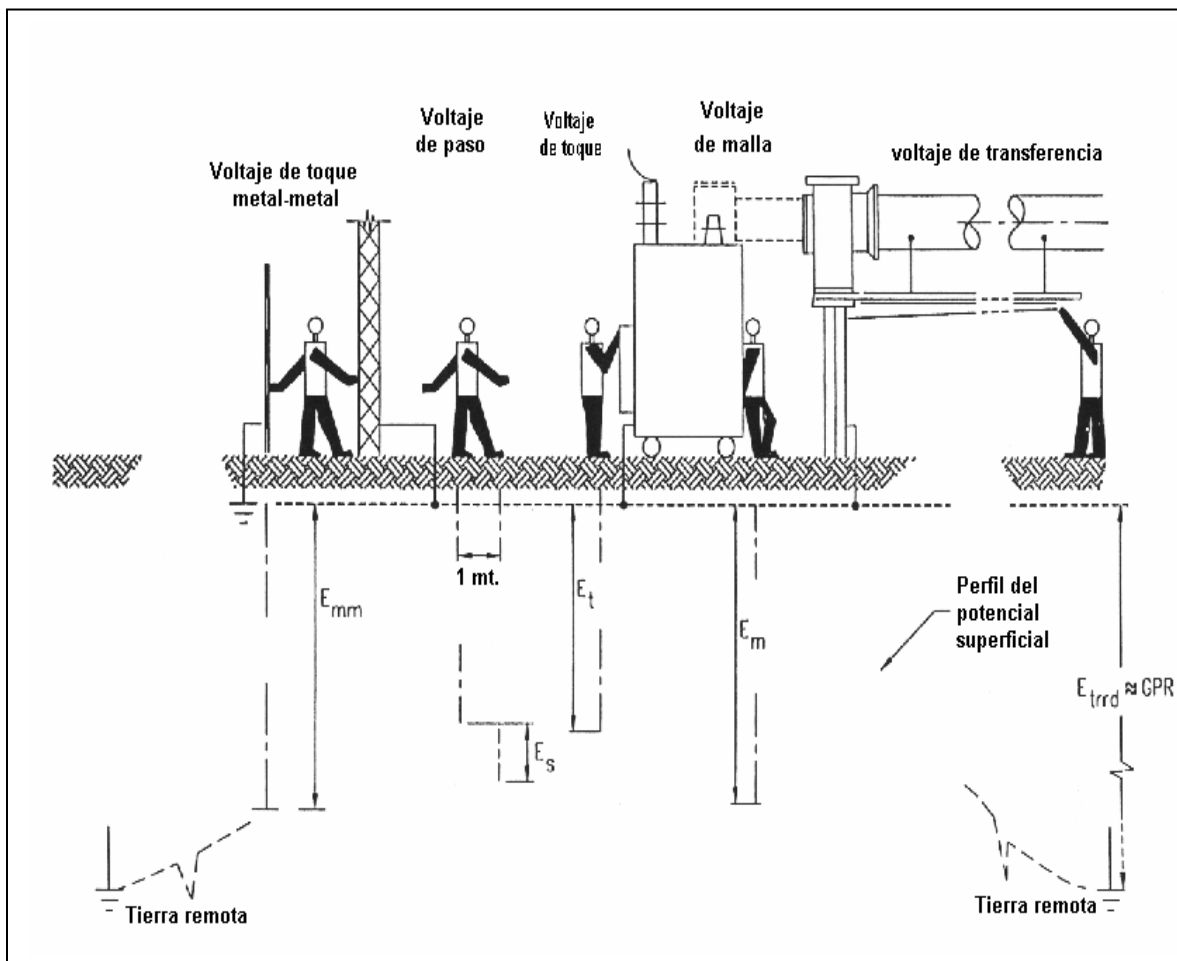
entre objetos metálicos ó estructuras conectadas a la rejilla de aterrizaje se debe a las fallas internas ó a las corrientes inducidas en los encerramientos.

El peor voltaje de toque se encuentra comúnmente en una subestación convencional por ser la diferencia de potencial entre una mano y los pies, en un punto de distancia de máximo alcance. Sin embargo, en el caso del contacto de metal-metal, mano-mano ó mano-pies, ambas situaciones deben investigarse por las peores condiciones posibles de alcance. Hacemos referencia a las *figuras 12 y 13* para ilustrar mucho mejor estas situaciones en subestaciones aisladas con aire y la *Figura 14* muestra estas situaciones en subestaciones con aislamiento de gas (GIS).

**8.1.4 Voltaje de paso:** Es la diferencia de potencial en la superficie del suelo experimentado por una persona a una distancia de 1 metro sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado.

**8.1.5 Voltaje de toque:** Es la diferencia de potencial entre el aumento de potencial a tierra (GPR) y el potencial en la superficie, en un punto donde la persona esta de pie y al mismo tiempo hace contacto con la mano en una estructura aterrizada.

**8.1.6 Voltaje transferido:** Es un caso especial del voltaje de toque, donde el voltaje se transfiere hacia el interior ó fuera de la subestación, desde ó hacia un lugar exterior distante al lugar de la subestación.



**Figura 12 - Entornos básicos del golpe eléctrico.**

<sup>8</sup> GPR es el aumento del potencial a tierra.

<sup>9</sup> GIS es la subestación con aislamiento de gas.

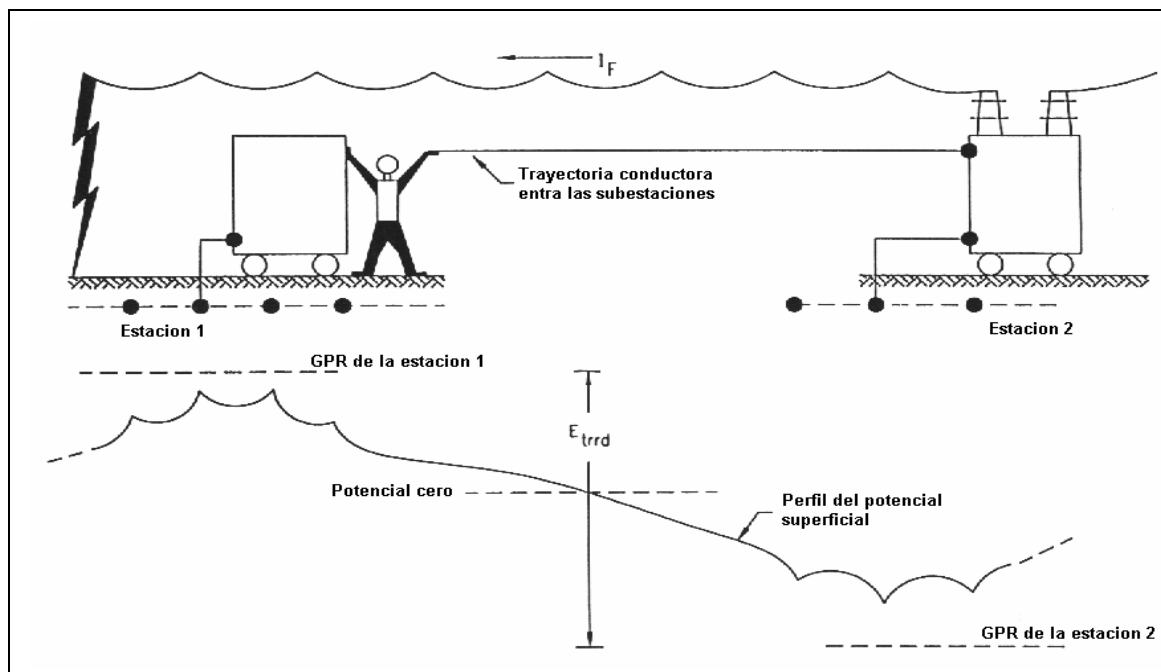


Figura 13 – Entorno típico del extenso potencial transferido

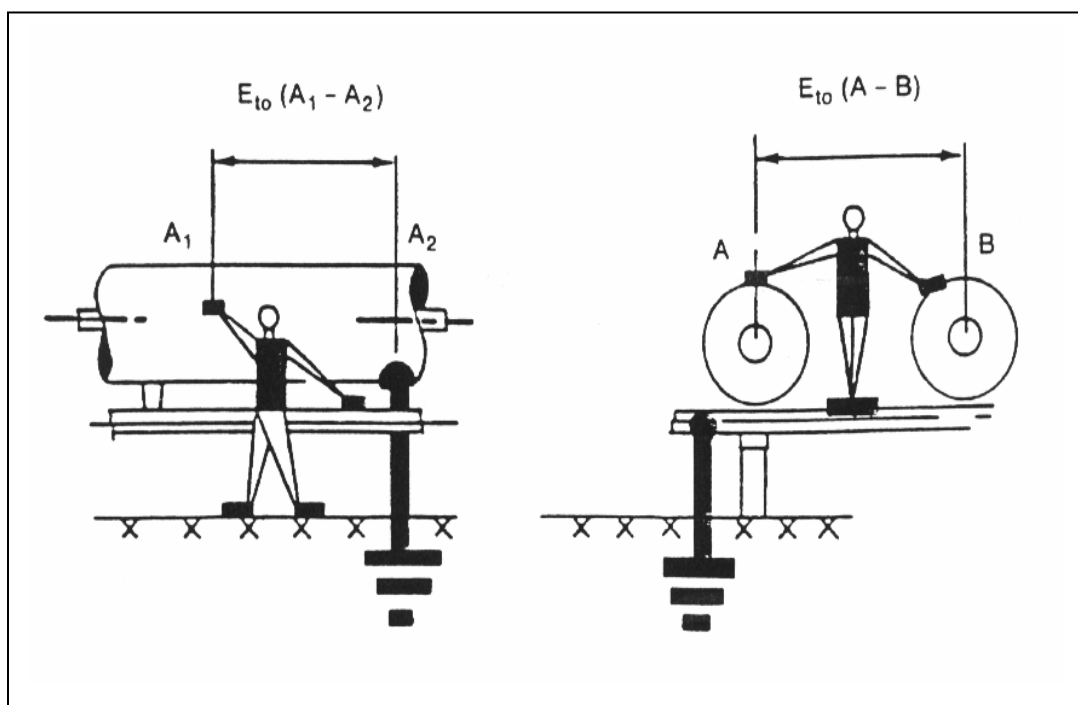


Figura 14 – Ambiente típico del contacto metal-metal en una subestación de gas aislante (GIS)

## 8.2 Situaciones típicas de choque

Las cinco situaciones básicas que involucran una persona e instalaciones aterrizadas durante una falla se muestran las *figuras 12 y 13*. Para un contacto de pie a pie, el circuito equivalente accidental se muestra en la *figura 9*, y el manejo del voltaje  $U$  es igual a  $E_S$  (Voltaje de paso). Para los tres ejemplos del contacto mano – pies utilizamos la *figura 12*, y  $U$  es igual al  $E_t$  (Voltaje de toque),  $E_m$  (Voltaje de acoplamiento) ó  $E_{trrd}$  (Voltaje transferido). El circuito accidental que involucra el contacto metal-metal, también los contactos mano-mano ó mano-pies, se ilustra por medio de la *figura 14*, donde  $U$  es igual al voltaje de toque metal-metal,  $E_{mm}$ .

Durante una falla, el planeta Tierra conduce las corrientes que provienen de las rejillas y electrodos de tierra permanentes, que son enterrados por debajo de la superficie. El gradiente de potencial resultante tiene un efecto primario en el valor de  $U$ .

En el caso de las subestaciones convencionales, el caso característico del voltaje de toque metal-metal ocurre cuando objetos metálicos ó estructuras dentro del área de la subestación, no están empalmados a la rejilla de aterrizaje. Los objetos como tuberías, rieles ó cercos que están colocados dentro ó cerca del área de la rejilla de aterrizaje de la subestación y que no están empalmados a la rejilla de aterrizaje, satisfacen este criterio. Los sustanciales voltajes de toque metal-metal suceden cuando una persona se encuentra de pie o esta tocando un objeto aterrizado o estructura, que hace contacto con un objeto metálico o estructura dentro del área de la subestación que no esta empalmada a la rejilla de aterrizaje. El cálculo actual del voltaje de toque metal-metal es complejo. En la práctica, resulta peligroso el contacto metal-metal y puede evitarse empalmando los puntos de potencial peligroso a la rejilla de la subestación.

Normalmente, un caso de transferencia de voltaje sucede cuando una persona esta de pie dentro del área de la subestación y toca un conductor aterrizado en un punto remoto ó una persona que esta de pie en un punto remoto toca un conductor conectado a la rejilla de aterrizaje de la subestación. Durante las condiciones de falla, la resultante del potencial a tierra puede igualar ó exceder el aumento del potencial a tierra total de una rejilla de aterrizaje descargando la corriente de falla, más bien la fracción de este voltaje total se halla en situaciones normales del contacto de toque (*figura 13*). De hecho, el voltaje de transferencia puede exceder la suma de el GPR en ambas subestaciones, debido a los voltajes inducidos en los circuitos de comunicación, alambrado estático ó neutro, tuberías, etc. no es nada práctico y muchas veces es imposible, diseñar una rejilla de aterrizaje fundamentado en el voltaje de toque causado por los voltajes de transferencia externos. Los peligros de estos voltajes de transferencia externos se evitan al utilizar aislantes ó dispositivos que los

neutralicen, a la vez tratando y etiquetando claramente estos circuitos, tuberías, etc. como lo que existe para líneas energizadas.

### 8.3 Criterios del voltaje de paso y de toque

La seguridad de una persona depende en prevenir que absorba una cantidad crítica de descarga eléctrica, antes de que la falla se elimine y se suspenda el servicio de energía al sistema. El manejo del voltaje máximo de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites que se indican a continuación.

Para el voltaje de paso el límite es:

$$E_{paso} = (R_B + 2R_f) \cdot I_B \quad (28)$$

$$E_{paso50Kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 110 lb.} \quad (29)$$

$$E_{paso70Kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 155 lb.} \quad (30)$$

Similarmemente, el límite del voltaje de toque es:

$$E_{toque} = \left( R_B + \frac{R_f}{2} \right) \cdot I_B \quad (31)$$

$$E_{toque50Kg} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 110 lb.} \quad (32)$$

$$E_{toque70Kg} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 155 lb.} \quad (33)$$

Donde

**E<sub>paso</sub>** es el voltaje de paso en voltios.

**E<sub>toque</sub>** es el voltaje de toque en voltios.

**C<sub>s</sub>** es el factor reductor de la capacidad normal.

**r<sub>s</sub>** es la resistividad del material superficial en Ω.m

**t<sub>s</sub>** es la duración del golpe de corriente en segundos

Si no se usa la capa superficial protectora, entonces  $C_s = 1$  y  $\rho_s = \rho$ .

Los límites del voltaje de toque metal a metal se derivan de las ecuaciones del voltaje de toque, la ecuación (32) y la ecuación (33). El contacto metal-metal, mano-mano y mano-pies, resultarán en  $\rho_s = 0$ . Por consiguiente, el total de la resistencia del circuito accidental es igual a la resistencia del cuerpo,  $R_B$ .

Al sustituir  $\rho_s = 0$  en términos de la resistencia del pie de la ecuación (32) y la ecuación (33).

El límite del voltaje de toque metal-metal es:

$$E_{mm-toque50Kg} = \frac{116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 110lb.} \quad (34)$$

$$E_{mm-toque70Kg} = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 155 lb.} \quad (35)$$

Donde

$E_{mm}$  es el voltaje de toque metal-metal en voltios

Los actuales voltaje de paso, voltaje de toque ó voltaje de toque metal a metal deben ser menores que el límite de voltaje máximo que se permite para garantizar la seguridad de las personas. Los peligros de estos voltajes de transferencia externos se evitan al utilizar dispositivos aislantes ó dispositivos que los neutralicen, a la vez tratando y etiquetando claramente estos circuitos, tuberías, etc. como lo existe para líneas energizadas.

#### **8.4 Situaciones típicas del golpe eléctrico para subestaciones aisladas con gas.**

En el análisis del aterrizaje de la subestación con aislamiento de gas, las consideraciones del voltaje de toque presentan muchos problemas notables. A diferencia de las instalaciones convencionales, el rasgo distintivo del equipo de la subestación con aislamiento de gas es una envoltura de metal confinando con gas aislante en los interruptores mecanizados y en las barras internas de alto voltaje. Cada barra está totalmente contenida dentro de su encapsulado y las carcasas están aterrizadas. Porque el voltaje se induce en el revestimiento externo cada vez que circula una corriente en la barra coaxial de distribución, ciertas partes de la carcasa metálica podrían estar a diferentes potenciales con relación a la tierra de la subestación. Para evaluar el voltaje máximo que ocurre durante la falla en el encerramiento de las barras, es necesario determinar la



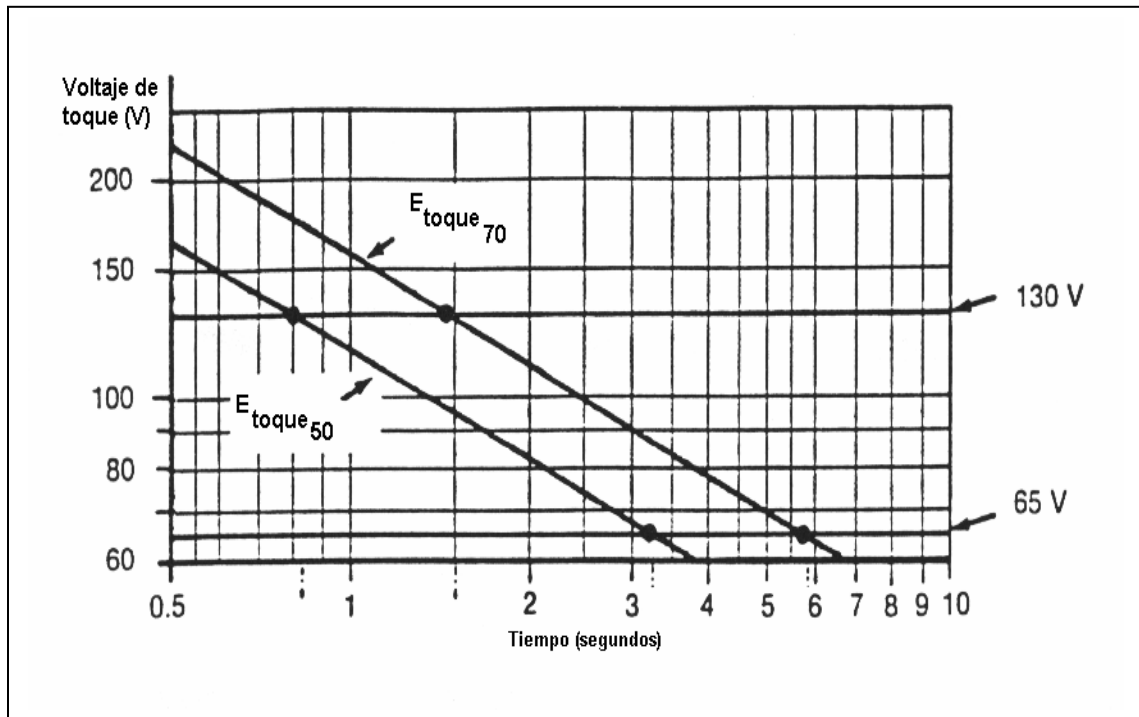
inductancia del revestimiento externo a tierra, la inductancia del conductor interno y las inductancias mutuas para una configuración de fase de las barras individuales de distribución.

Una persona que hace contacto con el revestimiento externo de una subestación con aislamiento de gas, podría estar expuesta a los voltajes que resultan de las dos condiciones básicas de falla que se mencionan a continuación.

- a) Una falla interna dentro del sistema de barras con aislamiento de gas, tal como, una descarga disruptiva entre las barras conductoras y las paredes internas del encerramiento.
- b) Una falla externa en la subestación con aislamiento de gas en el cual la corriente de falla circula a través de las barras de la subestación con aislamiento de gas e induce corrientes en el encerramiento.

Ya que la persona puede estar de pie en una verja de metal aterrizada y el circuito eventual puede involucrar un paso de corriente de mano-mano y mano-pies, el análisis del aterrizaje de una subestación con aislamiento de gas debe tomar en cuenta las consideraciones del voltaje de toque metal-metal (*figura 14*).

La mayoría de los fabricantes de las subestaciones con aislamiento de gas consideran la carcasa metálica diseñada adecuadamente y debidamente aterrizada si la diferencia de potencial entre las carcasas individuales y la diferencia de potencial entre las carcasas metálicas y otras estructuras aterrizadas, no exceda durante una falla un voltaje comprendido en el rango de los 65 a 130 voltios. Las ecuaciones del voltaje de toque metal-metal, ecuación (34) y la ecuación (35), revelan que este rango de voltaje corresponde a tiempos de falla en un rango desde los 0.8 a los 3.2 segundos, si se usa el criterio de las 110lb y si se utiliza el criterio de las 155lb el rango es desde 1.46 segundos a los 5.8 segundos. Esta relación se apreciada mejor en la forma de la grafica de la *figura 15*, la cual ayuda a comprender el problema que concierne a los márgenes de seguridad.



**Figura 15 – Límites del voltaje de toque para contacto metal-metal y rango típico del voltaje en gabinetes o carcasas a tierra.**

### 8.5 El efecto de las corrientes de tierra sostenidas

Después que se establecieron los límites seguros del voltaje de paso y de toque, el sistema de aterrizaje puede entonces diseñarse basándolo en la corriente de falla disponible y el tiempo de limpieza total. El diseñador debe también considerar las magnitudes de falla de bajo nivel sostenidas, que pueden estar sobre el umbral de la corriente de soltura. Algunas fallas sostenidas que están por encima de la corriente de soltura pero por debajo del umbral de fibrilación, pueden causar la asfixia que se debe a la contracción prolongada de los músculos del pecho. Sin embargo, no sería práctico diseñarlo contra golpes eléctricos que son simplemente dolorosos y no causan daño permanente.

## 9. PRINCIPALES CONSIDERACIONES DEL DISEÑO

### 9.1 Definiciones

Nota – Para un mejor entendimiento, se mencionan las definiciones más importantes.

**9.1.1 Electrodo auxiliar de tierra:** un electrodo de tierra con cierto diseño o restricciones de operación. Su función primaria puede ser distinta en conducir la corriente de falla a tierra hacia el planeta tierra.

**9.1.2 Electrodo de Tierra:** Es un conductor introducido en la tierra y se usa para recoger ó disipar corriente, desde ó hacia el interior del planeta Tierra.

**9.1.3 Malla de tierra:** Una placa sólida metálica ó un sistema de conductores desnudos con espacios estrechos que son conectados y con frecuencia colocados a pocas profundidades sobre una rejilla de tierra ó en otros sitios de la superficie de la tierra. Tratando de obtener una extra medida de protección minimizando el peligro a la exposición de altos voltajes de paso ó toque en lugares de operaciones críticas que frecuentemente usan las personas. Así como el enrejado metálico aterrizado, colocado por debajo ó sobre la superficie del suelo ó una red (malla) de alambre colocado directamente bajo el material superficial, son formas comunes de una malla de tierra.

**9.1.4 Rejilla de aterrizaje:** Es un sistema horizontal de electrodos que consiste en un número de interconexiones, conductores desnudos ocultos en la tierra, proporcionando una tierra común para los equipos eléctricos ó estructuras metálicas, comúnmente en una instalación específica.

NOTA – Las rejillas enterradas horizontalmente cercanas a la superficie terrestre son también efectivas en controlar los gradientes de potencial en la superficie. Una rejilla típica comúnmente se complementa por un número de varillas a tierra y pueden ser además conectados a los electrodos auxiliares de tierra para reducir su resistencia con respecto a la tierra remota.

**9.1.5 Sistema de aterrizaje:** Comprende todos los aterrizajes de las instalaciones interconectadas en un lugar específico.

**9.1.6 Electrodo de tierra primario:** es un electrodo de tierra diseñado específicamente ó adaptado para descargar la corriente de falla hacia el planeta, normalmente en un patrón específico de descarga, como se requiere por (ó llamado implícitamente para) el diseño del sistema de aterrizaje.

## 9.2 Concepto general

Un sistema de aterrizaje debe instalarse de manera que limite el efecto del gradiente de potencial a tierra para niveles de voltaje y corriente que no pondrán en peligro la seguridad de las personas o equipos bajo condiciones normales y falla. El sistema debe garantizar el servicio continuo.

En la siguiente discusión, se asume que el sistema de electrodos de tierra tiene la forma de una rejilla de conductores enterrados horizontalmente, complementado por un número de varillas a tierra verticales conectado a la rejilla. Basado en dos estudios, el primero se reporta en un manual de aplicación del IEEE en 1954[B3] y el segundo publicado en 1980 (Dawalibi, Bauchard and Mukhedkar [B45], este concepto representa la práctica que prevalece de la mayoría de ambas utilidades en Estados Unidos y otros países.

Las razones para utilizar el sistema combinado de varillas conductoras verticales y horizontales son las siguientes:

- a) En subestaciones un electrodo sencillo es, por sí mismo, inadecuado en dar un sistema de aterrizaje seguro. En vista de ello, cuando varios electrodos, tal como varillas a tierra se conectan entre ellos y a todo el equipo los neutros, marcos y estructuras son aterrizados, el resultado es substancialmente un arreglo de rejillas de electrodos de tierra, prescindiendo del objetivo original. Si los enlaces conectados por casualidad se entierran en un suelo que tenga buena conductividad, esta única red puede representar un excelente sistema de aterrizaje. En parte por esta razón, algunas utilidades dependen en el uso de una única rejilla. Sin embargo, las varillas a tierra son de un valor particular, como se explica en el literal b.
- b) Si la magnitud de la corriente con trayectoria hacia el interior de la tierra es alta, raramente es posible instalar una rejilla con una resistencia muy baja para asegurar que el incremento del potencial a tierra, no generará gradientes peligrosos en la superficie por el contacto humano. Entonces, el peligro puede eliminarse solamente por el control de los potenciales locales a través del área total.

Un sistema que combina una rejilla horizontal y un número de varillas verticales a tierra penetrando más abajo el suelo tiene las ventajas siguientes:

- 1- Mientras que los conductores horizontales (rejilla) son más efectivos en reducir el peligro de un alto voltaje de paso y toque en la superficie de la tierra, con tal que la rejilla este instalada en una hondura poco profunda [comúnmente 0.3-0.5 m (12-18 pulg.) debajo del nivel], las varillas a tierra bastante grandes estabilizarán el funcionamiento de semejante sistema combinado. Para muchas instalaciones esto es muy importante, porque el congelamiento o la sequedad de las capas superiores del suelo podrían

variar la resistividad del suelo con las estaciones del año, mientras que la resistividad de las capas inferiores del suelo permanece casi constante.

- 2- Las varillas penetrando el suelo de baja resistividad son hasta ahora más efectivas en disipar corrientes de falla siempre que un suelo de dos capas o múltiples capas es encontrado y las capas superiores del suelo tienen una resistividad mucho más alta que las capas inferiores. Para muchas GIS y otras instalaciones de espacio limitado, esta condición llega a ser de hecho la más deseable que suceda o lograr por el apropiado diseño (varillas a tierra extra grandes, etc.)
- 3- Si las varillas se instalan predominantemente a lo largo del perímetro de la rejilla en condiciones alto-bajo o suelos uniforme, las varillas moderarán considerablemente el incremento escarpado del gradiente de la superficie cerca de los acoplamientos periféricos. Referirse al diseño de sistemas de aterrizaje para detalles de este arreglo. Estos detalles son pertinentes para el uso de métodos simplificados en determinar el gradiente de voltaje en la superficie de la tierra.

### **9.3 Electrodo de tierra principales y auxiliares**

En general, la mayoría de sistemas de aterrizaje utilizan dos grupos de electrodos de tierra. El primer grupo de electrodos de tierra es diseñado para propósitos de aterrizaje. El segundo grupo de electrodos de tierra auxiliares son electrodos que incluyen varias estructuras metálicas subterráneas instaladas para otros propósitos que no sea aterrizaje. Los principales electrodos típicos incluyen tales formas como las rejillas de aterrizaje, conductores de contrapeso, varillas a tierra, etc. Los típicos electrodos auxiliares incluyen estructuras metálicas subterráneas y barras de refuerzo en concreto, si esta conectado a la rejilla de aterrizaje. Los electrodos de tierra auxiliares pueden tener una capacidad limitada para transportar corriente.

### **9.4 Aspectos básicos del diseño de la rejilla**

El análisis conceptual de un sistema de rejillas comúnmente inicia con la inspección del propósito de la subestación, mostrando todos los equipos y estructuras principales. Para cimentar las ideas y conceptos básicos, los casos siguientes pueden servir como manual para iniciar un diseño de la típica rejilla a tierra:

- a) Un circuito conductor continuo debe rodear el perímetro para encerrar mucha área como sea práctico. Esta disposición ayuda a evitar una alta concentración de corriente y por consiguiente, ambos gradientes altos en

el área de la rejilla y cerca de los terminales del cable de proyección. Encerrando más área reduce también la resistencia de la rejilla a tierra.

- b) Dentro del circuito, los conductores se extienden comúnmente en líneas paralelas y donde sea práctico, a lo largo de las estructuras o fila de equipos para proporcionar conexiones cortas a tierra.
- c) Un típico sistema de rejilla para una subestación puede incluir barras conductoras de cobre 4/0 enterrados 0.3 – 0.5 m (12-18 pulg.) debajo del nivel, separadas de 3 – 7 m (10 – 20 pies), en un patrón de rejilla. En conexiones cruzadas, los conductores empalmados juntamente serían seguros. Las varillas a tierra pueden estar en las esquinas de la rejilla y en los puntos de unión a lo largo del perímetro. Las varillas a tierra pueden instalarse también en equipos principales, especialmente cerca los apartarrayos. En suelos de múltiples capas o alta resistividad, podría ser útil usar varillas más grandes o varillas instaladas en puntos de unión adicionales.
- d) El sistema de rejilla sería extendido sobre toda la subestación y con frecuencia más allá del límite de la verja. Múltiples terminales a tierra ó conductores de tamaño grande serían utilizados en lugares donde sucedan altas concentraciones de corriente, tal como la conexión de generadores neutro-tierra, bancos de condensadores o transformadores.
- e) La relación al lado de la malla de rejillas comúnmente es de 1:1 a 1:3, a no ser que un análisis preciso justifique más valores extremos. El cruce frecuente de conexiones tiene un efecto relativamente pequeño al disminuir la resistencia de una rejilla. El papel principal es asegurar un control adecuado de los potenciales de la superficie. El cruce de conexiones es útil también para obtener trayectorias múltiples para la corriente de falla, minimizando la caída de voltaje en la misma rejilla y proveer una medida segura de redundancia en el caso de falla en el conductor.

## **9.5 Diseño en condiciones delicadas**

En áreas donde la resistividad del suelo es un tanto alta o el espacio de la subestación es muy escaso, no es posible obtener un sistema a tierra de baja impedancia por separar los electrodos de la rejilla sobre un área más grande, como es hecho en condiciones más propicias. Tal circunstancia es típica de muchas GIS y subestaciones industriales, ocupando tal solo una fracción del área de uso normal para el equipo convencional. Esto frecuentemente hace el control del gradiente de la superficie difícil. Algunas de las soluciones incluyen:

- a) La(s) conexión(es) de rejilla(s) a la tierra remota y las instalaciones a tierra inmediata, un sistema combinado utilizando instalaciones separadas en

edificios, bóvedas subterráneas, etc. Un uso predominante de electrodos de tierra remotos requiere una consideración cuidadosa de potenciales transferidos, localizar apartarrayos y otros puntos críticos. Una caída de voltaje significativo puede desarrollarse entre las instalaciones aterrizadas locales y remotos, especialmente para fuentes de alta frecuencia (rayos).

- b) El uso de barras de tierra llevadas profundamente.
- c) Varios aditivos y tratamiento de suelos se utilizan en conjunción con varillas a tierra e interconexión de conductores que se explican totalmente en el tratamiento del suelo para bajar la resistividad.
- d) El uso de mallas alambradas. Es factible combinar ambos una superficie material y mallas fabricadas hechas de alambres enlazados para ecualizar el campo del gradiente cerca de la superficie. Una típica malla alambrada consiste de alambres acerados de cobre revestido No. 6 AWG, un modelo de rejilla arreglado en 0.6 m x 0.6 m (24 x 24 pulg.). Instalados en la superficie de la tierra y debajo de la superficie material y empalmado a la rejilla de tierra central en múltiples lugares.
- e) Donde es factible, el uso controlado de otros términos disponibles para disminuir la resistencia total de un sistema a tierra, tal como conectar alambres estáticos y neutros a tierra (ver tipos de falla a tierra). Típico es el uso de objetos materiales en el lugar por el cual califica y puede servir como electrodos de tierra auxiliares o como lazos de tierra hacia otros sistemas. Las consecuencias de tales aplicaciones, por supuesto, tienen que evaluarse cuidadosamente.
- f) Dondequiera que sea práctico, un depósito cercano con material de baja resistividad de volumen suficiente puede usarse para instalar una rejilla extra (satélite). Esta rejilla satélite, cuando está conectado adecuadamente a la rejilla principal, disminuirá la resistencia total y así, el aumento de potencial a tierra de la rejilla. El material inmediato de baja resistividad puede ser un depósito de arcilla o puede ser parte de una gran estructura, tal como la masa de concreto de un embalse hidroeléctrico (Verma, Merand y Barbeau [B148]).

## 9.6 Conexión de la rejilla

Conductores con la adecuada ampacidad y resistencia mecánica (Ver selección de conductores y conexiones) deben usarse para la conexión entre:

- a) Todos los electrodos de tierra, tales como rejillas que ponen a tierra, camas de la barra y donde se aplique, metal, agua o gas transmiten, las cubiertas bien de agua, etc.
- b) Sobre todo partes metálicas conductoras a tierra que podrían llegar a energizarse accidentalmente, tal como estructuras metálicas, marcos de máquinas, cubiertas metálicas convencionales o que proveen de gas al dispositivo de distribución, tanques de transformadores, protectores, etc. También, las piezas conductoras de metal que pudieron estar a diferente potencial concerniente a otras partes metálicas que se han energizado deben estar juntamente empalmados, generalmente a través de la rejilla de tierra.
- c) Todas las fuentes de la corriente de incidente tales como pararrayos de la oleada, las baterías de los condensadores o los condensadores del acoplador, transformadores y donde los neutros apropiados.

Los cables o las correas de cobre se emplean generalmente para estas conexiones de tierra. Sin embargo, los tanques del transformador se utilizan a veces como parte de un camino de tierra para los pararrayos de la oleada. Similarmente, la mayoría de estructuras de acero o aluminio pueden usarse para el paso a tierra si puede establecerse de su conductancia, incluyendo el de cualquier conexión, está y puede mantenerse como equivalente al del conductor que sería instalado normalmente. Donde se sigue esta práctica, cualquier película de las pinturas que pudieran introducir de otra manera una conexión altamente resistente debe ser destituida, un compuesto común conveniente debe aplicarse o el otro eficaz significa tal puente a través de las conexiones se debe tomar para prevenir la deterioración subsiguiente de la conexión. En este caso de las instalaciones de GIS, debe ponerse mucha atención a la posibilidad de una circulación no requerida de corrientes inducidas. Las consideraciones especiales para la GIS cubre el tema en más detalles.

La igual división de corrientes entre terminales de componente de tierra en conexiones cruzadas o las puntas similares de la ensambladura no debe ser supuesta.

Todos los terminales de componente de tierra accesibles se deben examinar sobre una base periódica. La soldadura autógena exotérmica, cubierta o los conectores del tipo de presión se pueden utilizar para las conexiones subterráneas (ver selección de conexiones). Las conexiones soldadas se deben evitar debido a la posibilidad de incidente bajo altas corrientes de falla.



Los circuitos abiertos, en lugares expuestos inclusive, no se pueden detectar y no es práctico obviamente inspeccionar partes enterradas de la red media vez sea instalado. Para más detalles de los métodos que se utilizaron para determinar la continuidad de los sistemas a tierra soterrados se incluye en la prueba de integridad de la rejilla de tierra. Esas instalaciones que son más bien para suministrar o transportar una alta corriente, del tanque del interruptor, de los bastidores y las pistas de los pararrayos deben conectarse a la rejilla con más de un terminal de componente de tierra del interruptor. Los terminales de componente se deben ejecutar preferiblemente en direcciones opuestas para eliminar incidente del modo común.

## **10. CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA SUBESTACIONES CON AISLAMIENTO DE GAS (GIS).**

### **10.1 Definiciones**

Nota: Para un mejor entendimiento del tema se presentan las siguientes definiciones.

**10.1.1 Encerramiento continuo:** es el encerramiento de barra en la cual las secciones continuas de la cubierta, a lo largo del mismo conductor de fase están empalmadas para dar una trayectoria eléctricamente continua a la corriente, en toda la longitud del encerramiento. Los empalmes cruzados, que conectan los encerramientos de las otras fases, se hacen sólo en los extremos de la instalación y en algunos pocos puntos intermedios seleccionados.

**10.1.2 Corrientes de gabinete:** son corrientes que resultan de los voltajes inducidos en el gabinete metálico por corrientes que fluyen en los conductores encerrados.

**10.1.3 Subestación con aislamiento de gas:** es un ensamblaje de múltiples componentes, compacta, encerrada en una carcasa metálica, en el cual el aislante primario es un gas, y consiste normalmente de barras, interruptores mecanizados y equipos asociados (sub-ensamblajes).

**10.1.4 Barras de tierra principal:** es un conductor ó sistema de conductores que facilitan la conexión de todos los componentes metálicos, diseñados en las subestaciones aisladas con gas a un sistema de subestación aterrizada.

**10.1.5 Encerramiento no continuo:** es una barra encerrada con las secciones consecutivas de la cubierta del conductor de la misma fase, aislado eléctricamente (ó aislado uno de otro), de manera que no puede haber circulación de corriente más allá de cada sección de encerramiento.

**10.1.6 Voltaje transitorio de encerramiento (TEV):** es un fenómeno transitorio muy rápido, el cual se encuentra aterrizado en el encerramiento de los sistemas de las GIS. Típicamente, las tierras que se colocan son demasiado grandes (inductivas) a la frecuencia de interés para prevenir efectivamente el TEV. El fenómeno se conoce también como el aumento transitorio de tierra (TGR) ó como el aumento transitorio de potencial a tierra (TGPR).

**10.1.7 Transitorios súper rápidos (VFT):** es un tipo de transitorios que se generan internamente dentro de una subestación con aislamiento de gas (GIS) que se caracterizan por una duración corta y por una frecuencia muy alta. Los VFT se generan a través de los contactos de un aparato interruptor ó una línea a tierra durante la falla por el decremento rápido de voltaje durante la ruptura del gas aislante. Estos transitorios pueden tener incrementos de tiempos en el orden de los nanosegundos implicando una capacidad de frecuencia cercana a los 100 MHz. Sin embargo, las frecuencias de oscilación dominantes, se relacionan con las longitudes físicas de barras de la GIS, que se encuentran generalmente en el rango de los 20 a 40 MHz.

**10.1.8 Sobrevoltaje de transitorios súper rápidos (VFTO):** es un sistema de sobrevoltaje que surge de la generación de los VFT. Ya que el VFT es uno de los componentes principales del VFTO, algunos componentes de frecuencia más baja ( $\cong 1$  MHz) se pueden presentar como un resultado de la descarga de la capacitancia acumulada (transformadores de voltaje). Generalmente, el VFTO no excederá 2.0 en por unidad, aunque, son posibles las magnitudes elevadas, en instantes específicos.

## **10.2 Características de las subestación con aislamiento de gas.**

Las GIS están expuestas a la misma magnitud de la corriente de falla a tierra y requieren la misma impedancia baja de aterrizaje como las subestaciones convencionales.

Comúnmente, la instalación de GIS necesita del 10% al 25% del área que se requiere para instalar un equipo convencional. A causa de esta área pequeña, es difícil obtener un aterrizaje adecuado únicamente por los métodos convencionales. Una atención particular se tiene que dar a las uniones de las carcasas metálicas del montaje de la GIS, como estas carcasas transportan corrientes inducidas de magnitud significativa, debemos confinarlas a trayectorias específicas. Con relación a esto, las recomendaciones de aterrizaje proporcionadas por los fabricantes de la GIS se deben cumplir estrictamente.

Como un resultado de la naturaleza compacta de la GIS y a sus distancias cortas, resulta el rompimiento eléctrico en el gas aislante, a través de cualquiera de los contactos de un dispositivo de interrupción en operación ó durante una

falla que genere transitorios de frecuencias muy altas que pueden acoplarse sobre el sistema de aterrizaje. En algunos casos, esos transitorios se pueden considerar en el diseño total del aterrizaje. Estos transitorios pueden provocar una magnitud alta, del incremento a tierra de corta duración y son también la causa de la interferencia electromagnética (EMI) en una GIS. Aunque la interferencia electromagnética (EMI) está fuera del alcance de este manual, las técnicas de mitigación de EMI muchas veces implican consideraciones especiales en el diseño de aterrizaje (Harvey [B79]).

### **10.3 Carcasas metálicas y corrientes circulantes.**

La efectividad del blindaje del encerramiento de barra, se determina por su impedancia, la cual determina la circulación de corrientes inducidas.

Con los encerramientos separados para cada fase, la magnitud y dirección de la corriente de encerramiento se afecta por el tamaño de la carcasa y la separación de la fase entre las barras, al igual que por el método de interconexión de las carcasas.

En un diseño de encerramiento continuo, un voltaje se induce en la carcasa por la corriente en el conductor que lo rodea, produciendo una circulación de corriente a lo largo de la misma. Cuando la continuidad de todos los encerramientos de fase se mantiene a través de conexiones cortas en ambos extremos, la corriente de encerramiento es solamente un poco menor que la que corriente que circula en el interior de la barra en una dirección opuesta. Estas corrientes retornan a través de la cubierta (encerramientos) de las fases adyacentes cuando la carga se equilibra entre las fases. La corriente magnetizante retrasa la corriente de encerramiento aproximadamente  $90^\circ$ . Los cambios continuos son principalmente dentro del encerramiento.

En un diseño de encerramiento no continuo, no hay trayectorias de retorno para las corrientes de encerramiento. De esta forma, el voltaje inducido en un encerramiento no continuo por la corriente de una(s) barra(s) interna(s) no puede producir ninguna circulación de corriente longitudinal. Los voltajes se podrían inducir también en cada encerramiento por las corrientes en los conductores que no son encerradas. El resultado de los voltajes no continuos, causa la circulación local de corrientes en cada sección aislada del encerramiento, en patrones no uniformes. Debido a estas propiedades, el diseño no continuo se considera generalmente menos ventajoso que el tipo continuo. Como tal, no se usa actualmente por la industria.

## 10.4 Aterrizaje de carcasas

Normalmente, las carcasas del tipo continuo proporcionan una trayectoria de retorno para las corrientes inducidas, así, de esta forma el conductor y la carcasa formarán un par concéntrico con una protección externa efectiva del área interna a la carcasa. Sin embargo, bajo fallas asimétricas, la componente de corriente directa no está protegida y causa una caída de voltaje debido a la resistencia de la carcasa.

Frecuentemente, las uniones eléctricas (empalmes) y el aterrizaje de las carcasas de las subestaciones con aislamiento de gas, son la mejor solución para minimizar los peligrosos voltajes de toque y de paso dentro del área de la GIS. El uso de medidas adicionales incluye plataformas conductoras que se conectan a las estructuras de la GIS y que se conectan a tierra.

Para limitar los efectos indeseables causados por corrientes circulantes, debemos conocer los siguientes requisitos:

- a) Todas las carcasas metálicas deben operar normalmente a un nivel de voltaje a tierra.
- b) Cuando se conectan a tierra todos los puntos asignados, el diseño del encerramiento de barra debe asegurar que no existan diferencia de potencial entre las secciones de individuales de la carcasa y que las estructuras de apoyo ni los sistemas de aterrizaje sea afectado desfavorablemente por la circulación de las corrientes inducidas.
- c) Evitar la circulación de corrientes de encerramiento, más allá de la trayectoria de retorno usual dentro de los ensamblajes de la GIS. Los transitorios superápidos generados por conmutación o por fallas en la GIS, pueden causar una descarga disruptiva en el aislamiento de los elementos. En tales casos se deben considerar las consecuencias de las descargas disruptivas en la distribución de corriente dentro del sistema de aterrizaje (Fujimoto, Croall y Foty [B30]).
- d) No se puede permitir que las corrientes de retorno del encerramiento circulen a través de cualquier transformador de corriente instalada

## **10.5 Cooperación entre los fabricantes de las GIS y usuarios.**

Comúnmente, los fabricantes de la GIS definen claramente, la barra principal de tierra de la subestación aislada con gas y especifica que es lo que se requiere del usuario para conectar los ensamblajes de la GIS a la tierra de la subestación. Se necesita de mucha documentación para asegurar que ninguna de las conexiones propuestas desde la barra principal de tierra hasta la rejilla de aterrizaje interferirá con la trayectoria de corriente ó cualquier otra característica operacional del diseño de la GIS. Esto es especialmente adecuado si la barra principal de tierra consta de un sistema de interconexiones entre los componentes y estructuras de la GIS, y no separar la barra de distribución cuando se proporciona.

Comúnmente, el fabricante de las subestaciones con aislamiento de gas, también proporciona ó es el responsable de:

- a) Proveer el empalme de sub-ensamblaje a sub-ensamblaje para asegurar los gradientes de voltaje seguro entre todas las partes del montaje de la GIS conectadas intencionalmente a tierra y entre la barra principal de tierra.
- b) Equiparlas fácilmente con conectores accesibles de suficiente resistencia mecánica para soportar las fuerzas electromagnéticas, el abuso normal y que sean capaces de transportar la máxima corriente de falla prevista en la parte del circuito sin recalentamiento.
- c) Proveer plataformas de aterrizaje o conectores, o ambos, para tener al menos dos trayectorias a tierra desde la barra principal de tierra ó desde cada carcasa metálica y la componente auxiliar del equipo de la GIS, designado para la conexión a tierra de la subestación, siempre y cuando no exista la barra principal de tierra.
- d) Recomendar los procedimientos adecuados para las conexiones entre metales distintos, comúnmente entre cable de cobre ó un conductor a tierra parecido y carcasas de aluminio.

Los usuarios comúnmente proveen la información que se debe considerar sobre los orígenes de la corriente de falla, las magnitudes y duraciones esperadas. Lo que es más, el usuario debe ayudar al fabricante de la subestación en repasar todos los equipos de aterrizaje propuestos para asegurar la relación adecuada de:

- a) Las conexiones para corriente de neutro en aparatos ó equipos conectados a tierra y disipar las descargas causadas por los rayos y conmutaciones dentro de la subestación (GIS).

- b) Los dispositivos para disipar las corrientes externas de descarga eléctrica y conmutaciones, en el ensamblaje de la subestación.
- c) Los requisitos de los relevadores de protección y satisfacer las medidas necesarias por teléfono ó cualquier otro medio de comunicación.
- d) Donde sean aplicables conexiones a tierra de los marcos de apoyo, estructuras, cubiertas metálicas e instalación de blindajes para terminales de cable en todas las GIS.
- e) Las conexiones para todas las plataformas ó conectores, suministrados por el fabricante.
- f) El voltaje de paso y de toque seguro, bajo condiciones de operación normal y anormal, externos a los elementos de la GIS.
- g) El cumplimiento con las especificaciones del aterrizaje, a fin de corregir las prácticas de conexión a tierra, basándose en el mutuo acuerdo entre el fabricante y el usuario.

#### **10.6 Otros aspectos especiales del aterrizaje de GIS.**

Se deben tomar precauciones para evitar corrientes excesivas que se inducen hacia los marcos adyacentes, estructuras ó refuerzos de acero y para evitar que se establezcan lazos de corriente por medio de otro equipo de la subestación, tal como: transformadores ó interruptores mecanizados separados. Si existe la posibilidad de un lazo de corriente indeseable por media de las conexiones a tierra ó si cualquier trayectoria de corriente sostenida pudiera parcialmente cerrarse o pasar a través de las estructuras conectadas a tierra, el esquema del aterrizaje de una subestación y la disposición física se deben analizar cuidadosamente con el fabricante de GIS.

Un cuidado igual se necesita en la proximidad de discontinuidades en las trayectorias de aterrizaje en el encerramiento de las conexiones del transformador hacia la GIS y en los puntos de interconexión a los interruptores mecanizados convencionales para evitar las corrientes circulantes en el disyuntor y acero del tanque del transformador.

Donde sea aplicable, todos los elementos de aislamiento deben ser capaces de resistir la diferencia de potencial máxima que ocurre entre el sistema de aterrizaje local y el que es externo a la GIS. En muchos casos, los transitorios superápidos generados por conmutación ó fallas en la subestación pueden causar voltajes transitorios muy altos en esos puntos. Por ejemplo, el aislamiento de los cables de la tubería de aceite de alta presión desde el sistema de aterrizaje de la subestación comúnmente incluye muchas

dificultades. Aunque, los terminales de alto voltaje (HV, por sus siglas en ingles) o del extra alto voltaje (EHV, por sus siglas en ingles) proporciona una separación adecuada de las tierras externas (con la virtud de un diseño que comúnmente incluye el uso de una plataforma aislante hecha de porcelana idónea para alto voltaje ó fibra de vidrio), algunas veces surgen problemas si el mismo nivel de aislamiento se espera en otros puntos de la interconexión. Un problema característico del área, es la tubería auxiliar entre el recinto de aceite individual de los terminales de la subestación y el recinto de aceite de difusión al final de la tubería cableada que comúnmente se divide en un variedad de dispositivos de alarma e instrumentos para controlar la presión de aceite (Graybill, Koehler, Nadkarni y Nochotas [B33]). En ese punto, el aislamiento de las partes metálicas comúnmente se logra insertando cerámica ó plástico. Es necesario tomar otras precauciones para protección de los voltajes transitorios (Dawalibi, Fujimoto, Ford y Harvey [B22]; Ford y Geddes [B29]; Fujimoto, Croall y Foty[B30]).

En estas y en circunstancias similares, una cooperación cercana con el fabricante de la GIS en las primeras etapas del diseño es muy importante.

### **10.7 Notas sobre el aterrizaje de las fundaciones del GIS**

Desde que las trayectorias de las corrientes a tierra se ven afectadas por la posición relativa de los objetos conductores que están en el aterrizaje, se debe poner más atención a esas partes del sistema de aterrizaje de la GIS que incluye discontinuidades ó donde el diseño requiere un cambio brusco en el patrón de los electrodos de tierra y son de mucho interés los casos siguientes:

En el espacio limitado de la subestación, una parte substancial del área de ella es comúnmente ocupada por fundaciones de concreto, la cual puede causar irregularidades en una trayectoria de descarga de corriente. En cuanto a esto, un losa de concreto con acero reforzado monolítico simple es favorable, ya sea, como un dispositivo auxiliar de aterrizaje y por razones sísmicas.

Si se utiliza una losa de piso, una buena medida es unir la malla de acero reforzada a una barra de tierra común (barra principal a tierra) de esta manera la carcasa y la estructura de acero de la subestación, dentro y sobre la fundación tendrá el mismo nivel de potencial. La suposición es que esta medida debe producir un mejor aterrizaje y las barras reforzadas, que se encuentran considerablemente más cerca, que los cables de una rejilla típica de tierra debe producir más potenciales iguales dentro del piso y fuera de la superficie.

Las fundaciones de una subestación (GIS), incluyen barras reforzadas y otros metales, que pueden actuar como electrodos de tierra auxiliares y se pueden utilizar con la condición de que bajo ninguna circunstancia la corriente de descarga resultará en un daño al concreto debido al sobrecalentamiento local ó una erosión gradual de los empalmes acero-concreto.

## 10.8 Criterios del voltaje de toque para GIS.

A pesar que los fabricantes de GIS generalmente diseñan el equipo reuniendo los requisitos ya mencionados para una operación segura y normalmente realiza la mayoría de cálculos, o todos los necesarios para determinar las protecciones de los voltajes y corrientes durante las fallas, existen circunstancias más que el usuario tiene que comprobar que la instalación completa es segura. Teniendo esta posibilidad en mente, algunos de los aspectos críticos de interconectar la GIS con un sistema de aterrizaje se tratan brevemente a continuación.

Una paradoja muy cierta, esencial para el diseño de la GIS, ocurre cuando uno intenta determinar el mejor concepto de aterrizaje en la GIS. A diferencia del conocimiento general, de que una conexión larga a tierra necesariamente es una buena práctica de aterrizaje, las corrientes circulantes en las carcasas de la GIS durante una falla también deben tener consideraciones. Estas consideraciones son: 1) Donde circularán esas corrientes, y 2) donde y en que grado el ingeniero de diseño ó los fabricantes de la GIS (ó ambos), prefieren que circulen esas corrientes.

Característicamente, en un diseño de carcasa continua, la trayectoria de las corrientes de encerramiento incluye algunas partes estructurales de la armadura de la GIS y las carcasas mismos. Con cada encerramiento de fase vinculada a los encerramientos de las fases adyacentes en ambos extremos, se forman varios circuitos cerrados. Ya que, una sección cruzada de las partes estructurales que se mencionaron anteriormente, es normalmente mucho más pequeña que la carcasa y comparable a las abrazaderas de aterrizaje que conecta el ensamblaje de la GIS a la rejilla de tierra (y con respecto a eso, las barras de refuerzo de la fundación de concreto también se conectan a la rejilla de tierra), de la cual surgen muchas interrogantes.

- a) Si las corrientes se dividen y fluyen por todas las trayectorias metálicas disponibles, ¿que relación se debe suponer entre las corrientes que circulan dentro de los elementos de la GIS y a través de una conexión a tierra?
- b) ¿Cuanta corriente que circula en un lazo de corriente a través de una conexión a tierra es suficiente?
- c) ¿Deben diseñarse las GIS para ser seguras, si no hay corriente circulante, circularía (al menos para una falla externa) a través de las conexiones a tierra?
- d) Y finalmente, ¿cuanto aterrizaje es necesario para el mejor balance entre los requisitos relacionados de seguridad y operación.

En este momento, no hay respuestas, ni soluciones claras a las preguntas arriba mencionadas. Algunos fabricantes prefieren proveer una barra a tierra especial (barra principal a tierra) como una parte del paquete de la GIS, con los puntos de



conexión a tierra señalados claramente. Otros no usan ninguna barra principal a tierra, pero designan simplemente ciertos puntos en el encerramiento como plataformas de aterrizaje y dejar que esta utilidad complete el aterrizaje.

En cualquiera de los casos, esto llega a ser necesario para limitar a un valor la corriente corporal en el rango de los miliamperios, mientras que las corrientes de falla están en un rango de los cien a miles de amperios. De esta manera, una persona con toda seguridad puede asumir que no cambiará la diferencia de potencial total existente previo a un contacto, mientras se obliga a la corriente a una trayectoria alterna incluyendo el cuerpo humano. Entonces el caso de una persona que toca el metal cubierto de la GIS se reduce al problema de encontrar la caída de voltaje entre dos puntos de contacto a lo largo de uno de ellos o entre dos encerramientos y una tierra común. Para el contacto mano-pies que hace una persona al estar de pie en una superficie no metálica (por ejemplo, una losa de concreto ó la capa de suelo sobre la rejilla de aterrizaje), se requiere solamente una pequeña modificación de la aplicación del criterio de la ecuación (32) y la ecuación (33) para tomar en cuenta la caída de voltaje inductivo máximo que ocurre dentro de los elementos de la GIS.

El criterio del voltaje de toque para una subestación es:

$$\sqrt{E_t^2 + (E'_{\max})^2} < E_{toque} \quad (36)$$

Donde

$E_t$  es el voltaje de toque máximo, tal como se determina para los puntos por debajo de los pies de la persona.

$E_{\max}$  es el valor máximo de la diferencia de voltaje metal-metal en y entre las carcasas de la GIS, ó entre las carcasas y las estructuras de apoyo, incluyendo cualquier miembro vertical u horizontal para el cual los elementos de la GIS se han diseñado.

En situaciones practicas, como se muestra en la *figura 16*, ocurre una gran cantidad de trayectorias de retorno. Esto hace difícil los calculos de las corrientes inducidas longitudinalmente y para algunas fallas externas remotas completamente no funcionales, como muchos parámetros que permanecen indefinidos. Como una regla debido a la gran variedad en los arreglos fisicos posibles de los elementos de la GIS, los fabricantes realizan calculos detallados para determinar los parámetros básicos de diseño tal como el espacio y localización de los empalmes.

## 10.9 Recomendaciones.

Las siguientes recomendaciones se deben considerar para la instalación de la GIS:

- a) Cuando aplicamos el criterio del voltaje de toque en la ecuación (36), se deben considerar los siguientes factores. El caso de una falla interna con retorno a tierra requiere la adición de la caída de voltaje resistiva e inductiva, hacia la caída resistiva que representa la diferencia de potencial entre la tierra de la subestación y el punto por debajo de los pies de una persona. Generalmente, esto no es necesario para fallas externas de la GIS. Para una falla externa línea-tierra, los voltajes inducidos en el forro se deben examinar para un contacto mano-mano y metal-metal, pero el cálculo del voltaje de paso y de toque en la superficie terrestre es el mismo que para instalaciones convencionales [es decir, el termino inductivo  $E'_{max}$  en la ecuación (36) es cero].
- b) Al evaluar la magnitud de los voltajes inducidos causados por fallas externas a la GIS, solo el caso de una falla cercana [caso (B) en la *figura 16*] necesita ser analizado, ya que las fallas externas remotas causarían un problema menor.

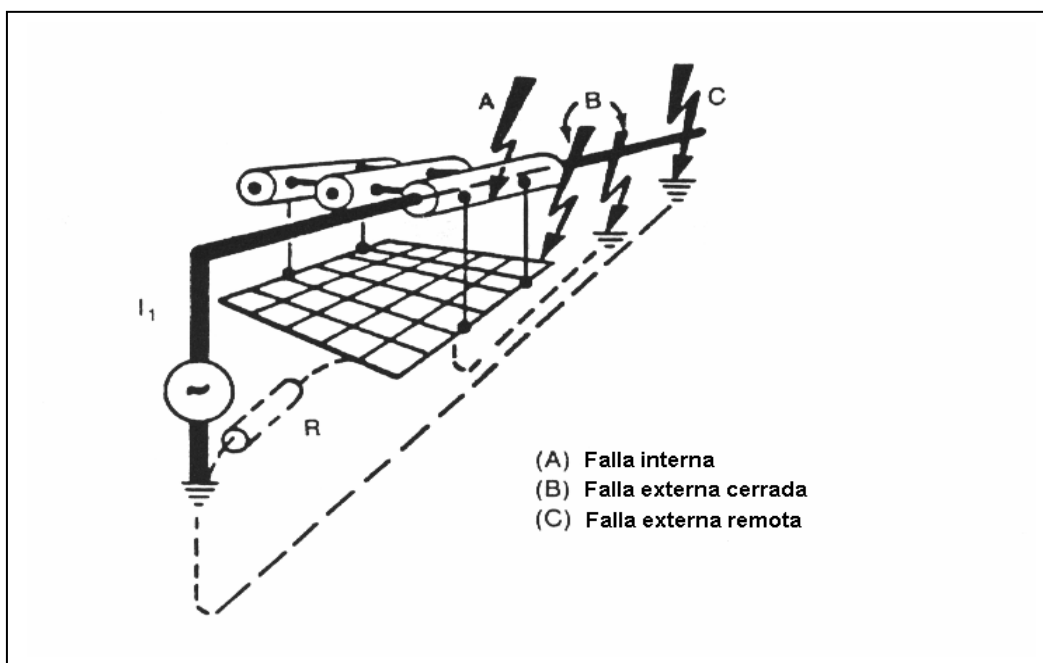


Figura 16 – Fallas características en una subestación con aislamiento de gas.

## **11. SELECCIÓN DE LOS CONDUCTORES Y CONEXIONES.**

Al evaluar que material y que calibre del conductor ó que límite máximo permisible de temperatura se necesita aplicar en situaciones individuales de diseño, la elección final siempre debe reflejar las consideraciones delineadas desde los requisitos básicos (11.1) hasta la selección de las conexiones (11.4).

### **11.1 Requisitos básicos**

Cada elemento del sistema de aterrizaje, incluyendo los conductores de la rejilla, conectores, terminales de conexión y todos los electrodos primarios, se deben diseñar para el supuesto tiempo de duración de la instalación, además el elemento tendrá que:

- a) Poseer suficiente conductividad, así no contribuirá principalmente a la diferencia de los voltajes locales.
- b) Resistir la fusión y el deterioro mecánico bajo las combinaciones más adversas de magnitud y duración de una falla.
- c) Ser mecánicamente confiable y con alto grado de resistencia.
- d) Ser capaz de mantener sus funciones, inclusive cuando este expuesto a la corrosión ó abuso físico.

### **11.2 Selección de los materiales para conductores y problemas relacionados a la corrosión.**

#### **11.2.1 El cobre**

El cobre es un material comúnmente usado para aterrizaje. Los conductores de cobre, además de una alta conductividad, tienen la ventaja de ser resistentes a la mayor parte de la corrosión subterránea ya que el cobre es catódico con respecto a la mayoría de los otros metales que son igualmente enterrados en la zona.

#### **11.2.2 El acero con revestimiento de cobre**

El acero con revestimiento de cobre se usa comúnmente en varillas subterráneas y ocasionalmente en rejillas de aterrizaje. Por lo tanto, el uso del cobre ó acero con revestimiento de cobre de menor grado, asegura que la integridad de una red subterránea será conservada por años, siempre que los conductores sean del calibre adecuado y no estén dañados y que las condiciones del suelo no sean corrosivas con el material que se este usando.

### **11.2.3 El aluminio**

El aluminio se usa con menos frecuencia en rejillas de tierra. Aunque, como primera opción, el uso del aluminio sería una selección común para el equipo de una GIS con gabinetes hechos de aluminio ó aleaciones de aluminio, el aluminio tiene las siguientes desventajas que debemos considerar:

- a) El mismo aluminio se puede corroer en ciertos suelos. La capa del material corroído de aluminio es mal conductora para todos los propósitos prácticos de aterrizaje.
- b) La corrosión gradual causada por corrientes alternas también puede ser un problema, bajo ciertas condiciones.

Así, el Aluminio solamente se debe usar después de una completa investigación de todas las circunstancias, a pesar del hecho que, como el acero, este alivia el problema de contribuir a la corrosión de otros objetos enterrados. Sin embargo, el aluminio es anódico para muchos metales, incluyendo el acero y sí es interconectado a uno de estos metales en la presencia de un electrolito, el aluminio se sacrificará así mismo para proteger al otro metal. Si se utiliza el aluminio, se recomiendan utilizar conductores eléctricos con altos niveles de pureza, por ser más confiable que la mayoría de las aleaciones.

### **11.2.4 El acero**

El acero se puede utilizar en los conductores de las rejillas de tierra como en las barras. Por supuesto que tal diseño requiere poner mayor atención a la corrosión del acero. El uso del acero galvanizado ó el uso de acero resistente a la corrosión, en combinación con protección catódica, es común para sistemas de aterrizaje de acero (Mahonar y Nagar [B39]).

### **11.2.5 Otras consideraciones**

Una rejilla de cobre ó acero con revestimiento de cobre forma una celda galvánica con estructuras de acero enterrado, tuberías, y cualquiera de las aleaciones con base de plomo que podría estar presente en la envoltura del cable. Esta celda galvánica puede acelerar la corrosión de la última. Se ha intentado cubrir con estaño el cobre para alguna de las utilidades. Esto reduce el potencial de la celda con respecto al Acero y al Zinc, alrededor del 50% y prácticamente elimina este potencial con respecto al plomo (el estaño se sacrifica mas que el plomo). La desventaja de usar un conductor de cobre estañado, es que acelera y concentra la corrosión natural del cobre en cualquier área pequeña descubierta, causado por los químicos en el suelo. Otros métodos que se usan frecuentemente son:

- a) Proteger del sacrificio la superficie del metal con una capa tal como la cinta plástica, mezcla de asfalto ó ambas.

- b) Destinar elementos metálicos enterrados, así como, los conductores con base de cobre que cruzarán las líneas de tuberías de agua u objetos similares hechos de otros metales sin revestimiento lo más cercano posible a los ángulos rectos, y luego aplicar una capa aislante a un metal ó a los otros donde estén en inmediación. La capa aislante se aplica comúnmente a las tuberías.
- c) La protección catódica usando ánodos expuestos ó sistemas de corriente señalados.
- d) El uso de tuberías no metálicas y cañería metálica.

En las GIS, el uso de la protección catódica se puede requerir también por otras razones. La protección catódica se usa generalmente para proteger las instalaciones que son externas a las GIS, tal como cables presurizados tipo-tubería, terminales de cables protegidos, etc. Debido a la complejidad de las instalaciones de las GIS, es esencial considerar todos los aspectos para la prevención de la corrosión antes del diseño del sistema de aterrizaje. Los terminales específicos son difíciles de colocar porque las condiciones de las subestaciones pueden ser diferentes debido al lugar y aplicación del sistema de potencia eléctrica.

El tema de la corrosión subterránea y la protección catódica es complejo. Muchos estudios se han hecho y mucho se ha publicado concerniente a este tema. La discusión detallada de este fenómeno esta más allá del alcance de este manual.

### 11.3 Los factores del tamaño de los conductores.

#### 11.3.1 Corrientes simétricas

El tiempo corto del aumento de temperatura en un conductor de tierra ó el calibre del conductor que se requiere en función de la corriente del mismo, se obtiene de la ecuación (37) a la ecuación (42), la cual se ha tomado de la derivación de Sverak [B48]. Estas ecuaciones evalúan la ampacidad de cualquier conductor para el cual la constante del material se conoce ó se pueden determinar por cálculo. Las constantes de los materiales que comúnmente se utilizan para el aterrizaje, están registradas en la tabla 1. La ecuación (37) hasta la ecuación (42) se derivan de la corriente simétrica (sin compensación DC “dc offset”).

$$I = A_{mm^2} \sqrt{\left( \frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left( \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)} \quad (37)$$

Donde:

- I** es el valor rms de la corriente en Kiloamperios
- A<sub>mm</sub><sup>2</sup>** es la sección transversal del conductor en mm<sup>2</sup>
- T<sub>m</sub>** es la temperatura máxima permisible en °C
- T<sub>a</sub>** es la temperatura ambiente en °C
- T<sub>r</sub>** es la temperatura de referencia para la constante de los materiales en °C
- α<sub>o</sub>** es el coeficiente térmico de resistividad a 0 °C en 1/°C
- α<sub>r</sub>** es el coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T<sub>r</sub> en 1/°C
- ρ<sub>r</sub>** es la resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T<sub>r</sub> en Ω-cm
- K<sub>o</sub>** 1/ α<sub>o</sub> ó (1/ α<sub>r</sub>) - t<sub>r</sub> en °C
- t<sub>c</sub>** es la duración de la corriente en segundos
- TCAP** es la capacidad térmica por unidad de volumen de la tabla 1, en J/(cm<sup>3</sup>.°C)

Se debe notar que α<sub>r</sub> y ρ<sub>r</sub> se encuentran a la misma temperatura de referencia de T<sub>r</sub> °C. La tabla 1 provee los valores para α<sub>r</sub> y ρ<sub>r</sub> a 20 °C.

Si el calibre del conductor esta dado en Kcmils (mm<sup>2</sup> x 1.974= Kcmils), la ecuación (37) llega a ser:

$$I = 5.07 \times 10^{-3} A_{\text{kcmil}} \sqrt{\left( \frac{\text{TCAP}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left( \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)} \quad (38)$$

La ecuación (37) y la ecuación (38), en conjunto con la ecuación (39) (la cual define el TCAP), reflejan las dos suposiciones básicas.

- a) Todo el calor será retenido en el conductor (Proceso adiabático)
- b) El producto del calor específico (SH) y el peso específico (SW), TCAP, es aproximadamente constante porque el SH aumenta y el SW se reduce al mismo porcentaje. Para la mayoría de metales, estos valores son aplicables sobre un amplio rango de temperatura, dentro de los segundos a lo largo de la duración de la falla.

**Tabla 1 – Constantes de los materiales**

| <b>Descripción</b>                                         | <b>Conductividad del material (%)</b> | <b>Factor <math>\alpha_r</math> a 20°C (1/°C)</b> | <b>K<sub>o</sub> en °C</b> | <b>Temperatura de fusión<sup>a</sup> T<sub>m</sub> (°C)</b> | <b><math>\rho_r</math> 20°C (μΩ.cm)</b> | <b>Capacidad Térmica TCAP[J/(cm<sup>3</sup>.°C)]</b> |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Cobre, destemplado de suave -trazado                       | 100.0                                 | 0.00393                                           | 234                        | 1083                                                        | 1.72                                    | 3.42                                                 |
| Cobre, comercial de duro-trazado                           | 97.0                                  | 0.00381                                           | 242                        | 1084                                                        | 1.78                                    | 3.42                                                 |
| Alambre de Acero con revestimiento de Cobre                | 40.0                                  | 0.00378                                           | 245                        | 1084                                                        | 4.40                                    | 3.85                                                 |
| Alambre de Acero con revestimiento de Cobre                | 30.0                                  | 0.00378                                           | 245                        | 1084                                                        | 5.86                                    | 3.85                                                 |
| Varilla <sup>b</sup> de Acero con revestimiento de Cobre   | 20.0                                  | 0.0078                                            | 245                        | 1084                                                        | 8.62                                    | 3.85                                                 |
| Aluminio de grado EC                                       | 61.0                                  | 0.00403                                           | 228                        | 657                                                         | 2.86                                    | 2.56                                                 |
| Aleación de Aluminio 5005                                  | 53.5                                  | 0.00353                                           | 263                        | 652                                                         | 3.22                                    | 2.60                                                 |
| Aleación de Aluminio 6201                                  | 52.5                                  | 0.00347                                           | 268                        | 654                                                         | 3.28                                    | 2.60                                                 |
| Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio             | 20.3                                  | 0.00360                                           | 258                        | 657                                                         | 8.48                                    | 3.58                                                 |
| Acero 1020                                                 | 10.8                                  | 0.00160                                           | 605                        | 1510                                                        | 15.90                                   | 3.28                                                 |
| Varilla <sup>c</sup> de acero con revestimiento Inoxidable | 9.8                                   | 0.00160                                           | 605                        | 1400                                                        | 17.50                                   | 4.44                                                 |
| Varilla de acero con capa de Zinc                          | 8.6                                   | 0.00320                                           | 293                        | 419                                                         | 20.10                                   | 3.93                                                 |
| Acero Inoxidable 304                                       | 2.4                                   | 0.00130                                           | 749                        | 1400                                                        | 72.00                                   | 4.03                                                 |

<sup>a</sup> de los estándares ASTM

<sup>b</sup> Varillas de Acero con revestimiento de Cobre basado en 0.254mm (0.010 pulg.) de espesor del Cobre.

<sup>c</sup> Varillas de Acero con revestimiento Inoxidable en 0.508mm (0.020 pulg.) N° 304 con espesor del Acero Inoxidable sobre el núcleo del Acero 1020.

### 11.3.1.1 Sustitución de fórmulas

El TCAP se puede calcular para materiales que no se muestran en la Tabla 1 por medio del calor específico y peso específico. El calor específico, SH, en cal/(gramos x °C) y el peso específico, SW, en gramos / cm<sup>3</sup> están relacionados a la capacidad térmica por unidad de volumen en J/(cm<sup>3</sup> x °C) de la siguiente forma:

$$4.184 \text{ J} = 1 \text{ Caloría}$$

Por lo tanto, el TCAP se define por:

$$\text{TCAP [cal/ cm}^3 \text{ x } ^\circ\text{C}] = \text{SH [cal/ (gramos x } ^\circ\text{C)]} \cdot \text{SW (gramos/cm}^3\text{)} \quad \text{Ó}$$

$$\text{TCAP [J/ (cm}^3 \text{ x } ^\circ\text{C)]} = 4.184 \text{ (J/cal)} \cdot \text{SH [cal/ (gramos x } ^\circ\text{C)]} \cdot \text{SW (Gramos/cm}^3\text{)} \quad (39)$$

Una vez está determinado el TCAP, la ecuación (37) y la ecuación (38) se pueden usar para determinar la ampacidad del conductor.

La ecuación (37) y la ecuación (38) se pueden ordenar para dar el calibre del conductor requerido como una función de la corriente en el conductor.

$$A_{\text{mm}^2} = I \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}} \quad (40)$$

$$A_{\text{kcmil}} = I \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}} \quad (41)$$

Por ejemplo: se puede hacer una tabulación utilizando la ecuación (41) y la Tabla 1, para obtener los datos para un acero con revestimiento de cobre del 30% y 40% y para conductores de cobre del 100% y 97%. Por ejemplo, para calcular el calibre de un conductor de acero con revestimiento de cobre, se obtiene:

$$T_c = 1.0, \alpha_{20} = 0.00378, \rho_{20} = 5.86, \text{TCAP} = 1084, T_a = 40, K_o = 245$$

Así, para I =1 KA y usando la ecuación (41)

$$A_{\text{Kcmil}} = 197.4 / \sqrt{267.61} = 12.06 \text{ Kcmil o } 12.06 \text{ Kcmil/KA}$$



### 11.3.1.2 Simplificación de fórmulas

La fórmula en unidades inglesas se puede simplificar como sigue:

$$A_{\text{kcmil}} = I \cdot k_f \sqrt{t_c} \quad (42)$$

Donde

$A_{\text{kcmil}}$  es el área del conductor en Kcmil.

$I$  es el valor rms de la corriente de falla en Kiloamperios.

$t_c$  es la duración de la corriente en segundos.

$K_f$  es la constante de la Tabla 2 para los materiales de varios valores de  $T_m$  (Temperatura de fusión o la temperatura limitada del conductor establecido en el tema 11.3.3) y utilizando la temperatura ambiente ( $T_a$ ) de 40°C.

**Ejemplos:** Utilizando la ecuación (42) para 20KA, con una falla de 3seg.

a) Para el Cobre de suave trenzado

$$A_{\text{kcmil}} = (20)(7)\sqrt{3} = 242.5 \text{ Kcmil} \cong 250 \text{ Kcmil}$$

b) Para una conductividad del 40% de un conductor de Acero con revestimiento de Cobre

$$A_{\text{kcmil}} = (20)(10.45)\sqrt{3} = 362.0 \text{ Kcmil} \cong \text{utilice el conductor 19 / \# 7.}$$

c) Para un conductor de Acero

$$A_{\text{kcmil}} = (20)(15.95)\sqrt{3} = 552.5 \text{ Kcmil} \cong \text{utilice el conductor 7/8" de diámetro}$$

También se pueden comparar las corrientes de fusión de un conductor de calibre establecido para diferentes intervalos de tiempo. Utilizando como ejemplo el cobre de suave trazado 4/0 AWG (211.6Kcmil)

$$\text{Sí } t_c = 0.5 \text{ s; } I = 211.6 / (7.00 \sqrt{0.5}) = 42.7 \text{ kA}$$

$$\text{Sí } t_c = 1.0 \text{ s; } I = 211.6 / (7.00 \sqrt{1.0}) = 30.2 \text{ kA}$$

$$\text{Sí } t_c = 3.0 \text{ s; } I = 211.6 / (7.00 \sqrt{3.0}) = 17.5 \text{ kA}$$

**Tabla 2 – Constantes de los materiales**

| <b>Material</b>                                | <b>Conductividad (%)</b> | <b>T<sub>m</sub><sup>a</sup> (°C)</b> | <b>K<sub>f</sub></b> |
|------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Cobre destemplado con suave trazado            | 100.0                    | 1083                                  | 7.00                 |
| Cobre comercial con duro trazado               | 97.0                     | 1084                                  | 7.06                 |
| Cobre comercial con duro trazado               | 97.0                     | 250                                   | 11.78                |
| Alambre de Acero con revestimiento de Cobre    | 40.0                     | 1084                                  | 10.45                |
| Alambre de Acero con revestimiento de Cobre    | 30.0                     | 1084                                  | 12.06                |
| Varilla de Acero con revestimiento de Cobre    | 20.0                     | 1084                                  | 14.64                |
| Aluminio grado EC                              | 61.0                     | 657                                   | 12.12                |
| Aleación de Aluminio 5005                      | 53.5                     | 652                                   | 12.41                |
| Aleación de Aluminio 6201                      | 52.5                     | 654                                   | 12.47                |
| Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio | 200.3                    | 657                                   | 17.2                 |
| Acero 1020                                     | 10.8                     | 1510                                  | 15.95                |
| Varilla de Acero con revestimiento Inoxidable  | 9.8                      | 1400                                  | 14.72                |
| Varilla de Acero con capa de Zinc              | 8.6                      | 419                                   | 28.96                |
| Acero Inoxidable 304                           | 2.4                      | 1400                                  | 30.05                |

<sup>a</sup> Ver el tema factores secundarios del tamaño del conductor para comentarios que interesan para la selección del material.

El calibre del conductor que se elige comúnmente es más grande que los que se establecen en la fusión debido a los siguientes factores:

- a) El conductor debe tener la fuerza para soportar cualquier abuso mecánico ó corrosivo durante la vida útil para lo que se diseñó la instalación.
- b) El conductor debe tener una conductancia suficiente para prevenir cualquier caída de voltaje peligrosa posible durante una falla, en la vida útil de la instalación.
- c) La necesidad de limitar la temperatura del conductor (Factores secundarios del tamaño del conductor)
- d) Un factor de seguridad se debe aplicar al sistema de aterrizaje, así, como a otros componentes eléctricos.

### **11.3.2 Corrientes Asimétricas**

#### **11.3.2.1 Utilizando un factor de reducción**

En algunos casos donde se puede contar con un componente de compensación de DC(dc offset) la corriente de falla se deseada, un valor equivalente de la corriente simétrica,  $I_F$ , representando el valor efectivo de una corriente asimétrica integrada sobre la duración total de falla,  $t_C$ , se puede determinar como una función de X/R usando el factor de reducción,  $D_f$ , antes de aplicar las ecuaciones (37 a la ecuación 42)

$$I_F = (I_f) (D_f) \quad (43)$$

El valor resultante de  $I_F$  siempre es más grande que  $I_f$  debido a que el factor de decremento se basa en una suposición que las componentes de CA no decaen con el tiempo pero permanece constante en su valor subtransitorio inicial.

#### **11.3.2.2 Utilizando las tablas de corrientes asimétricas**

Debido a la compensación de CD (dc offset) en la corriente de falla causará al conductor un incremento de temperatura para las mismas condiciones de falla (duración y magnitud de la corriente de falla), la ecuación (43) determina un valor equivalente de la corriente simétrica en la presencia de la compensación de DC. Además, si está presente, la compensación de CD resultará en una fuerza mecánica y energía absorbida, siendo esta casi cuatro veces el valor que para un caso de corriente simétrica equivalente. Sin embargo, el efecto de la compensación de CD se puede despreciar si la duración de la corriente es más

grande ó igual que 1segundo ó la relación X/R es menor que 5 segundos en el lugar de la falla.

Las características de fusión de varios calibres de conductores de cobre con varios niveles de compensación de CD se muestran en la Tabla 3 hasta la Tabla 6. Estas características de fusión se han derivado teóricamente y luego se han verificado extensamente a través de experimentos (Reichman, Vainberg y Kiffel [B46]).

**Tabla 3 - Corriente fundamental cargando capacidades de cables de aterrizaje de cobre; la corriente son valores RMS, para frecuencias de 60 Hz, X/R = 40; corriente en kiloamperios.**

| <b>Tamaño del cable, AWG</b> | <b>Sección transversal nominal, mm<sup>2</sup></b> | <b>6 Ciclos (100ms)</b> | <b>15 Ciclos (250ms)</b> | <b>30 Ciclos (500ms)</b> | <b>45 Ciclos (750 ms)</b> | <b>60 Ciclos (1s)</b> | <b>180 Ciclos (3s)</b> |
|------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| # 2                          | 33.63                                              | 22                      | 16                       | 12                       | 10                        | 9                     | 5                      |
| #1                           | 42.41                                              | 28                      | 21                       | 16                       | 13                        | 11                    | 7                      |
| 1/0                          | 53.48                                              | 36                      | 26                       | 20                       | 17                        | 14                    | 8                      |
| 2/0                          | 67.42                                              | 45                      | 33                       | 25                       | 21                        | 18                    | 11                     |
| 3/0                          | 85.03                                              | 57                      | 42                       | 32                       | 27                        | 23                    | 14                     |
| 4/0                          | 107.20                                             | 72                      | 53                       | 40                       | 34                        | 30                    | 17                     |
| 250 kcmil                    | 126.65                                             | 85                      | 62                       | 47                       | 40                        | 35                    | 21                     |
| 350 kcmil                    | 177.36                                             | 119                     | 87                       | 67                       | 56                        | 49                    | 29                     |

**Tabla 4 - Corriente fundamental cargando capacidades de cables de aterrizaje de cobre; la corriente son valores RMS, para frecuencias de 60 Hz, X/R = 20; corriente en kiloamperios.**

| <b>Tamaño del cable, AWG</b> | <b>Sección transversal nominal, mm<sup>2</sup></b> | <b>6 Ciclos (100ms)</b> | <b>15 Ciclos (250ms)</b> | <b>30 Ciclos (500ms)</b> | <b>45 Ciclos (750 ms)</b> | <b>60 Ciclos (1s)</b> | <b>180 Ciclos (3s)</b> |
|------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| # 2                          | 33.63                                              | 25                      | 18                       | 13                       | 11                        | 9                     | 5                      |
| #1                           | 42.41                                              | 32                      | 22                       | 16                       | 13                        | 12                    | 7                      |
| 1/0                          | 53.48                                              | 40                      | 28                       | 21                       | 17                        | 15                    | 9                      |
| 2/0                          | 67.42                                              | 51                      | 36                       | 26                       | 22                        | 19                    | 11                     |
| 3/0                          | 85.03                                              | 64                      | 45                       | 33                       | 27                        | 24                    | 14                     |
| 4/0                          | 107.20                                             | 81                      | 57                       | 42                       | 35                        | 30                    | 18                     |
| 250 kcmil                    | 126.65                                             | 95                      | 67                       | 50                       | 41                        | 36                    | 21                     |
| 350 kcmil                    | 177.36                                             | 134                     | 94                       | 70                       | 58                        | 50                    | 29                     |

**Tabla 5 - Corriente fundamental cargando capacidades de cables de aterrizaje de cobre; la corriente son valores RMS, para frecuencias de 60 Hz, X/R = 10; corriente en kiloamperios.**

| <b>Tamaño del cable, AWG</b> | <b>Sección transversal nominal, mm<sup>2</sup></b> | <b>6 Ciclos ( 100ms)</b> | <b>15 Ciclos (250ms)</b> | <b>30 Ciclos (500ms)</b> | <b>45 Ciclos (750 ms)</b> | <b>60 Ciclos (1s)</b> | <b>180 Ciclos (3s)</b> |
|------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| # 2                          | 33.63                                              | 27                       | 19                       | 13                       | 11                        | 9                     | 5                      |
| #1                           | 42.41                                              | 35                       | 23                       | 17                       | 14                        | 12                    | 7                      |
| 1/0                          | 53.48                                              | 44                       | 30                       | 21                       | 17                        | 15                    | 9                      |
| 2/0                          | 67.42                                              | 56                       | 38                       | 27                       | 22                        | 19                    | 11                     |
| 3/0                          | 85.03                                              | 70                       | 48                       | 34                       | 28                        | 24                    | 14                     |
| 4/0                          | 107.20                                             | 89                       | 60                       | 43                       | 36                        | 31                    | 18                     |
| 250 kcmil                    | 126.65                                             | 105                      | 71                       | 51                       | 42                        | 36                    | 21                     |
| 350 kcmil                    | 177.36                                             | 147                      | 99                       | 72                       | 59                        | 51                    | 30                     |

**Tabla 6 - Corriente fundamental cargando capacidades de cables de aterrizaje de cobre; la corriente son valores RMS, para frecuencias de 60 Hz, X/R = 0; corriente en kiloamperios.**

| <b>Tamaño del cable, AWG</b> | <b>Sección transversal nominal, mm<sup>2</sup></b> | <b>6 Ciclos (100ms)</b> | <b>15 Ciclos (250ms)</b> | <b>30 Ciclos (500ms)</b> | <b>45 Ciclos (750 ms)</b> | <b>60 Ciclos (1s)</b> | <b>180 Ciclos (3s)</b> |
|------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| # 2                          | 33.63                                              | 31                      | 19                       | 14                       | 11                        | 9                     | 5                      |
| #1                           | 42.41                                              | 39                      | 24                       | 17                       | 14                        | 12                    | 7                      |
| 1/0                          | 53.48                                              | 49                      | 31                       | 22                       | 18                        | 15                    | 9                      |
| 2/0                          | 67.42                                              | 62                      | 39                       | 28                       | 22                        | 19                    | 11                     |
| 3/0                          | 85.03                                              | 79                      | 50                       | 35                       | 28                        | 25                    | 14                     |
| 4/0                          | 107.20                                             | 99                      | 63                       | 44                       | 36                        | 31                    | 18                     |
| 250 kcmil                    | 126.65                                             | 117                     | 74                       | 52                       | 43                        | 37                    | 21                     |
| 350 kcmil                    | 177.36                                             | 165                     | 104                      | 73                       | 60                        | 52                    | 30                     |

## **Notas**

1. Los valores de corriente que se muestran desde la Tabla 3 hasta la Tabla 6 se calcularon por medio del programa de computadora RTGC (Reichman, Vainberg y Kuffel [B122]). Este programa de computadora se puede usar directamente para determinar los requisitos de calibre del cable de aterrizaje para una relación X/R y del tiempo de limpieza de la falla.
2. La corriente se calcula para la máxima compensación de CD
3. La temperatura inicial del conductor = 40°C; y la temperatura final del conductor = 1083 °C.
4. Los valores métricos son conversiones manejables. Las conversiones manejables es un cálculo directo del área, en unidades métricas, del tamaño AWG.

### **11.3.3 Factores secundarios del calibre del conductor**

El diseñador debe tomar precauciones para garantizar que la temperatura de cualquier conductor y la conexión en la instalación de aterrizaje, no ponga en peligro la seguridad de operación de la subestación. Por ejemplo:

- a) Comúnmente, los conductores y las conexiones cerca de materiales inflamables deben estar sujetos limitaciones más rigurosas de temperatura.

- b) Sí la fuerza del Cobre de suave trenzado se requiere por razones mecánicas, entonces se recomienda no excederse de los 250°C para evitar el destemplado de los conductores.

La posible exposición a un ambiente corrosivo se debe examinar cuidadosamente. Cuando el calibre del conductor y el método de unión que se escoge ha cumplido todos los requisitos de la prueba de acuerdo a el IEEE Std 837-1989, es aconsejable escoger un conductor de calibre más grande para compensar alguna reducción gradual en la sección transversal del conductor, durante el diseño de duración de la instalación donde el ambiente del suelo promueve a originar la corrosión.

Los terminales inferiores del equipo hacia la rejilla se pueden exponer a la corriente de falla total dentro de la rejilla, mientras la rejilla divide esta corriente y por lo que cada segmento del conductor en la rejilla está expuesto solamente a una pequeña fracción de la corriente de falla total. Así, los terminales de la parte inferior deberán ser más grandes que los conductores de la rejilla ó deben ser múltiples conductores desde el equipo hacia la rejilla para tener suficiente ampacidad para la corriente de falla total.

Los conductores de terminales a tierra que dirigen la corriente de los rayos, rara vez requieren mayor consideración. El calibre del conductor, el cual es seleccionado de acuerdo a los requisitos de la corriente de falla, comúnmente es también adecuado para cargar una sobre tensión por un tiempo corto causado por los rayos (Bellashi[B3]).

En la realidad, los requisitos en la fiabilidad mecánica colocarán el calibre mínimo del conductor. Mientras podría considerarse apropiado para el diseñador establecer los calibres mínimos de acuerdo a las condiciones del lugar, Algunas de estas razones específicas son:

- a) El mal funcionamiento de los relevadores puede resultar en una duración de la falla excesiva para los tiempos de limpieza del primario. El tiempo de respaldo para eliminar la falla es generalmente proporcionado por el calibre del conductor. Para subestaciones muy pequeñas, esto se puede acercar a un tiempo de 3 segundos ó más. Sin embargo, debido a las grandes subestaciones comúnmente tienen un esquema de protección complejo ó redundante, la falla se despejara generalmente en 1 segundo ó en menor tiempo.
- b) El último valor de corriente que se utiliza para determinar el calibre del conductor, debe tomar en cuenta con la posibilidad un incremento futuro. Es menos costoso incluir un margen adecuado en el calibre del conductor durante el diseño inicial, que intentar reforzar un número de terminales de tierra en una fecha posterior.

## **11.4 Selección de las conexiones**

Todas las conexiones hechas en una red de tierra por encima y debajo tierra, se deben evaluar para conocer los requisitos generales de un conductor que se utiliza; nombre, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, capacidad de la corriente de carga y la fuerza mecánica. Estas conexiones deben ser lo bastante sólidas para mantener el incremento de temperatura debajo de la temperatura del conductor y poder soportar el efecto del calentamiento. Las conexiones deben ser también lo suficientemente fuertes para soportar las fuerzas mecánicas causadas por las fuerzas electromagnéticas de las máximas corrientes de fallas y estar preparadas para resistir la corrosión a lo largo de la vida útil de la instalación.

El IEEE Std 837-1989 proporciona información individualizada en la aplicación y prueba de las conexiones permanentes para el uso de aterrizaje en subestaciones. Las conexiones de tierra que pasan el IEEE Std 837-1989 para un material y calibre de conductor en particular, deben satisfacer todos los criterios tales como: Conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, capacidad de la corriente de carga y la fuerza mecánica, se seleccionan para la misma categoría el calibre del conductor y su material.

## **12. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO**

### **12.1 El suelo como un medio de aterrizaje.**

El comportamiento de un electrodo de tierra que se entierra en el suelo se puede analizar por medio del circuito que se expone en la *figura 17*. Tal como se muestra en la figura, la mayoría de los suelos se comportan como un conductor de resistencia,  $r$ , y como un dieléctrico. Excepto para ondas de alta frecuencia y de frente escarpado que penetran el suelo de un material muy resistivo, la corriente de carga es indiferente en comparación con la corriente de fuga y la Tierra se puede representar por una resistencia pura.



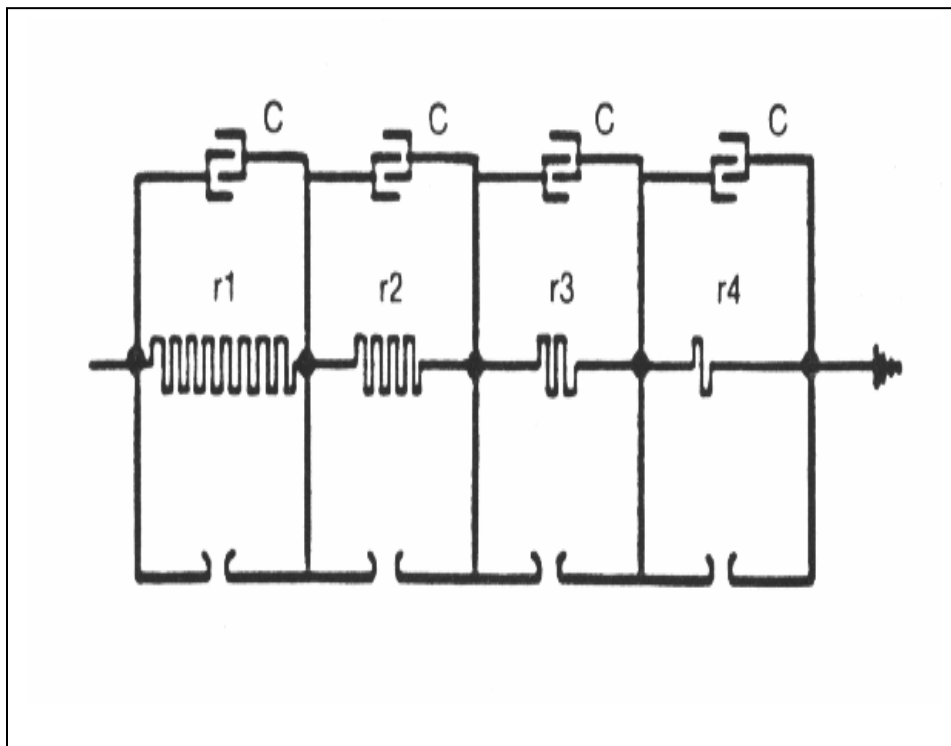


Figura 17 – Modelo de suelo

## 12.2 El efecto del gradiente de voltaje

La resistividad del suelo no se afecta por el gradiente de voltaje a menos que posteriormente exceda un valor crítico. El valor cambia un poco con el material del suelo, pero comúnmente este tiene la magnitud de varios kilovoltios por centímetro. Una vez se exceda, se desarrollarán arcos eléctricos en la superficie del electrodo y avanzarán hacia el interior del planeta Tierra, así como, para incrementar la capacidad efectiva del electrodo hasta que los gradientes se reduzcan a valores que el material del suelo pueda soportar. Esta condición se ilustra por la presencia de aberturas en la *Figura 17*. Debido a que el sistema de aterrizaje de la subestación normalmente está diseñado para cumplir con más criterios que los límites del voltaje de paso y de toque, el gradiente se asume siempre que este abajo del rango crítico.

## 12.3 Efecto de la magnitud de corriente.

La resistividad del suelo en las cercanías de los electrodos de tierra se puede afectar por la circulación de corriente desde los electrodos hacia dentro del suelo adyacente. Las características térmicas y el contenido de humedad del suelo determinarán si una corriente de magnitud y duración dada causarán una aridez (sequedad) significativa y así incrementar la resistividad efectiva del suelo.

Según Armstrong [B58] no se debe exceder el valor promedio de la densidad de corriente de  $200 \text{ A/m}^2$  por segundo.

#### 12.4 El efecto de la humedad, temperatura y contenido químico.

La conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica. Por esta razón en la mayoría de los suelos aumenta abruptamente siempre que el contenido de humedad sea menor del 15% del peso del suelo. La cantidad de humedad depende del tamaño del grano, la solidez y la variabilidad de los tamaños del grano. Sin embargo, tal como nos muestra la curva 2 de la *figura 18* una vez el contenido de humedad exceda el 22% la resistividad se vera un poco afectada, según El IEEE Std 142-1991.

El efecto de la temperatura en la resistividad del suelo, es casi despreciable para temperaturas por encima del punto de congelamiento. El agua que contiene el suelo comienza a congelarse a los  $0^\circ \text{C}$  y la resistividad aumenta rápidamente. La curva 3 ilustra la variación característica para un suelo de tierra arenosa que contenga 15.2% de humedad por peso.

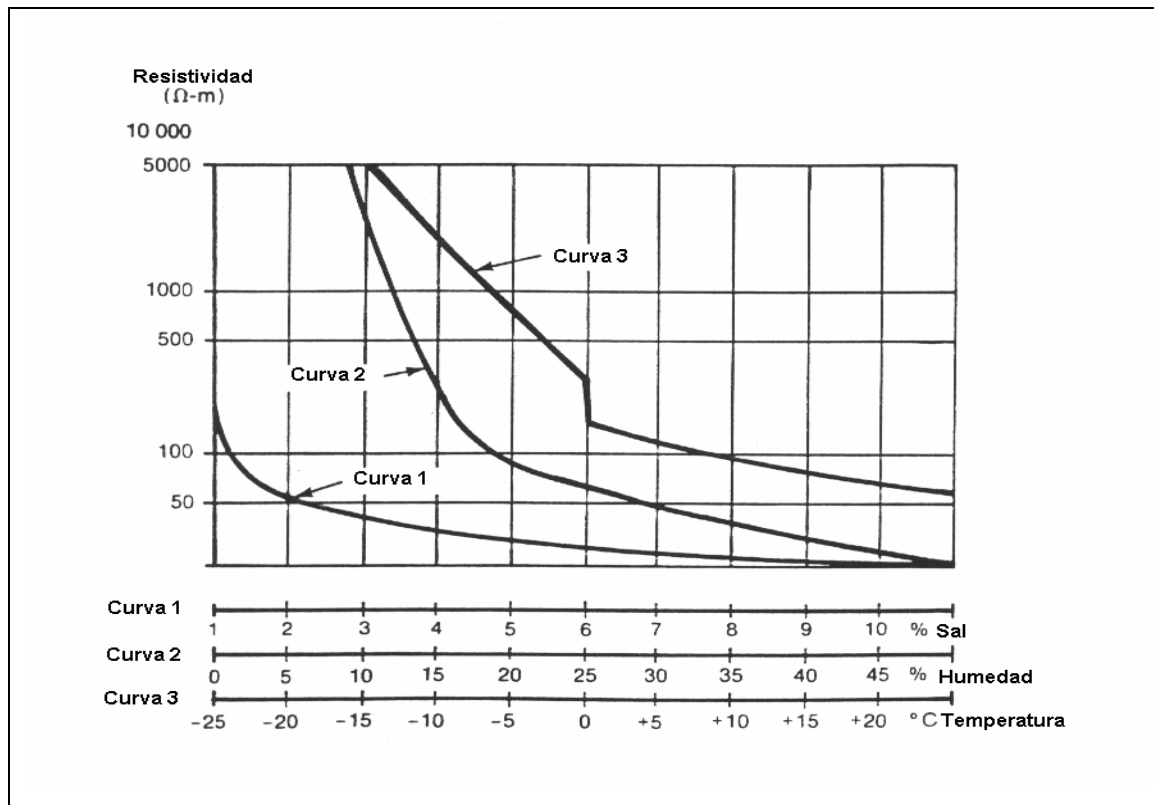


Figura 18 – El efecto de la humedad, temperatura y sal, sobre la resistividad del suelo.

La composición y la cantidad presente de sales solubles, ácidas ó alcalinas en el suelo pueden afectar considerablemente su resistividad. En la curva 1 de la *figura 18* se ilustra una característica de la resistividad de un suelo que contiene un 30 % de humedad por peso, al utilizar la sal (cloruro de sodio), (Towne [B59]).

### **12.5 El uso de capas del material superficial.**

La grava ó la capa de material superficial, se utiliza comúnmente con una profundidad de 0.08 - 0.15 metros (3-6 pulgadas), para retardar la evaporación de la humedad y así, limitar que la capa superior del suelo se seque en la estación seca del año durante un periodo prolongado. El cubrir la superficie con un material de alta resistividad es muy valioso para reducir las descargas de corriente, así como se trató anteriormente el efecto de una capa delgada de material superficial. El valor de esta capa en reducir la descarga de corrientes no siempre se realiza completamente. Las pruebas que realizó Bodier [B8] en Francia en una subestación, mostraron que la acumulación de grava utilizada como un cerco superficial estando húmeda dio el valor de  $5000 \Omega \cdot m$ . Una capa gruesa de 0.1 - 0.15 metros (4-6 pulgadas) reduce el factor de peligro por una relación de 10:1 (relación del cuerpo a la corriente de corto-circuito), tal como se compara con la humedad natural de tierra. En las pruebas que realizó en Alemania Langer[B60] se compararon las corrientes corporales cuando una persona esta tocando un hidrante mientras está de pie en una grava húmeda áspera de resistividad  $6000 \Omega \cdot m$  con las corrientes corporales cuando está en un suelo seco. En el caso del suelo seco el valor de la corriente fue 20 veces más grande que en grava húmeda áspera. Hay pruebas que confirman estos beneficios (Elek[B54]; EPRI TR-100863 [B28]).

Basándose en los cálculos, si no se remueve cuidadosamente en algunas áreas el asentamiento de polvo, se deben tomar ciertas consideraciones en el uso de una capa de material superficial limpio ó cascajo, como la posibilidad de que el aislamiento no se dañe en parte a través de los espacios vacíos por compresión de las capas más profundas de grava por debajo del suelo con materiales de excavaciones subsecuentes.

El rango de los valores de la resistividad para la capa del material superficial depende de muchos factores, alguno de los cuales son tipos de piedra, tamaño, la condición de la piedra (limpia ó fina), el tipo del contenido de humedad, la contaminación atmosférica, etc. La tabla 7 nos indica que la resistividad del agua con la cual la roca se humedece tiene una influencia considerable en la medición de la resistividad de la capa del material superficial. Así, el material superficial expuesto a la espuma de mar puede tener una resistividad más baja que el material superficial que se utiliza en ambientes áridos. Las condiciones locales, tamaño y tipo de piedra, etc. que se indica en la tabla 7, puede afectar el valor de la resistividad. Así, es importante que se tomen las mediciones de resistividad de las muestras del tipo roca, que se ha estado utilizando en algún área específica.

La tabla 7 muestra los valores característicos de la resistividad para los diferentes tipos de material superficial, que se obtienen en muchas partes y en regiones diferentes (Abledu y Laird[B1]; EPRI TR-100863[B28]; Hammond y Robson[B34]; Thompson[B52][B53]). Estos valores no son válidos para todos los tipos de suelos y el tamaño del material que se encuentre en cierta región de estudio. Ya que, se deben realizar las pruebas correspondientes para determinar la resistividad del suelo debido a su degradación.

**Tabla 7 – Resistividad de materiales superficiales característicos**

| Número | Descripción del material de superficie                  | Resistividad de la muestra $\Omega.m$          |                                                        |
|--------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|        |                                                         | Seco                                           | Húmedo                                                 |
| 1      | Granito                                                 | $140 \times 10^6$                              | 1300 (agua superficial, 45 $\Omega.m$ )                |
| 2      | Granito molido 1.5 pulg. (0.04 mts.)                    | 4000                                           | 1200 (agua llovida, 100W)                              |
| 3      | Granito molido 0.75 – 1pulg. (0.02 – 0.025 mts)         | -----                                          | 6513 (10 min. después de drenar agua a 45 $\Omega.m$ ) |
| 4      | Granito limpio 1 – 2 pulg. (0.025 – 0.05 mts.)          | $1.5 \times 10^6$ a $4.5 \times 10^6$          | 5000 (agua de lluvia, 100 $\Omega.m$ )                 |
| 5      | Granito limpio 2 – 4 pulg. (0.05 – 0.1 mts.)            | $2.6 \times 10^6$ a $3 \times 10^6$            | 10,000 (agua de lluvia, 100 $\Omega.m$ )               |
| 6      | Piedra caliza                                           | $7 \times 10^6$                                | 2000-3000 (agua superficial 45 $\Omega.m$ )            |
| 7      | Granito limpio similar a la grava 0.75 pulg. (0.02 mts) | $2 \times 10^6$                                | 10,000                                                 |
| 8      | Granito lavado,                                         | $10 \times 10^6$                               | 5,000                                                  |
| 9      | Granito lavado #57 (0.75plg) (0.02m)                    | $190 \times 10^6$                              | 800 (agua superficial, 45 $\Omega.m$ )                 |
| 10     | Asfalto                                                 | $2 \times 10^6$ a $30 \times 10^6$             | 10,000 a $6 \times 10^6$                               |
| 11     | Concreto                                                | $1 \times 10^6$ a $1 \times 10^9$ <sup>a</sup> | 21 a 100                                               |

## **13. ESTRUCTURA DEL SUELO Y SELECCIÓN DEL MODELO DE SUELO.**

### **13.1 Investigación de la estructura del suelo**

Es indispensable hacer investigaciones de resistividad en el sitio de una subestación para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. Las pruebas de perforación y otras investigaciones geológicas proveen a menudo información importante de la presencia de diferentes capas y la naturaleza del material del suelo, obteniendo algunas ideas del rango de la resistividad del sitio.

### **13.2 Clasificación de los suelos y rango de resistividad**

Existe un gran número de tablas que muestran los rangos de resistividad para varios tipos de suelos y rocas. Existe información más detallada en libros y publicaciones de ingeniería (por ejemplo, Sunde [B47] y Wenner [B55]). Ver tabla 8.

### **13.3 Mediciones de resistividad**

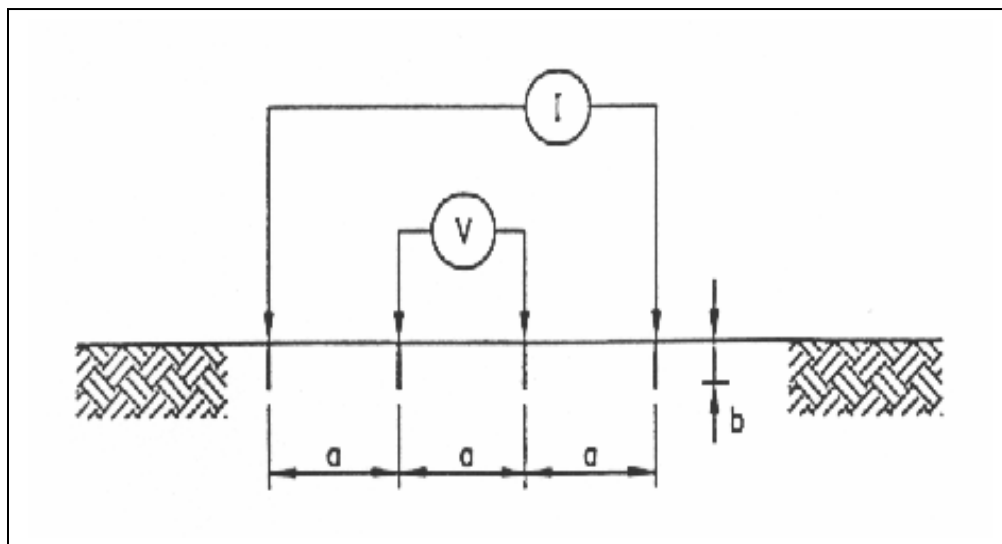
Estimaciones que se basan en la clasificación de los suelos proporcionan una aproximación general de la resistividad. Por lo tanto, es imprescindible hacer pruebas de resistividad. Estas se deben hacer en diferentes lugares dentro del sitio. Raramente se encuentran suelos con resistividad uniforme y a una profundidad considerable dentro de la zona de una subestación. Normalmente, se encuentran diferentes capas, cada una con diferente resistividad. A menudo suelen ocurrir cambios laterales, pero en comparación con los verticales, los cambios suelen ser aún más graduales. Se pueden hacer pruebas de resistividad en el suelo para determinar si existe alguna variación importante de resistividad con la profundidad. Cuando las variaciones son grandes se deben tomar aun más lecturas, especialmente si las lecturas son tan altas que indican problemas de seguridad.

Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, a menudo es deseable hacer pruebas a diferentes distancias para obtener un estimado de la resistividad de las capas mas profundas. Esto es posible ya que a medida se incrementa la distancia de las pruebas, las corrientes de prueba penetran a áreas más distantes, en direcciones verticales y horizontales, sin importar cuanto se desvíe la trayectoria de la corriente debido a la variación de las condiciones del suelo. (Manual de pruebas de resistencia de tierra [B61]).

**Tabla 8 – Rangos de resistividad de la Tierra**

| Tipo de tierra        | Resistividad promedio ( $\Omega.m$ ) |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Suelo orgánico húmedo | 10                                   |
| Suelo húmedo          | $10^2$                               |
| Suelo seco            | $10^3$                               |
| Roca                  | $10^4$                               |

Un gran número de técnicas de medición se describen con detalle en el Estándar 81-1983 del IEEE. El método de cuatro electrodos de Werner, como se muestra en la *figura 19*, generalmente es la técnica que más se utiliza. En resumen, se realizan cuatro pruebas dentro de la Tierra a lo largo de una línea estrecha, a una distancia igual “a” una de la otra, y a una profundidad “b”. Se mide el voltaje entre los dos electrodos (de potencial) internos y luego es dividido entre la corriente de los electrodos (de corriente) externos, para así, dar el valor de la resistencia  $R$ .



**Figura 19 – Método de Wenner de cuatro pines**

Luego,

$$\rho_a = \frac{4.\pi.a.R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (44)$$

Donde:

- $\rho_a$**  es la resistividad aparente del suelo en  $\Omega.m$   
 **$R$**  es la medición de la resistencia en  $\Omega$   
 **$a$**  es la distancia entre los electrodos adyacentes en m  
 **$b$**  es la profundidad de los electrodos en m

Si  $b$  es pequeño comparado con  $a$ , implica que la distancia entre electrodos auxiliares es grande comparada con la profundidad a la que se entierran, y la ecuación (44) se puede reducir a:

$$P_a = (2\pi) (a) (R) \quad (45)$$

La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pruebas en espacios pequeños, mientras que la mayoría de la corriente penetra más adentro del suelo para distancias más grandes. Se puede asumir, con aproximaciones razonables una resistividad aparente que se toman de las pruebas de medida de resistividad a una distancia dada, a una profundidad “ $b$ ” cuando los contrastes de la resistividad de las capas de los suelos no son excesivos.

La ecuación (44) y ecuación (45) se pueden utilizar para determinar la resistividad aparente  $\rho_a$  a una profundidad “ $b$ ”.

El método de Schlumberger-Palmer [B44] es una versión modificada del método de Wenner; este método nos da una mejor sensibilidad para pruebas a distancias mayores, tal como se describe en el estándar 81-1983 del IEEE.

Otro método de medida de resistividad del suelo, como se muestra en la *figura 20* y descrita en el estándar 81-1983 del IEEE es el método de la barra conductora o método de caída de potencial, basada en tres electrodos (Blattner [B5][B6]: Purdy [B45]). En este método, la profundidad  $L_r$  de la barra conductora localizada en el suelo a ser medido es variable. Las otras dos barras, conocidas como barras de referencia, se introducen a poca profundidad en el suelo y en línea recta. La ubicación del electrodo de voltaje varía entre el electrodo de prueba y el electrodo de corriente. Alternativamente, el electrodo de voltaje puede ser ubicado al lado opuesto del electrodo de corriente. La ecuación de la corriente aparente es:

$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (46)$$

Donde:

**L<sub>r</sub>** es la longitud de la barra en metros.  
**d** es el diámetro de la barra en metros.

Una grafica del valor medido de la resistividad aparente  $\rho_a$  contra la longitud de la barra  $L_r$  nos proporciona una ayuda visual para determinar las variaciones de la resistividad del suelo con la profundidad.

Pruebas realizadas en la Universidad de Ohio [B62] nos demuestran que cualquiera de los dos métodos vistos anteriormente, nos puede dar la información necesaria para revelar la estructura del suelo.

El método de cuatro electrodos de Wenner, es el método más utilizado en la actualidad, debido a muchas razones. El método de cuatro electrodos obtiene datos de la resistividad del suelo de capas mas profundas, sin tener que introducir los electrodos hasta esas capas. No se necesita equipo pesado para ejecutar la prueba de cuatro electrodos. Los resultados no serán afectados grandemente por la resistencia de los electrodos de tierra o de los orificios creados por los electrodos de prueba al ser introducidos al suelo.

Una ventaja del método de tres barras, aunque no necesariamente relacionada con las mediciones, es la capacidad de determinar a que profundidad se pueden introducir las barras. Conociendo la profundidad a la que se pueden introducir las barras dentro de la Tierra, se puede ahorrar la necesidad de rediseñar una rejilla de tierra. A menudo, debido a las capas duras de suelo tales como rocas, arcilla dura, etc. se hace imposible introducir el electrodo de prueba lo que resulta en obtener datos insuficientes. Una técnica para predecir la resistividad del suelo a una profundidad 10 veces mayor de la profundidad de un valor de resistividad conocido se desarrolló por Blattner [B5]. Esta técnica se puede utilizar efectivamente en lugares donde los electrodos no se puedan introducir profundamente. De cualquier manera se recomienda al usuario revisar las limitaciones de este método antes de utilizarlo. Una desventaja del método de la barra conductora es que cuando se introduce en lo profundo de la Tierra, muchas veces pierde contacto con el suelo debido a la vibración y al gran diámetro de las conexiones y resulta en mediciones de resistencia de valores altos. Una rejilla de tierra diseñada con estos valores altos de resistividad será inconveniente. El método de la barra conductora nos da cierta incertidumbre en los valores de resistencia. La regla del 62% es valida solamente para una separación grande entre electrodos y suelo uniforme. En suelos poco uniformes, esta suposición puede afectar los resultados de las lecturas. La parte plana de la curva se utiliza para determinar la resistencia del electrodo de prueba, pero



podría no darnos la resistencia correcta en un suelo no uniforme. Esta parte plana no se podrá obtener al menos que la separación de las barras de prueba y de corriente sea grande. (Dawalibi y Mukhedkar [B62] [B15]).

Los registros de la medida de la resistividad deben incluir datos de la temperatura e información acerca de la humedad del suelo en el momento que se hace la medición. Todos los datos disponibles ú objetos conductivos enterrados deben ser registrados.

Los objetos conductivos que se entierran y están en contacto con el suelo, pueden distorsionar las lecturas hechas con los métodos descritos si estos están suficientemente cerca para alterar el patrón del flujo de corriente. Esto es particularmente cierto para objetos grandes ó largos. Por esta razón, es que las mediciones de la resistividad del suelo se distorsionan fácilmente en áreas donde se han instalado los conductores de la rejilla, excepto para mediciones a poca profundidad en o cerca del centro de una malla rectangular grande. En algunos casos, se pueden tomar algunas medidas aproximadas a una distancia corta fuera de la rejilla, con los electrodos alejados para minimizar los efectos de la rejilla en el patrón del flujo de corriente. Si bien no se puede concluir las condiciones dentro de la rejilla, algunas medidas se pueden utilizar como aproximación, especialmente si existe alguna razón para creer que el suelo en el área es razonablemente homogéneo.

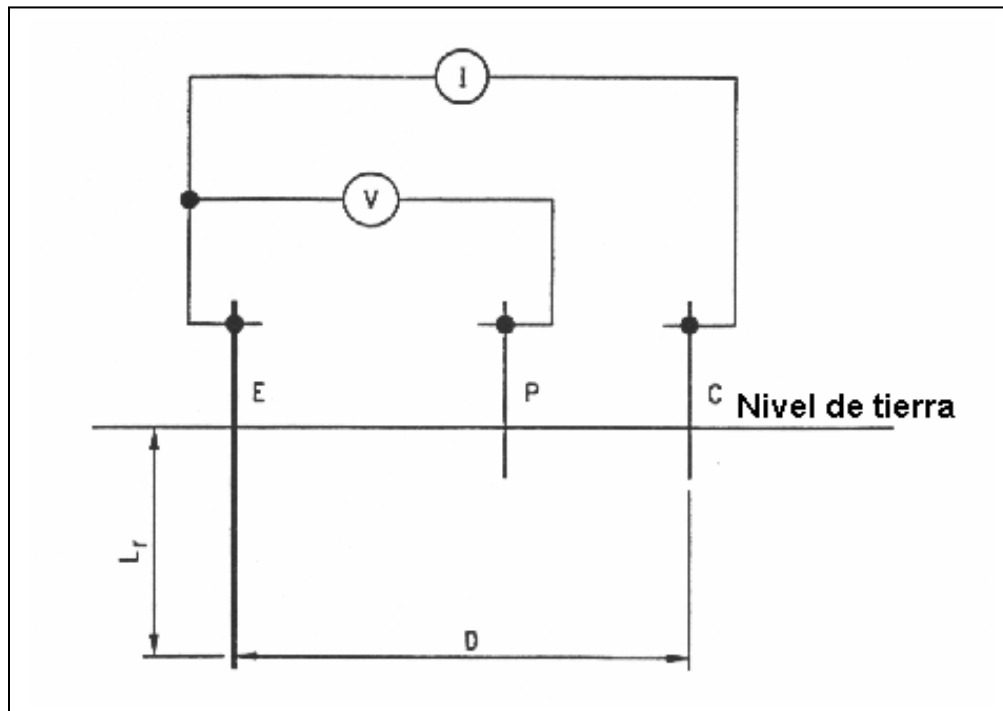


Figura 20 – Diagrama del circuito de tres pines ó el método de la varilla aterrizada

### **13.4 Interpretación de las medidas de resistividad del suelo.**

La interpretación de la resistividad obtenida en el campo es quizá la parte más difícil del programa de medición. El objetivo básico es obtener un modelo del suelo que sea aproximadamente igual al suelo existente. La resistividad del suelo varía lateralmente y con respecto a la profundidad y depende también de los estratos del suelo. Pueden ocurrir variaciones temporales en la resistividad del suelo de acuerdo a las variaciones del clima tal como se describe en EPRI TR100863 [B64]. Se debe reconocer que el modelo del suelo es solamente una aproximación de las condiciones del suelo en el momento de hacer las mediciones.

Los modelos de resistividad del suelo más comúnmente utilizados es el modelo de suelo uniforme y el modelo de suelo de dos capas. El modelo del suelo de dos capas es a menudo un aproximado de muchas estructuras del suelo, mientras que los modelos de suelo de múltiples capas son utilizados para suelos en condiciones más complejas. La interpretación de las mediciones de resistividad del suelo se pueden determinar por técnicas de análisis manuales o utilizando computadores, tal como lo describen Blattner y Dawalibi [B7]; Blattner [B5][B6]; Endrenyi [B24]; EPRI TR-100622 [B27]; EPRI EL-3982 [B26]:

Un modelo de suelo uniforme se utiliza solo cuando existe una variación moderada en la resistividad aparente. Para suelos con condiciones homogéneas, que en la práctica raramente sucede, el modelo de suelo uniforme es razonablemente preciso. Si hay una variación grande en la medición de la resistividad aparente, el modelo de suelo uniforme es poco probable que nos de un resultado preciso.

Una representación más exacta de las condiciones presentes en el suelo se obtiene utilizando el modelo de dos capas. El modelo de dos capas consiste en una capa superior de profundidad finita y con una resistividad diferente a una capa inferior de espesor infinito. Existen muchas técnicas para determinar un modelo equivalente de dos capas de resistividad aparente, obtenidas de pruebas de campo. En muchos casos, el modelo de dos capas se puede aproximar por inspección visual de una gráfica de la resistividad aparente contra la profundidad de las medidas de la barra conductora ó la resistividad aparente contra las mediciones de espaciamento del método de cuatro electrodos de Wenner. (Blattner [B4][B6]; IEEE Curso Tutorial 86 [B42]).

Programas de computadora disponibles en la industria, se utilizan para determinar el modelo de dos capas y el modelo de múltiples capas (Dawalibi y Barbeito [B11]; EPRI TR-100622 [B25]; Orellara y Money [B42]).

En muchos casos la variación de la resistividad del suelo puede mostrar mínimos y máximos, así como el equivalente de dos capas podría no darnos un modelo preciso.

En ambos casos, se requiere un modelo de suelo diferente como el modelo de múltiples capas, tal como lo describe Dawalibi. Ma y Southey [B17] y Dawalibi y Barbeito [B11].

### 13.4.1 Suposición de suelo uniforme.

Un modelo de suelo uniforme se puede utilizar en vez del modelo de suelo de múltiples capas cada vez que las herramientas de cálculo del modelo de dos capas ó el modelo de múltiples capas no este disponible. Desafortunadamente, es muy difícil estimar un mayor salto de error en todos los parámetros relevantes del aterrizaje, pero cuando el contraste entre las diferentes resistividades de las capas es moderado, se utiliza un valor promedio de la resistividad del suelo como primera aproximación o para establecer orden en las magnitudes. Un aproximado de la resistividad de un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de la medición de la resistividad aparente, como se muestra en la ecuación (47)

$$\rho_{a(avl)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (47)$$

Donde:

|                                                                 |                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}$ | Es el dato de la resistividad aparente obtenida a diferentes distancias, en el método de cuatro electrodos, ó a diferentes profundidades en el método de la barra conductora, en $\Omega.m$ |
| $n$                                                             | Es el total de número de mediciones.                                                                                                                                                        |

En la mayoría de suelos no se reconoce el criterio de la ecuación (47). Es difícil revelar un modelo de suelo uniforme cuando la resistividad del suelo varía significativamente. Ya que las ecuaciones del voltaje de toque y voltaje de paso de este manual se basan en un modelo de suelo uniforme, se intentara dar un lineamiento para aproximar un suelo no uniforme a un suelo uniforme. Los datos de la resistividad aparente del suelo se obtienen utilizando el método de cuatro electrodos en varias localizaciones geográficas diferentes. Los datos en cada situación se aproximan con tres diferentes modelos de suelo equivalentes. Estos modelos consisten en, un modelo de dos capas y dos modelos de suelo uniforme, los cuales se generan con computadora (EPRI TR 100622 [B27]). Los modelos de suelo uniforme se determinan a partir de la resistividad aparente

obtenida en la ecuación (47) y (48). En el siguiente paso, se calcula la resistencia y los voltajes de toque y de paso para una rejilla de 76.2m x 76.2m (250ft x 250ft) con un total de 64 barras distribuidas uniformemente, con un programa de computadora (EPRI TR-100622 [B27]). La profundidad de las barras de tierra depende del modelo de suelo utilizado. Por ejemplo, en el caso de un modelo de dos capas, las barras de tierra deben penetrar la capa mas profunda.

Finalmente, los parámetros de aterrizaje que se han calculado para el modelo de dos capas se comparan con los calculados utilizando los modelos de suelo uniforme. Los parámetros de aterrizaje que se calculan, utilizando el modelo de suelo uniforme de la ecuación (50) se comparan con los calculados en el modelo de dos capas.

$$\rho_{2(av2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2} \quad (48)$$

Donde:

$\rho_{a(max)}$  es el valor máximo de la resistividad aparente (del valor medido) en  $\Omega.m$ .

$\rho_{a(min)}$  es el valor mínimo de la resistividad aparente (del valor medido) en  $\Omega.m$ .

Encontramos un gran número de suposiciones sobre este estudio. Como resultado, la ecuación (48) se debe utilizar con precaución. Por ejemplo, el uso de la ecuación (48) no se recomienda para rejillas sin barras de tierra (Dawalibi, Ma, y Southey [B18]). Además, si la resistividad uniforme del suelo se determina utilizando la ecuación (48) y es utilizada para diseñar una rejilla de tierra, las barras de tierra por lo menos deben alcanzar la profundidad donde la resistividad medida corresponda al valor calculado de  $\rho_{a(av2)}$ .

Hay muchos métodos sugeridos por diferentes autores para aproximar un modelo no uniforme con un modelo uniforme. Uno de estos métodos incluye el promedio de la resistividad aparente de la capa superior para los cálculos de voltaje de toque y de paso y el promedio de la resistividad aparente de la capa inferior para el cálculo de la resistencia del sistema de aterrizaje.

#### 13.4.2 Suposiciones del suelo no uniforme.

Otra propuesta para situaciones en las cuales la resistividad varía notablemente con la profundidad es recomendada por Sunde [B47] además de otros libros de geofísica a los cuales él se refiere. Por ejemplo, frecuentemente es posible con las medidas que se toman de un terreno con un amplio rango de período de

pruebas deducir la estratificación de la tierra en dos ó más capas con un espesor adecuado que cuente con las variaciones reales de prueba. (Moore [B41]).

#### **13.4.2.1 Modelo de suelo de dos capas (general)**

Un modelo de suelo de dos capas se puede representar por una capa superior de profundidad finita sobre una capa inferior de profundidad infinita. El cambio brusco de la resistividad en los límites de cada capa del suelo se puede describir por medio de un factor de reflexión. El factor de reflexión,  $K$ , se define por la ecuación (49)

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (49)$$

Donde:

- $\rho_1$  es la resistividad de la capa superior, en  $\Omega$ -m.  
 $\rho_2$  es la resistividad de la capa inferior, en  $\Omega$ -m.

Mientras la representación más precisa de un sistema de aterrizaje se debe basar en las variaciones reales de la resistividad del suelo que se encuentra en el lugar de la subestación, raramente será económicamente justificable ó técnicamente viable enseñar todas las variaciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la representación de un electrodo de tierra fundamentado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema de aterrizaje seguro.

El estándar IEEE Std 81-1983 provee los métodos para determinar las resistividades equivalentes de la capa superior e inferior del suelo y el peso de la capa superior de los modelos.

Hay otros métodos que incluyen la determinación de un modelo de dos capas y para los cálculos del voltaje de toque y de paso se utiliza la resistividad de la capa superior y la resistividad inferior por resistencia y métodos que modifican las ecuaciones que se presentan en este manual para utilizarse en los suelos modelos de dos capas. Estos estudios pueden proveer al diseñador más información acerca de la interpretación de los suelos y el impacto de las capas múltiples, capas dobles y modelos uniformes (Dawalibi, Ma y Southey[B17]; Dawalibi y Barbeito[B11]; Thapar y Gerez [B49]).

#### 13.4.2.2 Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico

Un suelo modelo de dos capas se puede aproximar por los métodos que describe Blattner y Dawalibi[B7]; Endrenyi[B24]; Tagg [B63]; Roman [B64]; y Sunde [B47]. El método gráfico de Sunde lo describimos en el párrafo siguiente:

En el método de Sunde, el gráfico de la *figura 21* se utiliza para aproximar un suelo modelo de dos capas.

Los parámetros  $\rho_1$  y  $\rho_2$  se obtienen por la inspección de las mediciones de resistividad (referirse a la *figura 22*). Solamente  $h$  se obtiene por el método gráfico de Sunde, de la forma siguiente:

- a) Hacer una grafica de resistividad aparente  $\rho_a$  en el eje **Y** vrs el espaciamiento de los electrodos de prueba en el eje **X**.
- b) Estimar una densidad  $\rho_1$  y  $\rho_2$  del grafico en a). La  $\rho_a$  es lo que corresponde a un espacio pequeño del espaciamiento del electrodo de prueba  $\rho_1$  y  $\rho_2$  corresponde a para un espacio grande. Esto amplía la resistividad aparente del grafico en ambos extremos para obtener los valores si los datos de campo no son suficientes.
- c) Determinar  $\rho_1 / \rho_2$  y seleccionar una curva en la grafica de Sunde (*Figura 21*), la cual casi coincide ó interpola y dibuja una nueva curva en la gráfica.
- d) Seleccionar el valor en el eje **Y** de  $\rho_a / \rho_1$  dentro de la región con desniveles de la curva apropiada de  $\rho_2 / \rho_1$  de la *figura 21*.
- e) Leer los valores correspondientes de  $a / h$  en el eje **X**.
- f) Calcular  $\rho_a$  al multiplicar los valores seleccionados,  $\rho_a / \rho_1$  en d) por  $\rho_1$ .
- g) Leer el espacio de sondeo (eje **X**) correspondiente del gráfico de la resistividad aparente en el literal a).
- h) Calcular  $h$ , la profundidad del nivel superior, utilizando los espacios de separación en forma apropiada (eje **X**),  $a$ .

Utilizando los datos de suelo del tipo 1 en la tabla E.2 proporcionado en el anexo E, se puede dibujar una grafica de la resistividad vrs el espaciamiento de los electrodos de prueba (Ver *figura 22*)  $\rho_1$  y  $\rho_2$  se pueden determinar por inspección visual. Suponiendo que  $\rho_1 = 100\Omega.m$  y  $\rho_2 = 300\Omega.m$ , para ilustrar el método de Sunde mostramos el siguiente ejemplo:

- a) Grafico de la *figura 22*.
- b) Seleccionamos  $\rho_1 = 100\Omega.m$  y  $\rho_2 = 300\Omega.m$
- c)  $\rho_1 / \rho_2 = 300/100 = 3$ . es la curva dibujada en la *figura 21*. Ver *figura 23* como ejemplo.
- d) Seleccionar  $\rho_a / \rho_1 = 2$
- e) Leer  $a/h = 2.7$  de la *figura 23* para  $\rho_a / \rho_1 = 2$
- f) Calcular  $\rho_a$ :  $\rho_a = 2 \rho_1 = 2(100) = 200$
- g) Leer  $a = 19$  en la curva de la resistividad aparente en la *figura 24* para  $\rho_a = 200$
- h) Calcular  $h$ :  $h = (a)/(a/h) = 7.0$  metros ó 23 pies.

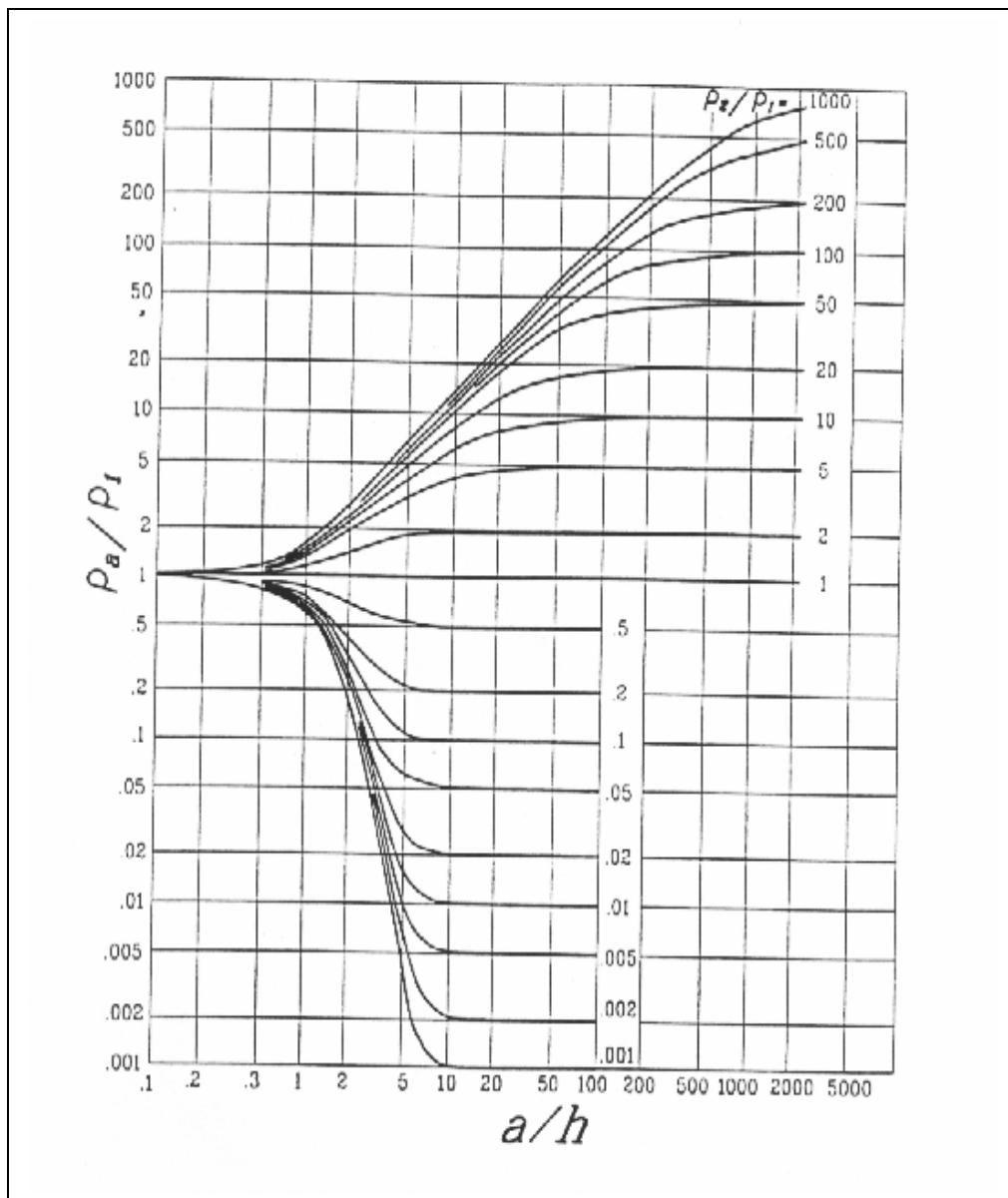


Figura 21 – Método grafico de Sunde



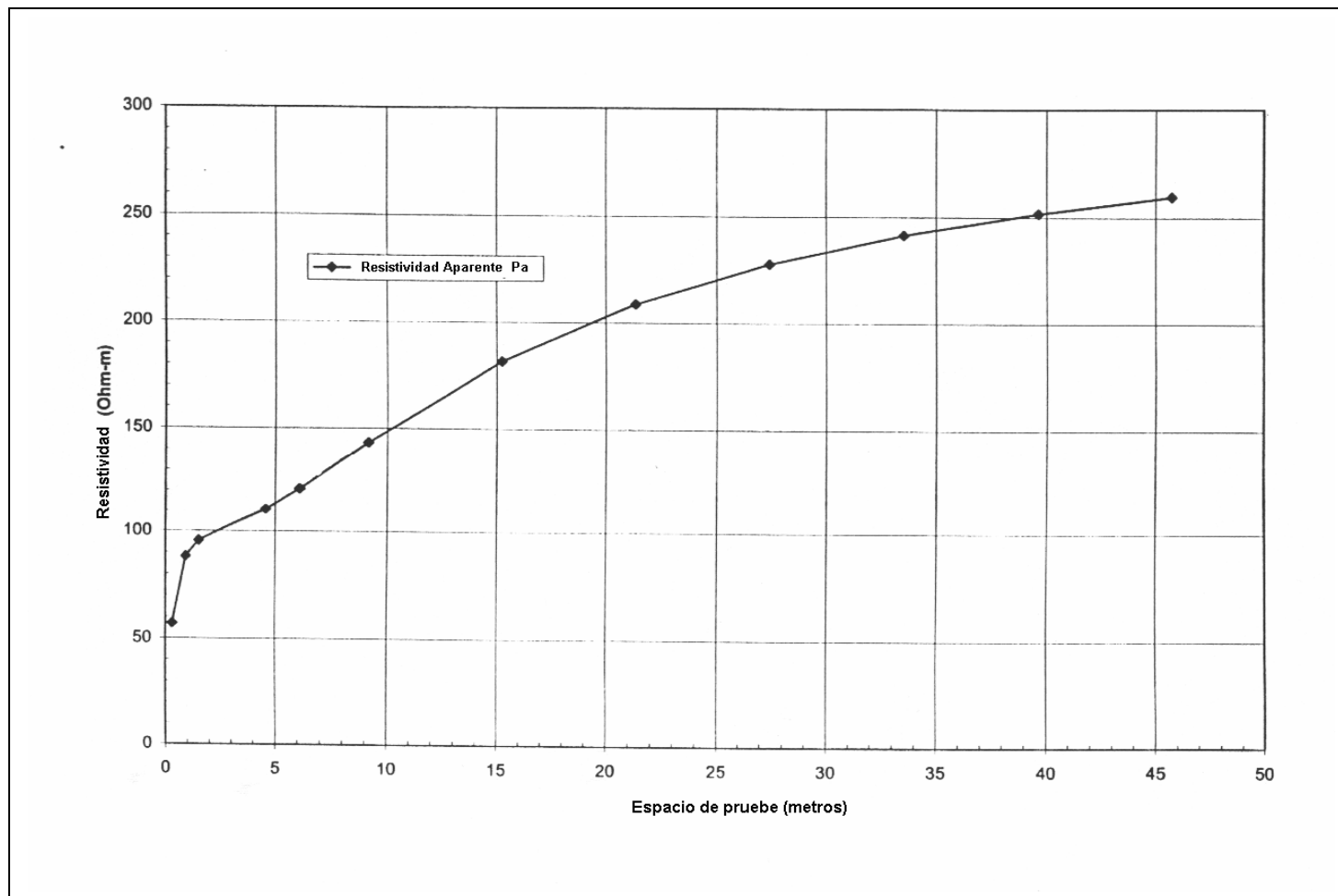


Figura 22 – Grafica de resistividad de los datos del tipo de suelo 1, tabla E2.

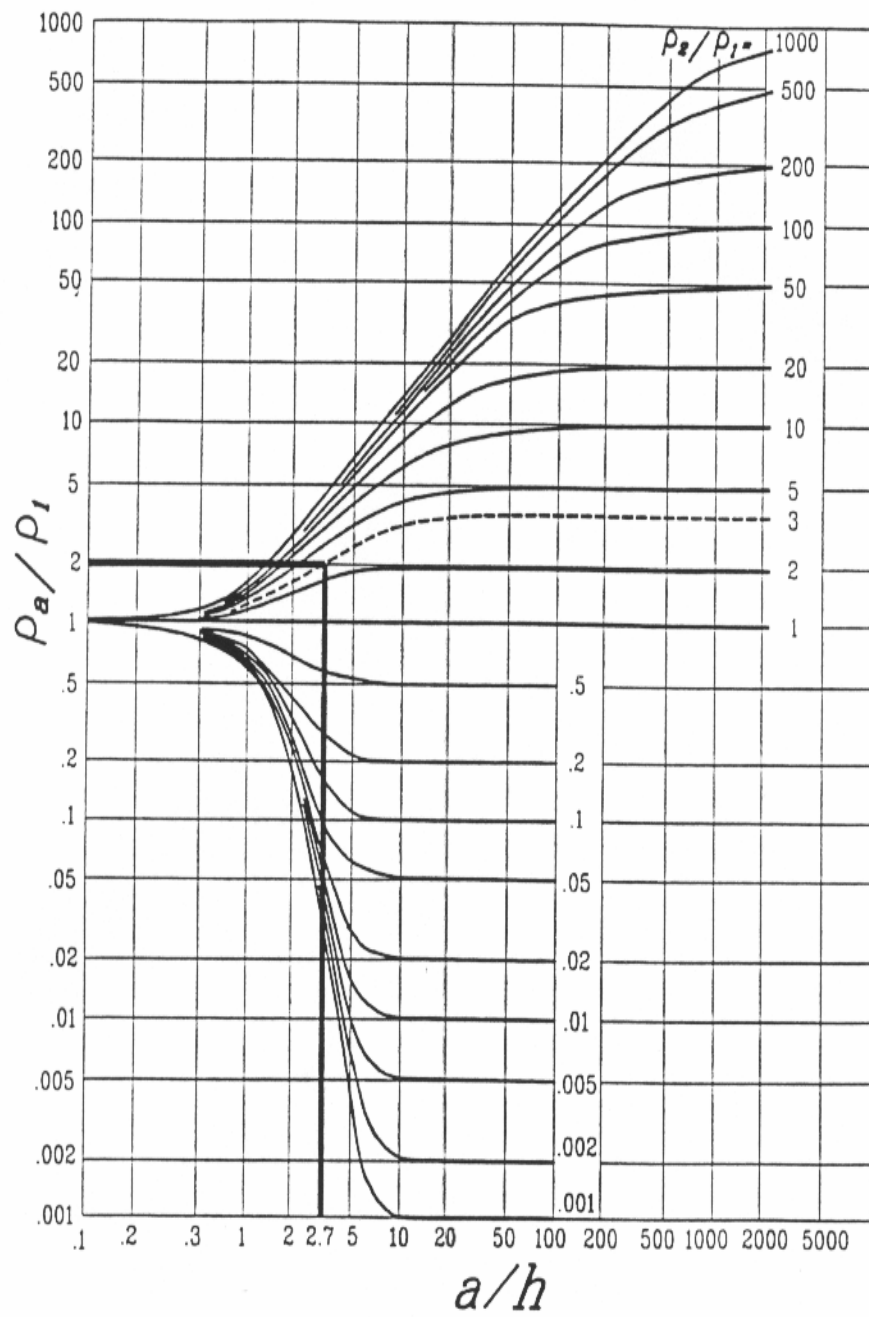


Figura 23 – Ejemplo del método grafico de Sunde.

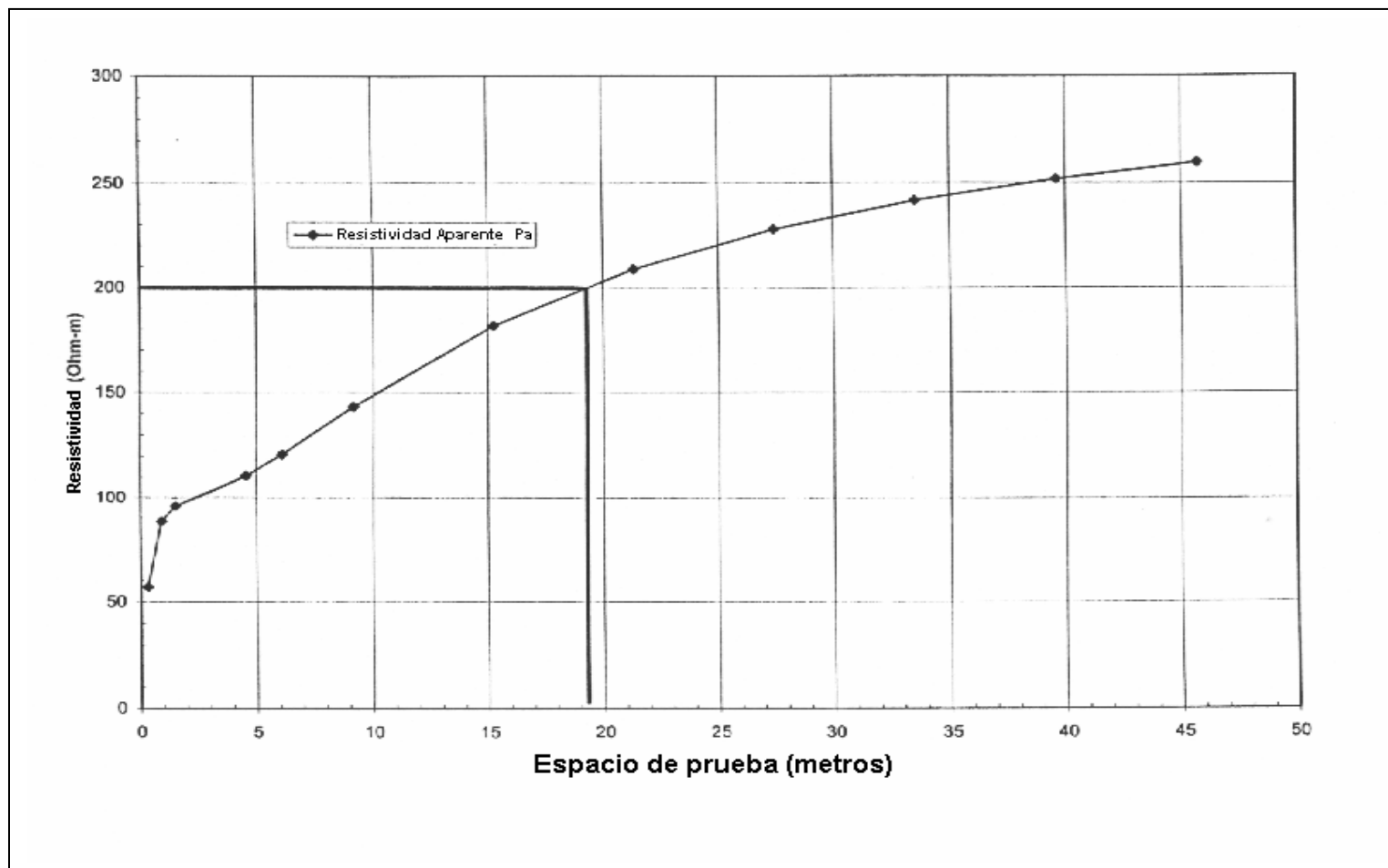


Figura 24 – Ejemplo para determinar “a” de la curva de resistividad aparente.

### 13.4.2.3 La comparación de un modelo de suelo uniforme y de dos capas en un sistema de aterrizaje.

Se ha encontrado que un suelo de dos capas es mucho más exacto que un modelo de suelo uniforme. Un sistema de aterrizaje en un ambiente de suelo de dos capas se comporta diferente al compararlo con el mismo sistema en un suelo uniforme.

Generalmente, para un sistema de aterrizaje en un suelo uniforme ó en un suelo de dos capas con  $\rho_1$  menor que  $\rho_2$  (la resistividad de la capa superior del suelo es menor que la resistividad de la capa inferior del suelo, que es un factor de reflexión positivo), la densidad de corriente es más alta en los conductores de los bordes exteriores de la rejilla de aterrizaje. En un suelo de dos capas con  $\rho_1$  mayor que  $\rho_2$  (la resistividad de la capa superior del suelo es mayor que la resistividad que la capa inferior del suelo, que es una factor de reflexión negativo), la densidad de corriente es más uniforme en todos los conductores del sistema de aterrizaje. Esto lo provoca la tendencia de la corriente de rejilla que baja hacia la capa de menor resistividad, es preferible que arriba ó exterior a la capa superior más resistiva. Los estudios hechos por Thapar y Gross [B50] y Dawalibi [B12] [B14] [B19] proveen una amplia información con respecto a este tema.

- a) Las variaciones en la resistividad del suelo tienen una influencia considerable en el rendimiento de la mayoría de los sistemas de aterrizaje, afectando tanto el valor de la resistencia a tierra, el incremento del potencial a tierra y los voltajes superficiales de paso y de toque. Por lo general, para valores negativos de  $K$  (la capa superior es más resistiva que la capa inferior), la resistencia es menor que la que tiene el sistema de aterrizaje en un suelo uniforme con resistividad  $\rho_1$ . A diferencia, para valores positivos de  $K$ , la resistencia generalmente es más grande que en un suelo uniforme y de resistividad  $\rho_1$ . Existe una relación muy similar para los voltajes de paso y de toque que se producen en la superficie de un suelo de dos capas vrs la superficie de un suelo uniforme. Para valores negativos de  $K$ , generalmente los voltajes de paso y de toque son más bajos que los voltajes para un mismo sistema de aterrizaje en un suelo uniforme de resistividad  $\rho_1$ . Para valores positivos de  $K$ , también los voltajes de paso y de toque son comúnmente más grandes que en un suelo uniforme.
- b) Otros parámetros, como la altura de la capa superior  $h$ , afecta también las diferencias en el rendimiento de los electrodos de tierra en un ambiente de dos capas y en condiciones de un suelo uniforme. La regla general es: que cuando la altura de la capa superior  $h$ , llega a ser considerablemente más grande que las propias dimensiones del electrodo, el rendimiento del electrodo se aproxima al rendimiento del mismo electrodo en un suelo uniforme de resistividad  $\rho_1$ .
- c) Se debe reconocer también que las características que se mencionan arriba se fundamentan en el indicio de una fuente constante de corriente de falla.

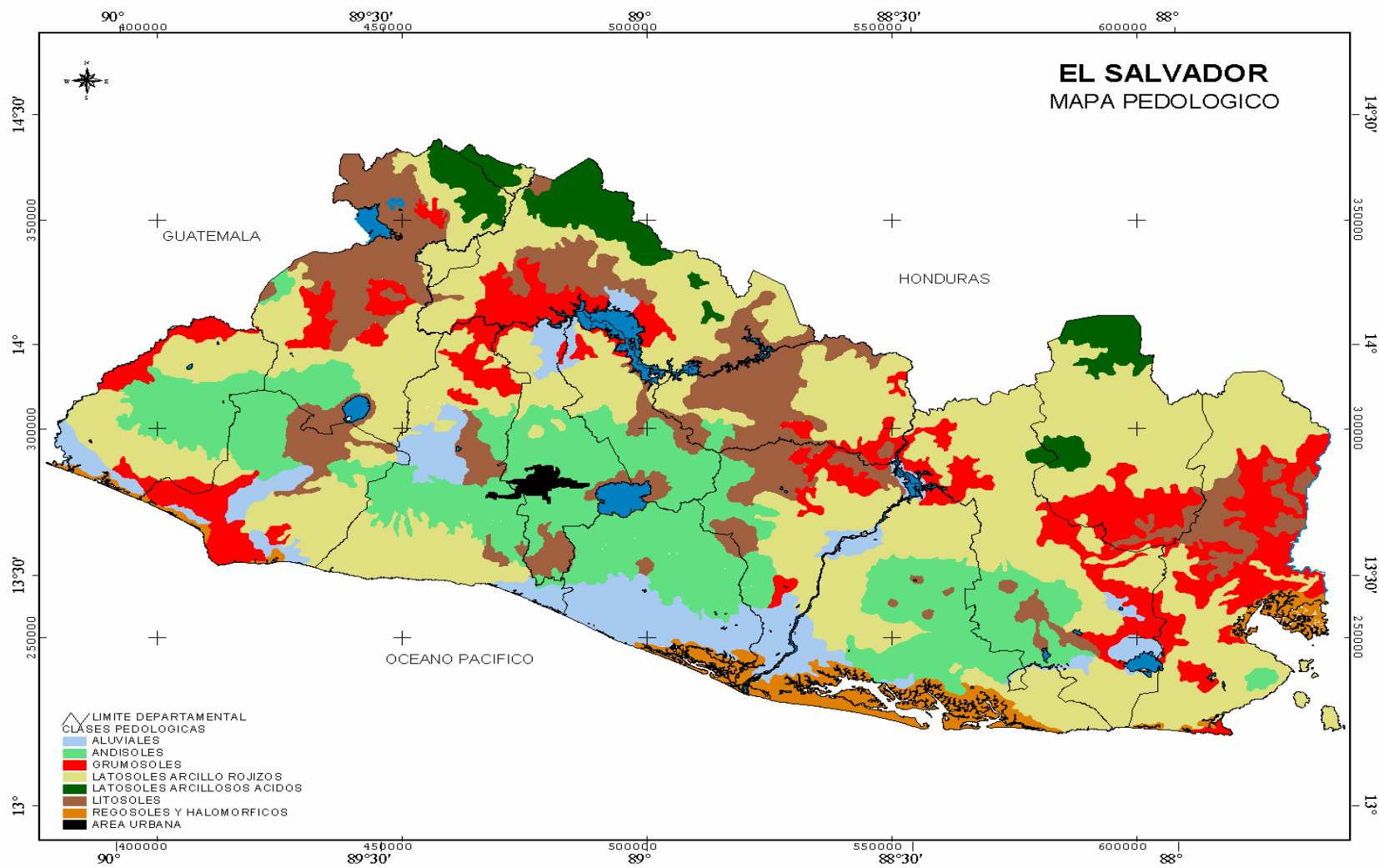
Las corrientes existentes en el sistema de aterrizaje cambiarán de caso en caso como una función de  $\rho_1$  y  $\rho_2$ , reflejando los cambios relativos locales a todas las trayectorias de las corrientes de falla a tierra que se predeterminan por la localización de la falla. La división de la corriente se estudiara en la determinación de la corriente máxima de rejilla. Por lo tanto, en ciertos casos algunas suposiciones que se mostraron anteriormente no siempre se cumplirán.

Para aplicaciones de diseño, relativamente se involucran arreglos sencillos de aterrizaje de electrodos enterrados en un suelo uniforme razonable, los métodos aproximados proporcionados en otros temas de este manual serán adecuados para obtener un diseño realista con los márgenes de seguridad adecuados. Sin embargo, para diseños que involucra un área grande de aterrizaje, rejillas de forma irregular (corriente) etc. ó donde la resistividad del suelo es claramente muy uniforme, el ingeniero responsable del diseño debe decidir si son necesarios métodos mas sofisticados (Zaborsky [B56]).

#### **13.4.2.4 Modelo de suelo de capas múltiples**

Se pueden encontrar condiciones de suelo altamente no uniformes. Como condiciones de suelo que requieren el uso de técnicas de modelos de múltiples capas, si no es viable el modelo de suelo de dos capas. El modelo de suelo de múltiples capas puede incluir varias capas horizontales ó verticales. Las técnicas para interpretar la resistividad de los suelos altamente no uniforme requieren el uso de computadoras ó de métodos gráficos (Dawalibi, Ma y Southey [B17]; Dawalibi y Barbeito [B11]; EPRI TR-100622 [B27]; EPRI EL-2699 [B25]; Orellana y Money [B42]).

Las ecuaciones que rigen el rendimiento de un sistema de aterrizaje enterrado en un suelo de capas múltiples se puede obtener al resolver la ecuación de Laplace para un punto de la fuente de corriente ó por el método de imágenes, el cual nos da los mismos resultados. Al utilizar otros métodos para determinar el potencial de la Tierra provocado por un punto de la fuente de corriente resulta en una serie infinita de términos que representan las contribuciones de cada imagen consecuente del punto de la fuente de corriente. La formulación exacta de las ecuaciones que incluyen estos efectos se encuentran en Dawalibi y Mudhedkar [B13]; Heppe [B36]; y Sunde [B47].



## 14. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE TIERRA

### 14.1 Necesidades usuales

Un buen sistema de aterrizaje provee una baja resistencia hacia la Tierra remota para minimizar el incremento de potencial a tierra. Para la mayoría de subestaciones de transmisión y otras más grandes, la resistencia de tierra es comúnmente de 1  $\Omega$  ó menos. En subestaciones de distribución más pequeñas, el rango que comúnmente se acepta es desde 1  $\Omega$  hasta 5  $\Omega$ , dependiendo de las condiciones del lugar.

### 14.2 Cálculos simplificados

Estimar la resistencia total hacia la Tierra remota es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y el sistema básico de aterrizaje. La resistencia depende principalmente del área a utilizar por el sistema de aterrizaje, la cual se conoce comúnmente en la primera etapa del diseño. Como una primera aproximación, se puede estimar un valor mínimo de la resistencia del sistema de aterrizaje de la subestación en un suelo uniforme, por medio de la fórmula de una placa metálica circular a una profundidad cero:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (50)$$

Donde:

- R<sub>g</sub>** es la resistencia a tierra de la subestación en  $\Omega$ .  
 **$\rho$**  es la resistividad del suelo en  $\Omega.m$   
**A** es el área que utiliza la rejilla de aterrizaje en  $mt^2$ .

A continuación, se puede obtener un límite superior de la resistencia a tierra de la subestación al agregar un segundo término en la fórmula (50), según Laurent [B97] y Niemann [B115].

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (51)$$

Donde:

- L<sub>T</sub>** es la longitud total de los conductores enterrados en metros.

En el caso de una rejilla con varilla en un suelo uniforme, una combinación de longitud de conductores horizontales y las varillas de tierra nos proporcionará el valor estimado de  $L_T$ , ya que las varillas de tierra normalmente son más efectivas en una longitud base en por unidad.

El segundo término reconoce el hecho de que la resistencia de cualquier sistema de aterrizaje real, que consiste en un número de conductores, es más grande que la resistencia de una placa sólida metálica. La diferencia disminuirá con el incremento de la longitud de los conductores enterrados y se aproximará a cero para  $L_T$  infinito, cuando se alcance la condición de una placa sólida.

Sverak [B132] amplió la ecuación (51) para tomar en cuenta la profundidad de la rejilla.

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (52)$$

Donde:

**h** es la profundidad de la rejilla en metros.

Para rejillas sin varillas de tierra, esta fórmula se ha probado y proporciona resultados que son prácticamente idénticos con los que se obtienen de la ecuación de Schwarz (56) [B128], que se describe en el tema de las ecuaciones de Schwarz.

La siguiente tabulación de Kinyon [B93] ofrece alguna idea de cómo se compara la resistencia que se ha calculado y la resistencia que se ha medido de cinco subestaciones diferentes. La ecuación 51 se utilizó para calcular la resistencia de rejilla (Tabla 9).

Un promedio de todos los valores que se midieron de la resistividad, frecuentemente, se sustituye por la resistividad de un suelo uniforme en la ecuación (51). Si se utiliza la resistividad promedio, la ecuación (51) comúnmente origina una resistencia que es más grande que el valor que resultaría de una medición directa de la resistencia. Los valores que se midieron y se calcularon de la resistencia, se muestran en la tabla 9, la cual no refleja esta tendencia, debido a que Kinyon [B93] fundamentó sus cálculos en el "... valor promedio más bajo de la resistividad que se midió en ese lugar."



**Tabla 9 – Resistencias de rejilla típicas**

| <b>Parámetro de la textura del suelo</b> | <b>Sub 1<br/>Arena y Grava</b> | <b>Sub 2<br/>Arenilla</b> | <b>Sub 3<br/>Arena y Arcilla</b> | <b>Sub 4<br/>Arena y Gravilla</b> | <b>Sub 5<br/>Tierra y Arcilla</b> |
|------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )        | 2000                           | 800                       | 200                              | 1300                              | 28.0                              |
| Área de rejilla ( $ft^2$ )               | 15159                          | 60939                     | 18849                            | 15759                             | 61479                             |
| Longitud enterrada (ft)                  | 3120                           | 9500                      | 1775                             | 3820                              | 3000                              |
| $R_g$ ( $\Omega$ calculado)              | 25.7                           | 4.97                      | 2.55                             | 16.15                             | 0.19                              |
| $R_g$ ( $\Omega$ medido)                 | 39.0                           | 4.10                      | 3.65                             | 18.20                             | 0.21                              |

### 14.3 Ecuaciones de Schwarz

Schwarz [B128] desarrolló el siguiente juego de ecuaciones para determinar la resistencia total de un sistema de aterrizaje, en un suelo homogéneo que consiste de electrodos horizontales (rejilla) y verticales (varillas). Las ecuaciones de Schwarz se han ampliado aceptando las ecuaciones de un alambre horizontal recto para representar la resistencia de tierra,  $R_1$ , de una rejilla que consiste de conductores entrelazados y una esfera embebida en La Tierra para representar varillas de tierra,  $R_2$ . Schwarz también introdujo una ecuación para la resistencia mutua a tierra  $R_m$  entre la rejilla y la cama de varilla.

Schwarz utilizó la siguiente ecuación, la cual introdujo Sunde [B130] y Rüdenberg [B127] para combinar la resistencia de la rejilla, varillas y la resistencia mutua a tierra, y de esta forma calcular la resistencia total del sistema,  $R_g$ .

$$R_g = \frac{(R_1)(R_2) - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 R_m} \quad (53)$$

Donde:

- $R_1$**  es el valor de la resistencia a tierra de los conductores de rejilla en  $\Omega$ .
- $R_2$**  es el valor de la resistencia a tierra de todas las varillas de tierra en  $\Omega$ .
- $R_m$**  es el valor mutuo de la resistencia a tierra entre el grupo de los conductores de rejilla,  $R_1$ , y el grupo de varillas de tierra,  $R_2$ , en  $\Omega$ .

Resistencia de tierra de la rejilla:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 L_c}{a'} \right) + \frac{(K_1)(L_c)}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (54)$$

- $\rho$**  es el valor de la resistividad del suelo en  $\Omega.m$   
 **$L_c$**  es el valor de la longitud total en metros de todos los conductores de la rejilla de tierra.  
 **$a'$**  es  $\sqrt{(a \times 2h)}$  para todos los conductores que se entierran a una profundidad  $h$  en metros, ó  
 **$a'$**  es  $a$  para un conductor en la superficie terrestre en metros.  
 **$2a$**  es el valor del diámetro del conductor en metros.  
 **$A$**  es el área cubierta por los conductores en  $m^2$ .  
 **$k_1, k_2$**  son los coeficientes [según *figura 25(a) y (b)*]

Resistencia de tierra de la varillas de apoyo.

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \pi (n_R)(L_R)} \left[ \ln \left( \frac{4 L_R}{b} \right) - 1 + \frac{(2 k_1)(L_r)}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (55)$$

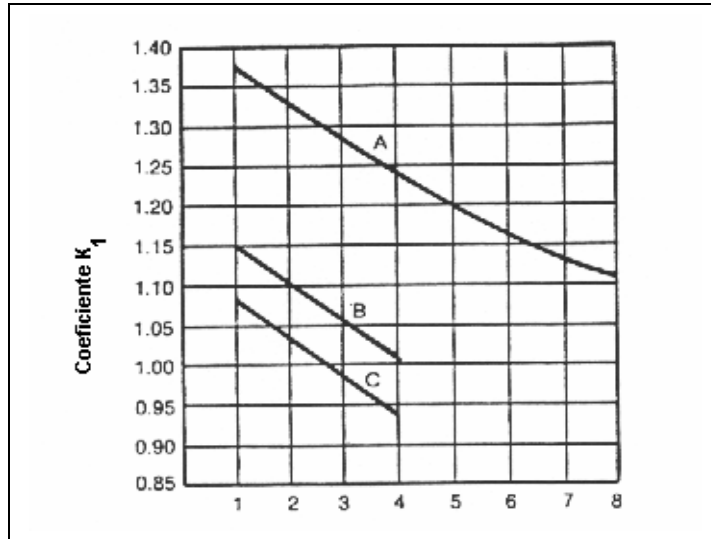
Donde

- $L_r$**  es el valor de la longitud de cada varilla en metros.  
 **$2b$**  es el diámetro de la varilla en metros.  
 **$n_R$**  es el numero de varillas que se colocan en el área  $A$ .

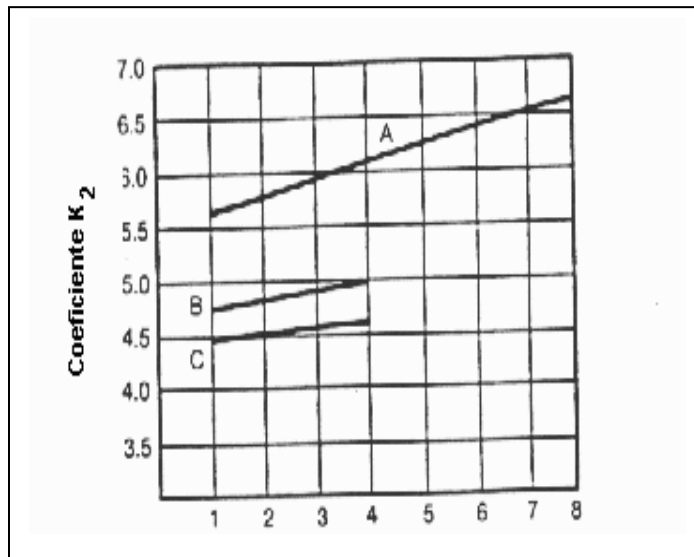
Resistencia a tierra mutua entre la rejilla y las varillas de apoyo.

$$R_2 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1(L_c)}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (56)$$

La combinación de la resistencia a tierra de la rejilla y la cama de varilla será de menor valor que la resistencia a tierra de los componentes individuales, pero será de un valor más alto que las de una combinación en paralelo.



(a)



(b)

Figura 25 – Coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  de la formula de Schwarz:  
(a) coeficiente  $k_1$ , (b) coeficiente  $k_2$

#### 14.4 Notas sobre la resistencia de tierra de los electodos principales.

En general, la resistencia a tierra de cualquier electrodo principal depende de la resistividad del suelo, el calibre y del tipo de arreglo de todos los conductores individuales que constituyen el electrodo de tierra. En arreglos más complejos que involucran alambres entrelazados y un gran número de varillas en la misma

área, la resistencia mutua desarrolla un papel muy importante entre los elementos individuales.

#### **14.5 Tratamiento del suelo para bajar la resistividad.**

Comúnmente es imposible lograr la reducción que se desea en la resistencia de tierra al agregar más conductores de rejilla ó varillas de tierra. Una solución alterna efectiva es, incrementar el diámetro de los electrodos, al modificar el suelo alrededor del electrodo. La capa interna del suelo más cercana al electrodo, normalmente comprende la mayor parte de la resistencia de tierra del electrodo hacia la Tierra remota. Este fenómeno se utiliza como una ventaja, de la siguiente manera:

- a) El uso de cloruro de sodio, magnesio y sulfato de cobre ó cloruro de calcio incrementa la conductividad del suelo inmediatamente alrededor del electrodo. El estado o las autoridades encargadas no permiten este método porque se da una lixiviación (tratamiento del suelo con una sustancia compleja, para separar sus partes solubles de las insolubles.) en los alrededores. Además, el tratamiento de sal se debe renovar periódicamente.
- b) El uso de bentonita, una arcilla natural que contiene el mineral montmorillonita, el cual se formó por la acción volcánica hace muchos años. No es corrosivo, es estable y tiene una resistividad de  $2.5 \Omega \cdot m$  en una humedad del 300%. La baja resistividad resulta principalmente de un proceso electrolítico entre el agua,  $Na_2O$  (soda),  $K_2O$  (potasio),  $CaO$  (lima),  $MgO$  (magnesia) y otras sales minerales que ionizan formando un electrolito fuerte con un rango de pH entre 8 a 10. Este electrolito se unirá gradualmente, como parte de la arcilla misma. Provista con una cantidad suficiente de agua, este incrementa hasta 13 veces su volumen seco y se adherirá a cualquier superficie que contacto. Debido a su naturaleza higroscópica, este actúa como un agente de secado que atrae cualquier humedad disponible del ambiente que lo rodea. La bentonita necesita agua para obtener y mantener sus características favorables. Su contenido de humedad inicial se obtiene en una instalación cuando se prepara la mezcla. Una vez este instalado, la bentonita cuenta con la presencia de una humedad para mantener sus características. La mayoría de los suelos tienen suficiente humedad, por lo tanto, la resequedad no es un problema. La naturaleza higroscópica de la bentonita se aprovechará de la disponibilidad de agua para mantener su condición. Si se expone directamente a la luz solar, esta tiende en aislarse, previniendo que el proceso de resequedad penetre mucho más. Esto no podría funcionar en un ambiente totalmente seco, debido a que la mezcla se puede contraer y agrietarse; de esta manera pierde contacto con el electrodo, incrementando la resistencia del mismo. (Jones [B90]).
- c) Los electrodos de tipo químico consisten de un tubo de cobre lleno de sal. Los agujeros en el tubo permiten que entre humedad, disuelva la sal y que

permita que la solución de sal llegue hacia el interior de la tierra. Estos electrodos se instalan en agujeros y comúnmente se rellenan con un mejorador de suelo.

- d) Los materiales mejoradores de suelos, algunos con una resistividad menor de  $0.12 \Omega \cdot m$  (más o menos el 5% de la resistividad de la bentonita), se colocan comúnmente alrededor de la varilla o alrededor de los conductores de aterrizaje que se encuentran en una zanja, en una forma seca o en un compuesto pre-mezclado. Algunos de estos materiales son permanentes y no derramarán ningún químico dentro del planeta. Otros materiales mejoradores de suelos disponibles se mezclan con la tierra del lugar en diferentes cantidades y lo derramará lentamente en el suelo, disminuyendo su resistividad.

#### **14.6 Electrodos embebidos en concreto.**

El concreto como es higroscópico atrae la humedad. Un bloque de concreto que se entierra se comporta como un medio semiconductor con una resistividad de 30 a  $90 \Omega \cdot m$ . Esto es de un interés particular para suelos con media o alta resistividad, debido a que un alambre o una varilla metálica empotrada en concreto tienen una resistencia más baja que el mismo electrodo enterrado directamente en la Tierra. Este proceso reduce la resistividad de las partes más críticas del material que rodea al elemento metálico, de la misma manera que un tratamiento químico de suelos. Sin embargo, este fenómeno puede ser a veces una ventaja o desventaja. Algunas de estas razones son las siguientes:

- a) Por un lado, no es muy práctico construir fundaciones para estructuras donde el acero interno (barras reforzadas) no se encuentra eléctricamente conectado a la parte metálica de la estructura. Aun cuando se tenga un absoluto cuidado con el perno de anclaje para evitar cualquier contacto directo metal con metal, la naturaleza semiconductora del concreto puede proveer una conexión eléctrica.
- b) Por el otro lado, la presencia de una pequeña corriente en CD, puede causar una corrosión del material, aunque la CA como tal, no produce corrosión, aproximadamente el 0.01% de la corriente alterna (CA) se rectifica en la interfase de la barra de acero y el concreto (Rosa, McCollum y Peters [B124]).
- c) La ruptura del concreto sucede debido al fenómeno descrito anteriormente, ya que el acero que se corroe utiliza 2.2 veces su volumen original, produciendo presiones cercanas a los 35 MPa o el paso de una corriente alta, la cual evaporaría la humedad del concreto.

Afortunadamente, hay un cierto umbral de potencial para la corrosión en CD, aproximadamente 60 Voltios en CD, abajo de este valor no ocurre corrosión. Se reporta un número de pruebas de campo, respecto a la máxima corriente de carga en Bogajewski, Dawalibi, Gervais y Mudhedkar [B16]; Dick y Holliday [B53]; y Millar, Hart y Brown [B107]. El corto tiempo de la capacidad de corriente de carga,  $I_{CE}$ , de electrodos embebidos en concreto se pueden estimar mediante la formula de Ollendorf para una corriente sostenible indefinidamente  $I_{\infty}$  que se ajusta por un factor de multiplicación de 1.4 ó directamente de la *figura 26*.

$$I_{CE} = 1.4(I_{\infty}) = \frac{1.4}{R_z} \sqrt{2\lambda_g \rho (T_v - T_a)} \quad (57)$$

Donde

- $\lambda_g$  es el valor de la conductividad térmica de la tierra en W / (m °C)
- $R_z$  es el valor de la resistencia a tierra del electrodo embebido en concreto en  $\Omega$ .
- $\rho$  es la resistividad del suelo en  $\Omega.m$
- $T_a$  es la temperatura del ambiente en °C.
- $T_v$  es la máxima temperatura que se permite, para evitar la evaporación súbita de humedad en °C.
- $I_{\infty}$  es el valor de la corriente sostenible indefinidamente en amperios.

La aplicación de esta formula se ha verificado de las extensas pruebas de campo de polos concretos según Borgajewski, Dawalibi, Gervais y Mukhedkar [B16]. En general, se evita el daño si la corriente real es menor que el valor de  $I_{CE}$  que se determina por la ecuación (57). Un margen de seguridad del 20 al 25% es razonable para la mayoría de las aplicaciones prácticas.

Así, con las precauciones apropiadas, los electrodos embebidos en concreto se pueden utilizar como electrodos auxiliares de tierra.

Fagan y Lee [B65] utilizan la siguiente ecuación para obtener la resistencia a tierra de una varilla vertical embebida en concreto.

$$R_{CE-rad} = \frac{1}{2\pi L_r} \left( \rho_c \left[ \ln \left( \frac{D_c}{d} \right) \right] + \rho \left[ \ln \left( \frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] \right) \quad (58)$$

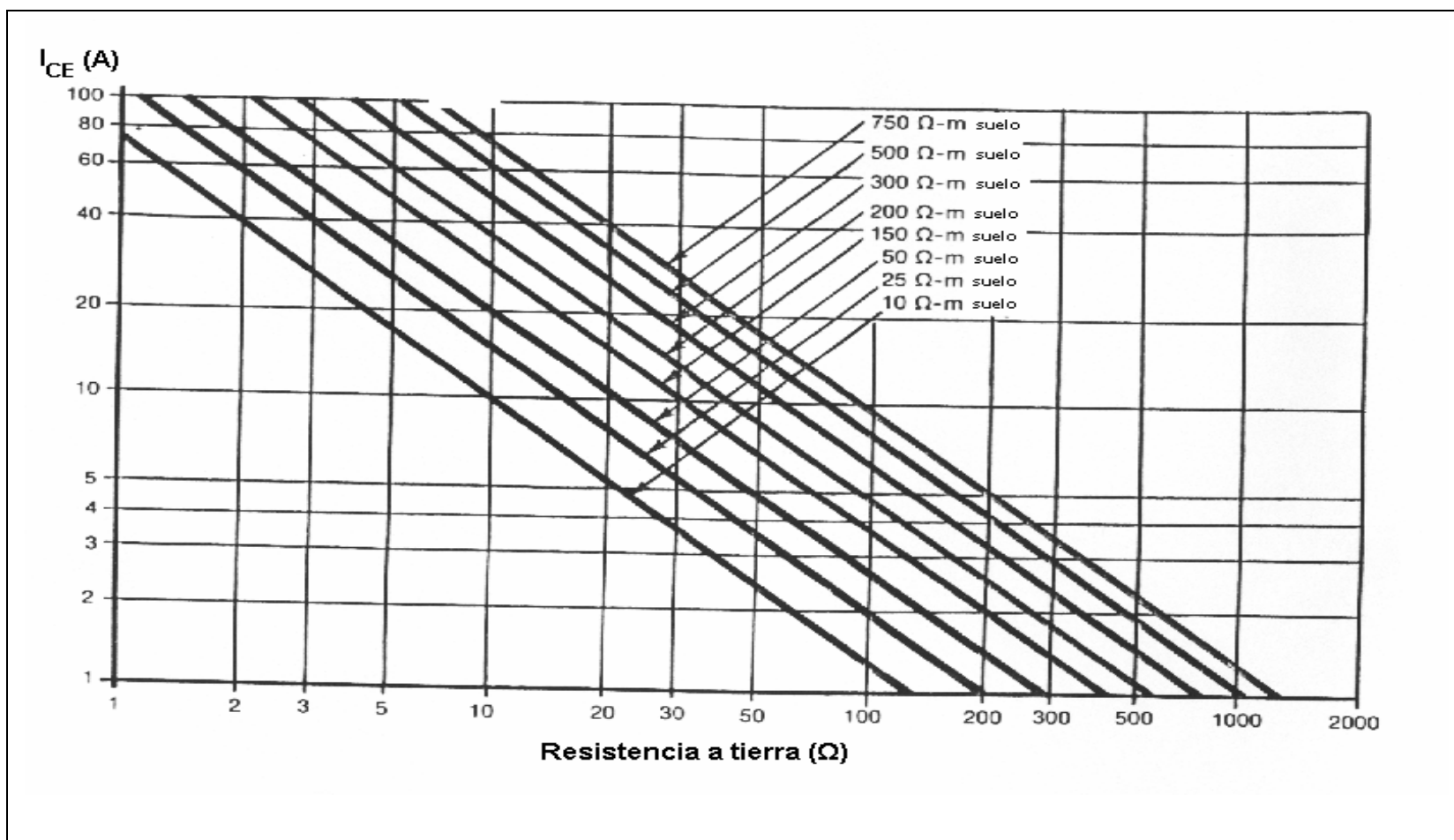


Figura 26 –Tiempo corto de la capacidad de carga de la corriente de los electrodos de tierra embebidos en concreto.

Donde

- $\rho_c$  es el valor de la resistividad del concreto en  $\Omega.m$   
 $\rho$  es el valor de la resistividad del suelo en  $\Omega.m$   
 $L_r$  es la longitud de la varilla a tierra en metros.  
 $d$  es el diámetro de la varilla a tierra en metros.  
 $D_c$  es el diámetro de la coraza de concreto en metros.

La ecuación (58) se relaciona con la formula que se usa comúnmente para una varilla de tierra de longitud  $L_r$  y diámetro  $d$ , de la siguiente manera:

$$R_{rad} = \frac{1}{2\pi L_r} \left( \left[ \ln \left( \frac{8L_r}{d} \right) - 1 \right] \right) \quad (59)$$

La ecuación (58) se puede resolver en la ecuación (60)

$$R_{CE-rad} = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] + \rho_c \left[ \ln \left( \frac{8L_r}{d} \right) - 1 \right] - \rho_c \left[ \left( \frac{8L_r}{D_c} \right) - 1 \right] \quad (60)$$

que representa una combinación de dos resistencias en serie:

- a) La resistencia a tierra de un cilindro de concreto de diámetro  $D_c$ , enterrado directamente en el suelo  $\rho$ , que se ha calculado con la ecuación (59).
- b) La resistencia a tierra del segmento interno de diámetro  $D_c$ , que contiene una varilla de metal de diámetro  $d$ .

Obviamente, el último término se obtiene como una diferencia de los valores de la resistencia hipotética para una varilla en concreto, si  $d$  y  $D_c$  están en la formula única media de la ecuación (59), y  $\rho$  se reemplaza por  $\rho_c$ .

Tal aproximación, comúnmente es válida para cualquier otro electrodo que tenga diferente forma y no por conveniencia.

$$R_{SM} = F(\rho, S_o, G) \quad (61)$$

$$R_{DM} = F(\rho, S_o, G) + F(\rho, S_i, G) - F(\rho_c, S_i, G) \quad (62)$$



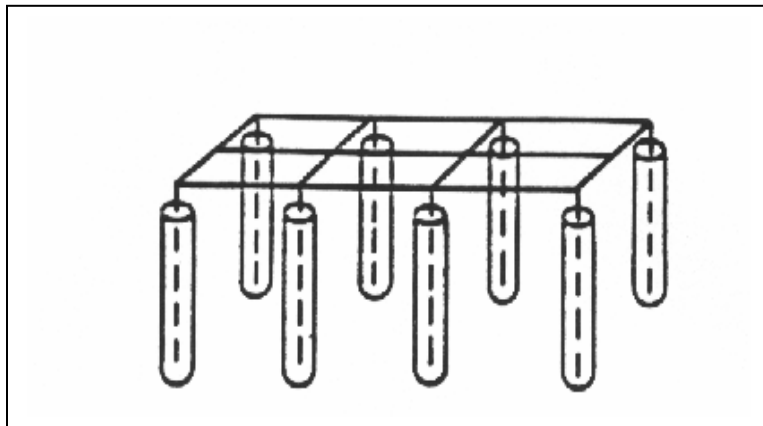
Donde, agregando a los símbolos que se mencionaron anteriormente

- R<sub>SM</sub>** es el valor de la resistencia del electrodo en un medio único en  $\Omega$ .  
**R<sub>DM</sub>** es el valor de la resistencia del electrodo en un medio doble en  $\Omega$ .  
**S<sub>o</sub>** es el área superficial de un electrodo en  $mt^2$ .  
**S<sub>i</sub>** es el área de la interfase en  $mt^2$ .  
**G** es un factor geométrico que caracteriza la forma particular de un electrodo.

Esta forma se adapta a una variedad de electrodos, que están enterrados en el suelo y se asume que están rodeados de una coraza concéntrica de un material que tiene diferente resistividad a la del suelo. Un posible modelo de este tipo (*Figura 27*), por la cual la formula de Schwarz fácilmente se puede modificar para una cama de varilla.

Las siguientes recomendaciones se deben considerar cuando se utilizan electrodos embebidos en concreto:

- Conecte el perno de anclaje en el acero reforzado para un contacto confiable metal con metal.
- Reduzca la corriente y las fugas de CD para permitir niveles que aseguren que los electrodos de tierra principales (rejilla de aterrizaje y varillas de tierra) drenen la mayoría de la corriente de falla.
- Los mejoradores de suelos, se pueden utilizar en las áreas de un suelo de alta resistividad para reducir la resistencia del aterrizaje principal. Hacer agujeros de 100 a 250 mm y rellenarlos con este material alrededor de la varilla de tierra, es un método muy útil para evitar la influencia de los electrodos auxiliares en disipar la corriente de falla.



**Figura 27 – Rejilla con electrodos embebidos verticalmente.**

## 15. DETERMINACION DE LA CORRIENTE MAXIMA DE REJILLA

### 15.1 Definiciones

Nota: Se mencionan las siguientes definiciones para un mejor entendimiento del tema.

**15.1.1 Compensación de CD (dc offset):** es la diferencia entre la onda simétrica de corriente y la onda real de corriente durante una condición transitoria del sistema de potencia. Matemáticamente, la corriente real de falla se puede separar en dos partes, una componente alterna simétrica y una componente unidireccional (CD). La componente unidireccional puede ser de cualquier polaridad, pero no cambia de polaridad y decrecerá a alguna velocidad predeterminada.

**15.1.2 Factor de decremento:** es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de aterrizaje orientados con seguridad. Determina el equivalente rms de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada,  $t_f$ , tomado en cuenta para el efecto del “dc offset” inicial y su atenuación durante la falla.

**15.1.3 Factor de división de la corriente de falla:** es un factor que representa al inverso de la relación de la corriente simétrica de falla a la parte de la corriente que fluye entre la rejilla de aterrizaje y en los alrededores del planeta Tierra.

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \quad (63)$$

Donde

$S_f$  es el factor de división de la corriente de falla.  
 $I_g$  es el valor de la corriente simétrica de rejilla en amperios.  
 $I_0$  es la secuencia cero de la corriente de falla en amperios.

**15.1.4 Corriente de rejilla máxima:** es un valor de diseño de la corriente de rejilla máxima, se define como sigue:

$$I_G = (D_f) (I_g) \quad (64)$$

Donde

$I_G$  es la corriente de rejilla máxima en amperios.  
 $D_f$  es el factor de decremento de la duración completa de la falla en segundos.  
 $I_g$  es el valor rms simétrico de la corriente de rejilla en amperios.

**15.1.5 Reactancia Subtransitoria:** es la reactancia de un generador al inicio de una falla. Esta reactancia se usa en los cálculos de la corriente de falla simétrica inicial. La corriente decrece continuamente, pero se asume que se llegará a estabilizar a este valor como en la primera etapa, tardando aproximadamente 0.05 segundos después de una falla.

**15.1.6 Corriente simétrica de rejilla:** es la parte de la corriente de falla a tierra simétrica la cual fluye entre la rejilla aterrizada y la tierra circundante, esto se puede expresar como:

$$I_g = (S_f) (I_f) \quad (65)$$

Donde

$I_g$  es el valor rms de la corriente de rejilla simétrica en amperios.

$I_f$  es el valor rms de la corriente de falla a tierra simétrica en amperios.

$S_f$  es el factor de división de la corriente de falla.

**15.1.7 Reactancia sincrónica:** es la reactancia de estado estable de un generador durante las condiciones de falla que se utilizan para calcular la corriente de falla de estado estable. La corriente que se calcula excluye el efecto del regulador de voltaje automático.

**15.1.8 Reactancia Transitoria:** es la reactancia de un generador entre los estados subtransientes y síncronos. Esta reactancia se utiliza para el calculo de la corriente simétrica de falla durante en periodo entre los estados subtransientes y estables. La corriente disminuye continuamente durante este periodo, pero se asume que es estable a este valor alrededor de los 0.25 segundos.

**15.1.9 Relación X/R:** es la relación entre la reactancia y la resistencia del sistema. Esto es un indicador de la disminución en el valor de cualquier compensación de DC. Un valor grande de X/R corresponde a una constante de tiempo grande y a una razón ó velocidad baja de su disminución.

## **15.2 Procedimiento.**

En la mayoría de los casos, el valor más grande de la corriente de rejilla resultará en la condición más peligrosa. Para estos casos, se involucran los siguientes pasos para determinar el valor correcto de diseño de la de corriente de rejilla máxima  $I_g$ , para utilizarlo en los cálculos de aterrizaje de subestaciones:

- a) Determinar la ubicación y el tipo de falla a tierra que es lo que probablemente produce grandes flujos de corriente entre la rejilla de tierra y en sus alrededores, y por consiguiente los incrementos más grandes de potencia a

tierra y grandes gradientes de potencial superficial en el área de la subestación.

- b) Determinar por medio de cálculos, el factor de división de la corriente de falla  $S_f$ , para las fallas que se seleccionaron en el literal a), y establecer los valores correspondientes de la corriente simétrica de rejilla.
- c) Por cada falla, basándonos en su tiempo de duración,  $t_f$ , se determina el valor del factor de decremento  $D_f$  permitido para los efectos de asimetría de la onda de corriente de falla.
- d) Seleccionar el valor más grande del producto  $(D_f)(I_g)$  y por consiguiente la peor condición de falla.

### 15.3 Tipos de fallas a tierra.

En el sistema pueden ocurrir diferentes tipos de falla. Desafortunadamente, puede ser difícil determinar que tipo de falla y que ubicación tendrá el flujo más grande de corriente entre la rejilla de tierra y sus alrededores debido a que no se aplica una regla específica. Desde la *figura 28* hasta la *figura 31* se muestra, la corriente máxima de rejilla  $I_G$ , para varias configuraciones del sistema y localizaciones de la falla.

Al determinar los tipos de falla aplicables, debemos considerar a la probabilidad de que ocurra la falla. No es necesario considerar múltiples fallas simultáneas, aunque puedan resultar en corrientes a tierra muy altas, si la probabilidad que ocurre es despreciable. Pero se recomienda, por razones prácticas, que la investigación se limite a fallas de línea a tierra y de línea a línea a tierra.

En el caso de una falla línea a línea a tierra, la corriente de falla de secuencia cero es:

$$I_0 = \frac{E \times (R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1)[R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)] + (R_2 + jX_2) \times (R_0 + 3R_f + jX_0)} \quad (66)$$

Donde

- $I_0$  es el valor rms simétrico de la corriente de falla de secuencia cero en amperios.
- $E$  es el valor del voltaje de fase-neutro en voltios.
- $R_f$  es el valor de la resistencia estimada de la falla en ohmios (normalmente se asume  $R_f=0$ ).
- $R_1$  es la secuencia positiva de la resistencia del sistema equivalente en ohmios.

- R<sub>2</sub>** es la secuencia negativa de la resistencia del sistema equivalente en ohmios.  
**R<sub>0</sub>** es la resistencia del sistema equivalente de la secuencia cero en ohmios.  
**X<sub>1</sub>** es la reactancia del sistema equivalente de la secuencia positiva en ohmios.  
**X<sub>2</sub>** es la reactancia del sistema equivalente de la secuencia negativa en ohmios.  
**X<sub>0</sub>** es la reactancia del sistema equivalente de la secuencia cero en ohmios.

Los valores R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>0</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> y X<sub>0</sub> se calculan observando el sistema desde el punto de falla.

En el caso de una falla simple de línea a tierra, la corriente de secuencia cero de la de falla es:

$$I_0 = \frac{E}{3R_f + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_3)} \quad (67)$$

En muchos casos, el efecto de los términos de la resistencia es insignificante en la ecuación (67). Para propósitos prácticos, las siguientes ecuaciones simplificadas son lo suficientemente precisas y convenientes.

La corriente de secuencia cero para una falla de línea-línea-tierra es:

$$I_0 = \frac{(E)(X_2)}{X_1(X_0 + X_2) + (X_2 + X_0)} \quad (68)$$

La corriente de secuencia cero para una falla de línea-tierra es:

$$I_0 = \frac{E(X_2)}{(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (69)$$

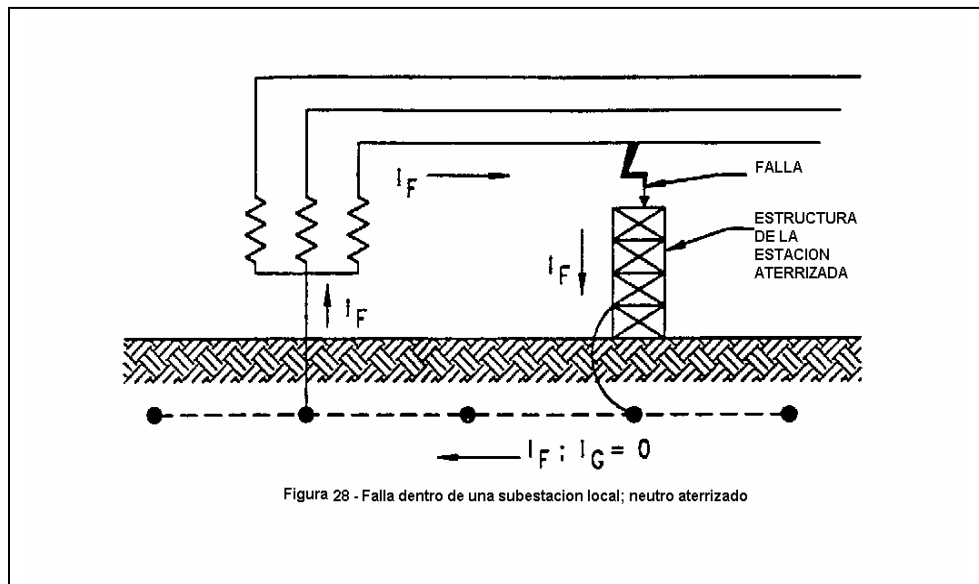


Figura 28 - Falla dentro del lugar de la subestación; aterrizaje del neutro local.

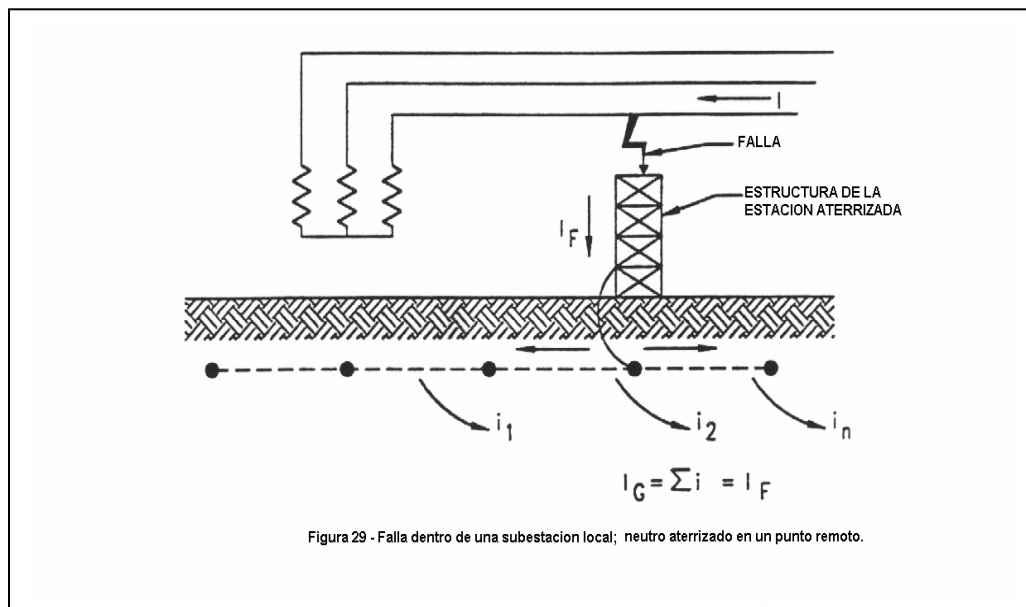


Figura 29 - Falla dentro del lugar de la subestación; aterrizaje del neutro en un lugar remoto.

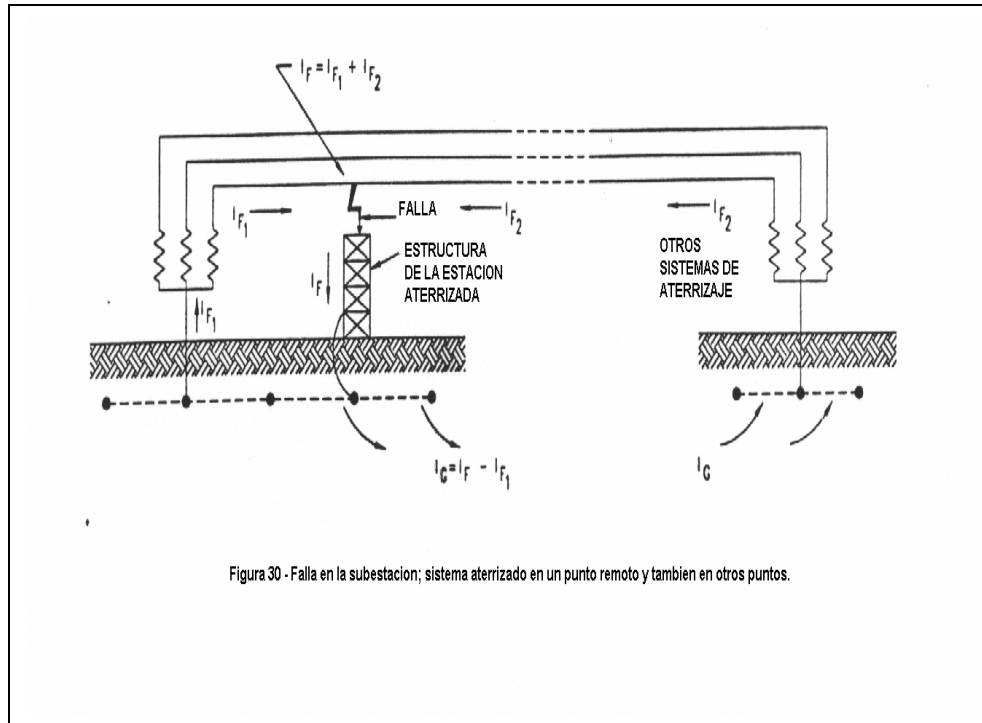


Figura 30 - Falla en la subestación; sistema aterrizado en un punto remoto y también en otros puntos.

**Figura 30 - Falla en la subestación; aterrizaje del sistema en la subestación local y en otros puntos del sistema.**

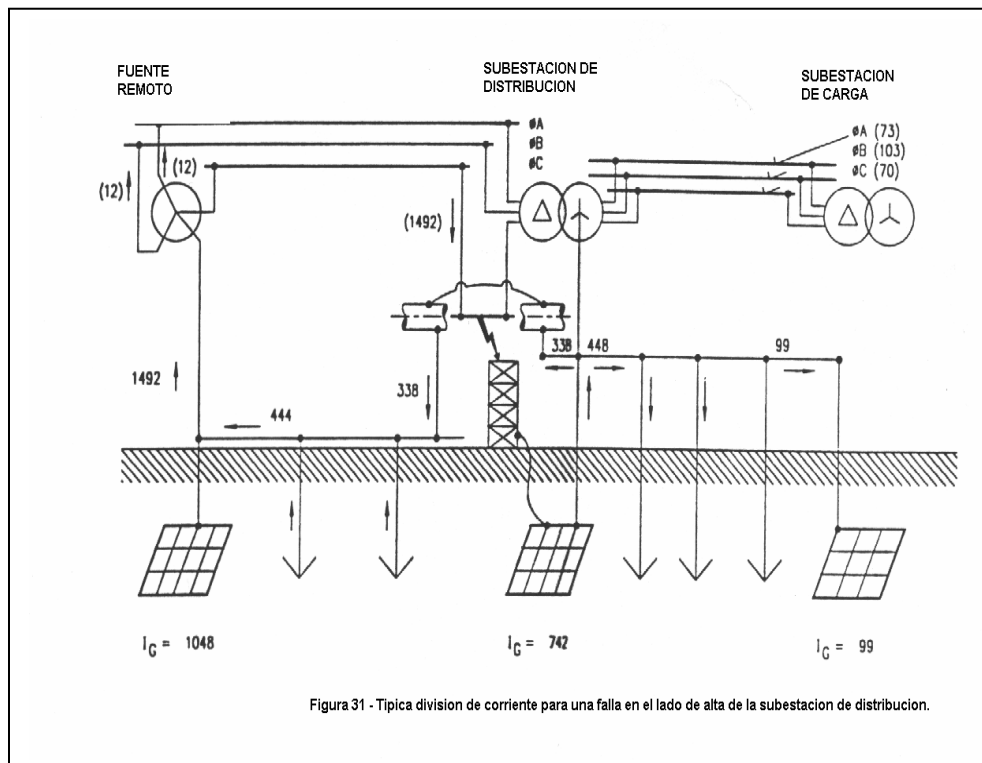


Figura 31 - Típica división de corriente para una falla en el lado de alta de la subestación de distribución.

**Figura 31 – División de corriente típica para una falla del lado de alta de la subestación de distribución.**

#### 15.4 El efecto de la resistencia a tierra de la subestación.

En la mayoría de los casos, es suficiente derivar la corriente máxima de rejilla  $I_G$ , tal como se mencionó anteriormente en el procedimiento y los tipos de falla a tierra, despreciando la resistencia del sistema, la resistencia del aterrizaje de la subestación y la resistencia a la hora de la falla. El valor del error que se ingresa comúnmente es pequeño y está siempre a favor de la seguridad. Sin embargo, se pueden dar casos extraños, donde la resistencia del aterrizaje de la subestación es tan grande, en relación a la reactancia del sistema, que vale la pena tener la resistencia en cuenta e incluirla dentro de la ecuación (66) o la ecuación (67) las cuales son más exactas. Esto representa un problema debido a que el sistema a tierra de la subestación aun no se ha diseñado y no se conoce su resistencia. Sin embargo, la resistencia se puede estimar utilizando las formulas que se mencionaron anteriormente en los cálculos simplificados y las ecuaciones de Schwarz. La resistencia que se estima generalmente nos da suficiente precisión para determinar la corriente  $I_g$  y por consiguiente  $I_G$ .

#### 15.5 El efecto de la resistencia de falla.

Si la falla significa una ruptura del aislamiento dentro del lugar de la subestación, la única suposición segura es que la resistencia de la falla se asuma cero (ver desde *figura 28* hasta la *figura 31*).

En el caso de una falla que se de fuera del área de la subestación, en una línea conectada al bus de la subestación (*figura 31*), es permisible, si se puede asignar un valor estimado (mínimo) de la resistencia de falla  $R_f$ , para utilizarlo en los cálculos de la corriente de falla a tierra. Esto se hace al multiplicar  $R_f$  por 3 y lo agregamos a los términos de la otra resistencia tal como se indica en el denominador de la ecuación (66) y la ecuación (67). Sí, por consiguiente, la resistencia de falla real no se mantiene a un valor al menos tan grande como el de  $R_f$  utilizado en los cálculos, entonces debe ingorarse la resistencia de falla. Cualquier error al despreciar el valor de  $R_f$ , estará en el lado de seguridad.

#### 15.6 Efecto del cable de guarda y del conductor neutro.

Cuando el cable de guarda o el conductor neutro de las líneas de transmisión se conectan a la tierra de la subestación, una parte considerable de la corriente de falla a tierra se desvía lejos de la rejilla de aterrizaje de la subestación. Cuando existe este tipo de situación se debe considerar para el diseño de la rejilla de aterrizaje, el cable de guarda o el conductor neutro.

Al conectar a la tierra de la subestación el cable de guarda o el conductor neutro, ó ambos y ellos a su vez hacia las estructuras de líneas de transmisión o postes de distribución, regularmente tendrá un efecto de incrementar el gradiente de



potencial en las bases de las torres, mientras se reduce en la subestación. Esto se debe a que cada torre que se encuentra cerca de la subestación compartirá el incremento del GPR en cada incremento de voltaje de la plataforma de aterrizaje de la subestación, cualquiera que sea la causa, en lugar de afectarse solo por una falla aislada en el lugar o por una descarga disruptiva en una de las torres. Por el contrario, cuando ocurre una falla en una torre, el efecto del sistema de aterrizaje que se conecta a la subestación debe disminuir la magnitud de los gradientes cercanos a la base de la torre.

### **15.7 Efecto de tuberías y cables enterrados directamente.**

Cables enterrados con sus forros o armaduras en contacto efectivo con la tierra, y tuberías metálicas enterradas tendrán de alguna forma un efecto similar cuando se unan al sistema de aterrizaje de la subestación, pero más allá de su perímetro.

Los cables enterrados con sus forros o armaduras en contacto efectivo con la Tierra, y tuberías metálicas enterradas unidas al sistema de aterrizaje de la subestación y ampliándose más allá de su perímetro tendrá un efecto similar a que tiene el cable de guarda y el conductor neutro. Ya que al dirigir parte de la corriente de falla a tierra lejos de la subestación, se reducirá de alguna forma el aumento de potencial de la rejilla durante la falla y los gradientes del lugar en la subestación.

Debido a la complejidad y a las incertidumbres en el patrón del flujo de corriente, normalmente el efecto es difícil de calcular. Algunas directrices para el cálculo de la impedancia de entrada de la trayectoria de la corriente como tal alejándose de la subestación lo suministra Rudenberg [B125] y Laurent [B97]. Un estudio más reciente de este tipo de problema se presentó en el EPRI EL-904 [B59], el cual provee métodos para calcular la impedancia tanto para tuberías en la superficie como para tuberías enterradas. Se puede determinar de estos valores un cálculo aproximado de la división de la corriente a tierra entre esas trayectorias, el sistema de aterrizaje de la subestación y cualquier alambre elevado que este conectado a tierra.

### **15.8 Peores tipos de fallas y ubicación.**

El peor tipo de falla en un sistema de aterrizaje es comúnmente el que resulta en el valor más alto de la corriente máxima de rejilla  $I_G$ . Debido que, la corriente es proporcional a la secuencia cero o a la corriente de falla a tierra y al factor de división de la corriente, y debido a que la división de corriente es casi independiente del tipo de falla, el peor tipo de falla se puede definir como el único resultado de la alta secuencia cero o el flujo de la corriente de falla hacia el planeta,  $3I_0$ . En un lugar específico, una falla simple de línea a tierra será el peor

tipo si  $Z_1 Z_0 > Z_2^2$  en el punto de falla y la falla línea a línea a tierra será el peor tipo de de falla si  $Z_1 Z_0 < Z_2^2$ . En el caso frecuente donde  $Z_2$  se asume igual a  $Z_1$ , las comparaciones antes mencionadas se reducen a  $Z_0 > Z_1$ , y  $Z_0 < Z_2$ .

$Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$  se definen como:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (70)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (71)$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3 \quad (72)$$

La pregunta que si la ubicación de la falla produce la corriente máxima de rejilla  $I_G$ , involucra muchas consideraciones. La peor ubicación de la falla también se puede dar en el lado de alto voltaje o en el lado de bajo voltaje y en cualquiera de los casos puede ser también dentro de la subestación o exterior sobre una línea, a cierta distancia de la subestación. Una falla se clasifica como dentro de la subestación si se relaciona con una estructura metálica que esta eléctricamente conectada a la rejilla de aterrizaje de la subestación a través de una impedancia insignificante. No hay reglas universales para determinar la localización de la peor falla. La siguiente discusión relaciona algunas, pero no significa que todas las posibilidades.

Para las subestaciones de distribución con el transformador aterrizado solo en el lado de distribución, la corriente máxima de rejilla  $I_G$  comúnmente ocurre de una falla a tierra en los terminales del lado de alta del transformador. Sin embargo, si el origen de la corriente de falla a tierra es débil en el lado de alta o si una operación en paralelo de varios transformadores resultan en una fuente de corriente de falla a tierra grande en el lado de baja, se puede dar la corriente máxima de rejilla para una falla a tierra en cualquier parte del circuito de distribución.

Para fallas a tierra en los terminales del lado de baja de un transformador secundario aterrizado, la contribución de los transformadores a la falla, circula en el conductor de la rejilla de la subestación con una fuga de corriente insignificante hacia el planeta Tierra y así, no tiene un efecto en el aumento de potencial a tierra (ver *figura 28*).

Para fallas a tierra fuera de la subestación en un alimentador de distribución (lo suficientemente lejos para ser una tierra remota con respecto a la rejilla de aterrizaje), una gran parte de la corriente de falla regresará a su origen (el transformador neutro) a través de la rejilla de la subestación, así contribuirá al aumento del potencial a tierra de la subestación.

En subestaciones de transmisión con transformadores de tres devanados o auto transformadores, el problema es más complejo. Puede ocurrir la corriente máxima de rejilla  $I_G$  por una corriente de falla ya sea en el lado de alta o de baja

del transformador; se deben estudiar ambas situaciones. En cualquiera de los casos, se puede asumir que la ubicación de la peor falla es en los terminales del transformador dentro de la subestación, si la contribución del sistema a la corriente de falla es más grande que la de los transformadores de la subestación. Contrario a esto, la ubicación de la peor falla puede ser fuera de la subestación en una línea de transmisión, si predomina la contribución del transformador.

Claro que existen excepciones a las generalidades vistas anteriormente. Por lo tanto, se deben considerar para un sistema específico varias ubicaciones de falla para la corriente máxima de rejilla. Por cada elección, se debe establecer el valor que se aplica de la corriente de secuencia cero  $I_0$  (corriente de falla a tierra).

En pocos casos, surge una complicación adicional. La duración de la falla depende en el tipo de protección que se utilizó, la ubicación de la falla y la alternativa de usar los tiempos de limpieza principales o de respaldo para la duración de la falla (golpe eléctrico). La duración de la falla no solamente afecta el factor de decremento,  $D_f$ , también afecta a los voltajes tolerables. Si el tiempo de limpieza de falla, para una falla en particular es relativamente grande, los voltajes tolerables correspondientes se pueden reducir a valores que hagan que esta condición de falla sea el peor caso, aunque para este caso la corriente de rejilla no sea el valor máximo. Este caso ocurre donde un transformador Delta-Estrella aterrizado se alimenta de una fuente relativamente débil de corriente de falla y la falla ocurra a cierta distancia debajo del alimentador de distribución rural. En este caso, la corriente de falla del lado de alta (Delta) puede ser relativamente baja y las fallas del alimentador del lado de baja (Estrella aterrizado) se determinan principalmente por las impedancias del transformador y el alimentador. Si se considera el respaldo de limpieza, una falla en el alimentador muchos kilómetros lejos de él, depende del dispositivo de limpieza del lado de alta para respaldar la falla en el disyuntor del alimentador, la cual tomará muchos segundos para poder limpiar la falla. El voltaje tolerable para este caso puede ser significativamente más bajo que para la falla en el lado de alta, haciendo la falla del alimentador del lado de baja el peor caso para el diseño de la rejilla. Así, se debe tomar en cuenta el tipo y lugar de la peor falla, no solo el máximo valor de la corriente de rejilla  $I_G$ , sino también los voltajes tolerables que se basan en el tiempo de limpieza de falla.

### 15.9 Cálculo de la división de corriente.

Para la suposición de un flujo sostenido de la corriente de falla a tierra inicial, la corriente simétrica de rejilla se expresa de la siguiente forma:

$$I_g = (S_f)(3 I_0) \quad (73)$$

Para determinar  $I_G$ , se debe calcular el factor de división de corriente  $S_f$ .

El proceso de cálculo consiste en derivar la representación equivalente de los cables de guarda, neutros, etc. conectados a la rejilla y luego se soluciona el equivalente para determinar que fracción del total de la corriente de falla que circula entre la rejilla y el planeta Tierra, y que fracción circula a través de los cables a tierra o neutros.  $S_f$  depende de muchos parámetros, los cuales son:

- a) El lugar de la falla.
- b) La magnitud de la impedancia de la rejilla de aterrizaje de la subestación.
- c) Las tuberías enterradas y los cables en las cercanías de o directamente conectadas al sistema de aterrizaje de la subestación.
- d) Los cables de guarda, neutros u otras trayectorias de retorno a tierra.

Debido a  $S_f$ , la corriente simétrica de rejilla  $I_g$ , y por lo tanto, también  $I_G$ , están relacionados de una manera muy cercana al lugar de la falla. Si se desprecian las trayectorias adicionales a tierra de los literales c) y d), la relación de la división de corriente (que se basa en contribuciones remotas vrs la corriente local) se puede calcular al utilizar las componentes simétricas tradicionales. Sin embargo, la corriente  $I_g$ , que se calculó utilizando algún método que puede ser excesivamente pesimista, aun si se considera una expansión futura.

Esto solamente se refiere a cables de guarda y a conductores neutros, aunque los principios que se involucran también aplican a las tuberías enterradas, cables o cualquier otra trayectoria de circulación conectada a la rejilla. Las líneas de transmisión de alto voltaje son comúnmente proveídas con cables estáticos aéreos, a lo largo de su longitud o para distancias cortas entre cada subestación. Estas deben aterrizar en cada torre a lo largo de la línea o se pueden aislar de las torres y utilizarse para propósitos de comunicación. Hay muchas fuentes que proveen ayuda para determinar la impedancia efectiva de un cable estático desde el punto de la falla (Carson[B17]; Clem[B19]; EEl y sistemas telefónicos Bell[B20]; CCITT Study Group V[B24]; Desieno, Marchenko y Vassel[B51]; Laurel [B97]; Patel [B120]; y Verna y mukhedkar [B149]). Muchos de estos métodos pueden, sin embargo, ser difíciles para aplicar por la ingeniería de diseño. Ya que esta fuera del alcance de este manual tratar detalladamente la aplicación de

cada método en todas las configuraciones posibles, solo se dará una breve descripción de los métodos más recientes.

Endrenyi [B57][B55] presenta una aproximación en el cual, para una serie de spans idénticos, las impedancias de las torre o los cables de guarda se reducen a una impedancia equivalente. Excepto para los propósitos que se estiman, Endreyi recomienda incluir los mutuos entre los conductores de aterrizaje múltiples e introduce un factor de acoplamiento que tenga en cuenta la impedancia mutua entre los conductores neutros y los conductores de fase.

En el método de matriz de cascada de Sebo [B129], se deriva una matriz de impedancias para cada span de la línea y las matrices span individuales están en cascada dentro de una matriz resultante que representa la línea entera. Esta técnica permite a una persona tomar en cuenta las impedancias propias y las impedancias mutuas (excepto entre la base de los aterrizajes de la torre), y la ubicación y el tipo de falla. Se sugiere una corrección para los efectos finales de la línea, utilizando un factor de protección modificado.

Con algunas limitaciones en la aplicación y la precisión, la técnica de cálculo span por span se puede simplificar considerablemente. Una aproximación típica, en el cual se ignoran todos los acoples mutuos entre el conductor neutral y los conductores de fase y entre los conductores neutrales, lo describe Garret [B70]. En esta técnica, cada conductor neutro es ejemplificado por la impedancia de cada span y la impedancia de aterrizaje equivalente de cada torre para formar una red que parece una escalera. Esta red de escalera se reduce entonces, al utilizar técnicas de reducción de red simple, para una impedancia de entrada como se ve desde el punto de falla. La impedancia de entrada de cada circuito se combina con la resistencia de aterrizaje y tres veces este valor resultante se incluye en la secuencia cero de la impedancia de falla equivalente. El factor de la división de corriente  $S_f$  se calcula al aplicar la ley de las corrientes de Kirchoff para obtener la división de corriente entre la resistencia de rejilla y la impedancia de entrada de cada circuito. Aunque esto ó las aproximaciones similares, se limitan en aplicación y precisión, en muchos casos se provee una estimación razonable de la influencia de los cables de guarda y los neutros en la resistencia del sistema de aterrizaje y la relación de la división de corriente.

Dawalibi [B37] provee algoritmos para derivar ecuaciones simples para resolver las corrientes en las rejillas y en cada torre. Estas ecuaciones se obtienen de uno o ambos extremos de cada línea y no demanda grandes requerimientos de almacenaje de una computadora de las técnicas que modela cada span en forma individual. Dawalibi también dirige los efectos de la estructura del suelo (que son, las resistividades de múltiples capas) en la impedancias propias y las impedancias mutuas de los conductores y en la relación de la división de corriente.

Meliopoulos y otros [B104] introdujeron un conductor equivalente para representar los efectos del planeta utilizando la formula de Carson. Cada span en cada línea se modela y la red que resulta se resuelve por flujos de corriente. A partir de esta solución, se calcula la relación de la división de corriente. El número de líneas y las subestaciones diseñadas se limitan solo por la computadora que se utiliza para resolver la red (EPRITR-100622[B63]).

Garret y patel [B73] utilizan el método de Meliopoulos [B104] para realizar un análisis paramétrico de los parámetros que afectan a  $S_f$  y para desarrollar un juego de curvas de  $S_f$  vrs la resistencia de la rejilla para algunos de los parámetros mas críticos. Esto provee un método rápido y sencillo para estimar la división de corriente que evita la necesidad de algunas suposiciones simplificadas de otros métodos de aproximación, como si los resultados son solo aproximaciones.

Obviamente, las técnicas que modelan los cables estáticos, conductores de fase, torres, etc., darán en detalle la mejor evaluación del factor de división de corriente  $S_f$ . Sin embargo, los métodos de aproximación que se discutieron en los párrafos anteriores se han comparado con los métodos detallados y se encontraron respuestas que se pueden comparar con muchos ejemplos sencillos. Así, la elección del método que se utilizó para determinar  $S_f$  dependerá de la complejidad del sistema que se conecta a la subestación y el grado de precisión que se desea.

### 15.10 El efecto de la asimetría.

En el diseño de una rejilla de aterrizaje se debe considerar la corriente asimétrica. Un factor de decremento,  $D_f$ , se derivará para tomar en cuenta el efecto de la compensación de CD (dc offset). En general, la corriente asimétrica de falla incluye los subtransientes, transientes y componentes de estado estable de CA y la componente de la compensación de CD. Ambos componentes de CA transientes y subtransientes como el componente de compensación de CD decaen exponencialmente, teniendo cada uno un porcentaje diferente de atenuación.

Sin embargo, para aplicaciones comunes de este manual, se asume que la componente de CA no decae con el tiempo, sino permanece en su valor inicial. Así, como una función periódica del tiempo,  $t$ , la corriente asimétrica de falla se expresa de la siguiente forma:

$$i_f(t) = \sqrt{2}(E)(Y_{ac}) \left[ \sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{\frac{-t}{T_a}} (\sin(\alpha - \theta)) \right] \quad (74)$$

Donde:

- $i_f(t)$  es el valor de la corriente asimétrica de falla, en amperios , en cualquier instante t, donde t esta en segundos.
- $E$  es el voltaje rms de la prefalla en voltios, línea a neutro.
- $\omega$  es la frecuencia del sistema en radianes / segundos.
- $\alpha$  es el ángulo del voltaje de la corriente de iniciación en radianes.
- $\theta$  es el ángulo de fase del circuito en radianes.
- $Y_{ac}$  es la admitancia del sistema equivalente de CA en mhos.
- $T_a$  es el valor de la constante de tiempo de la compensación de CD en segundos [ $T_a = X \div (\omega R), 60hz; T_a = X \div (120\pi R)$ ]

La relación X/R que se utiliza, es la porción X/R del sistema en el lugar de la falla para un tipo de falla dado. Las componentes X y R de la impedancia de falla del sistema subtransiente deben utilizarse para determinar la porción de X/R.

En la realidad, las fallas ocurren rara vez con respecto a las ondas de voltaje. Sin embargo, la descarga al contacto existe en el momento que inicia la falla. De aquí que, para permitir las condiciones más severas, es necesario asumir que la compensación máxima de CD posible se presenta en el momento de una descarga accidental.

La compensación máxima ocurre cuando  $(\alpha - \theta) = -\pi/2$

Entonces la ecuación (74) cambia a la siguiente ecuación:

$$i_f = \sqrt{2E(Y_{ac})} \left[ e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos(\omega t) \right] \quad (75)$$

Ya que, los datos experimentales en el umbral de fibrilación se basan en el contenido de energía de una onda seno simétrica de amplitud constante, es necesario establecer un valor rms equivalente de la onda de corriente asimétrica para el tiempo máximo de exposición posible a la descarga. Este valor, de acuerdo con la definición de la corriente asimétrica de falla efectiva  $I_F$ , puede determinarse por la integración de la ecuación (75).

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (76)$$

Donde

$I_F$  es el valor rms efectivo de la corriente asimétrica de aproximación para duración total de la falla en amperios.

$t_f$  es el tiempo de duración de la falla en segundos.

$t$  es el tiempo (variable) después de la iniciación de la falla en segundos.

Al evaluar la integral de la ecuación (76) en términos de la ecuación (75), obtenemos.

$$I_F = i_f \sqrt{\frac{2}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (77)$$

Por lo tanto, el factor de decremento  $D_f$  se determina por la relación  $I_F / I_f$ , dando lugar a:

$$D_f = (I_F) / (I_f) \quad (78)$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left( 1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right)} \quad (79)$$

La ecuación (79) se puede utilizar para calcular el factor de decremento para las relaciones específicas de X/R y las duraciones de falla. Los valores comunes del factor de decremento para diferentes duraciones de fallas y relaciones X/R se muestran en la tabla 10.

Para duraciones de fallas relativamente grandes, el efecto de la compensación de cd se puede asumir que esta más que compensado por la disminución de la componente subtransitoria de ca. Un factor de decremento de 1.0 se puede utilizar para duraciones de fallas de 30 ciclos o más.

Para descargas sucesivas a intervalos pequeños (posiblemente en los recierres) se sugiere calcular un factor de decremento utilizando la duración de falla más pequeña, aunque el tiempo,  $t_f$ , utilizado en otros cálculos se base en la suma de la duración individual de descarga. Sin embargo, la discusión anterior del factor de decremento de la corriente asimétrica de falla sugiere que se utilice la duración de falla más corta en conjunto con la duración de la descarga más grande, o la suma de las duraciones de descarga, pueden resultar en un sistema de aterrizaje sobre diseñado. Esto es especialmente cierto para fallas de duración intermedia (que es, de 6 a 30 ciclos), donde el factor de decremento es relativamente grande y se asume la componente de corriente alterna para permanecer en su valor subtransitorio. Crawford y Griffith [B22] sugieren que la duración de la descarga y la duración de la falla se deben asumir iguales, la cual resultará en un diseño de rejilla suficiente para casos que involucran recierres no



automáticos o descargas sucesivas (alta velocidad). Sin embargo, debido a que se han hecho o no pequeñas pruebas en los efectos de las descargas sucesivas separadas por unos pocos ciclos, el ingeniero de diseño debe juzgar si se debe utilizar o no la duración de descarga más grande para un tiempo  $t_s$  en otros cálculos y, la duración de la falla más corta para un tiempo  $t_f$  para calcular el factor de decremento con la ecuación (79).

Es importante que los valores del factor de decremento que se muestran en la tabla 10 no se confundan con los factores de multiplicación. El factor de decremento es  $D_f$  y se utiliza para determinar la corriente efectiva durante un intervalo de tiempo determinado después del inicio de una falla, mientras que los factores de multiplicación se utilizan para determinar la corriente rms al final de este intervalo. Ya que de la disminución de las componentes transitorias de ca y cd con el tiempo, los factores de decremento que se determinaron por medio de la ecuación (79) son un poco más altas que los factores para la fallas y duraciones de descarga cortas.

**Tabla 10.- Valores típicos de  $D_f$ .**

| Duración de la falla, $t_f$ |                | Factor de decremento, $D_f$ |        |        |        |
|-----------------------------|----------------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Segundos                    | Ciclos a 60 Hz | X/R=10                      | X/R=20 | X/R=30 | X/R=40 |
| 0.00833                     | 0.5            | 1.576                       | 1.648  | 1.675  | 1.688  |
| 0.05                        | 3              | 1.232                       | 1.378  | 1.462  | 1.515  |
| 0.10                        | 6              | 1.125                       | 1.232  | 1.316  | 1.378  |
| 0.20                        | 12             | 1.064                       | 1.125  | 1.181  | 1.232  |
| 0.30                        | 18             | 1.043                       | 1.085  | 1.125  | 1.163  |
| 0.40                        | 24             | 1.033                       | 1.064  | 1.095  | 1.125  |
| 0.50                        | 30             | 1.026                       | 1.052  | 1.077  | 1.101  |
| 0.75                        | 45             | 1.018                       | 1.035  | 1.052  | 1.068  |
| 1.00                        | 60             | 1.013                       | 1.026  | 1.039  | 1.052  |

### **15.11 El efecto de cambios futuros.**

Es una práctica común en ciertos lugares, para corrientes máximas de falla incrementar la capacidad del sistema agregando o haciendo nuevas conexiones a la rejilla. Mientras, un aumento en la capacidad del sistema incrementará la corriente máxima de falla que se desea  $I_F$ , nuevas conexiones pueden aumentar o disminuir la corriente máxima de rejilla  $I_G$ . Un caso en el cual la corriente de rejilla puede disminuir con las nuevas conexiones es cuando se añaden nuevas líneas de transmisión con cables de aterrizaje, neutros o ambos. En general, si no se incluye un margen para el aumento de  $I_G$  en el diseño original del sistema de aterrizaje, el diseño puede llegar a ser peligroso. También, adiciones subsecuentes serán comúnmente mucho menos convenientes y más caras. Esta práctica se ha aceptado ampliamente para asumir la corriente de falla total,  $I_F$ , entre la rejilla y los alrededores del planeta (ignorando cualquier división de corriente) en un intento para permitir el incremento del sistema. Mientras, esta suposición sea excesivamente pesimista para condiciones del presente año, este no debe exceder la corriente  $I_G$  que se calculó, considerando la división de corriente y el incremento del sistema. Si el incremento del sistema se toma en cuenta y se ignora la división de corriente, el resultado será una rejilla sobre diseñada. Un estimado de las condiciones futuras del sistema se obtiene al incluir todas las adiciones del sistema que se han pronosticado.

Se debe tener precaución cuando cambios futuros involucren cambios del diseño, como la desconexión de los cables de guarda que llegan a las subestaciones. Tales cambios pueden tener un efecto en las corrientes de falla a tierra y pueden resultar en un sistema de aterrizaje inadecuado. Sin embargo, los cambios futuros como la adición de cables de guarda que llegue a la subestación, pueden disminuir la relación de la división de corriente, lo que resultaría en la existencia de un sistema de aterrizaje sobre diseñado.

## **16. DISEÑO DEL SISTEMA DE ATERRIZAJE**

### **16.1 Criterios de diseño.**

Como se mencionó en el Problema básico de la seguridad en el aterrizaje, existen dos objetivos fundamentales que se deben lograr en el diseño de cualquier sistema de tierra en una subestación tanto en condiciones normales como de falla. Estos objetivos son:

- a) Proporcionar medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de los equipos.
- b) Asegurarse que cualquier persona en las cercanías de las instalaciones aterrizadas no se exponga al peligro de un golpe eléctrico.

Los procedimientos de diseño que se describen en las siguientes sub-cláusulas están dirigidos para lograr la protección de los voltajes peligrosos de toque y de paso dentro de una subestación. Se indicó en las situaciones típicas de choque (Cáp. 8.2) que para potenciales transferidos, es posible exceder el GPR de una subestación durante las condiciones de falla. En las áreas especiales de interés (Cáp. 17) se analiza algunos de los métodos que se utilizaron para proteger personas y equipos de estos potenciales transferidos. De esta manera, el procedimiento de diseño descrito acá se basa en asegurar la seguridad ante voltajes de paso y de toque peligrosos dentro e inmediatamente fuera del cerco de la subestación. Debido a que el voltaje de malla es, normalmente, el peor voltaje de toque posible dentro de la subestación (excluyendo potenciales transferidos), éste se utilizará como la base del procedimiento de diseño.

Los voltajes de paso son inherentemente menos peligrosos que los voltajes de malla. Sin embargo, si la seguridad dentro del área aterrizada se logra con la ayuda de una capa superficial de alta resistividad (material superficial), la cual no se extienda fuera de la cerca, entonces los voltajes de paso pueden ser peligrosos. En cualquier caso, el voltaje de paso que se calculó se debe comparar con el voltaje de paso permisible después de diseñarse la rejilla satisfaciendo el criterio del voltaje de toque.

Para rejillas de aterrizaje igualmente espaciadas, el voltaje de malla se incrementará a lo largo de las mallas desde el centro hasta la esquina de la rejilla. El rango de este incremento dependerá del tamaño de la rejilla, número y localización de las barras de tierra, el espacio de los conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores, y la resistividad del contorno del suelo. En el estudio de tres rejillas típicas de aterrizaje en un suelo con resistividad uniforme, se obtuvieron los valores de la tabla 11. A estas rejillas se les dio una forma simétrica cuadrada, sin barras de aterrizaje e igual espaciamiento entre conductores paralelos. La esquina  $E_m$  fue calculada en el centro de la esquina de la malla. El peor caso sucede cuando  $E_m$  está un poco fuera del centro (hacia la esquina de la rejilla), pero es solamente un poco más alto que  $E_m$  al centro de la malla.

Como se indica en la tabla 11, el voltaje de la esquina de la malla es mucho más alto que el del centro de ella. Eso será cierto al menos que la rejilla sea asimétrica (con salientes, en forma “L”, etc.), tenga barras de aterrizaje que se ubican en o cerca de su perímetro, o tenga espaciamientos completamente no uniformes entre conductores. De cualquier manera, en la ecuación para el voltaje de malla  $E_m$  que se darán en el cálculo de los voltajes máximo de malla y de paso (Cáp. 16.5), solamente se utiliza como base para el procedimiento de diseño, el voltaje de malla al centro de la esquina de la malla. Algunos análisis que se basan en programas de computadora, que se describen en “El uso del análisis de computadora en el diseño de rejilla” (Cáp. 16.8), se puede utilizar este valor aproximado de voltaje de malla en la esquina; el valor real del voltaje de malla en las esquinas, o el valor real del peor caso de voltaje de toque

encontrado en cualquier lugar dentro del área aterrizada como base del procedimiento de diseño. En cualquier caso, el criterio inicial para un diseño seguro es limitar la malla que se calculó o el voltaje de toque para bajar el voltaje de toque tolerable de la ecuación (32) o la ecuación (33).

A menos que se especifique de otra manera, el resto de este manual utilizará el término voltaje de malla ( $E_m$ ) para designar el voltaje de toque al centro de la esquina de la malla. De cualquier manera, el voltaje de malla puede no ser el peor caso de voltaje de toque, si las barras de tierra se encuentran localizadas cerca del perímetro, o si el espaciamiento de la malla cerca de perímetro es pequeño. En estos casos, el voltaje de toque en la esquina de la rejilla puede sobrepasar el voltaje de malla de la esquina.

**Tabla 11 – Relación típica de voltaje de malla de esquina a esquina**

| Numero de Rejilla | Número de Mallas | $E_m$ esquina/centro |
|-------------------|------------------|----------------------|
| 1                 | 10 x 10          | 2.71                 |
| 2                 | 20 x 20          | 5.55                 |
| 3                 | 30 x 30          | 8.85                 |

## 16.2 Parámetros Críticos.

Los siguientes parámetros sitio-dependientes se buscaron para tener un impacto considerable en el diseño de la rejilla: Corriente máxima de rejilla  $I_G$ , duración de la falla  $t_f$ , duración de la descarga  $t_s$ , resistividad del suelo  $\rho$ , resistividad del material de superficie ( $\rho_s$ ), y la geometría de la rejilla. Muchos parámetros definen la geometría de la rejilla, pero el área del sistema de aterrizaje, el espaciamiento del conductor, y la profundidad de la rejilla de tierra son los que tienen mayor impacto en el voltaje de malla, mientras los parámetros como el diámetro del conductor y el espesor del material superficial tienen menor impacto. (Dawalibi, Bauchard y Mukhedkar [B45]; Dawalibi y Mukhedkar [B43]).

### 16.2.1 Corriente máxima de rejilla ( $I_G$ )

La evaluación del valor máximo de diseño de una corriente de falla a tierra que fluye dentro de la Tierra a través del aterrizamiento de la subestación,  $I_G$ , se trató en el Cap. 15 “Determinación de la corriente máxima de rejilla”. Para determinar la corriente máxima  $I_G$ , por medio de la ecuación (64) debemos tener en cuenta la resistencia de la rejilla de aterrizaje, la división de la corriente de falla a tierra entre las diferentes trayectorias de retorno y la rejilla, y el factor de decremento.

### **16.2.2 Duración de la falla ( $t_f$ ) y duración de la descarga ( $t_s$ )**

La duración de la falla y la duración de la descarga se asumen normalmente iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de descargas sucesivas, tal como los recierres. La selección de  $t_f$  debe reflejar un tiempo rápido de limpieza para subestaciones de transmisión y tiempos de limpieza lentos para subestaciones de distribución e industriales. La selección de  $t_f$  y  $t_s$  resultan en la combinación más pesimista del factor de decremento de corriente de falla y la corriente permisible por el cuerpo humano. Los rangos más comunes para  $t_f$  y  $t_s$  están entre 0.25 seg a 1.0 seg.

### **16.2.3 Resistividad del suelo ( $\rho$ )**

La resistencia de la rejilla y el gradiente de voltaje dentro de una subestación son directamente dependientes de la resistividad del suelo. Debido a que en realidad la resistividad del suelo varía tanto horizontalmente como verticalmente, debemos reunir suficiente información del área de la subestación. De acuerdo a las mediciones de la resistividad (Cap. 13.3) el método de Wenner es el más ampliamente utilizado.

Debido a que las ecuaciones para  $E_m$  y  $E_s$  proporcionadas en el Cap. 16.5 “Calculo de los voltajes de escalón máximo y de malla” asumen un suelo con resistividad uniforme, estas pueden emplear solamente un único valor para la resistividad.

### **16.2.4 Resistividad de la capa superficial ( $\rho_s$ )**

Una capa de material superficial ayuda a limitar la corriente corporal añadiendo resistencia a la resistencia corporal equivalente.

### **16.2.5 Geometría de la rejilla.**

En general, la limitación de los parámetros físicos de una rejilla de tierra se basa en las limitantes económicas y físicas de la instalación. La limitación económica es obvia. Es impráctico instalar una placa de cobre como sistema de aterrizaje. Entre las limitaciones que se encuentran en la instalación de una rejilla podemos mencionar por ejemplo cuando se excavan las zanjas en las cuales se pondrá el conductor, se limita el espacio del mismo a aproximadamente 2 metros o más. Los rangos comunes para el espaciamiento de los conductores es de 3 a 15 metros, mientras el rango de profundidad promedio de la rejilla son de 0.5 a 1.5 metros. El voltaje de malla tiene un efecto insignificante para los conductores que se encuentran entre 2/0 AWG ( $67 \text{ mm}^2$ ) y 500 kcmil ( $253 \text{ mm}^2$ ). El área del sistema de aterrizaje es simplemente el factor geométrico más importante para determinar la resistencia de la rejilla. Entre más grande es el área aterrizada,

más baja será la resistencia de la rejilla, por lo tanto, el valor del GPR será menor.

### 16.3 Índice de parámetros de diseño.

La tabla 12 contiene un resumen de los parámetros de diseño utilizados en el procedimiento de diseño.

**Tabla 12 – Índice de parámetros de diseño**

| Símbolo       | Descripción                                                                                                                                         | Numero de capítulo |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $\rho$        | Resistividad del suelo $\Omega \cdot m$                                                                                                             | 13                 |
| $\rho_s$      | Resistividad del material superficial $\Omega \cdot m$                                                                                              | 7.4, 12.5          |
| $3I_0$        | Corriente de falla simétrica en una subestación para un conductor de tamaño A.                                                                      | 15.3               |
| $A$           | Área total rodeada por la rejilla de tierra. $m^2$                                                                                                  | 14.2               |
| $C_s$         | Factor de decremento de la capa superficial                                                                                                         | 7.4                |
| $d$           | Diámetro del conductor de la rejilla, m                                                                                                             | 16.5               |
| $D$           | Espaciamiento entre conductores paralelos, m                                                                                                        | 16.5               |
| $D_f$         | Factor de decremento para determinar $I_G$                                                                                                          | 15.1.4, 15.10      |
| $D_m$         | Distancia máxima entre dos puntos cualquiera de la rejilla, m                                                                                       | 16.5               |
| $E_m$         | Voltaje de malla al centro de la esquina de la malla por el método simplificado, V                                                                  | 16.5               |
| $E_s$         | Voltaje de paso entre un punto sobre la esquina exterior de la rejilla y un punto 1 m en diagonal fuera de la rejilla por el método simplificado, V | 16.5               |
| $E_{paso50}$  | Voltaje de paso tolerable por un humano de 50 Kg de peso, V                                                                                         | 8.3                |
| $E_{paso70}$  | Voltaje de paso tolerable por un humano de 70 Kg de peso, V                                                                                         | 8.3                |
| $E_{toque50}$ | Voltaje de toque tolerable por un humano de 50 Kg de peso, V                                                                                        | 8.3                |
| $E_{toque70}$ | Voltaje de toque tolerable por un humano de 70 Kg de peso, V                                                                                        | 8.3                |

**Tabla 12 – Índice de parámetros de diseño (continuación)**

| <b>Símbolo</b> | <b>Descripción</b>                                                                                                                        | <b>Numero de capítulo</b> |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| $H$            | Profundidad de los conductores de la rejilla                                                                                              | 14.2                      |
| $h_s$          | Espesor de la capa superficial, m                                                                                                         | 7.4                       |
| $I_G$          | Máxima corriente de rejilla que fluye entre la rejilla de aterrizaje y la tierra circundante (incluyen dc offset), A                      | 15.1.4                    |
| $I_g$          | Corriente simétrica de rejilla, A                                                                                                         | 15.1.6                    |
| $K$            | Factor de reflexión entre diferentes resistividades                                                                                       | 7.4                       |
| $K_h$          | Factor de ponderación correctivo que enfatiza el efecto de la profundidad de la rejilla, método simplificado                              | 16.5                      |
| $K_i$          | Factor de corrección para la geometría de la rejilla, método simplificado                                                                 | 16.5                      |
| $K_{ii}$       | Factor de ponderación correctivo que se ajusta por los efectos de los conductores internos en la esquina de la malla, método simplificado | 16.5                      |
| $K_m$          | Factor de espaciamento para el voltaje de malla, método simplificado                                                                      | 16.5                      |
| $K_s$          | Factor de espaciamento para el voltaje de malla, método simplificado                                                                      | 16.5                      |
| $L_v$          | Longitud total del conductor de la rejilla, m                                                                                             | 14.3                      |
| $L_M$          | Longitud efectiva de $L_v + L_R$ para el voltaje de malla, m                                                                              | 16.5                      |
| $L_R$          | Longitud total de las varillas de tierra, m                                                                                               | 16.5                      |
| $L_r$          | Longitud de la varilla de tierra en cada localización                                                                                     | 14.3, 16.5                |
| $L_s$          | Longitud efectiva de $L_v + L_R$ para voltaje de paso, m                                                                                  | 16.5                      |
| $L_T$          | Longitud efectiva total del conductor del sistema de aterrizaje, incluyendo rejilla y varillas de tierra                                  | 14.2                      |
| $L_x$          | Longitud máxima de los conductores de rejilla en dirección de x, m                                                                        | 16.5                      |

**Tabla 12 – Índice de parámetros de diseño (continuación)**

| <b>Símbolo</b> | <b>Descripción</b>                                                                     | <b>Numero de capítulo</b> |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| $L_y$          | Longitud máxima de los conductores de rejilla en dirección de y, m                     | 16.5                      |
| $n$            | Factor geométrico compuesto por los factores $n_a$ , $n_b$ , $n_c$ y $n_d$             | 16.5                      |
| $n_R$          | Número de varillas colocadas en el área A                                              | 16.5                      |
| $R_g$          | Resistencia del sistema de aterrizaje, $\Omega$                                        | 14.1 – 14.4               |
| $S_f$          | Factor de división de la corriente de falla (factor de separación)                     | 15.1.3                    |
| $t_c$          | Duración de la corriente de falla de acuerdo al calibre del conductor de aterrizaje, s | 11.3                      |
| $t_t$          | Duración de la corriente de falla para determinar el factor de decremento, s           | 15.10                     |
| $t_s$          | Duración de la descarga para determinar la corriente permitida por el cuerpo, s        | 5.2 – 6.3                 |

## 16.4 Procedimiento de diseño

El diagrama de bloques de la *figura 33*, ilustra la secuencia a seguir de los pasos de diseño de la rejilla de aterrizaje. Los parámetros que se muestran en el diagrama de bloques se identifican en la tabla 12. A continuación mostramos cada paso a seguir:

- **Paso 1:** El mapa apropiado y el plano general de la localización de la subestación nos deben dar un buen estimado del área a ser aterrizada. Un estudio de la resistividad del suelo, que se describe en la estructura del suelo y selección del modelo de suelo (Cáp. 13), determinará el perfil de la resistividad y el modelo de suelo que se necesite (esto es, modelo uniforme ó modelo de dos capas).
- **Paso 2:** El calibre del conductor se determina por las ecuaciones presentadas en los factores del tamaño de conductores (Cáp. 11.3). La corriente de falla  $3I_0$  debe ser la corriente máxima de falla esperada en un futuro, la cual será conducida por medio de cualquier conductor en el sistema de aterrizaje, y el tiempo,  $t_c$ , deberá reflejar el tiempo máximo de limpieza (incluyendo el respaldo ó protecciones).



- **Paso 3:** Los valores tolerables de toque y de paso se determinan por las ecuaciones que se proporcionaron en el criterio del voltaje tolerable (Cáp. 8.3 y 8.4). La selección del tiempo,  $t_s$ , se basa en el juicio del ingeniero de diseño, guiándose con los capítulos 5.2-6.3.
- **Paso 4:** En el diseño preliminar incluirá un lazo conductor que rodee toda el área que se aterrizará, además adecuar conductores cruzados para suministrar un acceso conveniente para el aterrizaje de los equipos, etc. Los estimados iniciales del espaciamiento entre conductores y ubicación de las varillas de aterrizaje se basan en la corriente  $I_G$  y el área a ser aterrizada.
- **Paso 5:** Los estimados de la resistencia preliminar del sistema de aterrizaje en suelo uniforme se determinará por las ecuaciones que se proporcionaron en los cálculos simplificados y las ecuaciones de Schwarz (Cáp. 14.2 y 14.3). Para el diseño final, es deseable tener estimaciones mucho más precisas. Un análisis computarizado que se basa en modelar los componentes del sistema de aterrizaje a detalle, puede calcular la resistencia con un alto grado de precisión, asumiendo que el modelo de suelo se escoja correctamente.
- **Paso 6:** La corriente  $I_G$  se determina por las ecuaciones que se proporcionan en la determinación de la corriente máxima de rejilla (Cáp. 15). Para prevenir un sobre diseño del sistema de aterrizaje se tomara en cuenta, para el diseño de la rejilla, solamente la porción de la corriente de falla,  $3I_0$ , que fluye desde la rejilla a una tierra remota. La corriente,  $I_G$ , debe, de cualquier manera, reflejar el peor tipo de falla y su localización, el factor de decremento, y cualquier expansión futura del mismo.
- **Paso 7:** Si el GPR del diseño preliminar está por debajo del voltaje de paso tolerable, no se necesitará un análisis adicional. Solamente será necesario dejar conductores adicionales para dar acceso a las terminales de aterrizaje de los equipos.
- **Paso 8:** Los cálculos de la malla y voltaje de paso para las rejillas, tal como se han diseñado, podrán estar terminados siguiendo las técnicas y el análisis para suelos uniformes que se describe en el capítulo 16.5 ó por medio de técnicas mas precisas de calculo, como se demostrara en el capítulo 16.8
- **Paso 9:** Si el voltaje de malla calculado está por debajo del voltaje de paso tolerado, el diseño pueda que este completo (ver paso 10). Si el voltaje de malla calculado es mayor que el voltaje de toque tolerable, el diseño preliminar deberá ser revisado (ver paso 11).
- **Paso 10:** Si el voltaje de paso y el voltaje de toque calculados están por debajo de los voltajes tolerables, el diseño requerirá solamente de ciertos

refinamientos requeridos para dar acceso a las terminales de aterrizaje de los equipos. Si no, el diseño preliminar se debe revisar (ver paso 11).

- **Paso 11:** Si se exceden los límites del voltaje de toque ó del voltaje de paso tolerables, se requerirá de una revisión del diseño de la rejilla. Esta revisión debe incluir pequeños espaciamentos entre conductores, electrodos de aterrizaje adicionales, etc. Se discutirá un poco mas acerca de la revisión del diseño de la rejilla para satisfacer los limites del voltaje de toque y de paso, en el capítulo 16.6.
- **Paso 12:** Antes de satisfacer los requerimientos del voltaje de toque y de paso, probablemente se requieran varillas de tierra y rejillas adicionales. Los conductores de rejilla adicionales probablemente se requieran si el diseño de rejilla no incluye conductores cerca del equipo a ser aterrizado. Las varillas de aterrizaje adicionales se pueden requerir en la base de los discriminadores de transitorios, transformadores de aislamiento, etc. El diseño final también se debe revisar para eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y los riesgos asociados para casos especiales que corresponden al tema.

## 16.5 Calculo de voltajes máximos de malla y de paso

En el EPRI TR-100622 se desarrollaron algoritmos para determinar la resistencia de la rejilla y los voltajes de toque y de paso de la malla. Estos algoritmos requerían de una gran capacidad de almacenamiento y eran difíciles de ejecutar y además muy caros, pero las mejoras en la solución de algoritmos y la proliferación de computadoras mucho mas poderosas han aliviado la mayoría de estos asuntos.

En algunos casos, no es económicamente justificable utilizar estos cálculos de algoritmos y además el diseñador podría no tener acceso a una computadora con las propiedades requeridas.

### 16.5.1 Voltaje de malla ( $E_m$ )

Los valores del voltaje de malla se obtienen como un producto del factor geométrico,  $K_m$ ; un factor correctivo,  $K_i$ , el cual toma en cuenta algunos de los errores que se introdujeron en las suposiciones hechas al derivar  $K_m$ ; la resistividad del suelo  $\rho$ ; y la corriente promedio en por unidad de la longitud efectiva del conductor del sistema de aterrizaje debidamente enterrado ( $I_G/L_m$ ).

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (80)$$

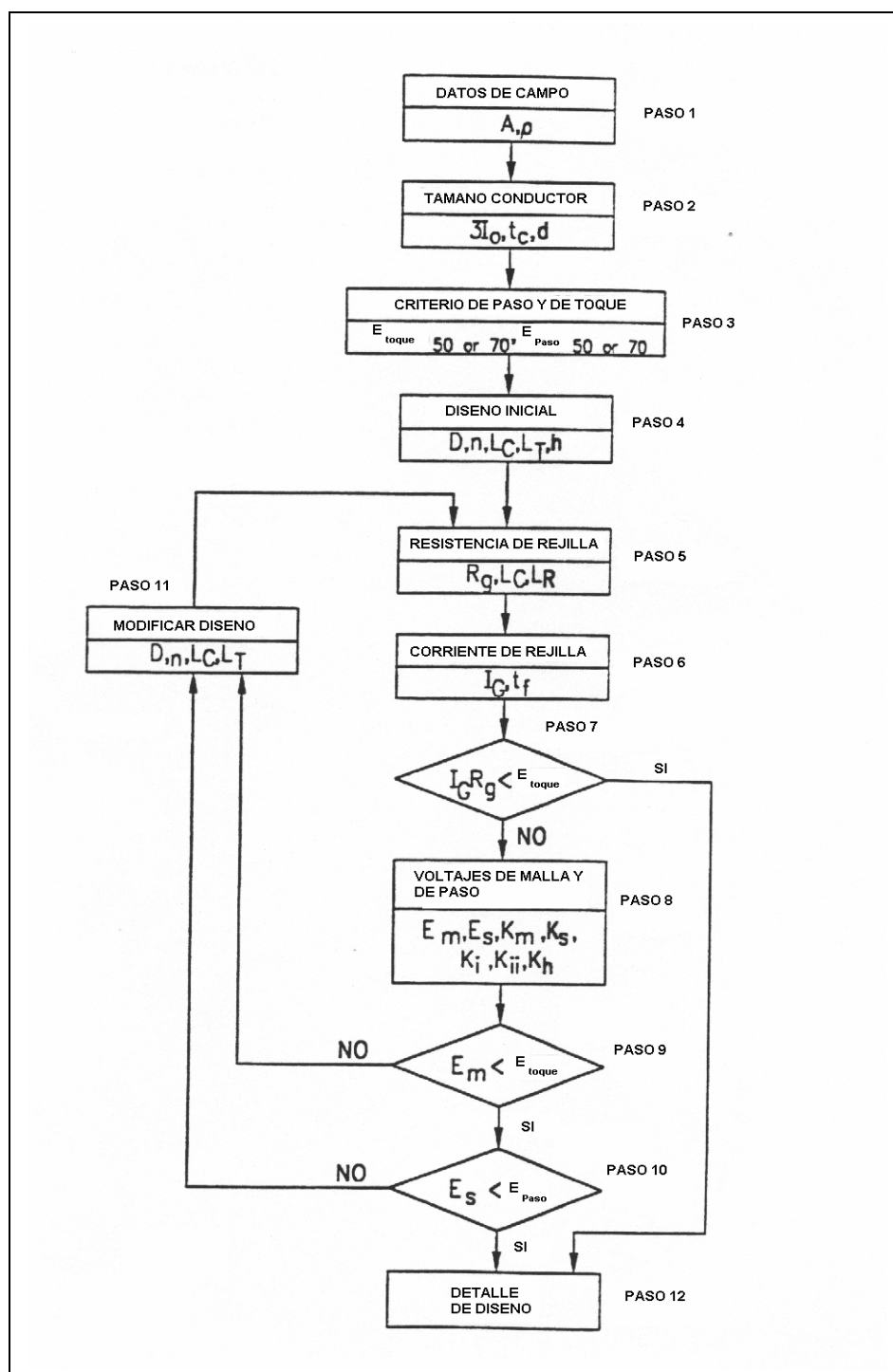


Figura 33- Diagrama de bloques del procedimiento de diseño.

El factor geométrico  $K_m$  se determina de la siguiente manera:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \ln \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \quad (81)$$

Para rejillas con varillas de aterrizaje a lo largo de su perímetro, o para rejillas con varillas de aterrizaje en sus esquinas, o ambos

$$K_{ii} = 1$$

Para rejillas sin varillas de aterrizaje o rejillas con pocas varillas de aterrizaje, ninguna de ellas se coloca en las esquinas o en el perímetro.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (82)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad h_o = 1 \text{ m (profundidad de referencia de la rejilla)} \quad (83)$$

El número efectivo de conductores paralelos en una rejilla dada,  $n$ , la cual se puede aplicar a rejillas de forma rectangular ó de forma irregular, representa el número de conductores paralelos en una rejilla rectangular equivalente.

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (84)$$

donde,

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \quad (85)$$

$n_b = 1$  para rejillas cuadradas

$n_c = 1$  para rejillas cuadradas y rectangulares

$n_d = 1$  para rejillas cuadradas, rectangulares y en forma de "L"

De otra forma

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (86)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} \quad (87)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (88)$$

$L_C$  es la longitud total del conductor en una rejilla horizontal en mt.

$L_P$  es la longitud perimetral de la rejilla en mt.

$A$  es el área de la rejilla en  $\text{mt}^2$ .

$L_x$  es la longitud máxima de la rejilla en la dirección de x, en mt.

$L_y$  es la longitud máxima de la rejilla en la dirección de y, en mt.

$D_m$  es la distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la rejilla

Y  $D$ ,  $h$  y  $d$  se definen en la tabla 12.

El factor de irregularidad,  $K_i$ , utilizado junto con el factor  $n$  anteriormente definido, es:

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (89)$$

Para rejillas sin varillas de aterrizaje o rejillas con tan solo algunas varillas dispersas a lo largo de la rejilla, pero ninguna colocada en las esquinas o sobre todo el perímetro de la rejilla, la longitud enterrada efectiva,  $L_m$ , es

$$L_M = L_C + L_R \quad (90)$$

donde,

$L_R$  es la longitud total de todas las varillas de aterrizaje en m

Para rejillas con varillas de aterrizaje en las esquinas, así como a lo largo de su perímetro y sobre toda la rejilla, la longitud enterrada efectiva,  $L_M$ , es

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (91)$$

donde,

$L_r$  es la longitud de cada varilla de aterrizaje en m

### 16.5.2 Voltaje de paso ( $E_s$ )

Los valores de voltaje de paso se obtienen como producto del factor geométrico,  $K_s$ ; el factor correctivo,  $K_i$ ; la resistividad del suelo,  $\rho$ ; y la corriente promedio en por unidad de la longitud del conductor del sistema de aterrizaje enterrado ( $I_G/L_s$ ).

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (92)$$

Para rejillas con o sin varillas de aterrizaje, la longitud enterrada efectiva,  $L_s$ , es

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \quad (93)$$

Se asume que ocurre el máximo voltaje de paso a una distancia arriba de 1 metro, comenzando y extendiéndose fuera del perímetro del conductor en el ángulo que divide la parte extrema de la esquina de la rejilla.  $K_s$  se define como sigue para una profundidad de enterramiento de  $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (94)$$

### 16.6 Refinamiento del diseño preliminar

Si los cálculos que se basan en el diseño preliminar indican que pueden existir peligrosas diferencias de potencial dentro de la subestación, debemos estudiar los siguientes remedios posibles y aplicarlos en donde sea necesario:

- a) *Decremento total de la resistencia de la rejilla:* Un decremento en la resistencia total de una rejilla hará que disminuya el valor máximo de GPR, y de aquí, el valor máximo de voltaje de transferencia. El método más efectivo para disminuir la resistencia de una rejilla de aterrizaje es incrementar el área ocupada por la rejilla. Pueden utilizarse pozos ó varillas colocadas a gran profundidad si el área disponible es limitada y las varillas penetran las capas de suelo con poca resistividad. Un decremento en la resistencia de la subestación podría o no disminuir apreciablemente los gradientes del lugar, dependiendo del método que se utilice.
- b) *Los espaciamientos pequeños en la rejilla:* Utilizando un espaciamiento pequeño entre los conductores de la rejilla, podemos aprovechar la condición de una placa continua. Los potenciales peligrosos dentro de la subestación pueden eliminarse de esta manera. El problema en el perímetro puede ser

más dificultoso, especialmente en subestaciones pequeñas en donde la resistividad es muy alta. De cualquier manera, enterrando los conductores de la rejilla fuera de la línea de la cerca, es posible que los gradientes de paso inmediatamente fuera del perímetro de la rejilla no contribuyan a contactos de toque más peligrosos. Otra forma efectiva y económica para controlar gradientes es incrementar la densidad de las varillas de aterrizaje en el perímetro. La densidad puede disminuir hacia el centro de la rejilla. Otra propuesta para controlar los gradientes en el perímetro y los potenciales de paso, es enterrando dos o más conductores paralelos alrededor del perímetro a una profundidad sucesiva como a la distancia que se extiende la subestación. Otra propuesta es variar la separación de los conductores de la rejilla con conductores más cercanos cerca del perímetro.

- c) *Desviar una gran parte de la corriente de falla a otras trayectorias:* parte de la corriente de falla se desviará de la rejilla conectando cables de guarda de las líneas de transmisión o disminuyendo la resistencia de los cimientos de la torre en las cercanías de la subestación. En relación a la última, de cualquier manera, se debería probar el efecto de los gradientes de falla cerca de los cimientos.
- d) *Limitar la corriente de falla total:* Si es viable, limitar el total de la corriente de falla (por medio de protecciones), disminuirá el GPR y todos los gradientes en proporción. Otros factores, sin embargo, hacen esto impráctico. Además, si se lleva a cabo a costa del tiempo de limpieza grande de una falla, el peligro puede incrementar en vez de disminuir.
- e) *Restringir accesos a áreas limitadas:* Restringir accesos a ciertas áreas, donde sea práctico, reducirá la probabilidad de riesgo al personal.

## 16.7 Aplicación de la ecuación para $E_m$ y $E_s$

Varias suposiciones simplificadas se hacen para derivar las ecuaciones para  $E_m$  y  $E_s$ . Las ecuaciones se compararon con los resultados más exactos de casos con rejillas de diferentes formas, tamaños de mallas, número y tamaños de varillas de aterrizaje, y se encontró que es más consistente que las ecuaciones anteriores. Estos casos incluyen rejillas cuadradas, rectangulares, triangulares, en forma de "T" y en forma de "L"; además se hicieron con y sin varillas de aterrizaje. La longitud total de la barras de aterrizaje variaron con diferentes barras colocadas y sus diferentes longitudes. El área de las rejillas varió de  $6.25\text{m}^2$  a  $10,000\text{ m}^2$ . El número de mallas a lo largo de uno de los lados varió de 1 a 40. El tamaño de la malla varió de 2.5 m a 22.5 m. En todos los casos se asumió un modelo de suelo uniforme y una separación entre conductores uniforme. Se consideraron los ejemplos más prácticos en el diseño de las rejillas. En la comparación se encontró que la ecuación resultó con una precisión aceptable.

### **16.8 Uso de análisis computarizado en el diseño de la rejilla.**

Dawalibi y Mukhedkar describen un cálculo de algoritmos para hacer un modelo del sistema de aterrizaje. En general, estos algoritmos se basan en:

- a) Modelar los componentes individuales que comprenden el sistema de aterrizaje (conductores de la rejilla, varillas de aterrizaje, etc.)
- b) Establecer un conjunto de ecuaciones que definan la interacción de esos componentes.
- c) Determinar la corriente de falla a tierra que fluye en cada componente dentro de la Tierra.
- d) Calcular el potencial en cualquier punto de la superficie debido a cualquier componente individual.

La precisión del cálculo de algoritmos depende en que tan bien el modelo de suelo y cualquier cambio físico reflejan las condiciones actuales del terreno.

Existen muchas razones importantes que justifican el uso de cálculos de algoritmos más exactos en el diseño de sistemas de aterrizaje, entre estas razones están:

- a) Parámetros que exceden las limitaciones de las ecuaciones.
- b) Es preferible un modelo de suelo de dos o múltiples capas debido a variaciones significativas en la resistividad del suelo.
- c) cuando no se pueden analizar conductores de rejilla irregulares o la separación entre las varillas de aterrizaje utilizando el método presentado en el capítulo 16.5.
- d) Más flexibilidad para determinar los puntos de peligro en el lugar.
- e) La presencia de estructuras metálicas enterradas o conductores no conectados al sistema de aterrizaje, los cuales dan complejidad al sistema.



## **17. AREAS ESPECIALES DE INTERES.**

Antes de completar los cálculos finales de la rejilla de aterrizaje, aun nos resta la tarea importante de investigar las posibles áreas especiales de interés que conciernen a la red de aterrizaje de la subestación. Esto incluye una investigación de las técnicas de aterrizaje para la cerca de la subestación, operación de los ejes de interruptores, carriles, tuberías y pantallas de cables. También se deben considerar los efectos de los potenciales de transferencia.

### **17.1 Áreas de servicio.**

Muchos de los problemas relacionados a la exposición de una persona a los voltajes de toque y de paso fuera de la cerca de una subestación son los mismos que ocurren a las personas dentro de las áreas cercadas de una subestación.

En ocasiones, una cerca se instala para encerrar una área mucho más grande que la utilizada inicialmente en una subestación y una rejilla de aterrizaje se construye solamente en el área utilizada y a lo largo de la cerca de la subestación. Las áreas desprotegidas restantes dentro del área de la cerca se usan frecuentemente como almacenaje, estacionamiento, o áreas de servicio generales. Los potenciales de paso y de toque se deben verificar para determinar si son necesarios aterrizajes adicionales.

Una subestación de rejilla reducida, la cual no incluye el área de servicio, tiene las ventajas iniciales del costo y ahorros futuros como resultado de no tener los problemas asociados con “trabajando alrededor” un sistema de rejilla anteriormente instalado en el área total cuando se requieran ampliaciones futuras en el área de servicio. Sin embargo, una rejilla reducida proporciona una protección menor para el personal comparada con una subestación de rejilla completa, la cual incluye el área de servicio. También, debido al área pequeña y conductores de menor longitud, una rejilla del área de servicio y una subestación de rejilla reducida tendrá una resistencia total mayor comparada con una subestación de rejilla completa, la cual incluye el área de servicio.

### **17.2 Aterrizaje del eje del interruptor y la manivela de operación.**

Las manivelas de operación de los interruptores representan una importancia significativa si las manivelas no son adecuadamente aterrizadas. Debido a que la operación manual de un interruptor requiere la presencia de un operador cerca de una estructura aterrizada, podrían ocurrir varias cosas que resultan en una falla hacia la estructura, sometiendo de esta manera al operador a un golpe eléctrico. Esto incluye la apertura de un circuito energizado, falla mecánica, ruptura eléctrica del aislador de un interruptor o intentar evitar una corriente con

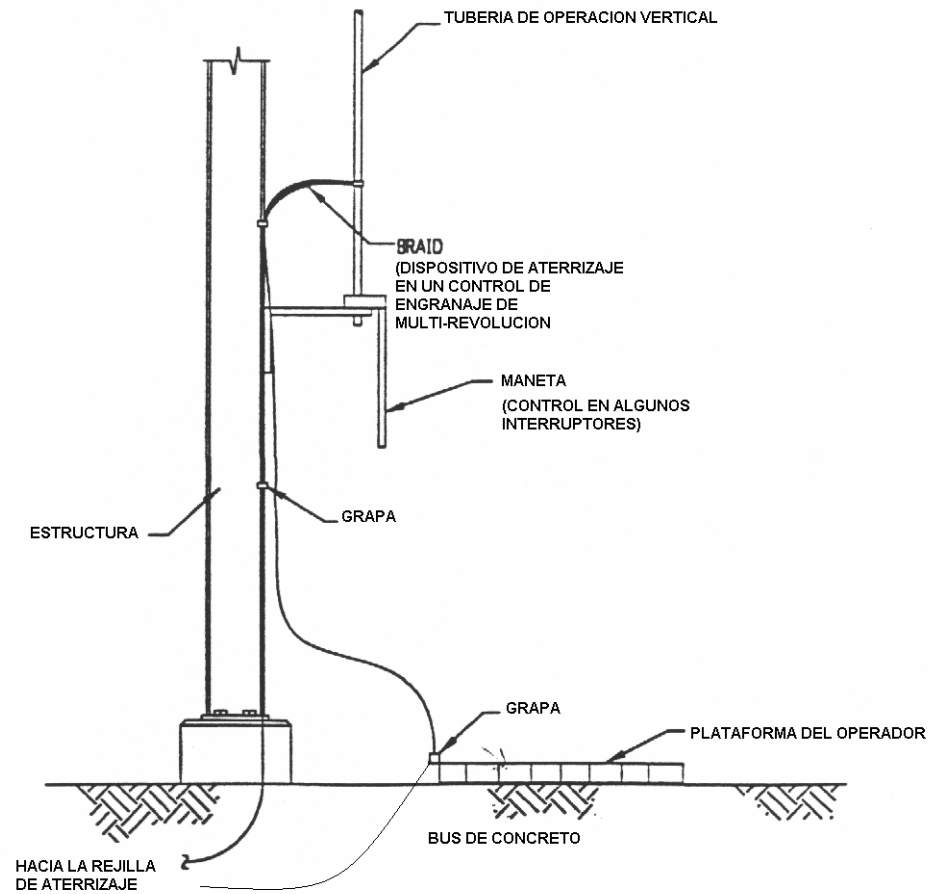
un valor mayor de corriente de línea-carga o la corriente magnetizante del transformador que el interruptor puede interrumpir con toda seguridad.

Es relativamente fácil proteger contra estos peligros cuando la manivela de operación se encuentra dentro de un área razonablemente extensa de la rejilla de aterrizaje de la subestación. Si el sistema de aterrizaje se ha diseñado de acuerdo con este manual, los voltajes de toque y de paso cerca de la manivela de operación se deben encontrar dentro de los límites de seguridad. Sin embargo, muchas veces se toman medidas adicionales para proporcionar un factor de seguridad mayor para el operador. Por ejemplo, el eje de operación del interruptor se puede conectar a una plataforma de aterrizaje (como se discutió anteriormente) en la cual el operador se pueda parar al manipular el interruptor. La plataforma de aterrizaje se conecta directamente a la rejilla de tierra y al eje de operación del interruptor. Esta técnica proporciona un puente directo a tierra a través de la persona que opera el interruptor. La trayectoria del aterrizaje del eje del interruptor a la rejilla de aterrizaje se debe calcular adecuadamente para transportar la corriente de falla a tierra para la duración requerida. Ver la *figura 34* para apreciar una practica de aterrizaje característica de un eje de interruptor.

Las practicas para el aterrizaje de los ejes de operación de interruptores son variados. Los resultados de una encuesta publicada en 1985 indicaron que 78 de cada 79 compañías respondieron que es necesario el aterrizaje de los ejes de operación de interruptores aéreos de una subestación a la rejilla de aterrizaje. La metodología para lograr este aterrizaje fue casi igualmente dividida entre las respuestas de la encuesta. Aproximadamente la mitad de las compañías utilizaron un cable de conexión directa entre el eje del interruptor y la placa de aterrizaje, mientras la otra mitad utilizó un cable de conexión del eje del interruptor a la estructura de acero aterrizada adyacente. El acero se usa como parte de la trayectoria conductora. Aproximadamente el 90% de las compañías utilizan un cable trenzado para el aterrizaje del eje del interruptor. El restante 10% utiliza un dispositivo braidless para el aterrizaje. Una típica braided ground se muestra en la *figura 34* y un mecanismo braidless para aterrizaje se muestra en la *figura 35*.

### **17.3 Aterrizaje de la cerca de la subestación.**

El aterrizaje de la cerca es de gran importancia ya que la cerca, normalmente, es accesible al público en general. El aterrizaje de la subestación se debe diseñar de manera que el potencial de toque en la cerca se encuentre dentro de los límites tolerables calculados para dicho potencial. El potencial de paso, normalmente, no es de interés en el perímetro de la cerca, pero se debe comprobar para verificar que no exista ningún problema.



**Figura 34 – Aterrizaje típico de un interruptor**

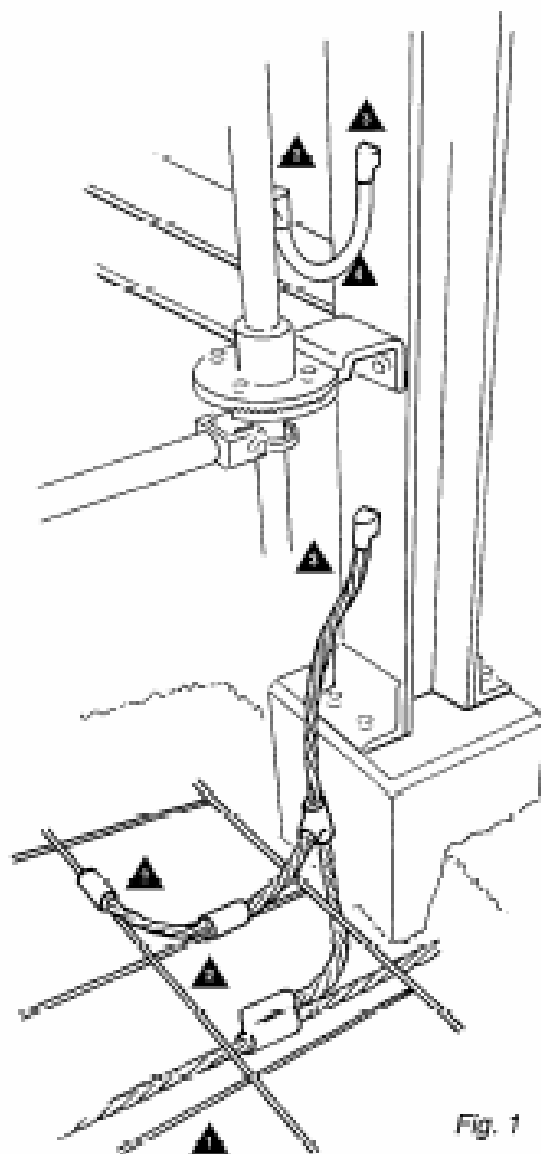


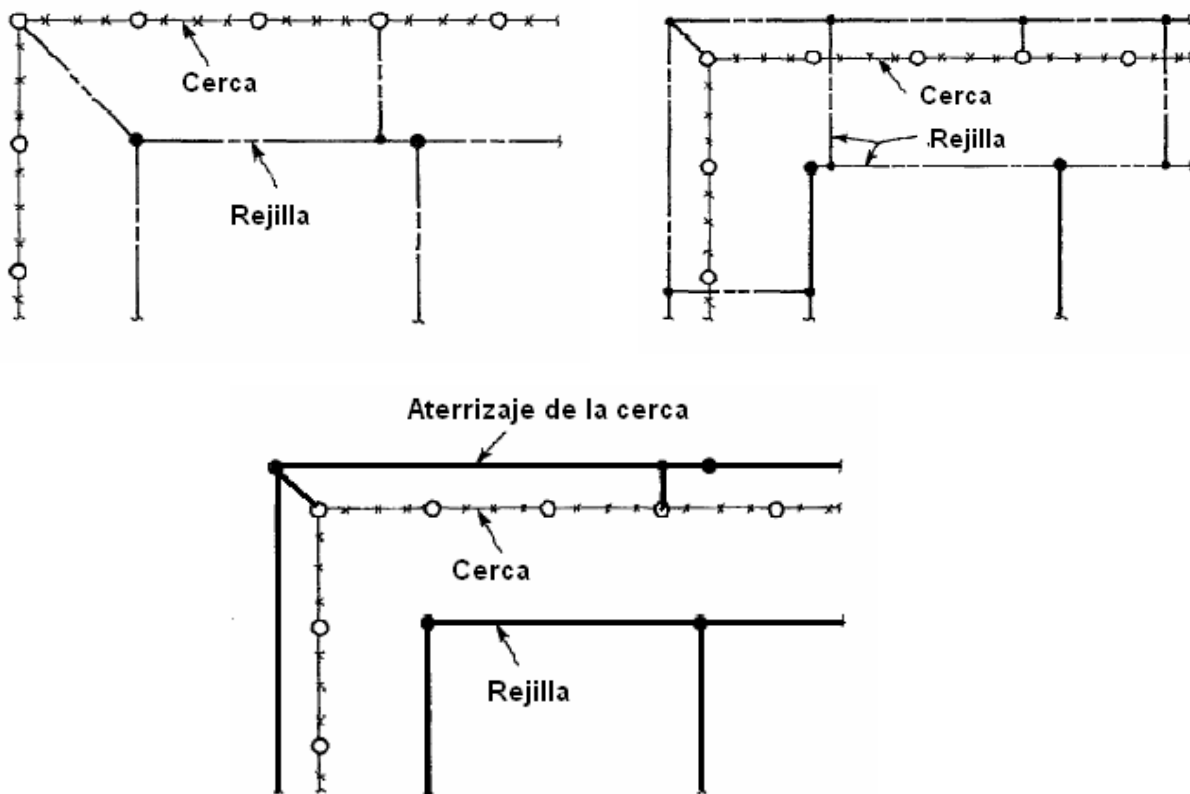
Fig. 1

**Figura 35 – Mecanismo Braidless**

Existen varias filosofías con respecto al aterrizaje de la cerca de una subestación. El Código Eléctrico Nacional de Seguridad (NESC, por sus siglas en ingles) exige el aterrizaje de las cercas de metal que suelen rodear las subestaciones de distribución eléctrica que tengan energizados los conductores o equipos eléctricos. Este requisito del aterrizaje de la cerca de metal se puede lograr uniéndolo eléctricamente a la rejilla de aterrizaje de la subestación

o a un conductor subterráneo separado por debajo o cercano a la línea de la cerca, usando los métodos descritos en el NESC. Las diferentes prácticas de aterrizaje de las cercas son:

- Que la cerca se encuentre dentro del área de la rejilla de tierra y se conecta a la rejilla de aterrizaje de la subestación (recomendado).
- Que la cerca se encuentre fuera del área de la rejilla de tierra y se conecta a la rejilla de aterrizaje de la subestación.
- Que la cerca se encuentre fuera del área de la rejilla de tierra, pero no se conecta a la rejilla de aterrizaje de la subestación. La cerca se conecta a un conductor de aterrizaje separado.
- Que la cerca se encuentre fuera del área de la rejilla de aterrizaje, pero no se conecta a la rejilla de tierra de la subestación. La cerca no se conecta a un conductor de aterrizaje separado. El contacto del poste de metal de la cerca a través del poste de concreto de la misma con la Tierra es confiable para un aterrizaje efectivo.



**Figura 36 – Practicas de aterrizaje de la cerca**

Si se siguen las últimas dos prácticas de aterrizaje de la cerca, es decir, si la cerca y sus aterrizajes asociadas no se acoplan de ninguna manera con la rejilla de tierra principal (excepto a través del suelo), entonces requieren consideración factores tres:

*¿La caída de una línea energizada en la cerca es un peligro que debemos considerar?*

Es común y fiable la construcción de líneas de transmisión sobre cercas privadas. El número de líneas que atraviesan una cerca de una subestación pueden ser muchos, pero los tramos frecuentemente son cortos y rematados en uno o ambos extremos. Por lo tanto, el peligro de la caída de una línea en una cerca normalmente no es de gran importancia. Si uno diseña contra este peligro, entonces, son necesarios los acoplamientos muy cercanos de la cerca a la tierra adyacente por toda. Los potenciales de toque y de paso en ambos lados de la cerca se deben, necesariamente, encontrar dentro del límite aceptable para una corriente de falla del mismo valor máximo como para las subestaciones. Esto es un poco impracticable ya que la cerca no se vincula a la rejilla de tierra principal en la subestación y la tierra adyacente sería requerida para disipar la corriente de falla a través del sistema de aterrizaje de la cerca local.

*¿Pueden existir potenciales peligrosos en la cerca durante otros tipos de fallas ya que la línea de la cerca atraviesa los contornos equipotenciales normales?*

Las cercas no siguen las líneas equipotenciales normales en la superficie de la tierra lo que resulta en una circulación de la corriente de falla hacia y desde la rejilla de aterrizaje de la subestación. Si el acoplamiento de la cerca a la tierra se basa solamente en el contacto entre los postes de la cerca y la Tierra circundante, la cerca pudiera, bajo una condición de falla, alcanzar el potencial de la tierra donde el acoplamiento fue relativamente bueno, y por esa razón alcanzar un voltaje alto con relación a la superficie de tierra adyacente en localizaciones donde el acoplamiento no fue tan bueno. La circulación de corriente en la Tierra y en la cerca, y el voltaje de toque posterior en la cerca es mucho menor del que resulta de la caída de una línea energizada en la cerca; sin embargo, se puede exceder el valor permisible del voltaje de toque y, por lo tanto, ser inseguro.

*¿En la práctica, puede el aislamiento metálico completo de la cerca y la rejilla de tierra de la subestación ser seguro siempre?*

Se puede suponer un aislamiento metálico completo de la cerca y la rejilla de tierra de la subestación, pero esto es poco práctico. Puede existir la posibilidad de una conexión eléctrica involuntaria entre la rejilla y las áreas de la cerca. Esta conexión eléctrica involuntaria se puede dar en conductos metálicos, cañerías de agua, etc. Estos artículos metálicos podrían transferir el potencial de la rejilla principal hacia la cerca y por lo tanto, pueden existir diferencias de potencial

peligrosos en la cerca durante una falla. Si la cerca no se acopla estrechamente con la tierra cercana con su propio sistema de tierra adecuado, entonces cualquier conexión involuntaria a la rejilla principal crearía un peligro a lo largo de toda la cerca bajo una condición de falla. Este peligro solamente se puede anular parcialmente utilizando uniones con aislamiento en la cerca a intervalos regulares. Sin embargo, esto no parece ser una solución práctica al peligro posible.

En lo concerniente al aterrizaje de cerca, diversas prácticas son seguidas por varias compañías. Algunas compañías aterrizan únicamente los postes de la cerca, usando varios tipos de conectores tal como se describe en otra parte de este manual. Otras compañías aterrizan los postes, estructura y los alambres con púas de la cerca. La rejilla de aterrizaje se debe extender para cubrir el recorrido de todas las puertas de la subestación. Los postes de las puertas se deben unir fijamente al poste de la cerca adyacente utilizando una conexión flexible

Para ilustrar el efecto del potencial de toque en diversas prácticas de aterrizaje de las cercas *figura 36*, se analizaron cinco ejemplos por medio de cálculos en computadora. Las técnicas analizadas para el aterrizaje de las cercas fueron:

- **Caso 1:** La inclusión de la cerca dentro del área de la rejilla de tierra. El cable de tierra externo está 0.91 metros (3 ft) fuera del perímetro de la cerca. La cerca se conecta a la rejilla de tierra.
- **Caso 2:** La rejilla de tierra y el perímetro de la cerca coinciden aproximadamente, el cable de tierra externo está justo junto al lado del perímetro de la cerca. La cerca se conecta a la rejilla de tierra.
- **Caso 3:** El cable externo de la rejilla de tierra está 0.91 metros (3 ft) dentro del perímetro de la cerca. La cerca se conecta a la rejilla de tierra.
- **Caso 4:** La rejilla de tierra está dentro del área de la cerca. El cable externo de la rejilla de tierra está 6.7 metros (22 ft) dentro del perímetro de la cerca. La cerca está conectada a la rejilla de tierra.
- **Caso 5:** La rejilla de tierra está dentro del área de la cerca. El cable externo de la rejilla de tierra está 6.7 metros (22 ft) dentro del perímetro de la cerca. La cerca está aterrizada localmente pero no se conecta a la rejilla de tierra.

El área a cercar para cada caso es un cuadrado que tiene lados de 43.9 metros (144 ft). Los cálculos de la prueba se basan en los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} H_s &= 0.076 \\ P &= 60 \\ I_g &= 5000 \\ R_s &= 3000 \\ R_g &= 0.66 \\ R_g &= 0.98 \\ T_s &= 0.5 \\ D_f &= 1.0 \end{aligned}$$

El factor  $C_s$  para reducir el valor nominal de resistividad de la capa superficial depende del espesor y la resistividad del material superficial y de la resistividad del suelo, y se calcula usando la ecuación (29) y la *figura 11*:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad K = \frac{60 - 3000}{60 + 3000} = 0.961$$

$$C_s = 0.62$$

Los voltajes de toque y de paso permisibles se calculan usando la ecuación (29) y la ecuación (32). Para los casos de prueba 1 – 5:

$$E_{\text{paso}50} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} = 1995 \text{ V}$$

$$E_{\text{toque}50} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} = 622 \text{ V}$$

El voltaje de paso actual  $E_s$  y el voltaje de malla actual  $E_m$  se calculan como una función del GPR en porcentaje, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$E_s = R_g \times I_g \frac{E_s(\%)}{100} D_f$$

$$E_m = R_g \times I_g \frac{E_m(\%)}{100} D_f$$

Donde:

**$E_s(\%)$** : es el potencial de paso en términos del porcentaje de GPR

**$E_m(\%)$** : son los potenciales de malla en términos del porcentaje de GPR



Al igualar las ecuaciones del voltaje de paso y de malla actual para los valores del voltaje de paso y de toque tolerable ( $E_{\text{paso}} = E_s$  y  $E_{\text{toque}} = E_m$ ) y resolverlo para  $E_s(\%)$  y  $E_m(\%)$ , las ecuaciones son:

$$E_s(\%) = \frac{E_{\text{paso}}(100)}{R_g \times I_g \times D_f}$$

$$E_m(\%) = \frac{E_{\text{paso}}(100)}{R_g \times I_g \times D_f}$$

Al sustituir los parámetros que se asumen para los casos de prueba, se obtiene lo siguiente:

Para los casos 1 – 4:

$$E_s(\%) = 60.5$$

$$E_m(\%) = 18.8$$

Para el caso 5:

$$E_s(\%) = 40.7$$

$$E_m(\%) = 12.7$$

Los voltajes actuales de paso y de malla como un porcentaje de GPR deben ser menores que el 60.5% y 18.8%, respectivamente, para los casos 1 – 4 y menores que 40.7% y 12.7%, respectivamente para el caso 5.

Para cada caso de prueba, dos perfiles de voltaje se analizaron en los siguientes lugares:

- Una línea paralela hacia la cerca y 0.91 metros (3 ft) fuera de la cerca.
- Una línea a través de la rejilla desde un lado al otro, paralela a los cables de la rejilla.

#### **17.4 Aterrizaje de pantalla de cable de control.**

Las pantallas de cable metálico, al no aterrizarlas efectivamente, pueden alcanzar voltajes peligrosos con respecto a tierra. Esos voltajes se producen por una falla en el aislamiento, a cargas debido a la inducción electrostática y el flujo de corrientes en la pantalla, o por el aumento de voltaje durante descargas de falla al sistema de tierra de la subestación, al cual se conectan las pantallas. Todas las conexiones de aterrizaje se deben blindar de tal forma que

proporcionen una conexión de baja resistencia permanente. El cable o abrazaderas que se usan para conectar el blindaje del cable de la conexión de tierra con la tierra permanente se debe calibrar para transportar la corriente de falla disponible.

La pantalla de los cables de corriente en conductores se pueden reducir al aterrizar solamente un extremo de las protecciones, cuando la longitud del cable no es excesiva. Para cables extensos, la pantalla se debe aterrizar en ambos extremos y en cada empalme.

Las pantallas de los cables de control blindados se deben aterrizar en ambos extremos para eliminar los potenciales inducidos. Si la pantalla de cable de control se aterriza en puntos muy distantes, durante las fallas los gradientes de potencial en la rejilla de tierra podrían causar el flujo de corrientes excesivas en la pantalla. Una solución es colocar un conductor separado, en paralelo con el cable de control que conecta los dos puntos de la pantalla a tierra. La corriente entonces se desviará fuera de la pantalla. Este conductor separado (normalmente de cobre desnudo) comúnmente se coloca a lo largo de la parte superior de la pared interna de la zanja en la cual está el cable ó sobre los conductores que se encuentran enterrados directamente.

Los cables sin blindaje están sujetos a voltajes inducidos transitorios con magnitudes de 190% o más que el voltaje inducido en cables con blindaje (Mitani [B109]). Los voltajes inducidos en los cables sin blindaje se pueden reducir hasta un 60% por medio del aterrizaje de ambos extremos de un cable sin utilizar. Los efectos de las corrientes de falla en las condiciones en cualquiera de estos arreglos de aterrizaje, solamente se pueden determinar por un análisis cuidadoso de cada caso específico.

### **17.5 Extensiones de barra de GIS.**

Un gran número de problemas exclusivos se encuentran en el aterrizaje de una GIS al compararla con las subestaciones convencionales. El aterrizaje del gabinete de metal del equipo de las GIS se puede convertir en una fuente de voltajes de toque peligrosos durante condiciones de falla. Referirse a las consideraciones especiales para subestaciones con aislamiento de gas (Capítulo 10).

### **17.6 Aterrizaje de apartarayos.**

Los apartarayos siempre se deben suministrar con una conexión confiable de baja resistencia a tierra. Los pararrayos se deben conectar lo más cerca posible a los terminales de los aparatos que se van a proteger y deben tener una

trayectoria corta y directa al sistema de aterrizaje. Mientras muchas compañías suministran cables de tierra separados para apatrrayos montados en estructuras de metal, otras compañías usan las estructuras en las cuales se montan los pararrayos como la trayectoria a tierra, debido a que la sección transversal de los miembros de acero proporciona una trayectoria de baja resistencia mejor que un cable de cobre de calibre normal. En estos casos es importante asegurar adecuadamente la conexión eléctrica desde la estructura hacia el cable de tierra del pararrayos y hacia la rejilla de tierra; también asegurar que el área de la sección transversal del acero sea la adecuada para la conductividad, y que no se introduzcan resistencias altas en las uniones debido a capas de pintura, oxidación, etc.

### **17.7 Tierras separadas.**

La práctica de tener tierras separadas dentro del área de una subestación se usa raramente por las siguientes razones:

- a) Se producen resistencias más altas (mayores) para separar la seguridad y sistemas de aterrizajes que sería el caso para un sistema único de aterrizaje uniforme.
- b) En el caso de fallas del aislamiento en la subestación, aún podrían circular altas corrientes en la tierra de seguridad.
- c) Debido a un alto grado de acoplamiento entre electrodos separados en la misma área, no se cumple el objetivo de mantener el GPR de las tierras de seguridad en valores aceptables para las fallas de líneas.
- d) Muchas veces potenciales peligrosos son posibles entre puntos de la tierra cercana, ya que es factible desacoplarlos de las tierras separadas, por lo menos hasta cierto punto.

### **17.8 Potenciales de Transferencia.**

Durante una falla un serio peligro puede resultar a tierra debido al potencial de transferencia entre el área de la rejilla de tierra de la subestación y las ubicaciones externas. Este potencial de transferencia se puede transmitir por circuitos de comunicación, conductos, tuberías, cercas metálicas, cables neutros de bajo voltaje, etc. El peligro, es comúnmente por el tipo de contacto de toque. Un problema de potencial de transferencia generalmente ocurre cuando una persona que está de pie en un punto remoto lejos del área de la subestación toca un conductor conectado a la rejilla de aterrizaje de la subestación. La importancia del problema se deriva de la alta magnitud de la diferencia de potencial, la cual es posible con frecuencia. Esta diferencia de potencial pudiera igualar o exceder (debido al voltaje inducido en los circuitos de comunicación sin

blindaje, tuberías, etc.) el GPR de la subestación durante una condición de falla. La situación básica del golpe eléctrico para el potencial de transferencia se muestra en la *figura 12*.

Una investigación de los posibles potenciales de transferencia peligrosos es esencial en el diseño de una red de aterrizaje segura para una subestación. Se pueden tomar varias medidas para protección contra el peligro de los potenciales de transferencia. Los siguientes párrafos presentan una breve discusión de varios potenciales de transferencia peligrosos y los medios para eliminar el peligro.

### **17.8.1 Circuitos de comunicación.**

Para los circuitos de comunicaciones, se han desarrollado métodos que corresponden a dispositivos de protección y aislamiento y neutralizador de transformadores para salvaguardar al personal y los terminales de los equipos de comunicación. Esos métodos no se tratarán aquí excepto para enfatizar la importancia de un aislamiento adecuado y para aislar de cualquier contacto accidental esos dispositivos y sus cableados, los cuales alcanzarían un voltaje alto con respecto a la tierra local. La introducción de fibra óptica para aislar los terminales de comunicación de la subestación, del terminal remoto puede eliminar la transferencia de potenciales altos. La fibra óptica se debe considerar cuando los potenciales no se pueden controlar fácilmente por medios convencionales.

### **17.8.2 Rieles**

Los rieles que entran en la subestación pueden crear daños a un punto remoto, por la transferencia de todo o una porción del GPR durante una falla a tierra. Similarmente, si la tierra es remota, se puede introducir daños en el área de la subestación debido a la transferencia de potencial de tierra remota hacia dentro de la subestación. Esos peligros se pueden eliminar al quitar los tramos de la vía dentro de la subestación después del uso inicial, o utilizando secciones movibles donde los rieles llegan al área de la rejilla de tierra. Sin embargo, la base aislante, como se discute en los siguientes párrafos, también se debe utilizar para proporcionar tanta protección como sea posible cuando la vía férrea esté intacta para su utilización.

Los empalmes o bases aislantes los fabrican una gran variedad de vendedores. La práctica general es instalar dos o tres conjuntos de esos equipos de manera que en un vagón no exista derivación a un solo conjunto. Las investigaciones de esos empalmes aislantes muestran que se diseñan primeramente para un aislamiento eléctrico de una vía hacia otra para propósitos de esquemas de señales. La conexión con aislamiento consiste de un tramo de la vía hecha de

un material aislante llamado un poste extremo, instalado entre los extremos de los carriles. Los miembros que sujetan la conexión se aíslan también de las secciones del carril. El voltaje de ruptura de las conexiones aislantes se debe considerar en cada aplicación. Las conexiones aislantes deben ser capaces de resistir la diferencia de potencial entre la tierra remota y el potencial de transferencia a la conexión.

Se debe hacer notar, sin embargo, que las bases aislantes no se recomiendan como la primer medida de protección, ya que las bases crean sus propias situaciones peligrosas (Garret and Wallace [B72]). Si los tramos de la vía fuera de la subestación y más allá de la base aislante están en contacto con el suelo, un voltaje peligroso existiría entre aquella sección de carril y una sección de carril o el perímetro de la cerca a tierra de la rejilla de la subestación durante falla. Si los carriles no se unen a la rejilla de la subestación, un existirá voltaje entre los carriles y las estructuras a tierra dentro de la subestación durante una falla. Otras situaciones se discuten en Garret y Wallace [B72] que pudieran resultar en voltajes peligrosos. De esta manera, se recomienda trasladar las secciones de los carriles al perímetro del sistema de aterrizaje.

### **17.8.3 Cables neutros de bajo voltaje.**

Los peligros son posibles donde los alimentadores de bajo voltaje o circuitos secundarios, sirven de puntos fuera del área de la subestación, teniendo sus neutros conectados a la tierra de la subestación. Cuando el potencial de la rejilla de tierra de la subestación aumenta como resultado de la circulación de corriente en una falla a tierra, todo o una gran parte de este aumento de potencial pudiera entonces aparecer en puntos remotos como un voltaje peligroso entre esta “tierra” de cable neutro y la tierra adyacente: además, donde también se proveen otras conexiones a Tierra, la circulación de la corriente de falla a través de ellas puede, bajo condiciones desfavorables, crear gradientes peligrosos en puntos remotos de la subestación.

Para evitar estas dificultades, el bajo voltaje del neutro se puede aislar desde la tierra a la subestación misma; siempre con precaución, sin embargo, que eso no resulte en una reducción del tiempo de limpieza para fallas de bajo voltaje al punto donde se incrementa el peligro total en lugar de reducirse. Si el bajo voltaje del neutro se aísla a partir de la tierra de la subestación, entonces se hace necesario proteger de los peligros a la subestación debido a la introducción, por medio del cable neutro, de potencial de tierra remoto. Esto implica que esté neutro, dentro y cerca de la subestación, se debe tratar como un conductor “vivo”. Eso se debe aislar desde el sistema de aterrizaje de la

subestación con un aislamiento adecuado para resistir el GPR; y eso se debe localizar para minimizar el peligro de estar en contacto con el personal.

#### **17.8.4 Equipo portátil y herramientas que se alimentan desde la subestación.**

Se necesitan considerar riesgos similares en el caso de minería, excavación, ó manejo de equipo de manual, ó herramientas portátiles, las cuales se alimentan eléctricamente desde la subestación y se usan fuera del área de la rejilla donde el potencial de malla se mantiene dentro de los límites seguros. Muchas cargas se alimentan frecuentemente por medio de líneas temporales o cables portátiles largos.

Un potencial de transferencia peligroso se puede dar entre el equipo y la tierra cercana durante una falla, sí el neutro o el cable de aterrizaje del equipo se conecta también al aterrizaje de la subestación. En casos como esos, es común aislar los circuitos alimentadores desde la tierra de la subestación; para aterrizar los neutros y equipos en Tierra del lugar del trabajo; y asegurarse que la corriente de falla máxima a la tierra local se limite a un valor bajo que no causaría gradientes peligrosos.

#### **17.8.5 Tuberías.**

Las tuberías y los conductos metálicos siempre se conectan al sistema de aterrizaje de la subestación para evitar peligros dentro del área de la subestación. Los potenciales de transferencia se pueden reducir o detener en los límites (fronteras) de la subestación al introducir secciones aislantes de suficiente longitud para reducir la derivación por el suelo adyacente. Las secciones aislantes deben ser capaces de resistir la diferencia de potencial entre la Tierra remota y la subestación.

#### **17.8.6 Construcciones auxiliares.**

Las construcciones auxiliares se pueden tratar como parte de la subestación para propósitos de aterrizaje, o como instalaciones separadas, dependiendo de las circunstancias. Si las construcciones y la subestación están relativamente cercanas, y especialmente si las construcciones se enlazan directamente con la subestación por tuberías de aguas, pantallas de cable, líneas telefónicas, etc., es apropiado tratar los edificios y sus áreas inmediatas como parte de la subestación. Como tal, las estructuras se deben aterrizar utilizando los mismos

criterios de seguridad que se usan para la subestación. Si las construcciones no están tan cercanas, y si tales enlaces conductores son escasos, se pudiera decidir tratar tales construcciones como unidades separadas con sus propias tierras locales de seguridad. Si se abastecen eléctricamente desde la subestación, ellas deben tener sus propios transformadores de distribución de un modelo que proporcione un aislamiento adecuado contra la transferencia de GPR de la subestación. Los neutros secundarios deben, en este caso, conectarse a la tierra local solamente en las construcciones auxiliares.

#### **17.8.7 cercas.**

Las cercas de la subestación que se extienden a otras áreas de un sitio en algunos lugares, presenta un posible potencial de transferencia peligroso si la cerca se conecta a la rejilla de aterrizaje de la subestación.

Para reducir este peligro, la cerca de la subestación se debe aislar de la cerca que sale del área de la subestación. Se recomienda que se instalen tramos aislados para prevenir el potencial de transferencia a través del suelo y sean lo suficientemente grandes para prevenir que se establezca un puente del tramo aislado.

### **18. CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE ATERRIZAJE**

El método de construcción o la combinación de métodos, dependerán de un número de factores, tales como el tamaño de la rejilla, tipo de suelo, tamaño del conductor, profundidad de la cavidad, disponibilidad del equipo, precio del trabajo y cualquier restricción física o de seguridad debido a la existencia de estructuras cercanas o equipo energizado.

Hay dos métodos que se emplean comúnmente para instalar la rejilla de aterrizaje. Estos son el método de trinchera y el método del conductor plowing. Ambos métodos emplean máquinas. Donde no se emplean estas máquinas debido a la falta de espacio para moverlas o al tamaño pequeño del lugar de trabajo, la rejilla de aterrizaje se instala por excavación manual.

#### **18.1 Construcción de la rejilla de tierra - método de trinchera.**

Se colocan banderas en el perímetro a lo largo de sus lados para identificar el espacio entre los conductores paralelos. Estos marcadores sirven también como guías para la máquina con la cual se hará la trinchera. Estas trincheras se excavan utilizando una máquina, comúnmente a lo largo del costado que tiene el

mayor número de conductores paralelos y se excavan a una profundidad específica (entre 0.5 metros o 1.5 pies). Los conductores se instalan en estas zanjas y las varillas de aterrizaje se entierran y se conectan a los conductores. Las mechas para aterrizaje de equipos se pueden colocar al mismo tiempo. Estas zanjas iniciales se rellenan con el mismo material hasta arriba de la ubicación de las conexiones cruzadas.

El próximo paso es cavar zanjas para conductores cruzados (a menudo, poco profundos), una vez más se utilizan marcadores como guías. Se debe tener mucho cuidado cuando se cavan estas zanjas para evitar dañar el conductor que se colocó en las zanjas en puntos cruzados. Los conductores se instalan en las zanjas y las varillas de aterrizaje restantes se entierran y se conectan a los conductores. Las mechas que quedan se conectan también a estos conductores. Se hacen conexiones de tipo cruzado entre los conductores perpendiculares. Las zanjas se rellenan entonces con el mismo material.

Otro método alternativo consiste en confinar el trabajo a una sección pequeña del total del espacio y completar totalmente la sección antes de cambiarse a otra área. En este caso, todas las zanjas se cavan a la misma profundidad antes que se coloque cualquier conductor. La instalación de los conductores y las varillas de aterrizaje son los mismos que se describieron en el párrafo anterior.

## **18.2 Construcción de la rejilla de tierra - método de “conductor plowing”**

Otro procedimiento para la instalación de conductores de aterrizaje, el cual proporcionaría economía y rapidez cuando las condiciones sean favorables y este disponible el equipo adecuado, es colocar los conductores dentro del área arada. Se utiliza un arado estrecho especial el cual se puede fijar o halar por, un tractor o un pick-up 4x4, si hay suficiente espacio para las maniobras. El arado se puede halar con un cabestrante (wincher) que se coloca al extremo del terreno. El conductor (cable eléctrico) se puede colocar en la tierra frente al arado o un carrete del conductor se puede colocar en un tractor o en el pick-up, o un trineo que se hale al frente del arado. El conductor se alimenta entonces hacia dentro de la tierra, a lo largo de la parte baja de la hoja de corte del arado. Otro método es fijar el conductor en la parte inferior de la hoja del arado y halarlo a lo largo según el corte vaya avanzando. En este caso, se debe tomar sumo cuidado para asegurar que el conductor (cable) no quede arriba del suelo blando.

Los conductores cruzados se aran a una profundidad mucho menor para evitar dañar a los conductores que se colocaron anteriormente. Los puntos de cruce o donde están los puntos para instalar las varillas de tierra están al descubierto para hacer las conexiones adecuadamente.



Con el equipo adecuado y la ausencia de rocas grandes, este método es adecuado para todos los calibres de conductores y para las profundidades que normalmente se utilizan.

### **18.3 Instalación de las conexiones, mechas y varillas de tierra.**

Media vez estén colocados los conductores en sus trincheras, entonces hacemos las conexiones que se requieran. Generalmente, los puntos de cruce requieren una conexión de tipo cruz, mientras que las conexiones en “T” se utilizan para conectar un conductor recto que se localiza a lo largo del perímetro. Son muchos los tipos de conexiones y dependen de la unión, del material que se une y la utilidad de la práctica habitual.

Las mechas se dejan en lugares apropiados para conexiones de aterrizaje de estructuras y equipos. Estos deben ser del mismo calibre que el conductor de la rejilla subterránea o ser de calibre diferente dependiendo del número de conexiones a tierra por dispositivo, la magnitud de la corriente de falla a tierra y las prácticas de diseño de la instalación. Las mechas quedan accesibles después de hacer el relleno, para hacer conexiones de alto grado.

Las instalaciones de varillas de aterrizaje se están comúnmente relacionadas con el uso de martillos hidráulicos, martillos de aire u otros dispositivos mecánicos. La unión de dos varillas de aterrizaje se hace por cualquiera de los métodos, ya sea, utilizando el método exotérmico o un método de acople roscado o acople sin rosca. La unión entre la varilla de tierra y el conductor de rejilla se puede hacer al utilizar varios métodos.

### **18.4 Consideración de la secuencia de construcción para la instalación de rejillas de tierra.**

Una rejilla de aterrizaje se instala normalmente después que el lugar se evalúa (grado de calidad), y las tuberías y conduits enterradas bajo tierra a grandes profundidades se instalan y se rellenan. La cerca de seguridad se puede instalar antes o después de la instalación de la rejilla de aterrizaje. En casos, donde no se instalan tuberías subterráneas profundas y conduits antes de la rejilla de aterrizaje, se debe hacer un intento para coordinar el procedimiento de trinchera de una manera lógica.

### **18.5 Consideraciones de seguridad durante las excavaciones subsecuentes.**

Como se mostró en el efecto de una capa delgada de material superficial, el valor de aislamiento de una capa de material superficial limpio o grava es una ayuda a la seguridad, bajo condiciones de falla a tierra. Por lo tanto, cuando se necesita hacer una excavación, después que se ha aplicado una superficie de roca, se debe tener sumo cuidado para evitar mezclar el suelo de baja resistividad con el material superficial de roca que esta alrededor.

Durante excavaciones subsecuentes hay más oportunidades de dañar el conductor de aterrizaje. En tal caso, se debe hacer una revisión para determinar si hay una ruptura en el conductor o en las uniones. Una ruptura en un conductor o en las uniones o ambos casos, se deben reparar inmediatamente. Se debe colocar una conexión de aterrizaje temporal alrededor de la quebradura antes de repararse. La conexión de aterrizaje temporal debe ser confiable para la aplicación e instalación de acuerdo a las prácticas de aterrizaje seguras, debido a que puede existir un voltaje entre los extremos de los conductores de aterrizaje.

## **19. MEDICIONES DE CAMPO DE UN SISTEMA DE ATERRIZAJE YA CONSTRUIDO.**

### **19.1 Mediciones de la impedancia del sistema de aterrizaje.**

Como se ha indicado, solo se pueden esperar resultados aproximados de un precalculo de la impedancia de tierra de la subestación. Por lo tanto, se desea una medición cuidadosa de la impedancia de la instalación, aunque no siempre práctica, si se conecta la rejilla o se afecta por otras estructuras metálicas enterradas.

En esta parte solo se trataran los métodos más generales. Muchos puntos importantes se utilizan en este manual, donde aplique cada uno de ellos. Mientras que en esta parte el valor ohmico se refiere como una resistencia, se debe recordar que hay un componente reactivo que se debe considerar cuando el valor ohmico de la tierra bajo prueba, es menor que  $0.5 \Omega$  y que el área sea relativamente extensa. Esta componente reactiva tiene un efecto pequeño en tierras con una impedancia mayor de  $0.5 \Omega$ .

#### **19.1.1 El método de dos puntos**

Este método mide la resistencia total del sistema de aterrizaje y un aterrizaje auxiliar. El valor que se obtuvo en ohmios se expresa como la resistencia del

sistema de aterrizaje y se asume despreciable debido a la resistencia de la tierra auxiliar.

Este método está sujeto a grandes errores para un valor bajo de la resistencia del sistema de aterrizaje o cuando los aterrizajes están cerca uno del otro, pero esto puede ser útil si un tipo de prueba “funciona o no funciona”, es todo lo que se necesita.

### **19.1.2 El método de los tres puntos**

Este método requiere el uso de dos electrodos de pruebas con sus resistencias designadas como  $r_2$  y  $r_3$  y con el electrodo que se va a medir que se designó como  $r_1$ . La resistencia entre cada par de electrodos se mide y se designa como  $r_{12}$ ,  $r_{13}$  y  $r_{23}$ , donde  $r_{12} = r_1 + r_2$ , etc.

$$r_1 = \frac{(r_{12}) + (r_{13}) - (r_{23})}{2} \quad (95)$$

Por lo tanto, medir la resistencia de cada par de electrodos de tierra en serie y al sustituir estos valores en la ecuación (95), el valor de  $r_1$  se puede determinar.

Si los dos electrodos de pruebas tienen resistencias sustancialmente mayores que el electrodo bajo prueba, los errores de las mediciones individuales aumentarán grandemente en los resultados finales. Además, este método puede dar valores erróneos, tal como una resistencia cero o negativa, si los electrodos no se separan por una distancia lo suficientemente grande. Consecuentemente, este método es difícil para subestaciones grandes.

### **19.1.3 Relación del método**

Este método compara la resistencia del electrodo bajo prueba, con la resistencia que ya se conoce, generalmente por la misma configuración del electrodo como en el método de caída de potencial. Ya que es un método de comparación, las lecturas ohmicas son independientes de la magnitud de la corriente de prueba siempre que, la corriente de prueba sea lo suficientemente alta para dar la sensibilidad adecuada.

### **19.1.4 Pruebas de las etapas de falla.**

Puede ser necesario llevar a cabo una prueba de alta corriente donde se desea la información específica para un diseño de aterrizaje particular. Esta prueba dará también cantidades a partir de las cuales la impedancia de aterrizaje se podría determinar.

Este tipo de prueba requiere el uso de un osciloscopio que registrará el voltaje entre los puntos que se han seleccionado. Sin embargo, la magnitud de voltaje podría ser relativamente grande y requerirá un transformador de potencia para bajar el voltaje a un nivel manejable. El máximo voltaje y la relación del transformador de potencia se deben determinar antes de obtener las pruebas de la etapa de falla, de esa manera el equipo de prueba no es muy importante. La prueba de la caída de potencial se puede utilizar para determinar el voltaje que se requiere de una prueba de la etapa de falla.

### 19.1.5 Método de la caída de potencial

Este método tiene muchas variaciones y se aplica a todos los tipos de mediciones de resistencia de aterrizaje (*figura 37*). Básicamente, las mediciones de la resistencia de aterrizaje consisten en medir la resistencia del sistema de aterrizaje con respecto al electrodo de tierra remoto. El electrodo remoto está teóricamente a una distancia infinita desde el sistema de aterrizaje donde la densidad de corriente de la Tierra se aproxima a cero. Mientras el método de la caída de potencial se utiliza universalmente, este presenta muchas dificultades y fuentes de error cuando se utiliza para medir la resistencia de grandes sistemas de aterrizaje. Estas dificultades ocurren primeramente debido al tamaño y a la configuración del sistema de aterrizaje y la heterogeneidad del suelo.

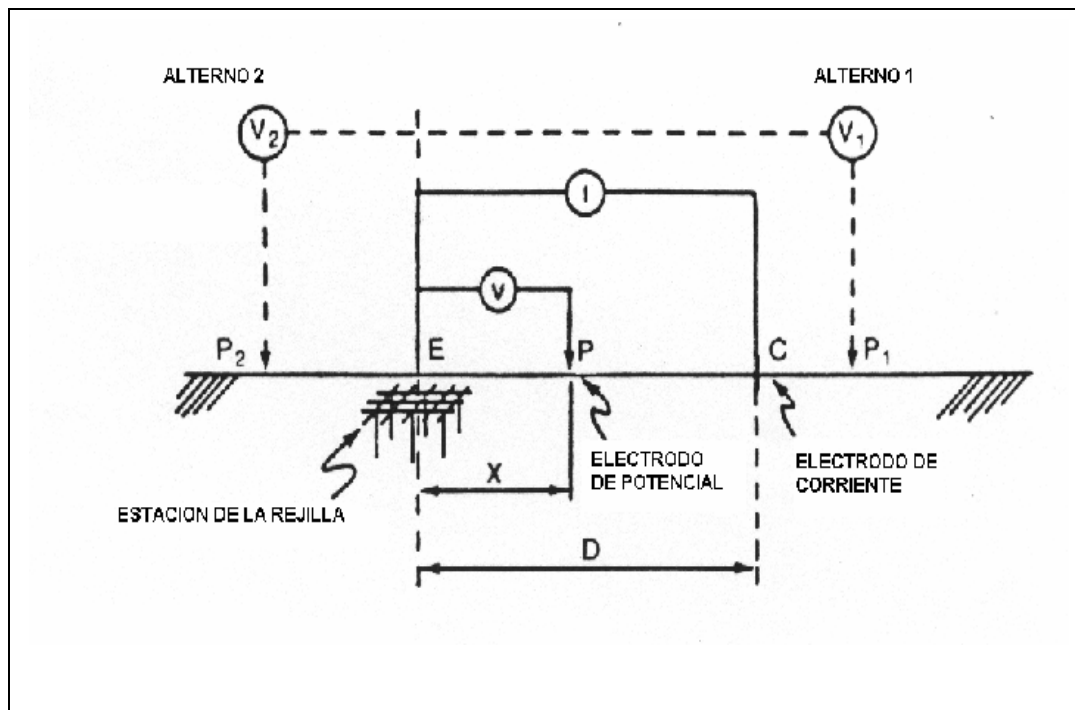


Figura 37- Método de la caída de potencial

Si la distancia  $D$  es lo suficientemente grande con respecto al sistema de aterrizaje, la parte central de la curva de la caída de potencial tiende a estar cerca de la parte horizontal, pero puede parecer que es así debido a la falta de sensibilidad de los instrumentos que se utilizan. Esto se acepta comúnmente, aunque no siempre correctamente, que la sección cercana a la horizontal de la curva de la resistencia  $R_g$ . Para sistemas de aterrizaje más grandes, mayores distancias  $D$  no son prácticas o si son posibles se tiene como resultado que la sección cercana a la horizontal de la curva no existirá. En este caso, no se obtendrán mediciones correctas a menos que se tenga una buena idea de la posición exacta de  $P$ .

Para medir la resistencia, la fuente de corriente se conecta entre la malla de aterrizaje de la subestación  $E$  y un electrodo de corriente que se encuentra a una distancia de varios cientos de metros de la subestación. El circuito de medición de potencial se conecta entonces entre la malla de la subestación  $E$  y un electrodo potencial  $P$ , con mediciones que se hacen en varias localizaciones del electrodo afuera de la subestación. Este electrodo de potencial se puede mover hacia el electrodo de corriente en aumentos iguales de distancia, comenzando cerca de la subestación y las lecturas de las resistencias obtenidas en las diferentes localizaciones se pueden trazar contra las distancias de la subestación. El gráfico que resulta se debe parecer a la curva EPC de la *figura 48(b)*. Desde  $E$  hasta  $P$ , el voltaje por amperio de la corriente de prueba aumenta pero el gradiente de voltaje disminuye alcanzando un mínimo en  $P$ . Si continuamos hacia  $C$ , el efecto de la corriente que converge en las investigaciones de la pruebas de corriente llega a ser aparente y se observa un incremento del gradiente de voltaje tal como se aproxima la prueba de corriente. El lento incremento, casi en la parte horizontal de la gráfica, si cualquiera representa, una zona pequeña donde la interacción de los electrodos que se examinaron y se devolvieron. Cuando los electrodos se colocan a una distancia finita desde el sistema de aterrizaje y el prueba de potencial, se maneja en un lugar específico, entonces se obtiene una medida precisa de la resistencia. Desafortunadamente, el lugar exacto del electrodo de potencial se define muy bien solo para algunos casos ideales tal como un hemisferio o electrodos muy pequeños enterrados en un suelo uniforme o en un suelo de dos capa (Dawalibi y Mukhedkar [B39][B44]). Curdts y Tagg analizaron el caso de un sistema de aterrizaje grande enterrado en un suelo uniforme suponiendo una distribución de densidad de corriente uniforme [B23][B137][B138][B139]. En la práctica, sin embargo, los sistemas de aterrizaje consisten de un arreglo complejo de varillas de tierra verticales y conductores horizontales, que se entierran comúnmente en suelos no uniformes.

Para rejillas de aterrizaje grandes los espacios que se requieren pueden no ser prácticos o incluso posibles, especialmente donde la línea de transmisión arriba de los cables de aterrizaje y los neutros que se conectan al aterrizaje de la subestación efectivamente ampliará el área de influencia. Consecuentemente, la parte plana de la curva no se obtendrá y se deben utilizar otros métodos de

interpretación. El trabajo anterior muestra que cuando el suelo no es uniforme y la separación no es muy grande comparado con las dimensiones del sistema de aterrizaje, el 61.8%, que corresponde a la llamada porción plana de la curva, pueda que no se aplique más (Dawalibi y Mukhedkar [B39][B44]). Donde se cree que son posibles los lugares varían del 10% al 90%.

Se debe notar que al colocar el punto P en el lado contrario con respecto al electrodo C ( $P_2$ ) resultará siempre en una medición de resistencia aparente más pequeña que la resistencia actual. Además, Cuando el punto P esta en el mismo lugar que C ( $P_1$ ) hay un lugar en particular que nos da la resistencia actual.

La primera ventaja del método de la caída de potencia es que los electrodos de potencial y corriente tendrán sustancialmente una resistencia muy alta que el sistema de aterrizaje que se esta evaluando sin afectar significativamente la precisión de las mediciones.

## **19.2 Investigación de campo de los contornos de potencial y voltajes de toque y de paso.**

La mejor certeza de que una subestación es segura viene de las pruebas de campo actuales del voltaje de paso y de toque con una fuerte carga de corriente en la malla de aterrizaje. Debido al presupuesto, pocas utilidades son semejantes para hacer estas pruebas como una práctica de rutina. Ahora, sin embargo, grandes discrepancias entre la resistencia que se midió y que se cálculo o anomalías que se conocen en las resistividades de aterrizaje dieron lugar a la duda de los voltajes de paso y de toque que se calcularon.

En algunas situaciones, vale la pena cargar el sistema de aterrizaje con una prueba de corriente (preferiblemente en el rango de los 100 Amperios) y tomar mediciones de los gradientes de potencial en lugares que se seleccionaron en toda la subestación y alrededor de su perímetro. Un proyecto EPRI (EPRI TR-100622[B63] que incluye una prueba de campo. Este proyecto incluye comparaciones de los resultados de las pruebas de campo con soluciones que se obtienen por computadora. Este método de medición se encontró confiable y que da buenos resultados (Patel[B120]; Meliopoulos, Patel y Cokkonides [B106]).

El método básico para las mediciones de gradientes incluye pasar una corriente de prueba a través del aterrizaje de la subestación vía un electrodo de corriente, como en las mediciones de la resistencia a tierra de la subestación y midiendo el resultado del voltaje de paso y de toque. Para obtener los potenciales que existen bajo condiciones de falla actual, los valores de la prueba se multiplican por la relación de la corriente de falla a tierra actual con la corriente prueba.

Desde que los potenciales de interés son los que existen en la superficie terrestre, la prueba de potencial que se utiliza es del tipo que establece contacto con la superficie.

Las resistencias de alto contacto que se involucraron, generalmente descartan el uso de instrumentos que se diseñaron para mediciones de resistencia a tierra desde que estos operan sobre un rango limitado de resistencia de prueba de potencial. Para utilizar un método de voltímetro y amperímetro, es necesario tener un voltímetro de alta-impedancia y utilizar pruebas de corrientes lo suficientemente altas para vencer los efectos de las corrientes a tierra residuales.

Se pueden utilizar varios métodos de medición y registro de voltajes. Utilizando un voltímetro de alta impedancia, podemos graficar perfiles y contornos de los voltajes de contacto de circuito abierto para la subestación completa. Al asumir apropiadamente los valores de resistencias de cuerpo y pie a tierra, y una corriente corporal segura, podemos determinar el valor máximo seguro para voltajes de contacto de circuito abierto y ubicar en el mapa de potencial los voltajes de paso y de toque mas peligrosos.

Langer [B96] y Bodier [B15] describen técnicas de medición en la cual se simula el efecto del contacto real y la resistencia corporal. El operador utiliza guantes de goma y botas con suela de goma, equipados con una superficie de contacto de malla metálica. Los voltajes entre estas superficies de contacto metálicas se miden con un voltímetro de tubos al vacío desviado por una resistencia igual a un valor supuesto de la resistencia corporal y la corriente se mide con un miliamperímetro. La relación de la corriente de descarga a la corriente a tierra total de determina de la misma manera.

Al incluir las resistencias de contacto pie-Tierra como una parte del procedimiento de prueba, se toma en cuenta el efecto de las variaciones de la conductividad de la superficie. Así, se incluye en los resultados de la prueba, el factor de seguridad adicional que se proporcionó al cubrir la superficie con material superficial, pavimento, etc.

### **19.3 Valoración de las mediciones de campo para el diseño seguro.**

Con imaginarse la resistencia disponible que se midió, el máximo GPR se puede recalcular. Si es sustancialmente diferente basándose en la resistencia que se calculó, es necesario revisar las precauciones que se toman en contra de la transferencia de potencial.

La resistencia que se midió no provee un medio directo para re-verificar los potenciales de paso y de toque que se calcularon, ya que estos que se derivan de la resistividad. Sin embargo, si la diferencia entre el cálculo y la medición de la rejilla de la subestación es muy grande, la resistencia o la resistividad que se

supone pueden estar bajo sospecha, este último, en general es, menos confiable. Cada caso tendrá que juzgarse por sus propios meritos para determinar si la discrepancia es tal, como para justificar más investigaciones o mediciones de las resistividades, el empleo de factores de seguridad más grandes o mediciones directas de potenciales peligrosos o descargas de corriente se tratan en la Investigación de campo de los contornos de potencial y los voltajes de toque y de paso.

#### **19.4 Prueba de integridad de la rejilla de tierra.**

Muchas veces, los relevadores de estado sólido, equipo telefónico, circuitos de grabación o unidades de fuentes de voltaje en la caseta de control se dañan debido a las descargas eléctricas o a una falla si la subestación tiene un mal sistema de aterrizaje. Comúnmente, la prueba de integridad de la rejilla de aterrizaje se lleva a cabo seguido de un evento. La evaluación de las rejillas de aterrizaje muy antiguas utilizan esta prueba, también es común en las instalaciones industriales. Esta prueba se lleva a cabo para asegurar la integridad de la rejilla de tierra antes de que se apruebe la operación de la subestación. Esta prueba es una necesaria para detectar cualquier circuito abierto o estructura aislada o equipo en una subestación.

Un juego de pruebas típico consta de una fuente variable de voltaje (0-35 voltios, 0-300 amperios), dispositivos de medición de voltaje y corriente, y dos puntas de prueba. Una de las dos puntas se conecta a una referencia a tierra, generalmente la toma de tierra de la carcasa del transformador. La otra punta se conecta al elemento de aterrizaje a ser evaluado. La prueba consiste en dejar circular 300 amperios entre los elementos que se conectaron y medir la caída de voltaje a través del circuito de aterrizaje incluyendo las puntas de prueba. La medición de la división de corriente en el elemento a ser evaluado utilizando un amperímetro de tenaza provee datos adicionales para evaluar la trayectoria a tierra. Manteniendo el elemento de referencia conectado anteriormente, la segunda punta de prueba se traslada alrededor para evaluar los elementos en otros equipos u estructuras hasta que se ha evaluado la subestación totalmente. Frecuentemente, un cable localizador se emplea para localizar un conductor a tierra roto o desconocido. El cable localizador detecta el campo magnético producido por la corriente de prueba y genera un ruido equivalente, el cual se puede escuchar por medio de audífonos. La ausencia del ruido indica un cable a tierra roto o una conexión abierta.

Es necesario determinar la caída de voltaje de las puntas de prueba. Esto se hace acortando las puntas a través del juego de prueba y medir la caída de voltaje al circular 300 amperios en el lazo de corriente. Esta medición única proporciona las impedancias en serie de las puntas de prueba. Para obtener un valor correcto de la impedancia, la impedancia de la punta de prueba se extrae de la impedancia que se mide entre los elementos. Llevar a cabo la prueba de



integridad es una forma práctica y conveniente, su resultado puede analizarse solo subjetivamente. Una forma para evaluar una rejilla de aterrizaje es comparar los valores de la impedancia con otra y determinar la prueba de los elementos, los cuales tienen altos valores de impedancia anormales. Uno puede evaluar también una rejilla de aterrizaje comparando la caída de voltaje con un valor de referencia conocido (comúnmente 1.5 V/5.0 pies entre elementos) y determinar uniones débiles entre los elementos. Las mediciones de las divisiones de corriente indican si hay una alta impedancia o una trayectoria abierta en cualquier dirección [B76].

### **19.5 Verificaciones periódicas de los sistemas de aterrizaje que se instalan.**

Algunos servicios re-verifican periódicamente la resistencia a tierra de la subestación después de terminar la construcción. También se aconseja revisar el sistema de aterrizaje de vez en cuando por posibles cambios en las condiciones del sistema que pueden afectar el valor máximo de la corriente a tierra, así como extensiones a la misma subestación que puede afectar la corriente máxima, la resistencia a tierra de la subestación o las diferencias de potencial local.

## **20. MODELOS A ESCALA FISICA**

Frecuentemente es difícil obtener conclusiones válidas con respecto al problema general de aterrizaje únicamente a partir de datos de campo reales. La falta de resultados consistentes causados por la incapacidad de controlar la prueba, tal como las condiciones del tiempo y otras variables que afectan la condición del suelo, y las dificultades en la recolección de datos, todo ello obstaculiza la capacidad de ejecutar y reproducir las pruebas. Debido a que es una gran ayuda verificar las suposiciones teóricas o las técnicas computarizadas, los modelos a escala se utilizan para llenar el vacío. El uso de modelos pequeños se puede utilizar para determinar la resistencia y los perfiles de potenciales de los arreglos de la rejilla de aterrizaje.

Las primeras pruebas de modelos a escala utilizaron agua para representar un suelo uniforme. El uso de modelos pequeños en grandes tanques dieron resultados consistentes y permitió varios modelos y condiciones para evaluarlos y observar los efectos de parámetros diferentes.

A finales de los 60's, un modelo de laboratorio de dos capas se desarrolló en Ecole Polytechnique para verificar las técnicas computarizadas. Este método utilizó bloques de concreto para representar la capa de suelo más baja (inferior) (mukhedkar, Gervais y Dejean [B111]). Una técnica que se desarrolló posteriormente por la Universidad del estado de Ohio fue utilizar Agar, que es una sustancia que se parece a la gelatina y frecuentemente se utiliza en estudios biológicos, para estimular los niveles más bajos (inferiores) del suelo.

En este proyecto, se utilizaron modelos exactos de suelo uniforme y de dos capas para estudiar los efectos de muchos parámetros en la resistencia y potenciales de la superficie [B61].

Los resultados de las pruebas de los modelos han mostrado que los modelos a escala se pueden utilizar efectivamente para estudios paramétricos en el diseño de la rejilla de aterrizaje y para verificar las simulaciones por computadora de los parámetros de la rejilla de aterrizaje (Sverak, Booream y kasten [B134]).

## **21. PUESTA A TIERRA DE SALAS DE COMPUTADORAS**

### **21.1 Introducción**

En este capítulo se analizará el verdadero significado de la tierra separada o tierra dedicada, es decir, la referencia cero del circuito. Asimismo, se estudiarán, resolverán los problemas típicos de alimentación y tierra en los sistemas que alimentan salas de computadoras y equipo electrónico sensible.

El ingeniero responsable de las operaciones y acciones correctivas podrá tomar decisiones con más confianza para lograr una operación confiable de la instalación. En este capítulo se tratan los sistemas de procesamiento electrónico de datos, y los problemas típicos en esta clase de instalaciones.

El aterrizaje del equipo electrónico sensible, tales como computadoras, controladores lógicos programables, plantas de proceso, sistemas de control distribuido y equipo electrónico similar es uno de los aspectos más importantes para lograr una operación aceptable y útil.

El término “Computadoras” se usará no sólo para computadoras sino que también para todos los equipos sensibles. Los voltajes de operación bajos en las computadoras y otros equipos electrónicos sensibles los hacen susceptibles a voltajes aleatorios de niveles más bajos que no son perceptibles para los humanos y que no tienen efectos eléctricos sobre los equipos de potencia.

Por ejemplo, el equipo electrónico sensible es extremadamente sensitivo a los voltajes de carga estática que generan los humanos en un movimiento simple del cuerpo. Efectivamente, los voltajes que las descargas eléctricas inyectan en la tierra, aún a distancias de varios miles de pies, a menos que se tenga una neutralización apropiada, pueden provocar funcionamiento anormal y posiblemente dañar el equipo.

Se ha aprendido mucho, no en como prevenir esta fuente de interferencias, sino que en prevenir que entren en los sistemas de los equipos electrónicos sensibles. Con los medios disponibles en la actualidad, se puede eliminar el funcionamiento anormal y el peligro de los voltajes transferidos a tierra.

## **21.2 Importancia del ambiente eléctrico**

El ambiente eléctrico para computadoras incluye sus fuentes de energía, el sistema de tierra y las interfases eléctricas con las líneas de comunicaciones, sistemas de aire acondicionado y los sistemas de seguridad industrial. También incluye el sistema de luminarias y otros equipos ubicados en la sala de computadoras.

Además en este capítulo se evalúan las características de los pisos de sala de computadoras, los muebles y aun el tipo de zapatos y la vestimenta que los operarios deben usar para evitar las descargas electrostáticas.

El ambiente eléctrico adyacente a la sala de computadoras, también se debe considerar ya que las perturbaciones eléctricas se propagan a través de conductores, tubería, conductos metálicos y partes estructurales del edificio o por medio de radiación electromagnética, como en el caso de ondas de radio.

Ningún equipo electrónico es inmune totalmente a las interferencias y perturbaciones. Sin embargo, la sensibilidad puede variar de un equipo a otro y de un tipo de perturbaciones a otro. 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 utilización de computadoras o equipos con componentes electrónicos digitales crece continuamente, ya sea en controles de tráfico aéreo, vehículos de despacho de emergencia, administración de hospitales y control de comunicaciones. La seguridad pública puede resultar afectada por los fallos de un sistema de computadoras.

## **21.3 Historia del aterrizaje de computadoras.**

### **21.3.1 Satisfacción de los requisitos del código.**

Las computadoras se aterrizaron por la necesidad de seguridad y por cumplir requisitos del NEC.

Primero se aterrizaron en el sistema de aterrizaje de los equipos de potencia eléctrica de los edificios en que se encontraban las computadoras. El conductor de tierra del equipo fue un alambre verde aislado o alambre desnudo. En muchos casos, el ducto metálico sirvió para este propósito. La tierra del equipo de la compañía de distribución. El gabinete metálico se unió con conexión al neutro, al conductor de aterrizaje del equipo y la Tierra.

La toma de tierra podría ser una barra y/o tubería metálica de agua. El acero del edificio también se conectó en el sistema de aterrizaje del edificio, intencional o no-intencionalmente.

No había requisitos particulares sobre qué partes de tierra del sistema de potencia y de tierra de las computadoras se deberían conectar; entonces, las conexiones se hacían generalmente en el conductor de tierra en el toma, receptáculo o tablero que suministraba potencia al computador.

Esto satisfacía requisitos del NEC para que nadie pudiese recibir golpes por tocar el gabinete del computador, en condiciones de falla de fase a tierra.

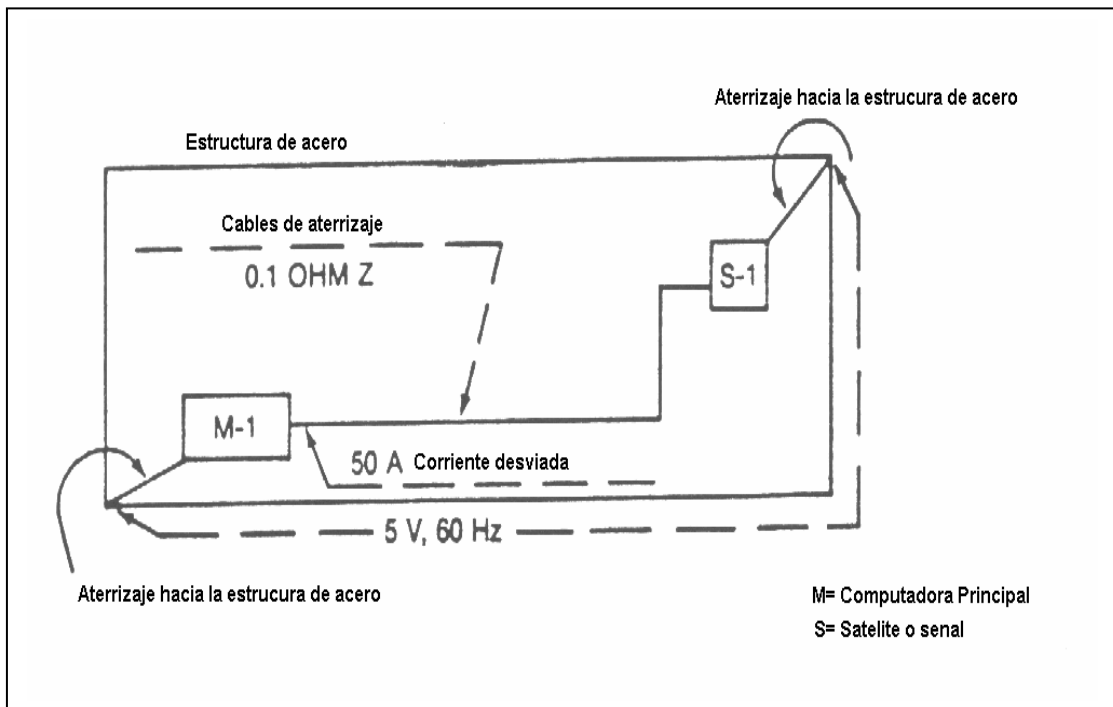
A medida que los componentes de las computadoras fueron más complejos y sensibles a los voltajes bajos, se encontró que los transitorios de los voltajes podrían ser peligrosos y dañinos para los dispositivos de estado sólido.

Los transitorios eléctricos de voltaje entraban a las conexiones múltiples, desde el conductor neutro al sistema de tierra.

En un edificio comercial, no es raro encontrar el conductor neutro conectado a tierra o Tierra en el transformador.

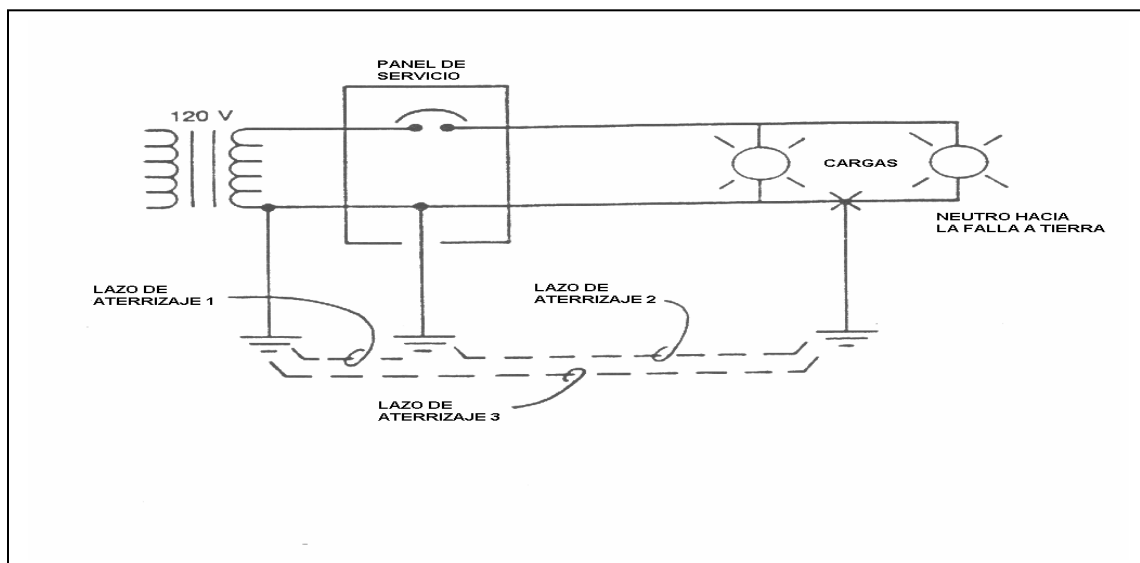
En un estudio se encontró que un 20% de los conductores neutro tenían fallas accidentales a tierra, en circuitos que alimentaban luminarias fijas.

En la *figura 38* se ilustra una de las condiciones. El término “tierra quieta” se originó cuando se comenzaron a usar las tierras aisladas, alrededor de 1960.



**FIGURA 38. Voltaje entre trayectorias conductivas múltiples de corriente a tierra en el acero del edificio (estructura).**

El término “tierra ruidosa” se aplicó a las tierras de los sistemas de potencia eléctrica, donde se hacían conexiones múltiples a tierra sobre ellas, como se ve en la *figura 39*



**FIGURA 39. Trayectorias de corriente en varios neutros a tierra.**

### **21.3.2 Ruido en la tierra del sistema de potencia.**

Con el incremento de complejidad de los sistemas de computadoras, se necesitó tener computadoras satélites o terminales remotas, colocadas lejos del lugar de la computadora principal. Los sitios de las computadoras remotas tenían fuentes de potencia. Se podían alimentar desde el sistema de potencia de la computadora principal, pero muchas veces se prefirió alimentarlas desde otra parte del edificio.

En los sistemas de aterrizaje de un edificio, no es raro tener diferencias de voltajes medibles entre punto y punto, debido al flujo de corriente, ya sea de 60 Hz o transitorios de alta frecuencia.

Entonces, la conexión a la tierra del sistema de potencia en el sitio remoto podría conectar la tierra remota con algunos pocos voltios de diferencia con la tierra del computador principal. Esto podría inyectar dentro del sistema, la diferencia de potencial entre las dos conexiones a tierra, interfiriendo con las señales normales del computador.

Con trayectorias múltiples a tierra y conductor neutro conectado intencional o no-intencionalmente, al sistema de tierra en muchos puntos, la corriente de retorno por el neutro podría fluir sin control sobre el sistema de tierra.

En cada uno de los puntos donde el neutro se conecta a tierra y que existen trayectorias en paralelo, la corriente se dividirá, por la Ley de Ohm, de acuerdo al inverso de la impedancia de circuito (Ver *fig 39*).

Por este flujo de corriente sin control sobre el sistema de aterrizaje, el sistema de potencia se conoció como “tierra sucia o ruidosa”. El personal de computadoras resolvió no meterse nunca más con los sistemas de aterrizaje de los edificios.

## **21.4 Sistemas o equipos que se deben aterrizar.**

### **21.4.1 Sistemas de Potencia.**

En los sistemas eléctricos de potencia, hay por lo menos dos grupos o clases de aterrizaje:

- 1) *Aterrizaje del sistema*: Es el aterrizaje de alguna parte de la fuente del sistema de potencia eléctrica, generalmente el sistema del neutro.
- 2) *Aterrizaje del equipo*: Es el aterrizaje de todas las estructuras y gabinetes metálicos de los equipos, uniando todas las partes y conectando esta unión a tierra.

#### **21.4.2 Equipo electrónico sensible (Computadoras).**

Así como la fuente del sistema eléctrico de potencia, las computadoras tienen diversos sistemas que se deben aterrizar.

- 1) *Aterrizaje de señal común*: La señal común también se conoce como “Señal común de CD”. El sistema de referencia cero para líneas de datos y en general, la parte de señales, representan el neutro sensible de las computadoras. Este es uno de los sistemas que son sensibles a los transitorios de voltaje y necesitan un punto de referencia estable, con respecto a un potencial de voltaje.
- 2) *Barra de tierra de referencia de la fuente de potencia de CD*. La computadora puede tener varios sistemas de voltaje de CD diferentes, tales como +12 / 0 / -12, +24 / -24 V.
- 3) *Barra de tierra del Equipo*. Este es el gabinete metálico o estructura del equipo de la computadora. Puede incluir el chasis de los elementos del computador, así como también el mueble o gabinete exterior. Algunos fabricantes de computadoras se refieren a la barra de tierra del equipo como la “Barra Segura de Tierra” (Safety Ground Bus).

Además de los términos que hemos descrito para los diferentes sistemas de barras de aterrizaje, podemos encontrar esos términos como: Tierra segura de CA (AC Safety (mains) Ground), Tierra de Referencia de computadoras (Computer Reference Ground), Señal común de CD (DC Signal Common), Tierra Común (Heraf Common), Barra de tierra de CD (DC Ground Bus), Punto Maestro de Tierra de CD (DC Master Ground Point) y Punto Común de Tierra de Fuente de Potencia (Power Supply Common Ground Point).

Pareciera que cada compañía de computadoras ha generado sus propios términos para las diferentes partes aterrizadas de sus sistemas. No hay uniformidad en terminología, aunque, como veremos más adelante, todas ellas deben terminar conectándose juntas.

#### **21.5 Características de la energía disponible**

La energía eléctrica pública puede estar disponible en numerosos voltajes y configuraciones de fase. La configuración preferida y la selección lógica dependen del tamaño del sistema y del equipo utilizado. En vez de intentar la adaptación de un equipo de procesamiento de datos a un sistema obsoleto de alimentación, es preferible instalar un cableado exclusivo para el equipo electrónico sensible que tenga un voltaje adecuado y el mínimo de interacción con otros elementos del edificio.

La frecuencia de la energía suministrada en Estados Unidos y en la mayor parte de los países latinoamericanos es de 60 Hz. En algunos países la frecuencia de la línea no es la óptima por lo que a menudo se presentan problemas en los sistemas de computadoras. De la misma forma, fuentes independientes de potencia como generadores diesel o motores eléctricos no tienen la estabilidad que ofrece una central eléctrica. El resultado por lo general es un mal funcionamiento y deficiente desempeño de equipos electrónicos.

Los límites en los cuales se espera que la fuente de voltaje pueda variar sin tratamiento especial es aproximadamente  $-13\%$  a  $+5.8\%$ . El voltaje de línea no debiera variar más allá de  $-10\%$  a  $+3\%$  del valor nominal.

Estos límites permiten esperar resultados confiables. El voltaje nominal de línea es una designación conveniente para esta clase de voltaje.

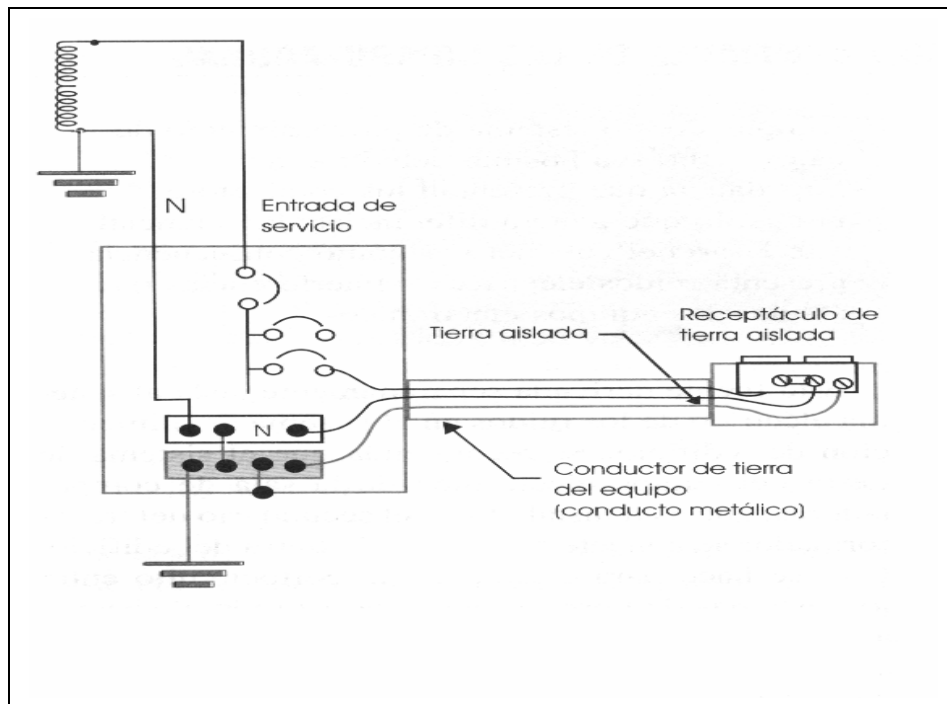
Las mediciones de voltaje de línea pueden variar de una ubicación a otra, así como la hora del día ya que las cargas cambian. Cuando se habla de 110 V, 115 V o 117 V, se está hablando de un voltaje nominal de 120 V.

## **21.6 Tierra de referencia cero del sistema**

La expresión “tierra del sistema” empleada en este capítulo se refiere a un cable o alambre aislado, separado y dedicado que tiene aislamiento color verde, que está conectado a tierra y se instala para computadoras y equipos que cuentan con microprocesadores.

Este conductor de conexión a tierra también es un conductor adicional para la seguridad, lo cual se ilustra en la *figura 40*. El propósito de este “sistema” a tierra es proporcionar un sistema “limpio”, libre de ruidos (interferencia electromagnética), de referencia cero de tierra para las fuentes de alimentación de CD y datos en los sistemas ya comentados.

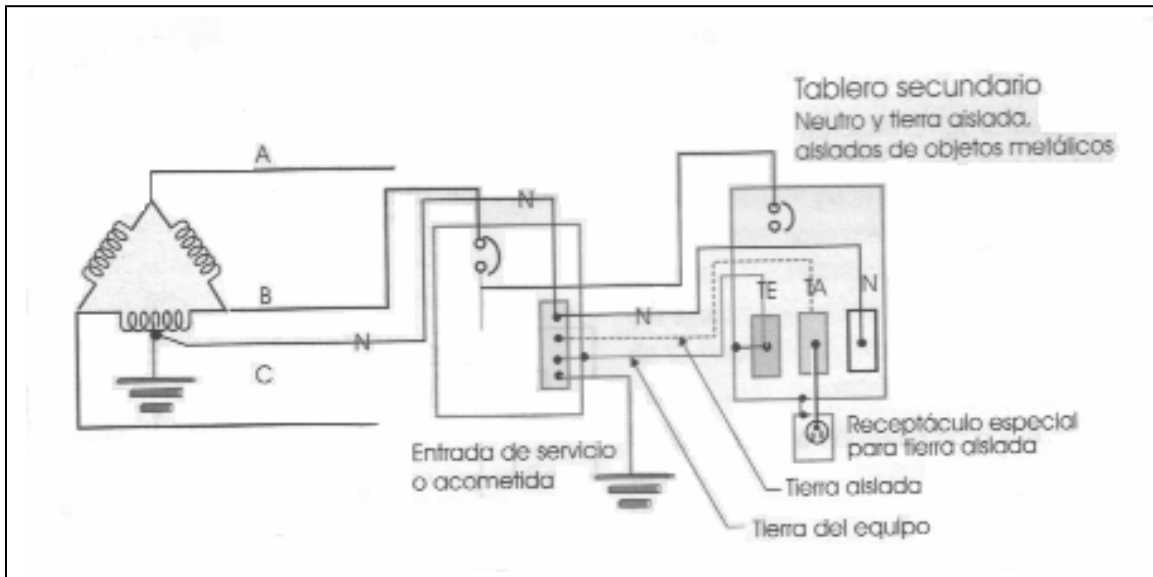




**FIGURA 40. Un receptáculo de tierra aislada, específica, libre de ruidos. También se muestra la tierra del equipo como conductor metálico.**

La sección 250-146(d) y la sección 384-20 del Código Eléctrico Nacional permiten que un conductor de puesta a tierra de equipo se instale desde el punto de unión neutro/tierra (equipo de servicio o terminal  $X_0$  de una fuente derivada separadamente) hasta el equipo, o a los receptáculos aislados a tierra para el equipo. Este conductor de tierra aislada se debe instalar con los conductores de circuito, el conductor neutro y el conductor de tierra de seguridad y podrá pasar o cruzar a través del tablero o paneles de control como se describe en las dos secciones arriba citadas y en la sección 250-96(b).

El conductor de tierra del sistema no se conecta al conducto o tableros de distribución secundarios por los cuales se desplaza, sino que solo termina en los bloques de terminales “aislados”, en el cable aislado principal de tierra u otra “tierra aislada” o el receptáculo, en la tierra aislada (lógica) del equipo y en el punto único de unión de la fuente de energía. Véase la *figura 41*.



**FIGURA 41. Tierra aislada**

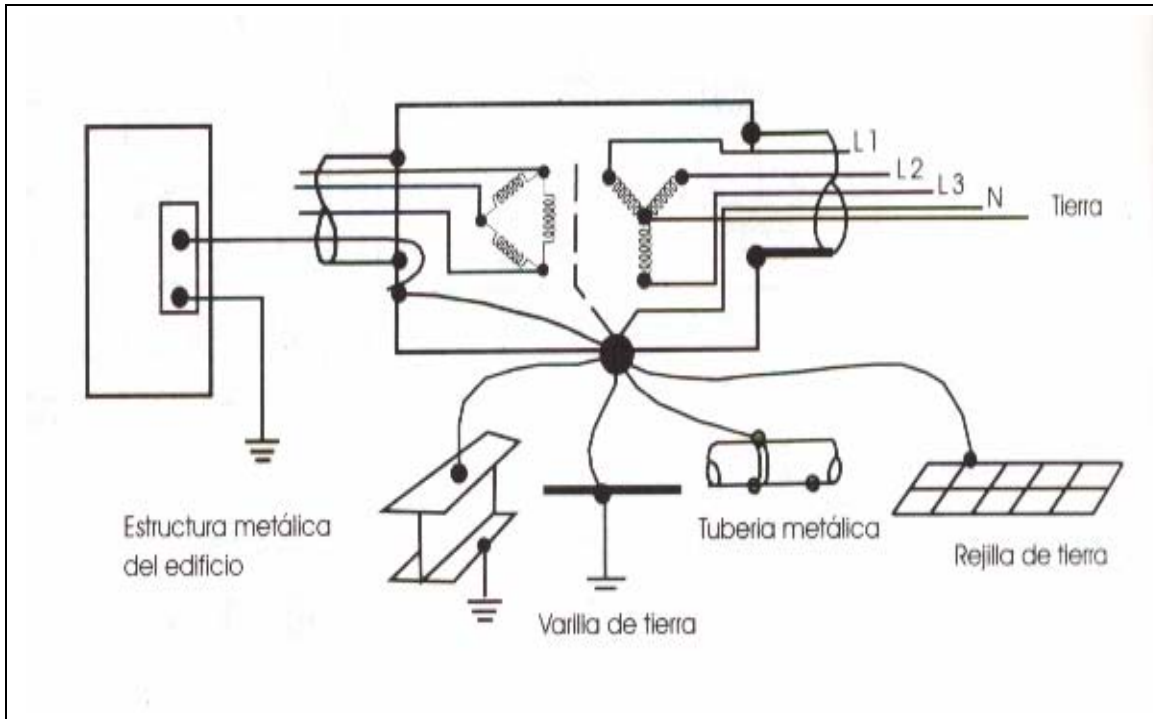
### 21.7 Conexión a tierra para la operación confiable de las computadoras

El concepto de punto único de conexión a tierra se ha establecido como estándar para realizar la conexión a tierra para equipo electrónico sensible.

Es de suma importancia establecer un punto único de referencia de tierra para lograr la confiabilidad de un equipo y una satisfactoria operación de los sistemas de cómputo y otros modernos sistemas electrónicos.

La confiabilidad y operación de un sistema computarizado mejorará utilizando esta técnica, la cual se basa en el mantenimiento de un plano equipotencial para todos los equipos y así evitar diferencias peligrosas de voltaje que puedan afectar el buen funcionamiento del equipo electrónico. Es un hecho que algunos sistemas no operan si no se cuenta con esta técnica. La acometida del edificio debe ser la referencia inicial para el sistema de un solo punto a tierra.

Es aun más conveniente establecer un punto único de unión neutro (tierra) para el sistema computarizado, ya sea en el dispositivo de un tratamiento de potencia del sistema o en el secundario del transformador reductor (*figura 42*)



**FIGURA 42. Punto único de conexión a tierra para salas de computadora.**

Siempre se necesita la instalación de un transformador de aislamiento tan cerca de la computadora o sistema de procesamiento de datos como sea posible debido a la impedancia que presentan los conductores largos, lo que genera diferencias de potencial a lo largo del conductor y como consecuencia presenta ruidos eléctricos e interferencia que afectan los equipos electrónicos.

Esta fuente derivada separadamente aísla al sistema eléctrico de los ruidos en el sistema de alimentación del edificio. Se recomienda que el sistema de tierra del equipo electrónico de la sala de computadoras, que está instalado en el secundario del transformador se conecte al sistema de tierra del edificio. Esto se hace para establecer un cortocircuito entre los sistemas de tierra y mantener así todo el sistema al mismo potencial ante la eventualidad de descargas atmosféricas u otros efectos causados por corrientes de tierra.

En la *figura 42* se muestra el secundario del transformador ubicado cerca el equipo de procesamiento de datos; el secundario se conecta a tierra en un punto único y los equipos se conectan a este punto, que se puede ubicar en el transformador o en un tablero secundario.

En muchos casos el fabricante de un equipo electrónico especifica un sistema "dedicado" a tierra el cual se refiere al sistema denominado tierra aislada, especificado antes. En sus instrucciones de instalación del sistema incluye

diagramas para la conexión de los dos sistemas de tierra: la “tierra de seguridad” y la “tierra aislada”, aunque solo incluyen una sola terminal o accesorio eléctrico de conexión, en la armadura del equipo. Esta única terminal incluida en el equipo del fabricante es común para los dos circuitos de tierra (el de seguridad y de tierra aislada); si ambos conductores de estos dos sistemas se conectaran a esta terminal la conexión de “tierra aislada” se perdería completamente.

La tierra aislada es la tierra de referencia cero para la lógica digital y la mantiene libre de ruidos eléctricos. El propósito es mantener los equipos eléctricos sensibles protegidos de los ruidos eléctricos producidos en los bucles de tierra y múltiples conexiones a tierra.

Si la armadura metálica del equipo se fija al piso de concreto por medio de un perno y este hace contacto con las barras de refuerzo en el concreto —como en ocasiones sucede—entonces se crea una trayectoria adicional. En este caso, lazos cerrados de corrientes de tierra pueden causar ruidos eléctricos que anularían por completo las ventajas de la “tierra aislada”. El calibre del cable es crucial para los modernos circuitos electrónicos. El conductor de la “tierra del sistema” debe ser continuo, de calibre completo, con aislamiento y con forro aislante de color verde.

Cuando el forro aislante de color verde se usa para la tierra de seguridad, se debe utilizar aislamiento de color verde con rayas amarillas para la “tierra del sistema”. Un “solo calibre” significa un conductor de cobre de un calibre mínimo de AWG #8 o del mismo calibre que los conductores portadores de corriente (conductores de fase).

Los conductores de conexión a tierra especificados por el Código Eléctrico Nacional pueden ser tan pequeños como 1/11 de la capacidad de los conductores de fase.

Para aplicaciones en sistemas electrónicos modernos, el conductor de la tierra del sistema se usa como la señal de referencia cero para toda la lógica digital y la fuente de alimentación de cd de la computadora.

Los circuitos de lógica de las computadoras de bajo-nivel y alta velocidad, requieren una impedancia baja y una referencia a tierra libre de ruidos eléctricos. Cuanto más grande sea el calibre del conductor de tierra del sistema, más baja será la impedancia de retorno al sistema de conexión a tierra del edificio. Cuanto más baja sea la impedancia la lógica será más pura (libre de ruidos eléctricos). El resultado es un mejor funcionamiento del sistema.

Ningún sistema computarizado puede operar eficientemente sin un sistema de aterrizaje de baja impedancia. Un sistema mecánico de tierra que usa conductos y paneles con conexiones deficientes no es totalmente satisfactorio.

Si la seguridad fuese el único factor de preocupación, cualquier trayectoria metálica a tierra sería satisfactoria. Los conductos de edificios se adhieren a las normas del Código en cuanto a requisitos de seguridad, pero su utilización es inaceptable como tierra para equipos electrónicos.

El conducto en los edificios es una tierra mecánica y su calidad depende completamente de la integridad de sus conexiones. Esta integridad está en función del ajuste de las conexiones, lo que varía con la edad de la instalación, los movimientos del edificio y los cambios de temperatura del conducto y del inmueble. Cuando las conexiones se degradan, causan tanto un efecto directo sobre la lógica de referencia de tierra, como sobre la tierra de seguridad, además de afectar la confiabilidad de la operación del sistema electrónico.

La utilización de un conductor de conexión a tierra, de calibre adecuado y uniforme, aislado, separado y dedicado, puede aumentar el calibre del conducto y el costo del trabajo, pero es el único método aceptable para asegurar la confiabilidad y el funcionamiento del moderno equipo electrónico computarizado.

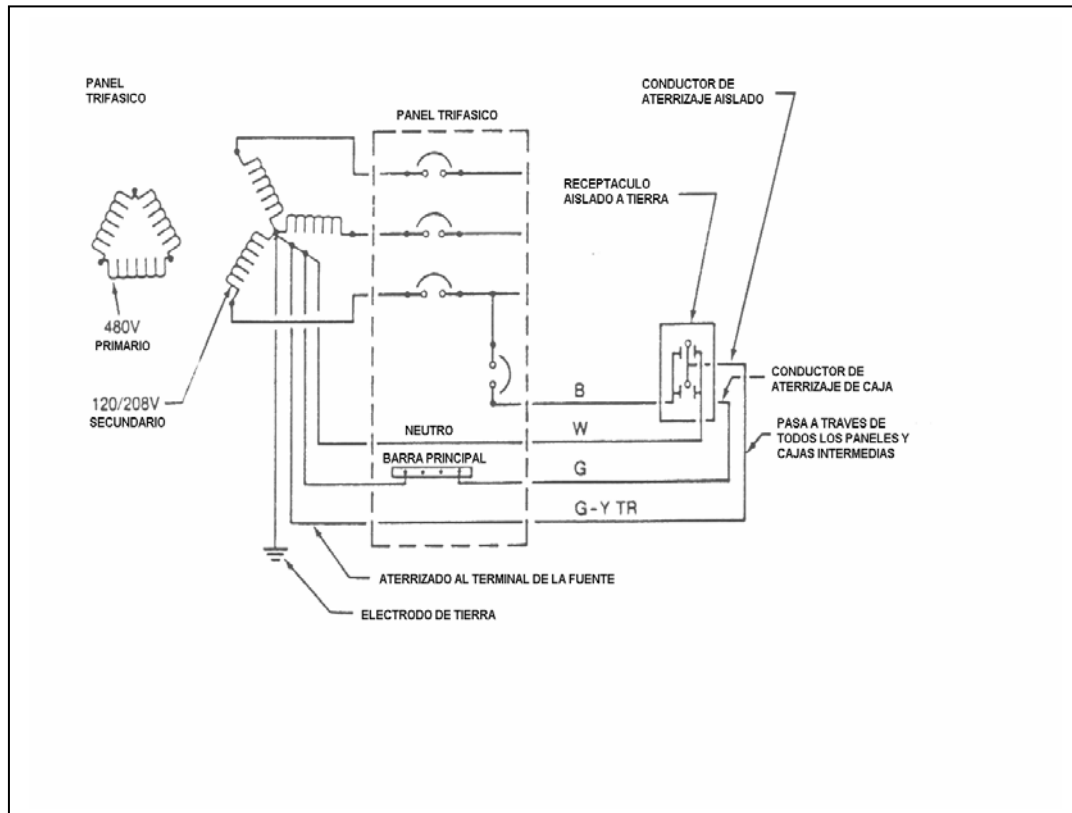
### **21.8 Conductores aislados de aterrizaje.**

El NEC reconoce que los equipos sensibles, tales como: cajas registradoras, minicomputadores, impresoras, etc. se pueden afectar adversamente con las corrientes que fluyen en los conductores comunes de aterrizaje de los equipos, como conduit, conductor o barra verde, acero de edificios, etc.

Para reducir tales problemas, el NEC en la Sección 250-74, Excepción No. 4, permite que se lleve un conductor de aterrizaje aislado, desde el terminal del aterrizaje aislado del receptáculo hasta el punto de aterrizaje del servicio de potencia eléctrica o al terminal aterrizado del sistema derivado separado para servicios de los receptáculos, este conductor se debe llevar en el ducto, canaleta o conduit, con los conductores que sirven la carga del receptáculo.

Generalmente es un conductor verde con una banda amarilla. Este conductor no se debe conectar en cualquier barra de aterrizaje o punto común entre la carga del receptáculo y el lugar de aterrizaje básico. Este sistema elimina mucho del ruido que afecta a tales equipos. Sin embargo, los problemas surgieron por interpretación errónea de la Sección 250-74, Excepción No. 4 y otras instalaciones inapropiadas.

El uso de cualquier conductor de aterrizaje aislado y un receptáculo aterrizado aislado no sustituye el requisito para las partes metálicas de la caja del receptáculo, canaletas, ductos, conduit, etc. que se deben conectar al sistema de tierra del equipo del edificio (*Vea Fig 43*)



**FIGURA 43. Conductor de aterrizaje aislado para tomacorrientes de equipo sensible, según NEC sección 250-74, excepción No 4.**

Entonces, se necesitarán los siguientes conductores:

- (1) Conductor de Fase (generalmente negro)
- (2) Conductor Identificado (neutro, blanco)
- (3) Conductor de Tierra del Equipo del Sistema (verde)
- (4) Conductor de Tierra del Equipo Aislado (generalmente verde con banda amarilla)

No se recomienda confiar en el metal de los ductos. La prueba de Harold Kaufmann sobre la forma en que fluyen las corrientes durante una falla en un cable de potencia No. 4/0 AWG y más grandes concluye que un conductor interno de aterrizaje mejora la eficiencia del retorno por tierra. Para conductores No. 12 AWG hasta No. 6 AWG, Robert West demostró que el efecto de incremento de la impedancia no es un factor.

Los conductores internos de retorno para tierra mejoran la confianza especialmente si se involucra aterrizaje de equipo electrónico sensible. La Fig. 43 ilustra la circuitería y la trayectoria del conductor aislado de aterrizaje, a través de tableros intermedios en la ruta, hasta el punto en donde se aterriza el sistema.

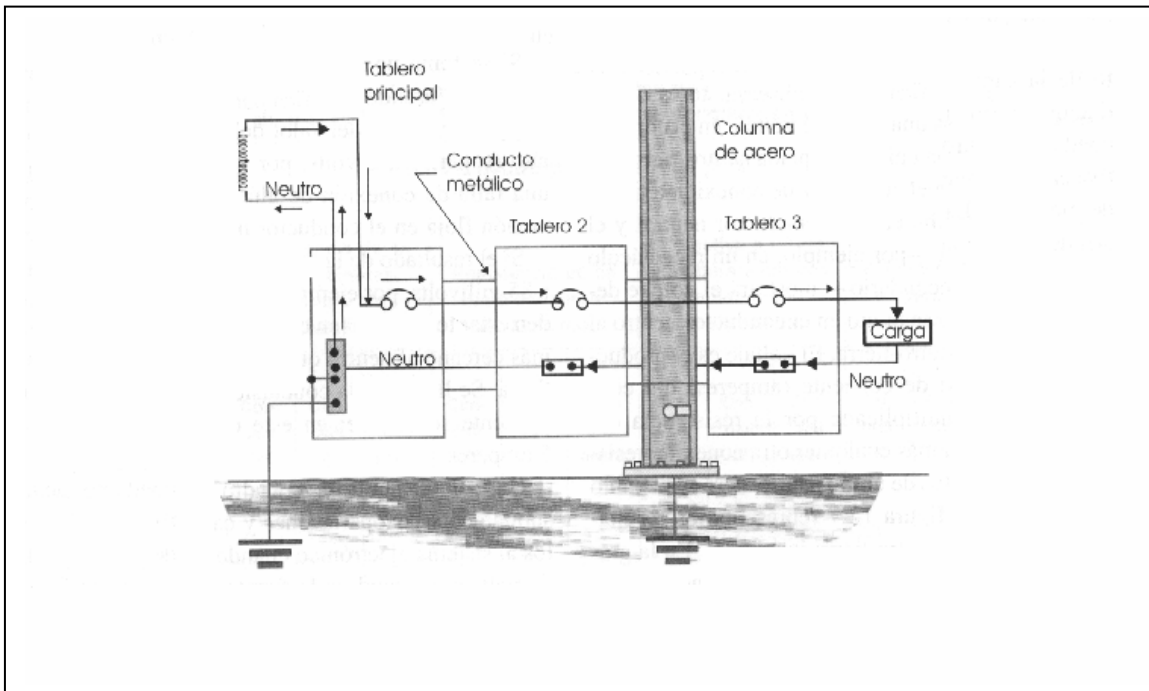
Cuando hay un número grande de estos conductores aislados, es lógico conectarlos todos juntos en una barra de aterrizaje sensible, en el gabinete más cercano al electrodo de aterrizaje y llevar un conductor grande al terminal principal de aterrizaje.

## **21.9 Conexión a tierra y neutro**

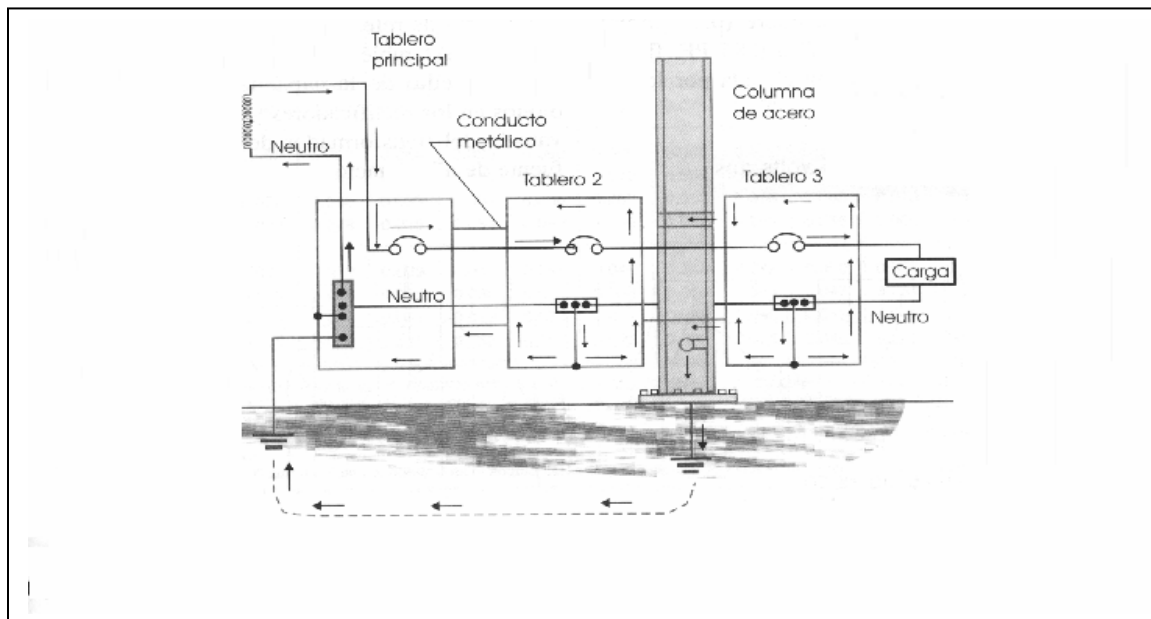
Los conductores de conexión a tierra y neutro se deben unir conjuntamente en un solo punto. Idealmente este punto sería el secundario de un transformador reductor o de un transformador de aislamiento, que este situado dentro o inmediatamente adyacente al equipo electrónico de cómputo. La segunda opción sería el centro de distribución de alimentación adyacente a la sala de computadoras.

El neutro nunca se debe conectar a tierra en un tablero secundario. Además, esto constituye una violación del Código Eléctrico Nacional. La conexión del neutro a tierra en un tablero secundario crea un lazo de tierra en el circuito de alimentación, lo que inyecta ruido directamente a la computadora y su instalación electrónica periférica. La *figura 44* ilustra una conexión correcta. En este caso el neutro conduce la corriente del neutro a la tierra.

Cuando la barra colectora neutral se conecta a tierra en un tablero secundario (*figura 45*) la corriente neutral de retorno se divide en esta conexión, o corto, y fluirán en ambos conductores: en el neutro y en el de conexión a tierra y también posiblemente en el conducto. Como resultado se producirán ruidos eléctricos de tierra y se creará posiblemente, un severo peligro en cuanto a seguridad. La corriente que fluye en los conductos puede desarrollar voltajes peligrosos a tierra que son un gran riesgo para el personal.



**FIGURA 44. Control del flujo de corriente cuando la barra neutral se conecta a tierra en el tablero principal o de servicio.**



**FIGURA 45. La unión del conductor neutro a la cubierta del equipo (tierra) en un tablero secundario produce un flujo de corriente sin control, por lo que existen múltiples trayectorias de retorno para la corriente de fase.**



El neutro nunca se debe conectar a la armadura del equipo y la corriente de retorno nunca debe fluir por los conductores de conexión a tierra. Los equipos aprobados o listados por los laboratorios UL nunca permiten que las corrientes fluyan en los conductores de conexión a tierra.

Algunos productos, debido a las características de los filtros de las líneas de alimentación, desarrollan pequeñas corrientes de fuga a tierra. La falla de estos filtros —o falla del supresor de voltaje de modo común—, puede generar una corriente peligrosa a tierra.

Los neutrales y las tierras nunca se deben conectar en forma de cadena. Es decir, nunca se debe compartir ni el conductor neutro ni el conductor de tierra. El alambrado de cada circuito dentro del tablero de distribución, así como en cada receptáculo o unidad de equipo alimentado por él se debe hacer de tal forma que no se comparta ni el conductor neutro ni el conductor de conexión a tierra, con cualquier otro circuito, receptáculo, o equipo. El hecho de compartir neutros o tierras, estando conectados los equipos al mismo conductor, se transfieren y comparten problemas entre equipos. Al compartir conductores también aumentan los problemas individuales de cada equipo dentro de un sistema computarizado.

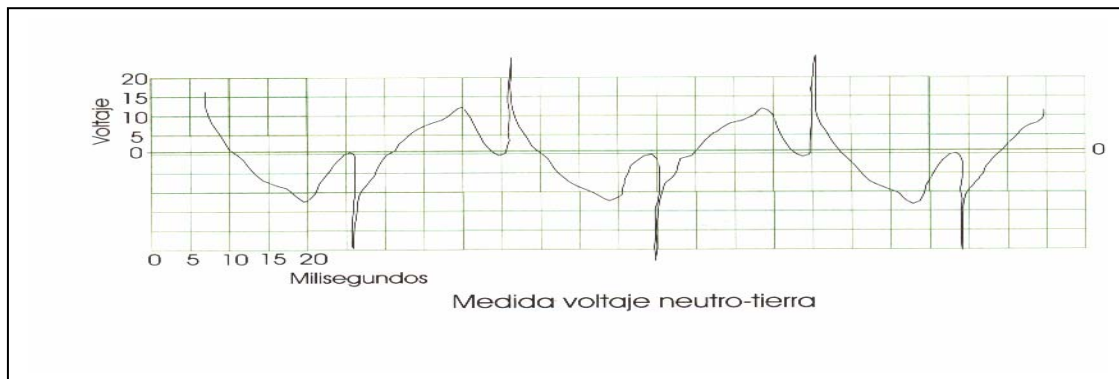
### **21.10 Como detectar un sistema neutro-tierra incorrecto**

La relación del voltaje entre los conductores neutro y de tierra puede ser un buen indicio de la calidad del sistema de tierra. En una instalación de alto grado, todas las conexiones del alambrado son de mínima resistencia y su cantidad se mantiene en un mínimo.

Supuestamente el conductor de tierra nunca transporta corriente o está destinado a transportar corriente. Si el conductor neutro porta corriente, habrá un voltaje generado entre éste y los conductores de tierra, que representa una caída de voltaje en el conductor neutro. Con una unión apropiada neutro-tierra, no existe corriente en el conductor de conexión a tierra, una medición hecha entre el conductor neutral y el conductor a tierra —por ejemplo, en un receptáculo o en un tablero secundario—mostrará el voltaje desarrollado, desde ese punto en el conductor neutro al punto de unión neutro-tierra. El voltaje es el producto de la cantidad de corriente (amperes) del conductor neutro, multiplicada por la resistencia del conductor neutro, más cualquier otra conexión resistiva entre los puntos de unión neutro-tierra y el punto de medición. La *figura 46* representa los resultados de una unión neutro —tierra incorrecta. En la grafica se pueden observar picos de energía que exceden 23 volts de pico a pico.

Por ejemplo: se supone que un conductor neutro formado por 30 m (100 pies) AWG #12 de cobre transporta una corriente senoidal de 5 amperios. El voltaje del neutro a tierra será la impedancia de 30 m (100 pies) de alambre # 12 de cobre (0.17 ohms) usando la columna “Z efectiva” a 0.85 PF, *figura 47* (tabla 9 del Código), multiplicada por la corriente (5 amperios).

$$V = IZ = 5 \times 0.17 = 0.85 \text{ volts rms}$$



**FIGURA 46. Medida de voltaje neutro-tierra con un osciloscopio.**

Si se toma una medición real en el punto 30 m (100 pies, usando una lectura real rms del voltímetro) y el resultado del valor del voltaje es demasiado alto (superior a 2 volts, por ejemplo) puede existir una falla de conexión de alta resistencia o una conexión floja en el conductor neutro.

Si el resultado de la medición es muy bajo (menor a 85 milivolts, por ejemplo) el neutro y la tierra pueden estar tocándose (en cortocircuito) en algún punto más cercano al neutro que al punto de unión neutro-tierra. Se llega a esta conclusión si se supone que la corriente se conoce; en este caso se consideró de 5 amperios.

Un voltaje neutro-tierra alto puede interrumpir súbitamente las operaciones y causar errores de datos al sistema electrónico cuando esta señal de ruido de voltaje se acopla a la fuente de alimentación de cd. La fuente de alimentación puede tener capacitores de acoplamiento que están conectados entre la tierra de voltaje cd de referencia y el conductor de conexión a tierra de voltaje de ca, para reducir el ruido a la salida de cd.

La tierra de referencia de voltaje (referencia cero para lógica) también está acoplada al conductor neutro por medio de la capacitancia a través de los diodos

en los rectificadores y la capacitancia de devanado del transformador de alta frecuencia en la fuente de alimentación conmutada de cd.

**FIGURA 47. Tabla 9 del Código**

| Ohms a neutro por cada 1000 pies |                                                              |                       |                                                                     |                    |                       |                                                   |                    |                       |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|
|                                  | X <sub>L</sub><br>(Reactancia)<br>para todos<br>los alambres |                       | Resistencia de ca<br>Para alambres<br>de cobre sin<br>recubrimiento |                    |                       | Resistencia de ca<br>Para alambres<br>de aluminio |                    |                       |
| Cali-<br>Bre<br>AWG/<br>kcmil    | Con-<br>Duit<br>PVC,<br>Al                                   | Con-<br>Duit<br>Acero | Con-<br>Duit<br>PVC                                                 | Con-<br>duit<br>Al | Con-<br>Duit<br>Acero | Con-<br>Duit<br>PVC                               | Con-<br>duit<br>Al | Con-<br>Duit<br>Acero |
| 14                               | 0.058                                                        | 0.073                 | 3.1                                                                 | 3.1                | 3.1                   | --                                                | --                 | --                    |
| 12                               | 0.054                                                        | 0.068                 | 2.0                                                                 | 2.0                | 2.0                   | 3.2                                               | 3.2                | 3.2                   |
| 10                               | 0.050                                                        | 0.063                 | 1.2                                                                 | 1.2                | 1.2                   | 2.0                                               | 2.0                | 2.0                   |
| 8                                | 0.052                                                        | 0.065                 | 0.78                                                                | 0.78               | 0.78                  | 1.3                                               | 1.3                | 1.3                   |
| 6                                | 0.051                                                        | 0.064                 | 0.49                                                                | 0.49               | 0.49                  | 0.81                                              | 0.81               | 0.81                  |
| 4                                | 0.048                                                        | 0.060                 | 0.31                                                                | 0.31               | 0.31                  | 0.51                                              | 0.51               | 0.51                  |
| 3                                | 0.047                                                        | 0.059                 | 0.25                                                                | 0.25               | 0.25                  | 0.40                                              | 0.41               | 0.40                  |
| 2                                | 0.045                                                        | 0.057                 | 0.19                                                                | 0.20               | 0.20                  | 0.32                                              | 0.32               | 0.32                  |
| 1                                | 0.046                                                        | 0.057                 | 0.15                                                                | 0.16               | 0.16                  | 0.25                                              | 0.26               | 0.25                  |
| 1/0                              | 0.044                                                        | 0.055                 | 0.12                                                                | 0.13               | 0.12                  | 0.20                                              | 0.21               | 0.20                  |
| 2/0                              | 0.043                                                        | 0.054                 | 0.10                                                                | 0.10               | 0.10                  | 0.16                                              | 0.16               | 0.16                  |
| 3/0                              | 0.042                                                        | 0.052                 | 0.077                                                               | 0.082              | 0.079                 | 0.13                                              | 0.13               | 0.13                  |
| 4/0                              | 0.041                                                        | 0.051                 | 0.062                                                               | 0.067              | 0.063                 | 0.10                                              | 0.11               | 0.10                  |
| 250                              | 0.041                                                        | 0.052                 | 0.052                                                               | 0.057              | 0.054                 | 0.085                                             | 0.090              | 0.086                 |
| 300                              | 0.041                                                        | 0.051                 | 0.044                                                               | 0.049              | 0.045                 | 0.071                                             | 0.076              | 0.072                 |
| 350                              | 0.040                                                        | 0.050                 | 0.038                                                               | 0.043              | 0.039                 | 0.061                                             | 0.066              | 0.063                 |
| 400                              | 0.040                                                        | 0.049                 | 0.033                                                               | 0.038              | 0.035                 | 0.054                                             | 0.059              | 0.055                 |
| 500                              | 0.039                                                        | 0.048                 | 0.027                                                               | 0.032              | 0.029                 | 0.043                                             | 0.048              | 0.045                 |
| 600                              | 0.039                                                        | 0.048                 | 0.023                                                               | 0.028              | 0.025                 | 0.036                                             | 0.041              | 0.038                 |
| 750                              | 0.038                                                        | 0.048                 | 0.019                                                               | 0.024              | 0.021                 | 0.029                                             | 0.034              | 0.031                 |
| 1000                             | 0.037                                                        | 0.046                 | 0.015                                                               | 0.019              | 0.018                 | 0.023                                             | 0.027              | 0.025                 |

Resistencia y reactancia de ca para cables de 600 volts, trifásicos,  
60 Hz, 75°C (167°F) – Tres conductores sencillos en conduit

Cualquier frecuencia de ruido presente entre el conductor neutro y tierra en el lado del voltaje de ca de la fuente de alimentación de cd, puede acoplarse a través de estas capacitancias a la señal de salida de cd que alimenta a los circuitos integrados (CI) del equipo electrónico.

Los fabricantes de equipo electrónico especifican un máximo voltaje neutro-tierra para sus respectivos equipos. Puede estar especificado en rms volts, como por ejemplo 0.5 Vrms, o en voltaje de pico a pico, por ejemplo 2 Vpp.

El diseño del sistema de distribución para cualquier equipo electrónico debe considerar la última cifra mencionada y el calibre del cable neutro se tendrá que escoger para asegurar una caída de voltaje de menos de 2 volts, de pico a pico, en el punto de la instalación del equipo. Dos volts pico a pico es igual a 0.7 volts rms de acuerdo con la formula:

$$V_{pp} = V_{rms} \times 2.828$$

$$V_{rms} = V_{pp}/2.828$$

$$V_{rms} = 2/2.828 = 0.7 \text{ V}$$

Para el siguiente ejemplo la medida de 0.85 Vrms se convierte en:

$$V_{pp} = 0.85 \times 2.828 = 2.4 \text{ V}$$

Si los 30 m (100 pies) de conductor de AWG #12 está transportando su corriente limite, 20 amperios, el voltaje de pico a pico del equipo sería:

$$V_{pp} = 20 \times 0.17 \times 2.828 = 9.6 \text{ V}$$

En este caso la impedancia se debe reducir para que produzca un voltaje neutro- tierra aceptable. Con el fin de lograr un voltaje neutro-tierra inferior a 2 Vpp en nuestro ejemplo, la impedancia debe ser menor que:

$$Z = 2 / (20 \times 2.828) = 0.035 \text{ ohms}$$

Existen tres posibilidades para reducir la impedancia a 0.035 ohms:

1. Aumentar el calibre del conductor neutro y por lo tanto reducir la impedancia. En la tabla de la *figura 47* encontramos que sería necesario instalar un neutro AWG # 4, el cual tiene una impedancia de 0.029 ohms por cada 30 m (100 pies)
2. Disminuir la longitud del alambre calibre AWG #12 a 6 m (veinte pies), tendría una impedancia total de 0.034 ohms. Esto se puede hacer instalando una “fuente derivada separadamente” cerca del equipo. Las posibilidades serían un transformador de aislamiento, un transformador reductor, una unidad de distribución de alimentación (con un transformador interior), etcétera.
3. Combinando las posibilidades 1 y 2.

#### **21.11 Selección del calibre del cable para cumplir con las normas de la industria de las computadoras**

La especificación del voltaje de neutro-tierra, que establece un voltaje inferior a 2 volts pico a pico, puede ser difícil de obtener. Este voltaje resulta de la corriente que fluye en el conductor neutro y es el producto de ella y de la resistencia del alambre.

El balance adecuado de las cargas polifásicas reducirá la corriente en el neutro.

Esta no es una opción para un circuito monofásico. En este circuito la resistencia se debe reducir mediante el uso de alambres de longitud más corto o de mayor calibre –números pequeños de calibre AWG--. Los tramos largos de cable requieren aumentar el calibre del conductor neutro en el diseño a medida que aumenta la distancia.

La resistencia conocida de los alambres de cobre y aluminio la proporciona la tabla 9 del Código. Las unidades de resistencia en esta tabla son en ohms por 300 m (1000 pies) de alambre.

Para calcular el calibre real del conductor neutro y lograr la especificación de voltaje de 2 volts de pico a pico, neutro-tierra, dados los factores de ajuste de voltaje del 80%, se puede utilizar la formula siguiente, la cual es una formula

empírica para el calculo aproximado del conductor neutro, y que se usa junto con la tabla 9 del Código:

$$R = 1000 / (I_{cb} \times L_m)$$

En donde:

$L_m$  = Longitud máxima del alambre en pies

$I_{cb}$  = Capacidad de corriente de disparo para el interruptor de circuito

$R$  = Resistencia del conductor neutro en ohms por 300 m (1000 pies) de alambre

En el ejemplo siguiente se aplican estas herramientas practicas para seleccionar el calibre del neutro: En un sitio se requiere instalar un pequeño sistema computarizado que se debe ubicar a 19.5 m (65 pies) del tablero de distribución eléctrica para computadoras más cercano. Calcule el calibre del conductor neutro requerido para un circuito de 20 amperios, usando la formula dada anteriormente.

$$R = 1000 / (I_{cb} \times L_m) = 1000 / (20 \times 65)$$

$$= 0.77 \text{ ohms/30 m (1000 pies)}$$

Usando los valores dados en la tabla 9-Z del Código -- efectiva a 0.85 Pf -- y usando "conducto de acero", seleccionamos un conductor de cobre AWG #8 o uno de aluminio del #6. Los conductores de aluminio no ofrecen seguridad en calibres menores del número 4 dentro de un edificio, así que seleccionaremos un conductor de cobre #8.

Por tanto, este circuito requiere tres conductores de cobre AWG # 12: para la fase, el sistema a tierra, y la tierra de seguridad y un conductor neutro de cobre del #8. Si posteriormente la carga monofásica instalada requiere 9 amperios para operar, también tendríamos 9 amperios de corriente neutra. Calcule el voltaje de pico a pico neutro-tierra para un cable 19.5 m (65 pies) de largo:

$$V_{rms} = (0.7 \times 0.065) \times 9 = 0.41 \text{ V}$$

$$V_{pp} = 0.41 \times 1.414 \times 2 = 1.16 \text{ V}$$

Si la corriente de carga aumenta a 16 amperes:

$$V_{rms} = (0.7 \times 0.065) \times 16 = 0.73 \text{ V}$$

$$V_{pp} = 0.73 \times 1.414 \times 2 = 2.06 \text{ V}$$

## **21.12 Especificaciones para la unión eléctrica del sistema**

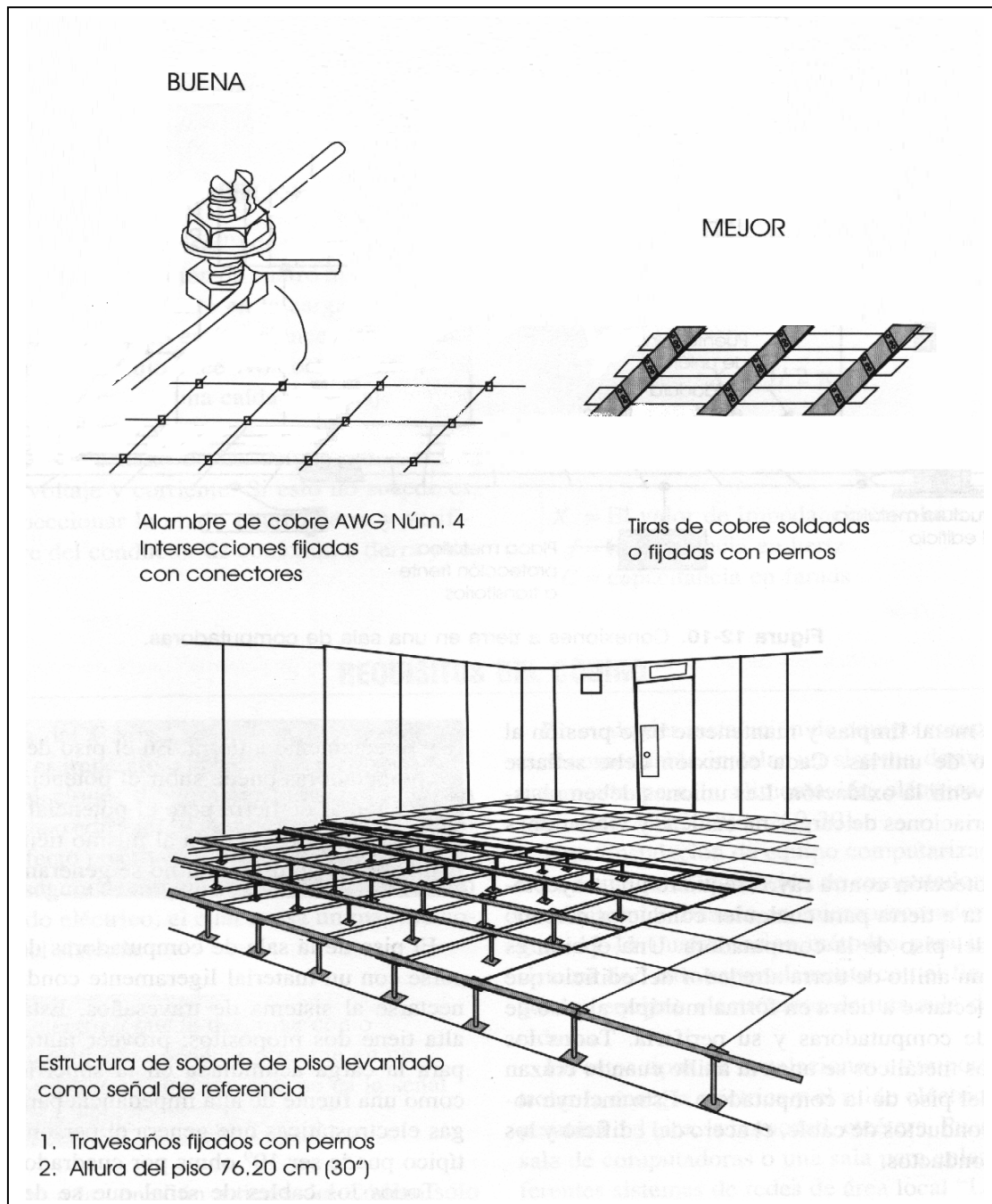
Las corrientes de los rayos siguen la trayectoria de mínima resistencia a tierra. Cuando un edificio recibe una descarga de este tipo, la corriente que fluye puede seguir como trayectoria la estructura metálica del inmueble, las líneas de energía, los conductos de cables u otros conductos metálicos. Si uno de estos conductores esta cerca de una instalación de computadoras, se pueden generar diferencias significativas de potencial, a menos que se tomen precauciones especiales.

Un pulso de 20 000 amperes desarrolla 5000 volts a través de 0.25 ohms. Esto es solo 0.05 microhenrys a 1.0 megahertz. Las diferencias de potencial de esta magnitud pueden destruir el equipo electrónico (hardware). Si todo el metal de un edificio se une cuidadosamente, la diferencia de potencial minimizará y se reducirán las probabilidades de daños causados por los rayos.

En una instalación típica de computadoras puede parecer que la confiabilidad del sistema de alimentación no concuerda con los requisitos de conexión a tierra. La tierra de seguridad que conecta los equipos forma lazos de tierra. Esto se combina con la necesidad de tierra para prevenir daños causados por los rayos.

La apertura de uniones reduce el flujo de la corriente de ruido, pero esto se contrapone con las necesidades previamente descritas. Los inductores de separación se han usado, pero esta opción no ha sido vista favorablemente por las agencia reguladoras, debido a las altas impedancias a tierra que presentan altas frecuencias.

Este dilema se puede resolver usando un plano de tierra – con referencia a tierra – adecuadamente diseñado, el cual puede servir como piso de la sala de computadoras. La *figura 48* ilustra el plano equipotencial.



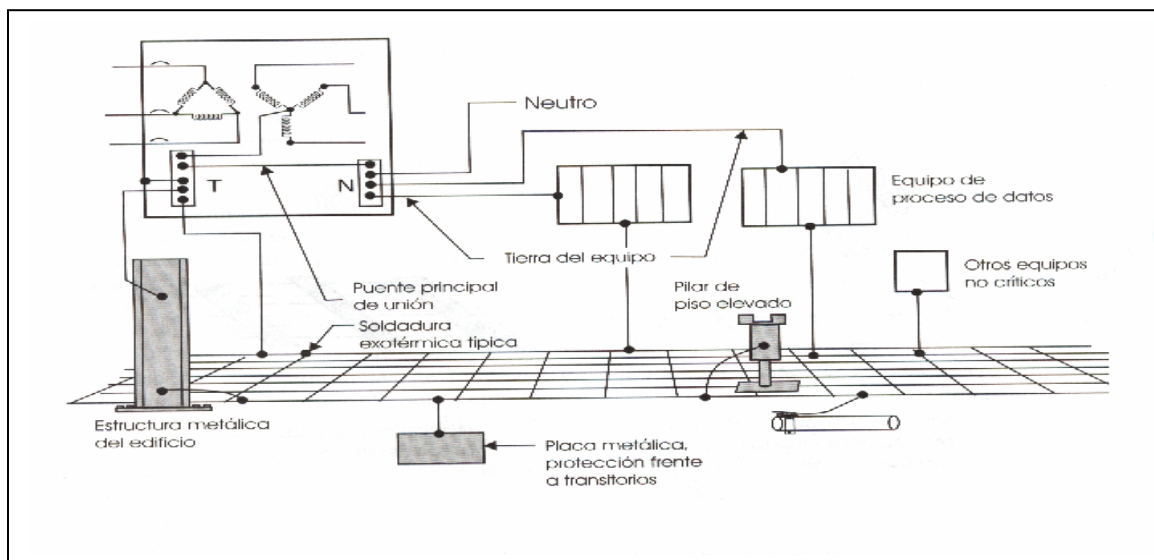
**FIGURA 48. El piso elevado forma un plano equipotencial.**



Una solución puede ser la utilización de una lámina metálica. Una lámina delgada de metal tiene una baja impedancia de superficie. Una lámina de 0.03 mm de cobre tiene una impedancia en su superficie de 1 megohm por  $\text{cm}^2$  aun a 10 megahertz. Desafortunadamente es muy difícil fijar como soporte una lámina delgada de cobre por sus características físicas. Un método práctico es usar una rejilla de travesaños interconectados como soportes de suelo y plano de tierra. La cerámica del piso encaja en los travesaños, permitiendo el acceso al interior del piso. Los travesaños constituyen la estructura, la cual puede soportar el peso del equipo pesado. Dos requisitos esenciales son:

1. Emplear travesaños atornillados – los soportes laterales de sujeción se instalan entre los pedestales de soporte.
2. Usar miembros compatibles (estaño o zinc) de manera que se puedan efectuar conexiones a presión de baja resistencia.

Los travesaños usualmente se montan entre sí a distancias de 0.6 m (2pies) de centro a centro. Esta clase de espacio entre los alambres de la rejilla parece una limitante para la operación de alta frecuencia del plano de tierra, sin embargo, el piso es adecuado para niveles inferiores a 30 megahertz. Si el diseño de la sala de computadoras es correcto, las señales de ruidos por encima de estas frecuencias son ignoradas o filtradas. Véase la *figura 49*



**FIGURA 49. Conexiones a tierra en una sala de computadoras.**

Los travesaños en el piso de una sala de computadoras se deben unir con resistencias de valores inferiores a 1.0 millohm. Esto es necesario para que la rejilla funcione como una lamina delgada a bajas frecuencias. Estas conexiones de baja resistencia requieren atención detallada en su diseño e instalación. Todas las conexiones se deben realizar con las superficies de metal limpias y se deben mantener bajo presión al momento de unir las. Cada conexión se debe sellar para prevenir la oxidación. Las uniones deben resistir las variaciones de cargas mecánicas y vibraciones del piso.

La protección contra rayos requiere una trayectoria directa a tierra para cualquier conductor cercano al área del piso de la computadora. Una opción es proveer un anillo a tierra alrededor del edificio que se debe conectar a tierra en forma múltiple al piso de la sala de computadoras y su periferia. Todos los elementos metálicos se unen al anillo cuando cruzan el área del piso de la computadora. Esto incluye todos los conductos de cable, el acero del edificio y los demás conductos.

Cualquier corriente inducida por los rayos tomará una trayectoria hacia fuera del anillo y directamente a tierra. En el piso de las computadoras puede subir el potencial con relación al de tierra pero el potencial de todos los conductores subiría al mismo tiempo. Sin diferencia de potencial no se generan daños.

El piso de la sala de computadoras se debería fabricar con un material ligeramente conductivo y conectarse al sistema de travesaños. Esta resistencia alta tiene dos propósitos: proveer tanto un drenaje para la carga acumulada en la superficie del piso como una fuente de alta impedancia para las descargas electrostáticas que genera el personal. Un valor típico puede ser  $10^9$  ohms por cuadrado.

Todos los cables de señal que se desplazan por debajo del piso de la sala de computadoras deberían hacerlo hacia la superficie del plano de tierra. Esto reduce tanto las áreas de lazos cerrados como los ruidos eléctricos inducidos. Los cables que salen de protección del área del piso deben seguir una extensión del plano de tierra que esté correctamente unida a ese plano.

### **21.12.1 Efectos de una carga desequilibrada**

Las lecturas altas (o “ruidosas”) de voltaje en un sistema trifásico de distribución de cuatro hilos, pueden indicar un balance deficiente en la carga de las tres fases. Las cargas que no están balanceadas adecuadamente causan un flujo

excesivo de corriente en el neutro por lo que ocurre una caída de voltaje mayor a través del conductor neutro.

El balanceo adecuado de las cargas reducirá las lecturas de voltaje y corriente. Si esto no sucede es preciso inspeccionar la unión neutro-tierra y verificar el calibre del conductor de conexión a tierra y su instalación.

Es importante destacar que cuando la mayor porción de la carga consiste en descargas eléctricas de alumbrado, procesamiento de datos o equipo similar, existirán corrientes armónicas en el conductor neutro. Si éstas son altas, también lo serán los voltajes “neutro-tierra”. Debido a que este ruido armónico entre el neutro y tierra es de frecuencias más altas, la impedancia del acoplamiento capacitivo a través de la fuente de alimentación de cd se reduce y el efecto adverso del ruido aumentará.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

En donde:

$X_c$  = El valor de impedancia en ohms

$F$  = la frecuencia en hertz

$C$  = capacitancia en farads

### **21.13 Requisitos del código**

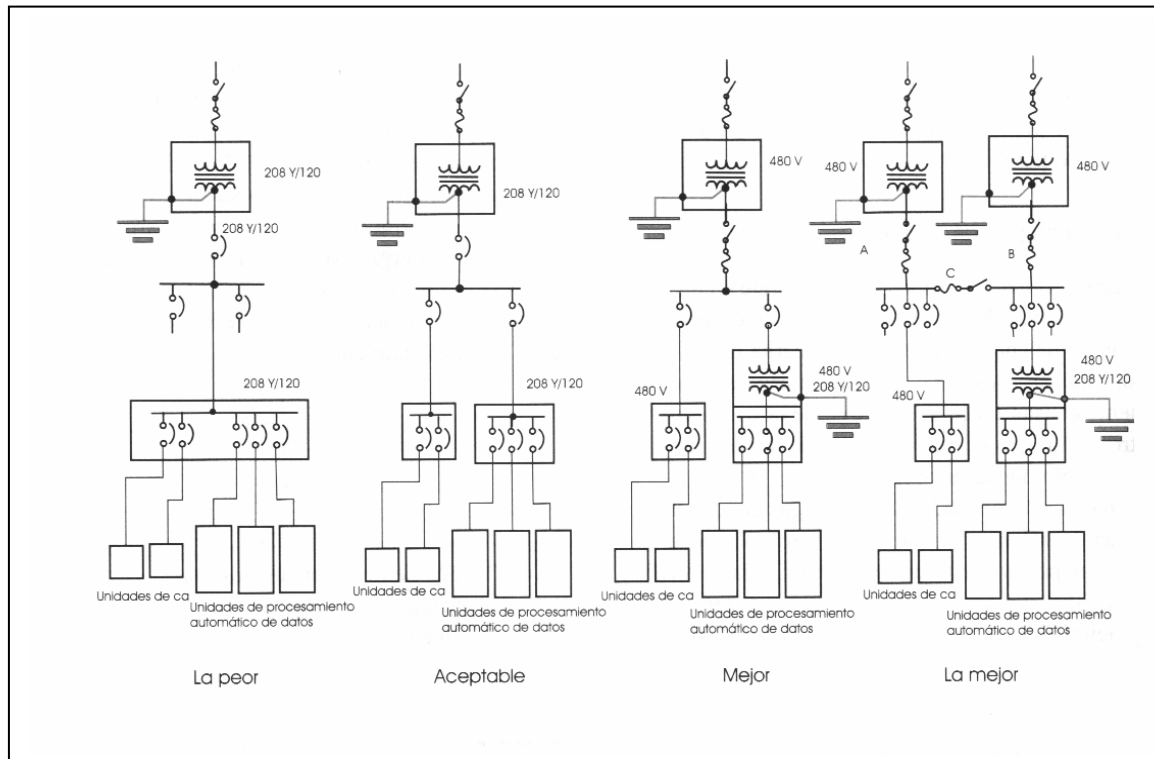
Las normas del Código se aplican por razones de seguridad y es imperativo observarlas en los ambientes de instalaciones de computadoras así como en toda la planta o edificio. El cumplimiento del Código tendrá un efecto positivo en la operación del equipo, lo que no asegura de ninguna manera una instalación libre de ruido eléctrico, el cual causa un mal funcionamiento del sistema.

El ruido eléctrico puede definirse como cualquier voltaje o corriente presente en un conductor, o en un circuito, que no es la señal eléctrica deseada.

En cuanto a la conexión a tierra del Código solo analiza las consideraciones de seguridad y no contempla los efectos de dicha conexión en la operación de equipos electrónicos.

En cualquier instalación de equipo computarizado es recomendable instalar un sistema derivado separadamente para la alimentación eléctrica [Código de secciones 250-200(d) y 250-30].

Una “instalación de equipo computarizado” se refiere a cualquier instalación de computadoras o equipo electrónico basado en microprocesadores. La *figura 50* ilustra varios métodos para instalar un sistema derivado separadamente con el fin de proteger los equipos electrónicos de una sala de computadoras.



**FIGURA 50. Instalaciones de un sistema derivado separadamente para proteger una sala de computadoras.**

En estos tipos de instalaciones es importante controlar la energía eléctrica y el ruido eléctrico, la temperatura del aire, la humedad, etcétera. Puede ser una sala de computadoras o una sala para enlazar los diferentes sistemas de redes

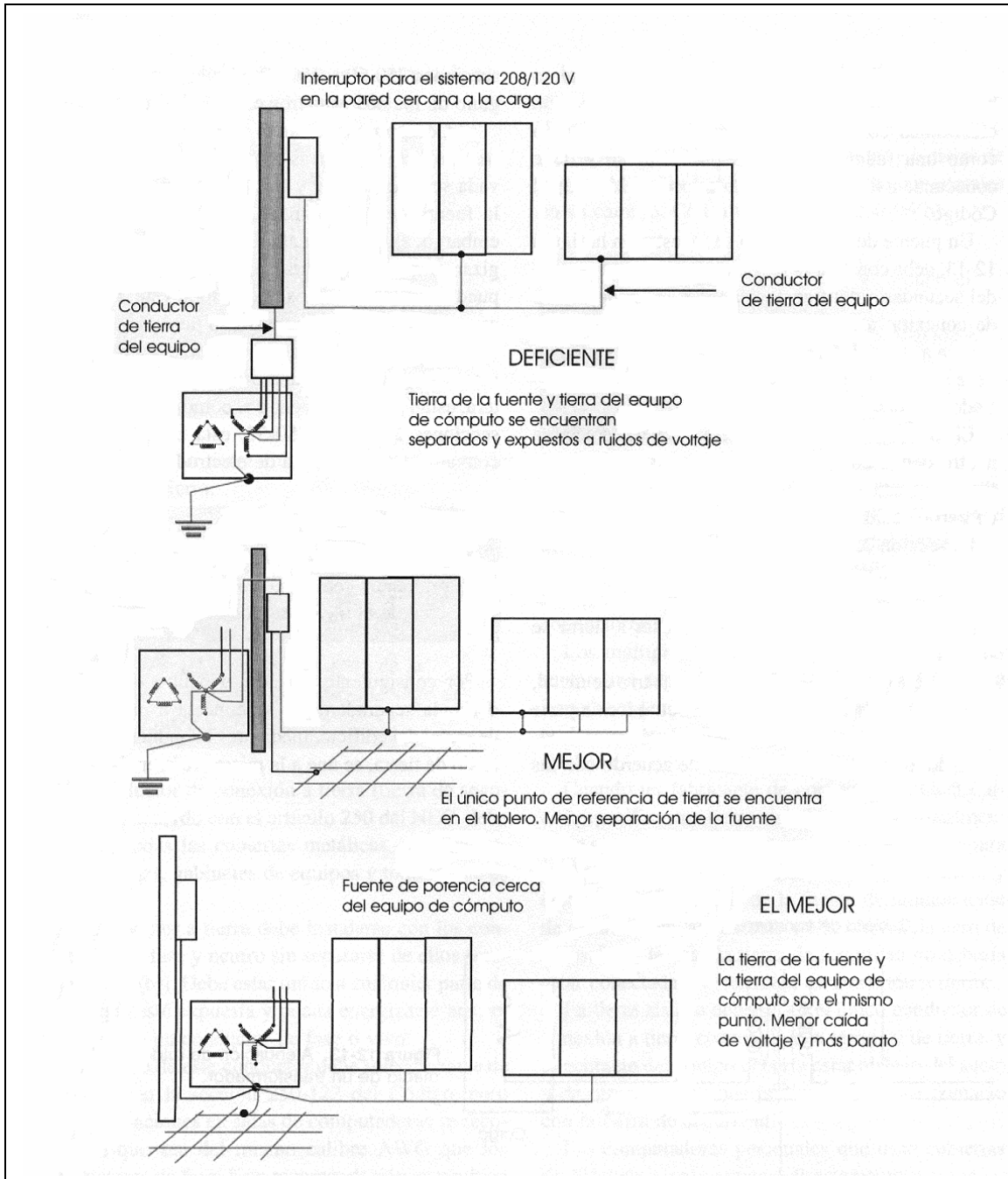
de área local “LAN”, una estación de bombeo, un centro conmutador de teléfonos, un centro de control de procesos, centros CT o MRI, etcétera.

Un sistema derivado separadamente no solo aísla la instalación del resto de la planta, sino que también proporciona un punto controlado de unión neutro-tierra y un mejor control de los problemas de distorsiones armónicas y de ruido eléctrico. Además, crea un nuevo neutro que puede ser un generador o un transformador. La unidad de distribución de energía comúnmente usada, que cuenta con un transformador y un tablero de distribución, es una fuente derivada separadamente.

#### **21.13.1 Dispositivos de tratamiento para las líneas que tienen conexión a tierra**

Cada instalación de ambiente computarizado debe recibir energía de su propio transformador dedicado, el cual debería, preferiblemente, bajar el voltaje de 480 volts, de servicio trifásico, al típico voltaje de una computadora, por ejemplo: 208 Y/120 volts. Sin embargo, el transformador puede ser del tipo elevador o de una relación uno-a-uno, si es requerido, y el voltaje de salida debe concordar con los requisitos del equipo. También puede ser simplemente un transformador de aislamiento que proporciona solo rechazo de modo-común y aislamiento ca.

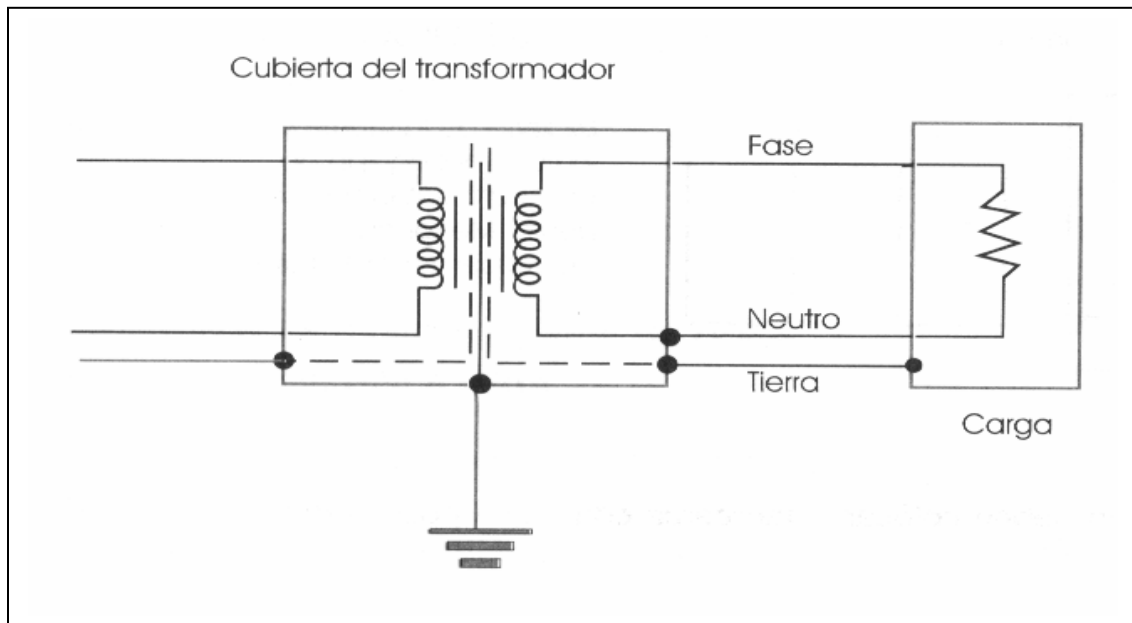
Si se requiere, este transformador puede tener un blindaje de Faraday para la atenuación de ruido “en modo común”, lo mismo que ser de voltaje constante para una mejor regulación de voltaje, o puede tener un acondicionador de línea, lo que proporciona regulación y atenuación de ruido. La razón primordial 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 la *figura 51*.



**FIGURA 51. Los transformadores de asilamiento deben colocarse tan cerca como sea posible del equipo computarizado y al sistema de tierra local.**

Un “transformador dedicado” – con aislamiento blindado, núcleo ferorresonante y con derivación electrónica conmutada, etcétera-, es considerado como una fuente derivada separadamente y se debe conectar a tierra conforme a la sección 250-30 del Código.

Un puente de unión, como se muestra en la *figura 52*, debe conectar la barra neutro, o la terminal  $X_0$  del secundario del transformador, a los conductores de conexión a tierra o a la barra colectora de conexión a tierra. El calibre de este puente de unión no debe ser menor que el calibre del conductor del electrodo de tierra de la tabla 250-66.



**FIGURA 52. Atenuación de ruido común por medio de un transformador.**

El conductor conectado a tierra o la barra colectora neutro se debe conectar al sistema de electrodo de tierra del edificio con un “conductor de electrodo de tierra”, calibrado de acuerdo con la tabla 250-66.

La sección 250-30 (a) (3) establece que “el electrodo de tierra o de puesta a tierra estará localizado tan cerca como sea posible y preferiblemente en la misma área donde el conductor de puesta a tierra se conecta al sistema”.

El electrodo de tierra debe ser una barra de metal, efectivamente conectado a tierra, el cual forma parte de la estructura, un tubo del agua efectivamente conectado a tierra u otro electrodo de acuerdo con las secciones 250-50 y 250-52, esto en caso de que ninguno de los dos primeros esté disponibles.

El Código no requiere el empleo de un conductor para conectar las barras colectoras, de la fuente derivada separadamente y la barra colectora a tierra de la fuente de suministro eléctrico del edificio. Sin embargo, exige que cualquier metal que pueda energizarse, se debe conectar a los demás metales que puedan ser energizados y que todo este sistema se conecte al sistema de conexión a tierra del edificio.

Si todos los elementos metálicos, soportes de la estructura, tubería, refuerzos, rejillas de tierra, etcétera, están conectados entre sí como lo establecen las secciones 250-50 y 250-52, esta configuración se convierte en el “sistema de electrodo de tierra”.

El sistema completo, cuando esta unido correctamente, se convierte en el voltaje de referencia cero para las frecuencias de la señal de alimentación de ca.

Por consiguiente, cuando el neutro de la fuente derivada separadamente se conecta a una columna de metal del edificio, mediante el conductor del electrodo de tierra, se une a la misma referencia de conductor del electrodo de tierra, para la entrada de servicio principal del edificio (acometida).

El transformador dedicado está ahora correctamente conectado a tierra, como una fuente de energía eléctrica, derivada separadamente. 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.

Dos sistemas a tierra emanan del punto único de unión neutro-tierra:

1. El sistema de conexión a tierra o “tierra de seguridad” también llamada “tierra del equipo”
2. El sistema de conexión a tierra de la “tierra aislada” que permite el Código en la sección 250-96(b)

El conductor de conexión a tierra (tierra de seguridad), de acuerdo con el artículo 250 del NEC, debe conectar todas las cubiertas metálicas, canalizaciones, bandejas, gabinetes de equipo y todo lo que es instalado.

El conductor a tierra se debe instalar con los conductores de fase y neutro sin separarse de ellos [sección 300-3(b)]. Debe estar unido a cualquier parte de



metal que este expuesta y pueda energizarse por accidente con un conductor de fase o vivo.

El calibre de este conductor se debe seleccionar de acuerdo con la sección 250-122 del Código, pero para instalaciones en salas de computadoras se recomienda que sea del mismo calibre AWG que los conductores de fase. Esta recomendación es también un requisito de muchos fabricantes de equipos.

El conductor de “tierra aislada” debe partir desde el punto de conexión a tierra del edificio, el punto “neutro-tierra” del edificio, y se debe extender - junto con los conductores de fase, el neutro y la tierra de seguridad -, sin hacer ningún contacto con metales en su camino. Consulte la sección 250-96(b)

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.

Muchos fabricantes de equipo especifican que este conductor sea del mismo calibre AWG que el del conductor de fase, y muchos fabricantes recomiendan que se use un cable de estaño en lugar del cable trenzado de siete hilos que se utiliza en los conductores de fase y neutro.

Los múltiples alambres del cable de estaño presentan una superficie más extensa, y por tanto, una impedancia mas baja a las altas frecuencias encontradas en los modernos sistemas de procesamiento de datos.

Cuando un fabricante de componentes electrónicos especifica una tierra aislada el equipo usualmente no proporciona una terminal de tierra aislada para tal fin. Solo se cuenta con una terminal de tierra y está unida a la entrada de la fuente de alimentación de ca, al chasis, al gabinete y a la referencia cero de datos. En este caso la tierra de seguridad no debería estar conectada a la terminal de conexión a tierra.

La tierra aislada debería ser el único conductor de conexión a tierra conectado a la terminal de tierra, y el gabinete del equipo debería estar aislado del suelo y de otros metales que pudieran entrar en contacto con la tierra de seguridad.

Las computadoras personales que usan cubiertas de plástico y se conectan directamente a tomacorrientes aislados en forma correcta proporcionan esta

clase de aislamiento. En este caso la tierra aislada es la tierra de seguridad. Como no es la situación ideal, se prefiere a la adopción donde la tierra de seguridad y la tierra aislada están unidas al equipo, lo que contradice el propósito de proveer una tierra aislada libre de ruido.

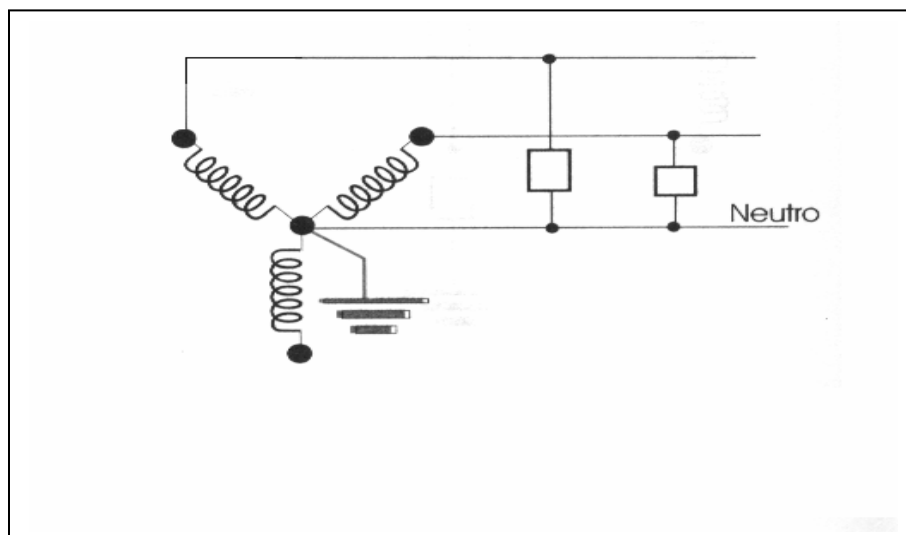
Es importante tener presente que en salas de computadoras o sistemas que alimenten a computadoras, cuando se instale una “fuente continua o interrumpida de alimentación” (UPS, por sus siglas en ingles), o una “fuente de alimentación de respaldo” (SPS, por sus siglas en ingles), el transformador se debe colocar en el lado de carga de la UPS o la SPS.

La UPS o SPS no son fuentes derivadas separadamente a menos que tengan un transformador en su salida como parte de su diseño original. Si no existe tal transformador, como parte integral de la UPS o SPS, entonces se añade un transformador.

Una instalación típica sería una UPS de 480 volts, de entrada y salida trifásica, con un transformador reductor de 480 volts tipo delta de 208/120 volts en estrella, que alimente un tablero de distribución dedicado solo para la computadora y sus equipos periféricos, en el centro o sala de computadoras (*figura 53*).

Las “unidades de distribución de alimentación” (PDU), también están disponibles para este fin y se pueden alimentar con 480 volts, tres fases en la entrada, y 208 Y/120 volts de salida a través de un tablero integral de distribución.

Cuando sea necesario se puede utilizar una UPS de gran capacidad, para conectar varias PDU a la salida de la UPS para alimentar numerosas salas de computadoras, u otras cargas para equipos computarizados.



**FIGURA 53. Sistema de supresión con buena conexión neutro-tierra y dos fases de un servicio trifásico.**

## 21.14 Sobrevoltajes transitorios

Los sobrevoltajes transitorios también llamados picos, impulsos o transitorios, son impulsos de alta energía de voltaje y corriente que viajan sobre la onda senoidal de 60 Hz y que presentan una frecuencia no repetitiva, un tiempo de ascenso rápido (1us a pico) y un tiempo de caída al 50% igual o menor a 1 ms. Por definición duran por lapsos menores de ½ ciclo de la frecuencia de alimentación, o sea 8.3 ms a 60 Hz.

Los sobrevoltajes transitorios son difíciles de detectar y por ello se requiere el uso de un analizador de línea en el sistema de distribución el tiempo suficiente para obtener resultados del ambiente eléctrico de la instalación. De acuerdo con la ley de Lenz, los transitorios se producen de acuerdo con las ecuaciones:

$$E = - di/dt$$

$$I = C dv/dt$$

## 21.15 Dispositivos de protección contra sobrecorrientes (SPD)

Las descargas atmosféricas inducen en las líneas de distribución de corriente alterna, líneas telefónicas, TV por cable y líneas de radiofrecuencia. Los conductores que llevan estos circuitos generalmente tienen diferente punto de entrada a la estructura o edificio y pueden tener dispositivos de protección conectados a diferentes tierras.

### Definición

**SPD:** (surge protective device, por sus siglas en ingles) es un dispositivo destinado a limitar las sobretensiones transitorias y desviar las sobrecorrientes. Este dispositivo cuenta con por lo menos un componente no lineal, conocido como supresor, supresor de picos, supresor de transitorios, supresor de sobretensiones (TVSS- Transient Voltaje Surge Supresor). Existen SPD'S para corriente alterna (CA), corriente directa (CD), radiofrecuencia (RF), etc.

### Función:

Un SPD protege al equipo electrónico sensible, de sobretensiones transitorias, causadas por los efectos directos o indirectos de las descargas eléctricas

atmosféricas o por las provocadas por maniobras de interruptores en las redes de distribución eléctrica.

### **21.15.1 Puntos de entrada de los transitorios**

Los transitorios provocados por descargas atmosféricas, sobre líneas de energía, telefonía, o líneas de datos, tienen diferentes puntos de entrada a los edificios, estructuras o instalaciones. Algunos equipos de energía, telefonía y datos, cuentan con protectores contra transitorios, los cuales en forma tradicional se encuentran conectados a diferentes puntos de conexión a tierra (práctica errónea y peligrosa).

Un transitorio o sobrevoltaje es una condición eléctrica de sobre-esfuerzo que tiene una duración menor a algunos milisegundos. Con el objetivo de enfatizar la naturaleza del evento, algunas veces el término se usa como sobrevoltaje transitorio. El transitorio puede causar daño o malfuncionamiento en equipo electrónico sensible. El daño es una falla del “hardware” que requiere la sustitución de los componentes afectados. El concepto malfuncionamiento se refiere a un funcionamiento erróneo temporal de un circuito o sistema y generalmente no requiere la sustitución de las partes afectadas, pero sí la intervención del operador.

Una aproximación lógica de la protección contra sobrevoltajes transitorios sería:

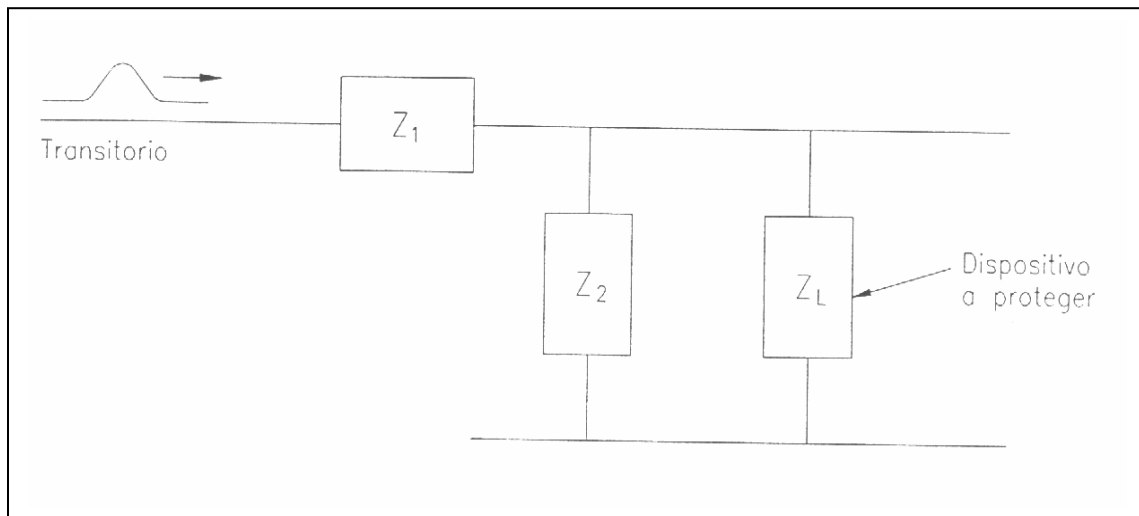
- a) Determinar el nivel al cual se puede presentar el daño al componente o sistema.
- b) Determinar el peor escenario considerando el nivel de sobrevoltaje que afectará a un dispositivo en particular.
- c) Diseñar e instalar un dispositivo de protección para limitar el peor escenario en cuanto al sobrevoltaje que dañaría el dispositivo.

Una estrategia común para limitar las corrientes transitorias en un sistema sería la siguiente:

- 1) Bloquear o limitar las corrientes transitorias a través de impedancias serie de gran tamaño.
- 2) Drenar las corrientes transitorias a través de una impedancia paralelo casi nula.
- 3) Una combinación de los dos métodos anteriormente mencionados.

### 21.15.2 Principios básicos para la aplicación de dispositivos de protección.

- 1) El dispositivo o circuito de protección debe tener una mínima influencia en la operación normal del sistema a proteger. Esto es, la impedancia serie debe ser mucho muy pequeña ( $Z_1 \ll Z_L$ ) y la impedancia paralelo debe ser muy grande ( $Z_2 \gg Z_L$ ) para las señales de operación normal del equipo a proteger, ver *Figura 54*.



**FIGURA 54. Circuito básico de protección contra transitorias.**

- 2) Durante condiciones anormales (condiciones transitorias) la impedancia serie debe ser muy grande ( $Z_1 \gg Z_L$ ) para limitar la corriente transitoria y la impedancia paralelo debe ser muy pequeña ( $Z_2 \ll Z_L$ ) para drenar la corriente a tierra.
- 3) Los dispositivos o circuitos de protección deben ser lo suficientemente robustos para soportar, sin dañarse, las señales transitorias.

Durante el sobre-esfuerzo eléctrico, el voltaje de la señal transitoria es más grande que el voltaje de la señal de operación normal. Por lo tanto, los elementos en arreglo paralelo con un comportamiento no lineal de sus características V-I (voltaje-corriente) pueden ofrecer muy baja impedancia durante las condiciones transitorias y una impedancia muy elevada bajo condiciones normales de operación. Las formas de onda de las señales de sobrevoltaje tienen un tiempo de subida o de bajada corto (una razón de cambio muy elevada), por lo que es necesario que los elementos en paralelo del dispositivo de protección respondan muy rápido, en el rango de los nanosegundos. Estos elementos pueden ser los entrehierros en aire y los tubos de gas, varistores y elementos semiconductores.

Los tres dispositivos más comunes utilizados para la protección contra sobrevoltajes transitorios son: los tubos de gas, los varistores de óxido metálico y los diodos de avalancha de silicio. Cada dispositivo tiene sus características específicas de desempeño.

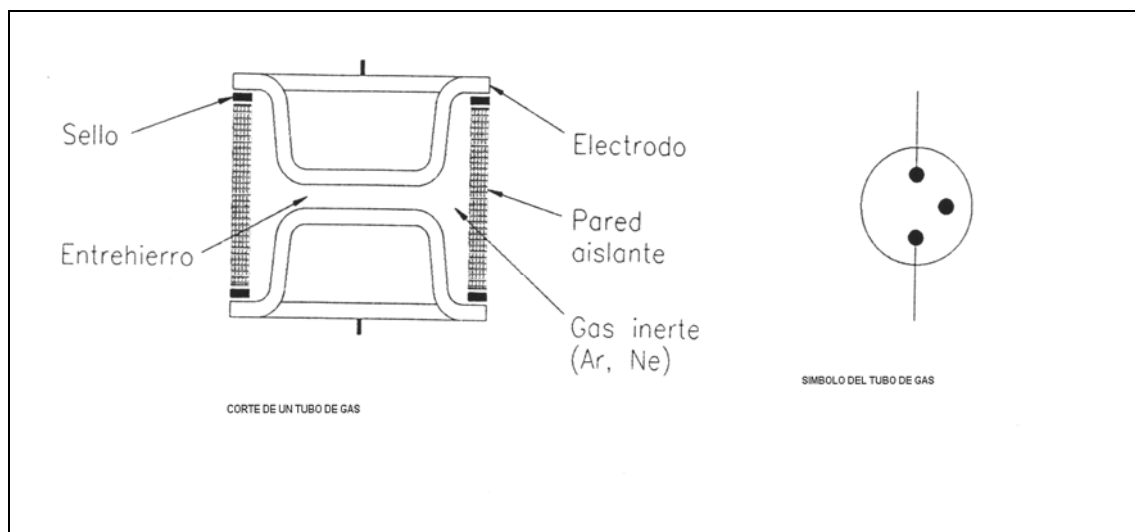
### **Tubos de gas**

Uno de los primeros elementos de protección contra transitorios fue el entrehierro en aire entre dos bloques de carbón. Una de las principales desventajas de este elemento fue que el carbón se erosionaba durante la conducción de grandes cantidades de corriente. Este hecho cambiaba las características eléctricas de operación del elemento. Actualmente, este mismo principio se usa utilizando un entrehierro entre dos electrodos metálicos en un tubo sellado conteniendo una mezcla de gases nobles (neón, argón, etc.), ver *figura 55*. Estos elementos en miniatura (normalmente en tubos de cerámica) pueden conducir corrientes transitorias de 5 a 20 kA para señales de 10 microsegundos sin presentar daños considerables. De todos los elementos no lineales, este dispositivo tiene la menor capacitancia parásita, cuyos valores característicos están en el rango de 0.5 a 2 pF. Por lo tanto, pueden usarse en aplicaciones donde la señal tiene frecuencias mayores a 50 MHz.

Uno de los problemas a los que tiene que enfrentar este tipo de elemento de protección es la corriente remanente. Cuando ocurre un transitorio durante la posición cero de una señal alterna de 60 Hz, esta corriente remanente no constituye un problema. Sin embargo, si la señal transitoria se presenta en cualquier otro instante de la señal senoidal, el arco puede sostenerse debido a la potencia suministrada por la señal a 60 Hz. El arco se extingue cuando la forma de onda de voltaje cae por debajo del voltaje del arco.

Sus características eléctricas generales son:

- 1) Posibles corrientes remanentes en voltajes alternos mayores a 120 V.
- 2) Lentos en tiempos de respuesta.



**FIGURA 55. Corte y simbología que se utiliza para tubo de gas.**

### **Varistores de óxido metálico (MOV)**

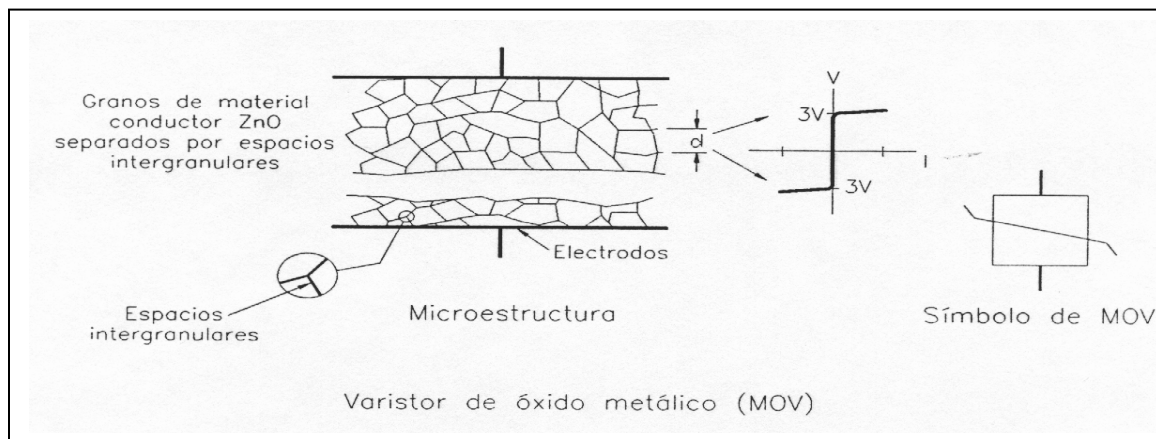
El varistor de Oxido Metálico (MOV por sus siglas en inglés) es un elemento semiconductor no lineal cuya resistencia disminuye con el incremento en el voltaje. La curva típica de este elemento se indica en la *figura 56*. Bajo condiciones normales, existe una pequeña corriente de fuga menos de 0.1 mA y el varistor se comporta como un simple resistor de alto valor. Durante el transitorio, la corriente a través del varistor se incrementa el voltaje es sostenido a un nivel muy cercano al nominal. Esta zona se conoce como la región de operación del varistor.

A corrientes muy elevadas, generalmente mayores de 100 mA, las características del varistor están dominadas por los valores de la resistencia del varistor. Generalmente están contruidos en forma de discos, por lo que tienen una gran capacitancia parásita, con valores entre 0.2 y 10 nanofaradios. Si se incluye la inductancia de las terminales del varistor, el circuito equivalente sería como el mostrado en la *Figura 57*.

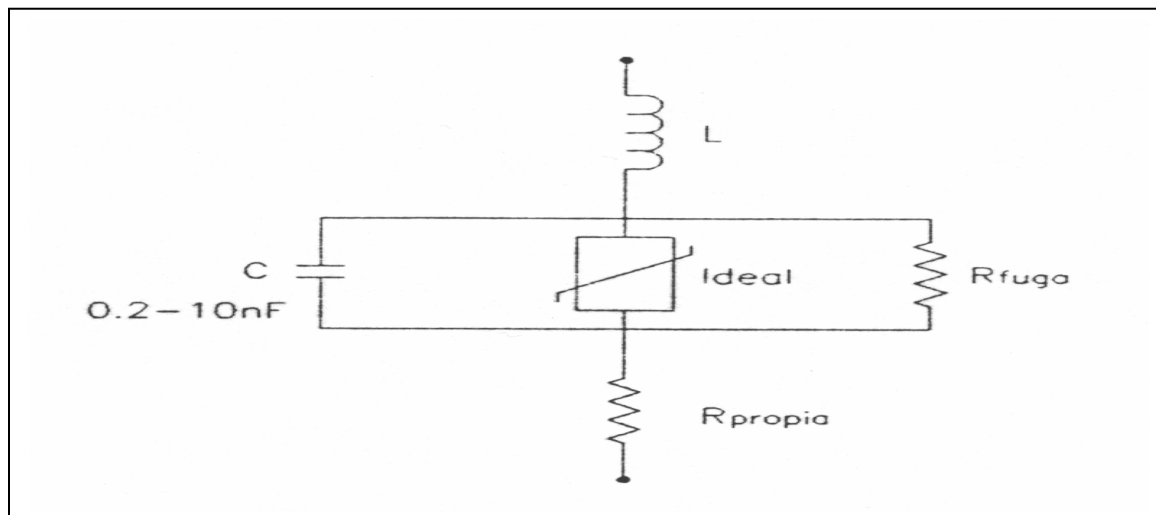
Si la inductancia de las terminales es muy pequeña, estos elementos tienen un tiempo de respuesta menor a 0.5 nanosegundos. Uno de los parámetros que afecta el comportamiento del varistor lo constituye la temperatura. Como el varistor tiene un coeficiente de temperatura negativo, la corriente se incrementa cuanto más caliente es el varistor, lo cual incrementa la corriente aún más, resultando en problemas térmicos. Los varistores generalmente se utilizan en sistemas electrónicos en donde se requiere una protección de sobre-voltaje que se propaga en o a través de los paneles eléctricos principales.

Sus características eléctricas generales son:

- 1) Fabricación con un arreglo tipo disco.
- 2) La energía que maneja depende del tamaño físico.
- 3) Comercialmente disponibles en un amplio rango de voltaje.
- 4) Un tiempo de respuesta medio.



**FIGURA 56.** Corte y simbología que se utiliza para un elemento varistor MOV.



**FIGURA 57.** Circuito eléctrico equivalente de un varistor, considerando sus componentes eléctricas parásitas.

Los MOV son los componentes de mayor utilización en la protección de equipos de comunicaciones. Los MOV son mucho más rápidos que los tubos de gas. Están compuestos por una capa de óxido de zinc de forma granular. Cuando el MOV se activa conduce corriente en las líneas de demarcación que buscan la



trayectoria de menor impedancia. Cada sobrevoltaje transitorio sigue la misma trayectoria y cada incidencia de las descargas transitorias de voltaje eventualmente debilitara y luego hará fallar cada línea de demarcación. Al fallar los granos, el voltaje de fijación baja de nivel y la capacidad de absorción de energía del MOV también disminuye o se degrada.

Los MOV tienen el costo más efectivo en la protección de equipo digital que usa microprocesadores. Debido a que la capacidad de corriente esta en función de su masa, entre mayor sean los MOV mayor será su capacidad. Para un MOV de 20 mm, la capacidad de corriente es de 10 000 amperes pico o 155 joules (8 x 20 us) y su tiempo de respuesta es en nanosegundos.

Su amplia capacidad para resistir energía y el tiempo de respuesta son la mayores cualidades del MOV mientras que la degradación es su mayor debilidad. Con el fin de ofrecer protección confiable, la degradación debe ser un factor importante en el diseño de un supresor de sobrevoltajes transitorios MOV.

### **Diodo de avalancha de silicio (SAD)**

Los diodos de pulsos de altas corrientes (también conocidos como diodos de avalancha tipo silicón SAD's) pueden encontrarse en una gran variedad de configuraciones. Tienen una relación de voltaje limitador mucho más ideal que un varistor con un tiempo de respuesta mucho más rápido. Su tiempo de vida es ilimitado si las corrientes transitorias no sobrepasan los valores nominales de operación. Desafortunadamente, estos elementos no tienen la capacidad de manejar grandes cantidades de corriente en un solo paquete. La *Fig. 58* muestra el diagrama esquematizado de estos dispositivos.

Se debe tener especial cuidado en la etapa de diseño con el objeto de asegurar la correcta capacidad de manejar la energía para la cual está diseñado. El diodo SAD y el varistor son más rápidos que los entrehierros en aire y que la mayoría de los tubos son de gas.

Sus características eléctricas generales son:

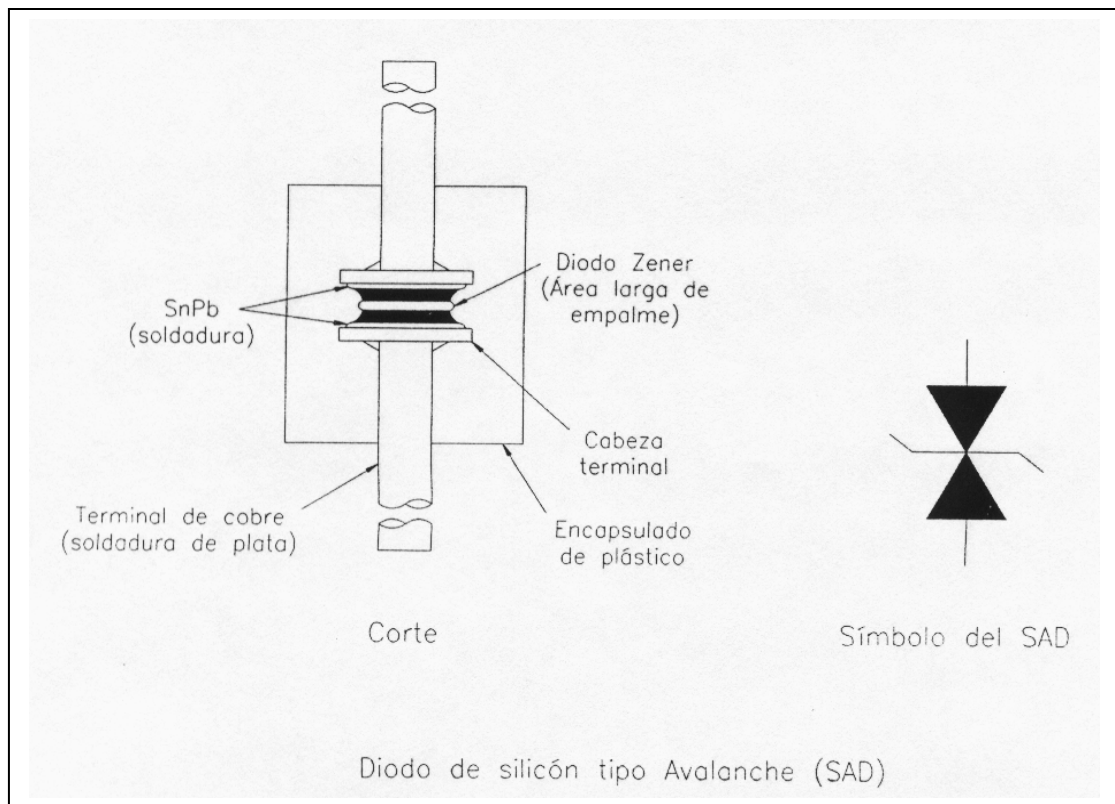
- 1) Rápida respuesta
- 2) Baja capacidad de energía
- 3) Amplio rango de voltajes.

Un MOV de 20 mm ofrece una protección de 155 joules en tanto que el SAD ofrece tan solo 5 joules de protección. Para lograr una capacidad elevada y resistir grandes cantidades de energía, se tienen que combinar cierta cantidad de dispositivos SAD. Pero al aumentar la cantidad de estos dispositivos sube el precio del equipo de protección que lo contiene. Además, la instalación de una

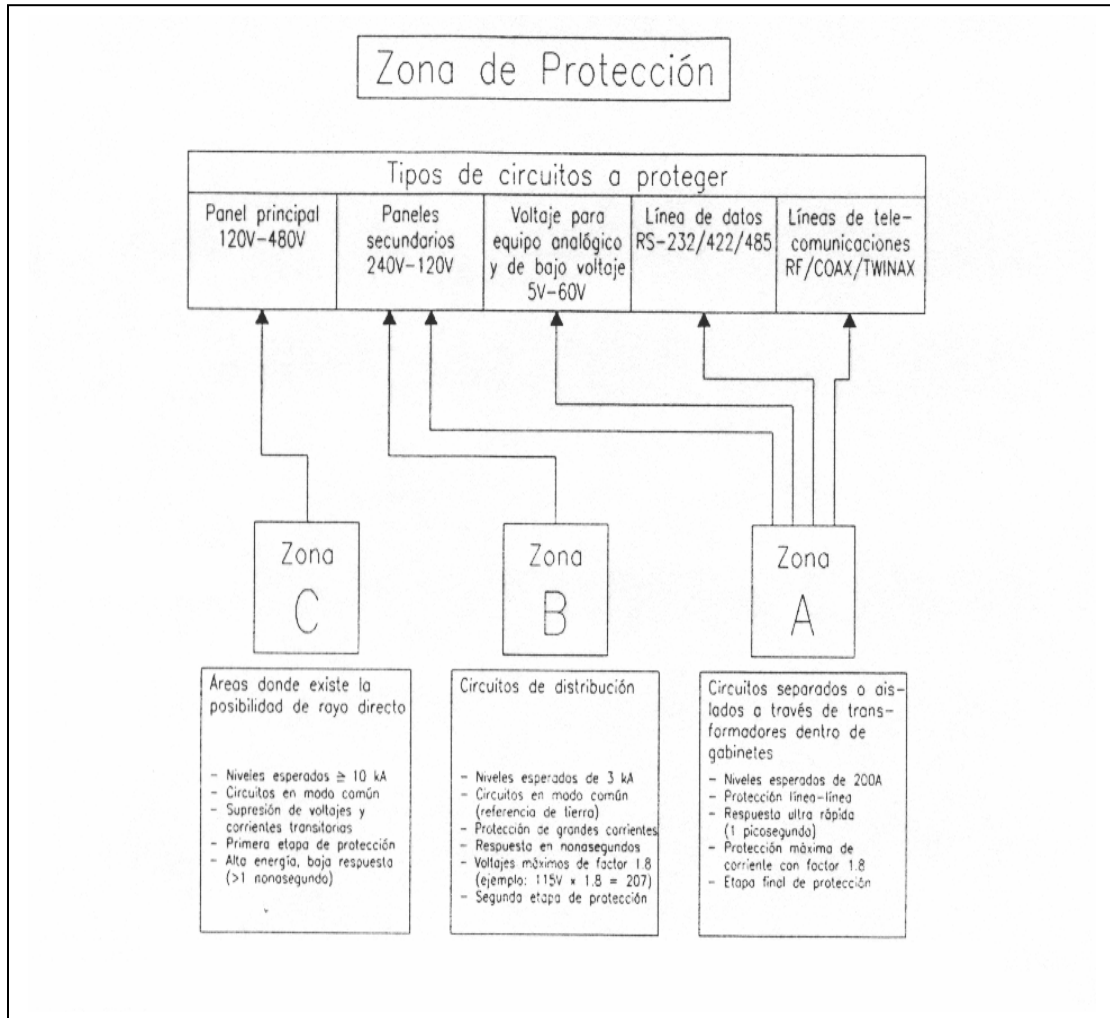
cantidad insuficiente o inadecuada de dispositivos SAD puede provocar fallas catastróficas en el equipo de protección contra sobrevoltajes transitorios.

El SAD es el componente más confiable pero brinda la protección menos efectiva en cuanto al costo de operación cuando se evalúa su costo en dólares por joule de energía. El costo entre un MOV y un SAD es solo de centavos.

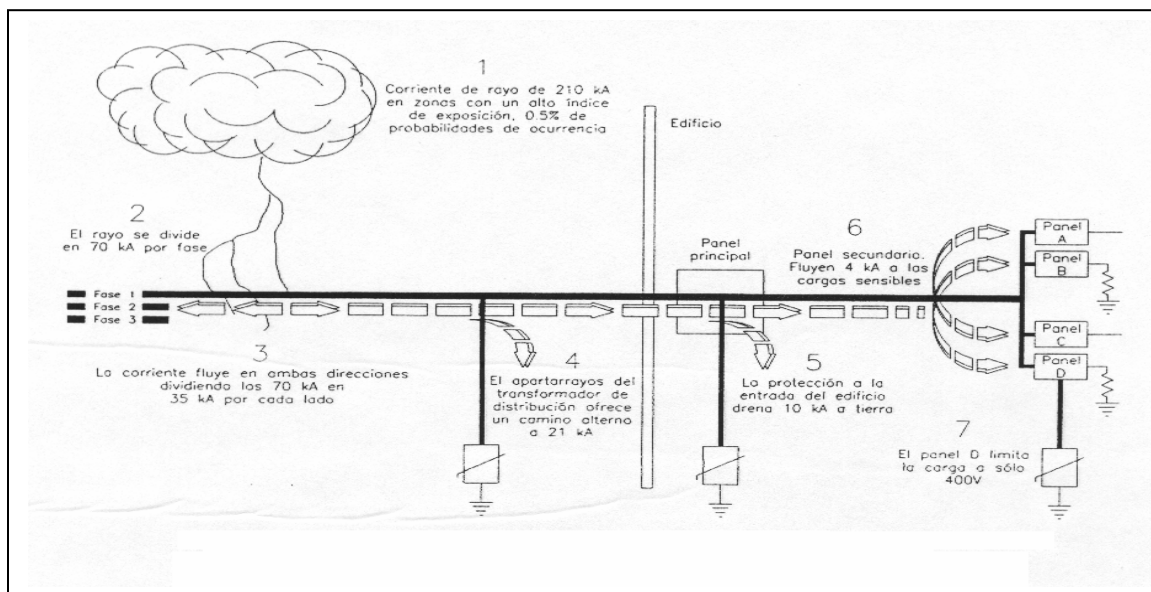
El instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) ha adoptado algunas recomendaciones que dividen a una residencia o edificio en tres categorías de exposición al rayo basado en su localización. Estas categorías corresponden a las Clases A, B y C, indicadas esquemáticamente en la *Figura 59*.



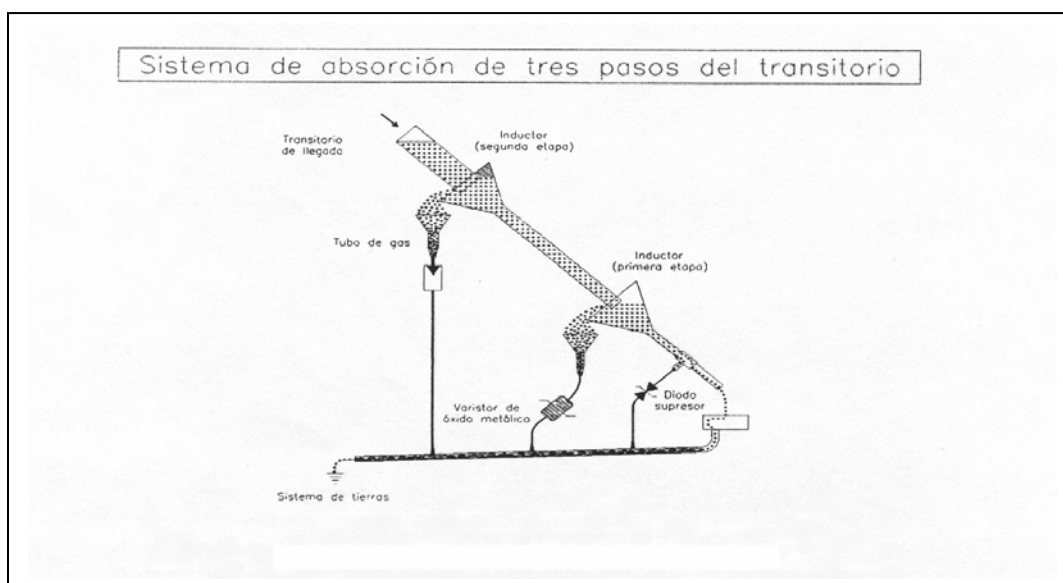
**FIGURA 58. Corte y simbología de un elemento diodo semiconductor tipo avalancha.**



**FIGURA 59. Zonas de protección de acuerdo a la clasificación recomendada por el IEEE.**



**FIGURA 60a. Diagrama simplificado para un sistema de protección.**



**FIGURA 60b. Sistema de protección contra transitorios de tres pasos.**

**TABLA 1. Ventajas y desventajas de los elementos que se utilizan en la protección contra transitorios.**

| Supresor                   | Ventajas                                                                                                                                                                   | Desventajas                                                                                                                                                                  | Ejemplos de uso                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tubos de gas               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Capacidad para manejar corrientes elevadas</li> <li>Baja capacitancia</li> <li>Elevada resistencia de aislamiento</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Elevados voltajes de arqueo</li> <li>Ciclo de vida limitado</li> <li>De lenta respuesta</li> <li>No se reestablece bajo CD</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Protectores primarios en Telecomunicaciones y líneas de AC</li> <li>Paso primario para algunos módulos híbridos</li> </ul>                                                                                                                                               |
| Varistor de óxido metálico | <ul style="list-style-type: none"> <li>Capacidad para manejar corrientes elevadas</li> <li>Bajo costo</li> <li>Amplio rango de corriente-voltaje</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Degradación gradual</li> <li>Elevado voltaje limitador</li> <li>Difícil de montar sobre superficies</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Protectores secundarios</li> <li>Para líneas de AC y automotores</li> <li>Aplicaciones limitadas a nivel de tarjetas</li> <li>Protección primaria o secundaria para esquemas híbridos</li> </ul>                                                                         |
| Diodo TVS                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bajo voltaje limitador</li> <li>No se degrada</li> <li>Amplio rango de voltaje</li> <li>Tiempo de respuesta ultrarrápido</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango limitado de corriente transitoria</li> <li>Costo elevado</li> </ul>                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ideal para aplicaciones a nivel de tarjetas con componentes semiconductores</li> <li>Aplicaciones limitadas en protecciones secundarias</li> <li>Ideal para transitorios eléctricos y problemas de ESD y EFT</li> <li>Protección final para esquemas híbridos</li> </ul> |
| Tiristor TVS               | <ul style="list-style-type: none"> <li>No se degrada</li> <li>Rápido tiempo de respuesta</li> <li>Manejo de altas corrientes</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>No se restablece bajo CD</li> <li>Limitado rango de voltaje</li> </ul>                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Protección primaria y secundaria en circuitos de telecomunicaciones</li> </ul>                                                                                                                                                                                           |

#### ▪ Comparación de costo

El precio es uno de los criterios para la compra de un supresor de sobrevoltaje transitorio. El MOV proporciona la mejor protección al precio más efectivo. Cuando se considera un supresor de sobrevoltaje transitorio con dispositivos MOV el criterio es el diseño del circuito y su instalación.

#### ▪ Confiabilidad del diseño

Mientras que el precio puede representar una limitación importante, la confiabilidad debe ser la preocupación primaria. Los dispositivos de protección se deben evaluar con base en su capacidad para sobrevivir múltiples

sobrevoltaje transitorios mientras protegen el equipo digital de comunicaciones en una oficina central. Para la evaluación de supresores es importante entender el estándar UL 1449, el cual fue implementado para certificar tanto la seguridad de los supresores cuando se instalan en un circuito como las bases de comparación de los voltajes de paso. La agencia UL (Underwriters Laboratories) adoptó las pruebas de corriente recomendadas por el IEEE STD C62.41. La prueba consiste en aplicar impulsos de 3000 amperes durante 8 x 20 us y se determinó como capacidad mínima 330 V para un servicio de 120 V. El principio aceptado es que mientras menor sea el voltaje mejor será su capacidad. Una deficiencia del estándar UL1449 es que esto no refleja los voltajes de paso para los dispositivos instalados, por lo que se preparó el estándar UL1449 2ª edición.

#### ▪ **Estándar 1449 2ª edición**

Este estándar trata sobre las deficiencias de las pruebas de UL 1449 para los voltajes de paso, usando alambres para simular el dispositivo instalado en lugar del dispositivo inalámbrico. Las pruebas realizadas indicaron que los dispositivos con alambres tienen un voltaje de paso mayor que los inalámbricos.

Un resumen de las pruebas indicaba lo siguiente:

- Como promedio, los voltajes de fijación más bajos se obtenían con un módulo híbrido que utiliza dispositivos MOV y SAD.
- Por UL 1449 (3000 amperes, 8 x 20 us – prueba con alambre), un módulo con dispositivos MOV presentó un mejor desempeño que un módulo con dispositivos SAD
- Se encontró en las pruebas que la mayor diferencia de voltaje de fijación entre un dispositivo MOV y un SAD es de solo 83 volts,
- Se encontró en las pruebas que la diferencia entre el voltaje de paso más alto y el más bajo era consistente para ambos dispositivos MOV y SAD.

Hay que enfatizar que además de las consideraciones del estándar UL1449, los supresores se deben evaluar de acuerdo con los parámetros del equipo que se protegerá. Los supresores nunca se deben instalar con más de dos pies de alambre de conexión al centro de carga que alimenta al equipo protegido.

Cuando sea posible, el supresor de sobre voltajes transitorios se debe instalar en la primera posición del interruptor para maximizar así todas las alimentaciones del interruptor. Si el supresor se instala en la posición indicada o se usa un protector bi-direccional, se asegura que tanto las descargas

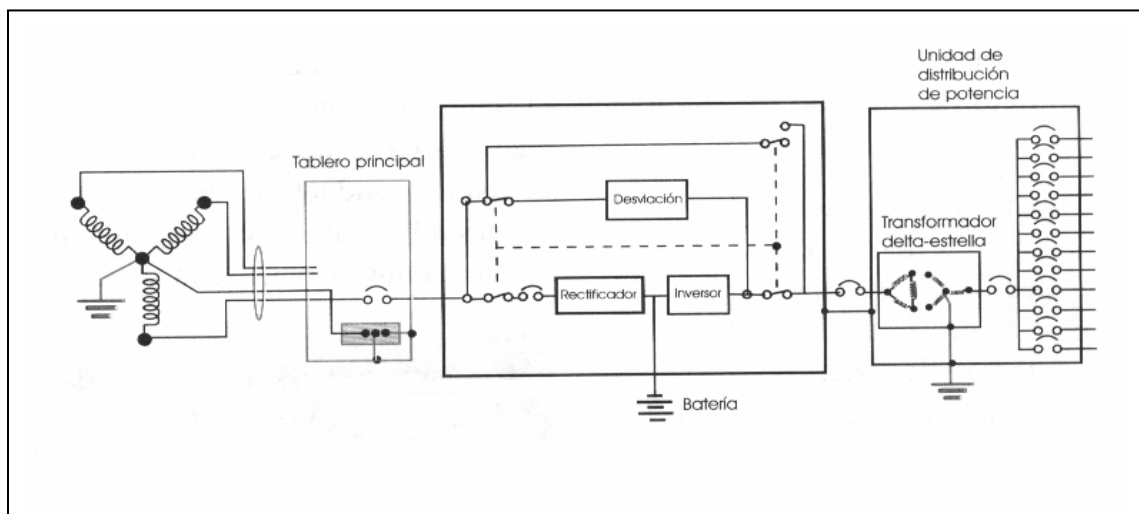
transitorias de voltaje externas como las que se generaran internamente en el centro de carga no pasen al equipo critico que se va a proteger.

#### ▪ Tierra para el protector de sobre voltajes transitorios

Los sobre voltajes transitorios, también llamados impulsos transitorios de voltaje se definen como anomalías de las líneas de alimentación que exceden una amplitud de 50 voltios y una duración inferior a  $\frac{1}{2}$  ciclo o sea menores de 8.3 ms, a 60 Hz. Los sobre voltajes transitorios de modo común (fase -tierra o neutro-tierra) que entran en las líneas de alimentación de c.a se convierten a transitorios de modo normal (fase-fase o fase-neutro), por el transformador del equipo o del edificio.

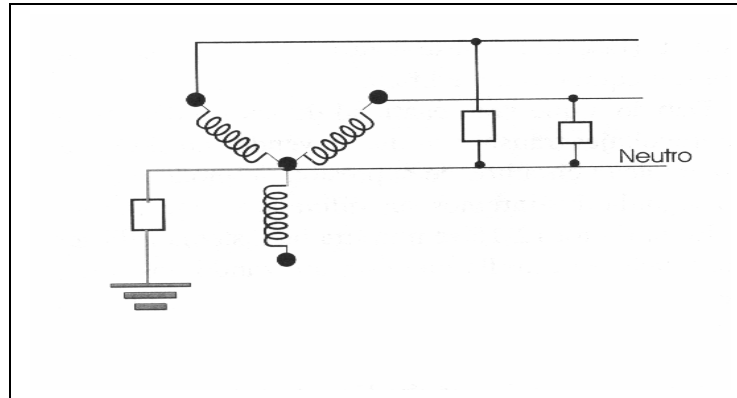
Debido a que gran cantidad de los supresores de sobre voltajes transitorios que se venden en el mercado emplean circuitos de supresión de modo común, en seguida ilustraremos sus diferentes conexiones.

En la *figura 53* se muestra un sistema trifásico conectado en estrella que esta utilizando dos líneas de fase para alimentar el equipo electrónico que se quiere proteger. Ya que se determina que existe una buena conexión neutro a tierra, no se recomienda la protección de modo común. En este caso se instala la protección entre las fases y el neutro. Este sistema se puede emplear para un servicio de 120/208 V o el de 127/220V.



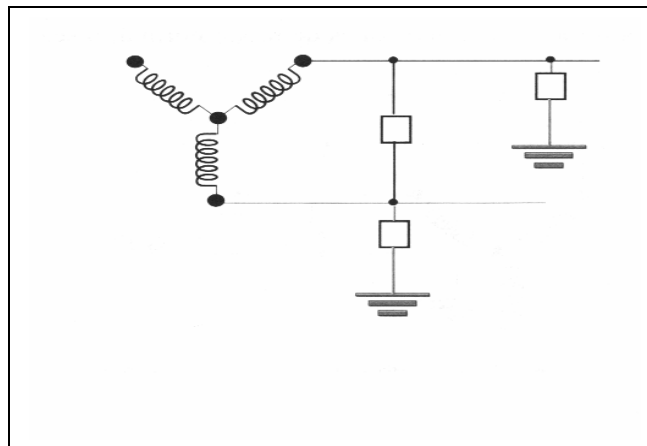
**FIGURA 61. Sistema de supresión con buena conexión neutro-tierra y dos fases de un servicio trifásico.**

El sistema ilustrado en la *figura 61*. se efectúa cuando se ha establecido que en el tablero principal de distribución no existe una conexión neutro-tierra adecuada y dicha conexión puede ser de alta impedancia. También se utiliza cuando el supresor se va a montar a más de dos metros de distancia de la conexión neutro-tierra. En este ejemplo se muestra un sistema trifásico conectado en estrella, el cual puede ser el sistema utilizado en muchos países de 127/220 V o en Estados Unidos de 120/208.



**FIGURA 62. Sistema de protección, fase-neutro, conexión deficiente neutro-tierra.**

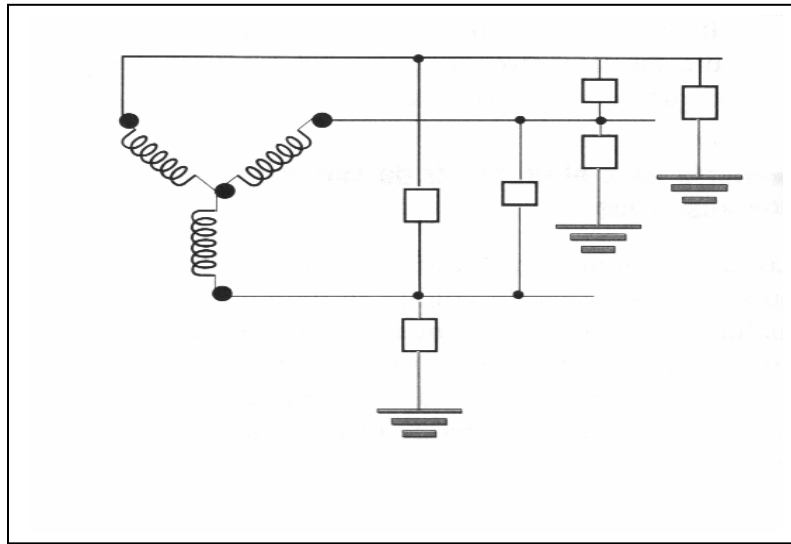
En la *figura 62* se presenta un sistema de protección para una alimentación trifásica. Este sistema proporciona las protecciones de modo normal, o sea protección entre fase y fase, y la de modo común entre fase y tierra. Como puede notarse, el sistema ilustrado no tiene un conductor conectado a tierra o neutro. Esta es una de las aplicaciones más comunes de la protección de modo común.



**FIGURA 63. Sistema de protección, fase-fase y fase-tierra.**



En la *figura 63* se muestra un sistema de protección para un sistema trifásico, conectado en estrella, que proporciona protección para todas las fases de las formas: fase-fase y fase-tierra, es decir, protección de modo normal y de modo común. También se puede observar que no existe el conductor conectado a tierra o neutro y por esta razón es recomendable este sistema de protección de modo común para las tres fases.



**FIGURA 64. Sistema de protección, fase-fase y fase-tierra.**

#### ▪ Sobre corrientes a tierra

La presencia de supresores de sobre voltajes transitorios de fijación entre fase y tierra, o de “modo común” puede representar un aumento del riesgo de una descarga eléctrica. Esto puede ocurrir si:

1. La armadura del equipo protegido no esta correctamente conectada a tierra y
2. La impedancia de alta frecuencia de la trayectoria a tierra, entre la armadura y la tierra del equipo es significativa, con relación a la impedancia de la impedancia del cuerpo de una persona que conecte a ambos.

La descarga de pequeñas cantidades de corriente a través del corazón, aun por una fracción de segundo, puede causar desde fibrilaciones hasta la muerte.

### **Corrientes de fuga**

Cuando los supresores se conectan de fase-a-tierra en un circuito de ca, las corrientes de fuga prevalentes en los dispositivos MOV- fluirán no a través del conductor neutro sino por la trayectoria de retorno a tierra. Si un gran número de supresores se instalan en un edificio, la cantidad total de corrientes de fuga puede ser significativa y difícil de detectar. Los problemas que crea la acumulación de corrientes de fuga incluyen disparos fastidiosos de GFI, errores en el circuito electrónico debido a la inestable referencia a tierra y ruidos introducidos a los amplificadores de alta ganancia.

### **Corrientes de lazo cerrado a tierra**

Las supresiones de neutro-tierra también pueden incrementar el riesgo de descarga eléctrica. Si un supresor falla entre línea y tierra, la corriente que fluye causará inmediatamente el disparo del interruptor automático de circuito o fusible para proteger la línea conductora. No existe un interruptor de circuito o fusible en la línea neutro.

Si un supresor, conectado entre neutro-tierra falla o se degrada debido a una falla, una porción de la corriente del neutro fluirá a tierra; por ejemplo, a través de las bandejas de cables y en el metal de los paneles de distribución en la trayectoria de retorno a tierra de la unión neutro-tierra del transformador. Esto genera un lazo cerrado a tierra y provoca riesgos de descargas eléctricas para el personal. Además, esto es una violación al Código, sección 250-142(b)

#### **▪ Fallas intermitentes de red**

En 1988, los científicos investigadores del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST), encontraron que los supresores de sobrevoltajes transitorios pueden causar daños a los dispositivos interconectados de computación, si proporcionan sobrevoltajes transitorios a tierra, lo que provoca la contaminación de las líneas de datos.

Durante un experimento en un edificio recientemente construido, tales investigadores introdujeron sobrevoltajes transitorios en las líneas de alimentación. Después del experimento, encontraron componentes dañados

pegados a las líneas de datos entre las computadoras y las impresoras. El daño resulta cuando los sobrevoltajes transitorios desviados a tierra se acoplaron en las líneas de datos a través de la tierra. Muchas líneas de datos de red usan la tierra como voltaje de referencia, y muchas líneas de datos y blindajes de cables de instrumentación se conectan a tierra.

## **ANEXO A**

### ***BIBLIOGRAFÍA***

[B1] ABB Power Systems, Inc., Electrical transmission and distribution reference book, 4<sup>th</sup> Edition, 12<sup>th</sup> printing, 1964.

[B2] Abledu, K. O., and Laird, D. N., "Measurement of substation rock resistivity," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, no. 1, pp. 295-300, Enero 1992.

[B3] AIEE Working group on substation grounding Practices, "application guide on methods of substation grounding," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, no. 11, pp. 271-278, Abril 1954.

[B4] Armstrong, H. R., "Grounding electrode characteristics from model tests," AIEE Transaction on Power Apparatus and Systems, pp. 1301-1306, Dic. 1953.

[B5] Armstrong, H.R., and Simpkin, L.K., "Grounding electrode potential gradients from model tests," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 618 - 623, Oct. 1960.

[B6] Bellashi, P. L., "Lightning current in field and laboratory," AIEE Transactions, Vol. 54, pp. 837-843, 1935.

[B7] Biegelmeier, U.G., "Die Bedeutung der Z-Schwelle des Herzkammerfilimmerns für die Festlegung von Berührungsspannungsgrenzen bei den Schutzmaßnahmen gegen elektrische Unfälle," E&M, Vol. 93, no. 1, pp. 1-8, 1976.

[B8] Biegelmeier, U.G., and Rotter, K., "Elektrische Widerstände und Ströme in menschlichen Körpern," E&M, Vol. 89, pp. 104-109, 1971.

[B9] Biegelmeier, U.G., and Lee, W.R., "New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for AC shocks at 50-60 Hz," Proceedings of the IEEE, Vol. 127, pp. 103-110, 1980.

[B10] Blattner, C.J., "Analysis of soil resistivity test methods in two-layer earth," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, no. 3603-3608, Dic. 1985.

[B11] Blattner, C.J., " Prediction of soil resistivity and ground rod resistance for deep ground electrodes," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no 5, pp. 1758-1763, Sept./ Oct. 1980.

[B12] Blattner, C. J., " Study of driven ground rods and four point soil resistivity data," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, no. 8, pp. 2837-2850, Agosto 1982.

[B13] Blattner, C.J., and Dawalibi, F., " Earth resistivity measurement interpretation techniques," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 2 pp. 374-382, Feb. 1984.

[B14] Bodier, M.G., " La Secrites des Personnes et la Question des Mises a la Terre dans les Postes de Distribution," Bulletin de la Societe' Francaise des Electriciens, ser 6<sup>th</sup>, Vol. VII, no. 74,pp. 545-562, Oct. 1947.

[B15] Bodier, M.G., " Systematic investigation of potential gradients in and around a transformation substation, Bulletin de la societe' Francaise Des Electriciens, Jul. 1951.

[B16] Bogajwesji, W.,Dawalibi, F. Gervais, Y., And Mukhedkar, D., "Effects of sustained ground fault current on concrete poles," IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2686-2693, Agosto 1982.

[B17] Carson, J. R., " Wave propagation in overhead wires with ground return," Bell Systems Technical Journal," vol. 5, 1926.

[B18] CIGRÉ Working Group 33/13-09, " Very fast phenomena associated with gas-insulated substation," 1988 Session of CIGRÉ, paper 33-13,1988.

[B19] Clem, J.E.," Reactance of transmission lines with ground return." AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 50, pp. 901-918, Sept. 1931.

[B20] " Computation of zero sequence impedances of power lines and cables," Engineering Report no. 37, Joint Subcommittee on Development and Research of EEI and Bell Telephone Systems, Jul. 22, 1936.

[B21] Conversion Subcommittee of AIEE Substations Committee, " Recommended grounding practices for singles polarity DC structures," Paper no. 57-719, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 76, part III, 1957.

[B22] Crawford, E., and Griffith, M., "A closer look at "The facts of life in ground mat design," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. IA-15, no. 3, pp. 241-250, May / June 1979.

[B23] Curdts, E.B., "Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Part I, vol. 77, pp. 767-770, Nov. 1958.

[B24] "Currents in earth wires at the top of pylons and their effect on the potentials of the pylons and stations in the neighborhood of a point of short-circuit to earth," Contribution no. 78, CCITT, study Group V, Nov. 1963.

[B25] Dalziel, C.F., "A study of the hazards of impulse currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 72, part III, pp. 1032-1043, Oct. 1953.

[B26] Dalziel, C.F., "Dangerous electric currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 65, pp. 579-585, 1123-1124, 1946.

[B27] Dalziel, C.F., "Effect of wave form on let-go currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 62, pp. 739-744, 1946.

[B28] Dalziel, C.F., "Electric shock hazard," IEEE Spectrum, pp. 41-50, Feb. 1972.

[B29] Dalziel, C.F., "Temporary paralysis following freezing to a wire," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 79, part III, pp. 174-175, 1960.

[B30] Dalziel, C.F., "Threshold 60 Cycles fibrillating currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 79, part III, pp. 667-673, 1960.

[B31] Dalziel, C.F., and Lee, W. R., "Lethal electric currents," IEEE Spectrum, pp. 44-50, Feb. 1969.

[B32] Dalziel, C.F., and Lee, W.R., "Reevaluation of lethal electric currents," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. IGA-4, no. 5, pp. 467-476, Oct. 1968.

[B33] Dalziel, C.F. And Mansfield, T.H., " Effect of frequency on perception currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 69, 1161-1168, 1950.

[B34] Dalziel, C.F., and Massogilia, F.P., " Let-go currents and voltages," AIEE Transactions on power Apparatus and Systems," vol. 75, part II, pp. 49-56, 1956.

[B35] Dalziel, C.F., Lagen, J.B., and Thurston, J.L., " Electric shock," AIEE transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 60, pp. 1073-1079, 1941.

[B36] Dalziel, C.F., Ogden, E., and Abbott, C.E., " Effect of frequency on let-go currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 62, pp. 745-750 and 1000, Dec. 1943.

[B37] Dawalibi, F., "Ground faults current distribution between soil and neutral conductors," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 2, pp. 452-461, Mar./Apr. 1980.

[B38] Dawalibi, F., and Barbeito, N., " Measurements and computations of the performance of grounding systems buried in multilayer soils," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1483-1490, Oct. 1992.

[B39] Dawalibi, F.P., and Mukehdkar, D., " Ground electrode resistance measurements in non-uniforms soils," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 1, pp. 109-116, Jan. 1974.

[B40] Dawalibi, F. and Muhehedkar, D., " Ground fault current distribution in power systems- The necessary link," Abstract A77 754-5, Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 2, pp. 332-333, Mar./Abr. 1978.

[B41] Dawalibi, F., and Mukehdkar, D., " Influence of ground rods on grounding systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2089-2098, Nov./Dic. 1979.

[B42] Dawalibi, F., and Mukeyhedkar, D., " Optimum design of substations grounding in two-layer earth structure; part I- Analytical study, part II- Comparison between Theoretical and experimental results, and Part III- Study of grounding grids performance and new electrodes configuration, " IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 2, pp. 252-261, 262-266, 267-272, Mar./Abr. 1975.

[B43] Dawalibi, F., and Mukeyhedkar, D., " Parametric analysis of grounding systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 5, pp. 1659-1668, Sept./ Oct. 1979.

[B44] Dawalibi, F., and Mukeyhedkar, D., " Resistance measurement of large grounding systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2348-2354, Nov./Dic. 1979.

[B45] Dawalibi, F. Bauchard, M., and Mukeyhedkar, D., " Survey on power grounding design practices," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-99, no. 4, pp. 1396-1405, Jul / Ago. 1980.

[B46] Dawalibi, F., Ma, J., and Southey, R.D., " Behavior of grounding systems in multilayer soils: A parametric analysis," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 9, no. 1, 334-342, Ene.1994.

[B47] Dawalibi, F.P., Ma, J., And Southey, R.D., " Equivalence of uniform and two-layer soils to multilayer soils in the analysis of grounding systems," IEE Proceedings-Generation, transmission, Distribution, vol. 143, no. 1, pp. 49-55, Ene. 1996.

[B48] Dawalibi, F. Mukeyhedkar, D., and Benstend, D., " Soil effects on ground fault currents," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 3442, Jul. 1982.

[B49] Dawalibi, F. P. Southey, R. D. and Baishiki, R. S., " Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric Shocks," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp. 613-626, 1990.

[B50] Dawalibi, F. P., Xiong, W., and Ma, J., " Effects of deteriorated and contaminated substation surface covering layers on foot resistance calculations," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 104-113, Ene. 1993.



[B51] Desieno, C. F., Marchenko, P.P., and Vassel, G. S., " General equations for fault currents in transmission line ground wires," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, pp. 1891-1900, Nov. / Dic. 1970.

[B52] Dick, E.P., Fujimoto, N., Ford, G. L., and Harvey, S., " transient ground potential rise in gas-insulated substation-problems identification and mitigation," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 10, pp. 3610-3619, Oct. 1982.

[B53] Dick, W. K., and Holliday, H.R., "Impulse and Alternating current tests on grounding electrodes in soil environment," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 1, pp. 102-108, Ene. /Feb.1978.

[B54] Elek. A., " Hazards of electric shock at stations during fault and method of reduction," Ontario Hydro Research News, vol. 10, no. 1, pp. 1-6, 1958.

[B55] Endrenyi, J., "Analysis of transmission tower potentials during ground faults ," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems," vol. PAS-86, pp. 1274-1283, Oct. 1967.

[B56] Endrenyi, J., " Evaluation of resistivity test for design of station grounds in non-uniform soil ," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. 84, pp. 996-970, Dic. 1963.

[B57] Endrenyi, J., " 2 Fault current analysis for substation grounding design," Ontario Research Quarterly, 2<sup>nd</sup> Quarter, 1967.

[B58] EPRI, *EPRI* Transmission line reference book 345 kV and above. Electric power Research Institute, Palo Alto, Calif. 1975.

[B59] EPRI EL-904, Mutual design considerations for overhead AC transmission lines and gas transmission pipelines, vols. 1 y 2, Sept. 1978.

[B60] EPRI EL-2699, Transmission line grounding, Chapter 4, (Resistivity) and Chapter 9 (Field measurement Techniques), Safe Engineering Services, Oct.1982.

[B61] EPRI el-3099, Substation grounding scale model tests, Ohio State University, May 1985.

[B62] EPRI EL-3982, Soil resistivity tests using modeling techniques, Ohio State University, Mayo 1985.

[B63] EPRI TR-100622, Substation grounding programs, vols. 1-5, Mayo 1992.

[B64] EPRI TR-100863, seasonal variations of grounding parameters by field tests. SEI/Georgia power Research Center, Jul. 1992.

[B65] Fagan, E. J., and Lee, R. H., " The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes," IEEE Transactions on Industry and General Applications, vol. IGA-6, no. 4, pp. 337-348, Jul./Ago. 1970.

[B66] Ferris, L.P., King, B.G., Spence, P.W., and Williams, H., " Effect of electric shock on the heart," AIEE transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 55, pp. 498-515 and 1263, Mayo 1936.

[B67] Ford, G. L., and Geddes, L. A., " Transient ground rise in gas- insulated substations Assessment of shock hazard," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS- 101, no. 10, pp. 3620-3629, 1982.

[B68] Fujimoto, N., Croall, S. J., and Foty, S. M., " techniques for the protection of gas-insulated substation to cable interfaces," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 1650-10655, Oct. 1988.

[B69] Fujimoto, N., Dick, E. P., Boggs, S. A., and Ford, G. L., " transient ground potential rise in gas-insulated substations: Experimental studies," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no.10, pp. 3603-3609, Oct. 1982.

[B70] Garret, D. L., "Determination of maximum ground fault current through substation grounding system considering effects of static wires and feeder neutrals," Proceedings of Southeastern Electric Exchange, Atlanta, Ga., 1981.

[B71] Garret, D. L., and Holley, H. J., " Calculation of substation ground resistance using matrix techniques," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 5, pp. 2008-2011, Sept./Oct. 1980.

[B72] Garret, D. L., and Wallace, R. A., " A critical analysis of grounding practices for railroad tracks in electric utility substations," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no.1, pp. 90-96, Enero 1993.

[B73] Garret, D. L., Mayers, J., and Patel, S., " Determination of maximum substation grounding system fault current using graphical analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. POWRD-2, no. 3, pp. 725-732, Jul. 1987.

[B74] Geddes, L. A., and Baker, L. E., " response of passage of electric current through the body," Journal of Association for the Advancement of Medical Instruments, vol. 2, pp. 13-18, Feb. 1971.

[B75] Gieiges, K. S., " Electric shock hazard analysis," AIEE Transactions on Power Apparatus and systems, vol. 75, part III, pp. 1329-1331, 1956.

[B76] Gill, A. S., " High-current method of testing ground integrity," NETA WORLD, International Testing Association, vol. 10, no. 2, Winter 1988-1989.

[B77] Graybill, H. W., Koehler, h. C., Nadkami, J. D., and Nicholas, J. H., " Termination of high-pressure oil cables in gas-insulated minisubstation equipment," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 5, pp. 1669-1674, Sept./Oct. 1974.

[B78] Hammond, E., and Robson, T. D., " Comparison of electrical properties of various cements and concretes," The Engineer, 199, no. 5165, pp. 78-80, Enero 1955.

[B79] Harvey, S. M., " Control wiring transients and electromagnetic compatibility in GIS," in S. S. Boggs, F. Y. Chu, and Fujimoto, N., eds., Gas insulated substations-technology & Practice, New York: Pergamon Press, 1986.

[B80] Heppe, R. J., " Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS.98, no. 6, pp. 1978-1989, Nov./Dic. 1979.

[B81] Heppe, R. J., " Step potentials and body currents for near grounds in two-layer earth," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 1, pp. 45-59, Ene. / Feb. 1979.

[B82] IEC 60479-1 (1994-09), Effect of current passing through human body- Part I: General aspects.

[B83] IEC 60479-2 (1987-03), Effect of current passing through human body- Part II: Special aspects.

[B84] IEEE Std C37.010-1979, IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.

[B85] IEEE Std 590-1992, IEEE Cable Plowing Guide.

[B86] The IEEE Standard Dictionary of Electrical And Electronics Terms, Sixth Edition.

[B87] IEEE Tutorial course 86 Eh0253-5 PWR, " Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986, IEEE Guide for Safety, Chapter 2, (Soil Resistivity Analysis),"

[B88] IEEE Working Group on Electrostatic Effects of Transmission Lines, General Systems Subcommittee, "Electrostatic effects of overhead transmission lines, Part I-Hazards and effects," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-91. pp. 422-426, Mar./Apr. 1972.

[B89] Jackson, J. D., Classical electrodynamics, New York: John Wiley & Sons, Inc.

[B90] Jones, W. R., " Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils," IEEE Transactions on Power Apparatus, vol. PAS-99, no.4, pp. 1343-1346, July/Aug. 1980.

[B91] Joy, E. B., meliopoulos, A. P., and Webb R. P., " Touch and step calculations for substations grounding Systems," Abstract Paper A 79-052-2,

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 4, pp. 1143, July/Aug. 1979.

[B92] Kercel, S. W., "Design of switchyard grounding systems using multiple grids," IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, vol. PAS-100, no. 3, pp. 1341-1350, Mar. 1981.

[B93] Kynion, A. L., "Earth resistivity measurements for grounding grids," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 20, pp. 795-800, Dec. 1961.

[B94] Kiselev, "Research into electric shock," Electrical Review, vol. 31, Dec. 1965.

[B95] Kouwenhoven, W. B., et al., "AC shocks of varying parameters affecting the Heart," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 78, part I, pp. 163-169, 1959.

[B96] Langer, H., "Messungen von Erderspannungen in einem 220 kv Umspanwerk," Electrotechnische Zeitschrift, vol. 75, no. 4, pp. 97-105, Feb. 1954 (Traducción en Inglés disponible en El AIEE No. 80-1961, Apéndice V, pp. 91-102).

[B97] Laurent, p. G., "Les Bases Generales de la Technique des Mises a la Terre dans les installations Electriques," Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens, vol. 1, ser. 7, pp. 368-402, Julio 1951.

[B98] Lazzara, J., and Barbeito, N., "Simplified two-layer model substation ground grid design methodology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 4, pp. 1741-1750, Nov. 1990.

[B99] Lee, W. R., "Death from electrical shock," Proceedings of the IEEE, Vol. 113, no. 1, pp. 144-148, Enero 1966.

[B100] Loucks, W. W., "A new approach to substation grounding," Electrical News and Engineering, Mayo 15, 1954.

[B101] Mahonar, V. N., and Nagar, R. P., " Design of steel earthing grids in India," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no.6, pp. 2126-2134, Nov./ Dic. 1979.

[B102] Manual on ground resistance testing, Publication no. 25-J, James G. Biddle Co. 1970.

[B103] Meliopoulus, A. P., Papalexopoupos, A. D., Webb, R. P., " Current division in substation grounding systems," Proceedings of the 1982 Protective Relaying Conference, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga. May 1982.

[B104] Melipoulos, A. P., Papalexopoulos, A. And Webb, R. P., " Interpretations of soil resistivity measurement experience with the model SOMIP," IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems, vol. PAS-1, no. 4, pp. 142-151, Octubre 1986.

[B105] Meliopoulus, A. P., Papalexopoupos, A. D., Webb, R., and Blattner, C. J., "Estimation of soil parameters from driven-rod measurements," IEEE Transactions of Power Delivery, vol. 103, no. 9, Septiembre 1994.

[B106] Melipoulos, A. P., Patel, S., and Cokkonides, G. J., " A new method and instrument for touch and step voltage measurements," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 4, pp. 1850-1860, Octubre 1994.

[B107] Melipoulos, A. P., S., Xia, F., Joy, E. B., Cokkonides, G. J., "An advanced computer model for grounding systems analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol 8, no. 1, pp. 13-23, Enero 1993.

[B108] Miller, Hart, and Brown, " Stray current and galvanic corrosion of reinforced steel in concrete," Material Performance, Vol. 15, no. 5, pp. 20-27, Mayo 1976.

[B109] Mitani, H., "Magnitude and Frequency of transient induced voltage in low-voltage control circuits of power stations and substations," IEEE Transactions on Power Apparatus And Systems, vol. PAS-99, no. 5, pp. 555-570, Sept./Oct. 1980.

[B110] Moore, R., "An empirical method of interpretation of earth resistivity measurements," American Institute of Mining Engineering. Column 164, pp. 197-231, 1945.

[B111] Mukhedkar, D., Gervais, Y., and Dejean, J. P., "Modeling a grounding electrode," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-92, no. 1, pp.295-297, enero 1973.

[B112] Nahman, J. M., and Salamon, D., " A practical method for the interpretation of earth resistivity data obtained from driven rod tests," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 3, no. 4,pp. 1375-1379, Oct. 1988.

[B113] Nahman, J. M., and Salamon, D. D., " Analytical expressions of the resistance of grounding grids in non-uniform soil," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, pp. 880-885, Abril 1984.

[B114] Nahman, J. M., and Salamon, D. D., " Analytical expressions of the resistance of rodbeds and of combined grounding system in uniform soil," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PWRD-1, no. 3, pp. 90-96, Julio 1986.

[B115] Nieman, J., " Unstellung von Hoschtspannungs-Erdungsalagen Aufden Betrieb Mitt Starr Geerdetem Sternpunkt," Electrotechnische Zeitschrift, vol. 73, no. 10, pp. 333-337, Mayo 1952.

[B116] Ollendorff, F., Erdstome ( Groung Currents), Suttgsrt, Germany: Springer-Verlag, 1928; Brukhauser-Verlag-Baselund, 1969.

[B117] Orellara, E., and Mooney, H. M., " Two and Three layer master curves and auxiliarity point diagrams for vertical electrical sounding using Wenner arrangement," Interciencia, Madrid, España, 1972.

[B118] Osypka, P., "Quantitative investigation of current strength and routing in AC electrocution accident involving human beings and animals," Technische Hochschule Braunschweig, Brunswick, West Germany, 1966/SLA Translation Center TT-6611470.

[B119] Palmer, L. S., " Examples of geotechnical surveys," Proceedings of the IEE, Paper 2791-m, vol. 106, pp. 231-244, Junio 1959.

[B120] Patel, S. G., " a complete field analysis of substation ground grid by applying continuous low voltage fault," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 8, pp. 2238-2243, Agosto 1985.

[B121] Purdy, A. B., " Accurate equations for the characteristics of rod electrodes in a homogeneous medium," Abstract A 79-027-4, IEEE Transactions in Power Apparatus systems, vol. 98, no. 4, pp. 1141, Julio/Agosto 1979.

[B122] Reichman, J., Vainberg, M., and Kuffel, J., " Short-circuit capacity of temporary grounding cables," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 260-271, Enero 1989.

[B123] Roman, I., " Some interpretations of earth resistivity data," American Institute of Mining and Metallurgical Engineering, vol. 110, pp. 183-200, 1934.

[B124] Rosa, E. B., McCollum, B., and Peters, O. S., " Electrolysis in concrete," Department of Commerce, Technical Paper of Bureau of Standards, no. 18, pp. 1- 137, Marzo 1913.

[B125] Rüdenberg, R., " Basic considerations concerning systems," Electrotechnische Zeitschrift, Vol. 11 y 12, 1926.

[B126] Rüdenberg, R., " Distribution of short-circuit currents in ground," Electrotechnische Zeitschrift, vol. 31, 1921.

[B127] Rüdenberg, R., " Grounding principles and practices-Part 1. Fundamental considerations on grounding currents," Electrical Engineering, Vol. 64, pp. 1-13, Enero 1945.

[B128] Schwarz, S. J., "Analytical expression for resistance of grounding systems," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 73, no. 13, part III-B, pp. 1011-1016. Enero 1945.



[B129] Sebo, S. A., "Zero sequence current distribution along transmission lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, pp. 910-919, Junio 1969.

[B130] Sunde, E. D., Earth conduction effects in transmission systems, New York: McMillan, 1968.

[B131] Sverak, J. G., "Optimized grounding grid design using variable spacing technique," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-95, no. 1, pp. 362-374, Ene./Feb. 1976.

[B132] Sverak, J. G., "Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid: Part I-How good is the present IEEE method?" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 1, pp. 7-25, Enero 1984

[B133] Sverak, J. G., "Sizing of ground conductors against fusing," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 1, pp. 51-59, Enero 1981.

[B134] Sverak, J. G., Booraem, C. H., and Kasten, D. G., "Post design analysis and scale model tests for a two grid earthing system the 345Kv GIS facilities at Seabrook Power Plant," Paper 410-06, Proceedings of the CIGRÉ Symposium on High Currents in Power Systems Under Normal, Emergency and Fault Conditions, Brussels, Junio 3-5, 1985.

[B135] Tagg, G. F., "Earth resistances, New York: Pitman, 1964.

[B136] Tagg, G. F., "Interpretation of resistivity measurements," American Institute of Mining and Metallurgical Engineering Transactions, vol. 110, pp. 135 - 147, 1934.

[B137] Tagg, G. F., "Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering large area," Proceedings of IEE, Vol. 111, no. 12, pp. 2118-2130, 1974.

[B138] Tagg, G. F., "Measurements of the resistance of an earth-electrode systems covering large area," Proceedings of IEE, Vol. 116, no. 3, pp. 475-479, Marzo 1969.

[B139] Tagg, G. F., "Measurements of the resistance of physically large earth-electrode systems," Proceedings of IEE, Vol. 117, no. 11, pp. 2185-2190, Nov. 1970.

[B140] Thapar, B., and Gerez, V., "Equivalent resistivity of non-uniform soil of grounding design," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, no. 2, pp. 759-767, April 1995.

[B141] Thapar, B., and Gross, E. T. B., "Grounding grids for high voltage stations-Part IV: Resistance of grounding grids in non-uniform soil," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-82, pp. 782-788, Oct. 1963.

[B142] Thapar, B., Gerez, V., and Emmanuel, P., "Ground resistance of the foot in substation yards," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 1-6, Enero 1993.

[B143] Thapar, B., Gerz, V., Kejriwal, H., "Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, no. 1, pp. 360-368, Enero 1994.

[B144] Thapar, B., Gerez, V., Balakrishnan, A., and Blank, D., "Simplified equations for mesh and step voltages in an AC substation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 2, pp. 601-607, April 1991.

[B145] Thompson, P., "Resistivity test on electric station ground coverings," Internal Report, Los Angeles Department of Water and Power, Julio 12, 1983.

[B146] Thompson, P., "Resistivity tests on soil and concrete," Internal Report, Los Angeles Department of water and Power, Agosto 8, 1977.

[B147] Towne, H. M., "Lightning arrester grounds-Parts I, II and III," General Electric Review, vol. 35, pp. 173-280, Marzo – Mayo 1932.

[B148] Verma, R., Merand, A., and Barberau, P., "design of low resistance grounding system for hydroelectric plant located on highly resistive soils," IEEE

Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 5, pp. 10760-1768, Sept./ Oct. 1978.

[B149] Verma, R., and Mukhedkar, D., “ Ground fault current distribution in substation, towers and ground wire,” IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, vol. PAS-98, pp. 724-730, Mayo/Junio 1979.

[B150] Wenner, F., “ A method of measuring earth resistances,” Bulletin of the Bureau of standards, Report no. 258, vol. 12, no. 3, pp. 469-482, Feb. 1916.

[B151] Yu, L., “ Determination of induced currents and voltages in earth wires during faults,” Proceedings of IEE, Vol. 120, no.6, pp. 689-692, Junio 1973.

[B152] Zaborszky, J., “Efficiency of grounding grids with non-uniform soil” AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 74, pp. 1230-1233, Dic. 1955.

## ANEXO B

Este anexo es una forma de ilustrar las aplicaciones de las ecuaciones que se han tratado en este manual, tablas y graficas para el diseño de un sistema de aterrizaje. Los objetivos específicos de este anexo son:

- Mostrar la aplicación de las ecuaciones principales de este manual para varios refinamientos del diseño hacia una solución satisfactoria del diseño final.
- Ilustrar las típicas diferencias que se esperan entre los resultados que se obtienen utilizando cálculos simplificados de este manual y mas soluciones rigurosas por computadora.
- Ilustrar tales condiciones de diseño por el cual el uso de los cálculos simplificados de este manual no serian apropiados para un diseño seguro, como algunas de las ecuaciones que pueden utilizarse solamente con prudencia.

Teniendo en cuenta estos objetivos, los siguientes ejemplos no representan o intentan ser la mejor forma o la más eficiente para diseñar un sistema de aterrizaje.

Se utiliza un programa de aterrizaje para modelos de rejillas que se fundamenta por medio de una computadora en estos ejemplos.

Los datos de diseño para los ejemplos son los siguientes:

|                                                                                        |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Duración de la falla $t_f$                                                             | 0.5seg                       |
| Impedancia del sistema equivalente de secuencia positiva $Z_1=4.0+j10.0\Omega$ (115Kv) |                              |
| Impedancia del sistema equivalente de secuencia cero $Z_0$                             | $=10.0+j40.0\Omega$ (115Kv)  |
| Factor de división de corriente $S_f$                                                  | 0.6                          |
| Voltaje de línea-línea en el peor lugar de falla                                       | 115000 V                     |
| Resistividad del suelo $\rho$                                                          | 400 $\Omega.m$               |
| Resistividad de grava (húmeda) $\rho_s$                                                | 2500 $\Omega.m$              |
| Espesor de la superficie de Grava $h_s$                                                | 0.102m (4")                  |
| Profundidad de la rejilla en tierra                                                    | 0.5mts                       |
| Área de aterrizaje disponible $A$                                                      | (63x84)mts                   |
| Impedancia del transformador, ( $Z_1$ y $Z_0$ )<br>( $Z=9\%$ a 15 MVA, 115/13 Kv)      | $=0.034+j1.104\Omega$ (13Kv) |

La resistividad de la grava se asume conservativa basándonos en las mediciones actuales de los ejemplos de las típicas rocas. El sistema equivalente de la falla de impedancias y el factor de división de corriente se determinan por el tipo y el lugar donde se da la peor falla, incluyendo cualquier adición concebible al sistema en los próximos 25 años. Así, no se agregan factores de seguridad para el crecimiento del sistema. Además, se asume que la

subestación no se despejara (limpiar la falla) por circuitos disyuntores con un plan de recierre automático. Así, la duración de la falla y la duración de la descarga son iguales.

### B.1 Ejemplo 1 – Rejilla cuadrada sin varillas de aterrizaje

Utilizando el procedimiento de paso a paso como se trato en el procedimiento de diseño y se ilustra en la *figura 33*, entonces se puede hacer la evaluación del siguiente diseño.

**Paso 1: Datos de campo.** Aunque la rejilla de aterrizaje de la subestación este dentro de un área de 63mx84m (5292 m<sup>2</sup>), para la evaluación del diseño inicial puede ser conveniente en suponer una rejilla de 70m x70 m sin varillas de aterrizaje. Consecuentemente, el área que ocupa tal rejilla es de A = 4900m<sup>2</sup>. Se asume una resistividad de suelo promedio de 400 Ω.m, que se fundamenta en las mediciones de la resistividad del suelo.

**Paso 2: Tamaño del conductor.** Ignorando la resistencia de la estación, la corriente de falla simétrica a tierra  $I_f = 3I_0$ , se calcula por la ecuación siguiente:

$$I_0 = \frac{E}{3R_f + (R_1 + R_2 + R_3) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (B.1)$$

Para la falla del bus 115Kv

$$3I_0 = \frac{3\left(\frac{115,000}{\sqrt{3}}\right)}{3(0) + (4 + 4 + 10) + j(10 + 10 + 40)}$$

Y por lo tanto

$$3I_0 = 3180 \text{ A y la relación } X/R = 3.33$$

Para la falla del bus de 13 kV, los 115 kV de las impedancias de falla equivalente se deben transferir al lado de los 13 kV del transformador. Debe notar que, debido a la conexión delta-estrella del transformador, solo la secuencia positiva de 115 kV de la impedancia de falla se transfiere. Así,

$$Z1 = \left(\frac{13}{115}\right)^2 (4 + j10) + 0.034 + j1.014 = 0.085 + j1.142$$

$$Z0 = 0.034 + j1.1014$$

$$3I_0 = \frac{(3)\left(\frac{13000}{\sqrt{3}}\right)}{3(0) + (0.085 + 0.085 + 0.034) + j(1.142 + 1.142 + 1.014)}$$

Y, por lo tanto

$$|3I_0| = 6814 \text{ A y la relación } X/R = 1.62$$

El valor de los 13 kV de la falla del bus que es de 6814 Amperios se debe utilizar para medir (tamaño) del conductor de aterrizaje.

Al utilizar la tabla 10 para una duración de falla de 0.5 seg, el factor de decremento  $D_f$  es aproximadamente 1.0; así, la corriente asimétrica de falla rms también es 6814 amperios. Esta magnitud de corriente se utilizara par determinar la mínimo diámetro de los conductores de aterrizaje.

Suponiendo el uso de alambre de cobre y una temperatura ambiente de 40 °C. La ecuación (42) y la Tabla 2 se utilizan para obtener el área transversal del conductor. Para un tiempo de 0.5 seg y una temperatura de fundición de 1084°C para el cobre hard-drawn, el área transversal que se requiere en circular mils es:

$$\begin{aligned} A_{\text{kcmil}} &= I \cdot K_f \sqrt{t_c} \\ A_{\text{kcmil}} &= 6.814 \left( 7.06 \sqrt{0.5} \right) = 32.04 \text{ kcmil} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Ya que  $A_{\text{mm}^2} = \pi d^2/4$ , el diámetro del conductor es 4.7 mm o 0.0047 mt si es un conductor sólido.

Basándonos es estos cálculos, se puede utilizar un alambre de cobre tan pequeño como # 4 AWG, pero debido a la fuerza mecánica y a los requisitos de dureza, un conductor trenzado # 2/0 AWG con un diámetro  $d = 0.0115 \text{ m}$  (0.414") comúnmente se prefiere como un mínimo.

Consecuentemente, en esta etapa, el diseñador puede optar revisarlo si, alternamente, utilizar un cable de acero con revestimiento de cobre menos conductivo (30%) y la imposición de una máxima temperatura limite más conservativa de 700 °C permitirá utilizar un conductor con diámetro  $d = 0.01 \text{ mt}$ .

Al utilizar la ecuación (41) y la Tabla 1, obtenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} A_{\text{kcmil}} &= I \frac{197.4}{\sqrt{\frac{\text{TCAP}}{(t_c)(\alpha_r)(\rho_r)} \left[ \ln \left( \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right) \right]}} = 65.9 \text{ kcmils} \\ A_{\text{kcmil}} &= 6.184 \frac{197.4}{\sqrt{\frac{3.85}{(0.5)(0.00378)(5.862)} \left[ \ln \left( \frac{245 + 700}{245 + 40} \right) \right]}} = 65.9 \text{ kcmils} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

En este caso, un conductor sólido de  $d_{\min} = 6.5 \text{ mm}$ , o  $0.0065 \text{ mt}$ , el cual es menor que  $d = 0.01 \text{ mt}$ . Por lo tanto, un cable de cobre de acero con revestimiento de cobre con un tamaño casi de # 2/0 AWG es una alternativa viable para alambres de rejilla, aun si se impone una máxima temperatura límite de  $700^\circ\text{C}$ .

**Paso 3: El criterio del voltaje de paso y de toque.** Para una capa superficial de grava de  $0.102 \text{ mt}$  (4”), con resistividad de  $2500 \Omega\cdot\text{m}$  y para una resistividad terrestre de  $400 \Omega\cdot\text{m}$ , el factor de reflexion K se calcula por medio de la siguiente ecuación (21)

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (\text{B.4})$$

$$K = \frac{400 - 2500}{400 + 2500} = -0.72$$

La *figura 11* indica que para  $K = -0.72$  la resistividad de la roca molida se desconsidera por el factor de reducción  $C_s = 0.74$ . El factor de reducción  $C_s$  se puede aproximar también al utilizar la ecuación (27)

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (\text{B.5})$$

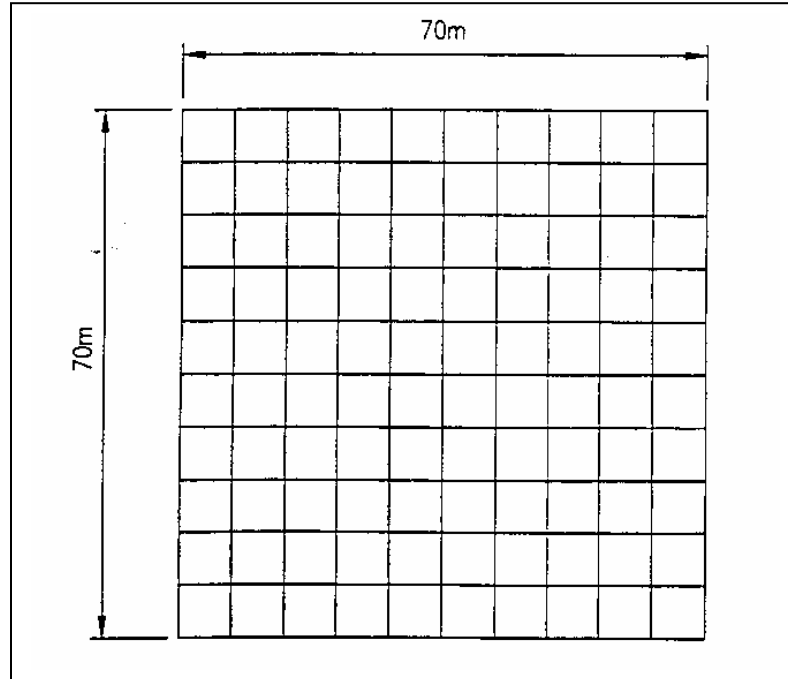
$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left( 1 - \frac{400}{2500} \right)}{2(0.112) + 0.09}$$

Al suponer que para una estación en particular, el lugar del aterrizaje de las instalaciones dentro de la propiedad cercada, es tal que, se espera que la persona al menos tenga un peso corporal de  $70 \text{ kg}$  ( $155 \text{ lb}$ ), se pueden utilizar las ecuaciones para calcular los voltajes de toque y de paso, de la siguiente manera:

$$E_{\text{paso } 70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{B.6})$$

$$E_{\text{paso } 70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{B.7})$$

**Paso 4: Diseño inicial.** Suponer una instalación preliminar de una rejilla de 70 m x 70 m con los conductores separados a la misma distancia, como se muestra en la figura B.1, con espacios  $D = 7\text{m}$ , la profundidad de entierro de la rejilla es  $h = 0.5\text{ m}$  y sin varillas de aterrizaje. La longitud total de los conductores enterrados,  $L_T$ , es  $2 \times 11 \times 70\text{ m} = 1540\text{ m}$ .



**Figura B.1 – Rejilla cuadrada sin varillas de aterrizaje**

**Paso 5: Determinación de la resistencia de la rejilla.** Utilizando la ecuación (52) para  $L = 1540\text{ m}$ , y un área de la rejilla de  $A = 4900\text{ m}^2$  la resistencia es

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{20A} \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (\text{B.8})$$



**Paso 6: Corriente máxima de rejilla  $I_G$ .** Por el procedimiento y las definiciones que se trataron en las definiciones de la corriente máxima de rejilla, esta se determina por la combinación de la ecuación (63) y la ecuación (64). Dirigiéndonos al paso 2, para  $D_f = 1.0$  y el factor de división de corriente de  $S_f = 0.6$ ,

$$S_f = \frac{I_c}{3I_0} \quad (B.9)$$

y

$$I_G = D_f(I_g) \quad (B.10)$$

Aunque el valor de 6814 amperios del bus de falla de 13 Kv es mas grande que el valor de 3180 amperios del bus de falla de 115 Kv, se recuerda que en la determinación de la corriente maxima de rejilla que el devanado del transformador estrella-aterizado de 13 Kv es una fuente local de corriente de falla y no contribuye al GPR. Así, la corriente máxima de rejilla se fundamenta en 3180 amperios.

$$I_G = D_f(S_f)(3I_0) \quad (B.11)$$

**Paso 7: GPR.** Ahora es necesario comparar el producto de  $I_G$  y  $R_g$ , o GPR, para el voltaje tolerable de toque,  $E_{toque70}$

$$GPR = I_G(R_g) \quad (B.12)$$

El cual a lo mucho sobrepasa los 838 voltios, el cual se determinó en el paso 3 como valor de seguridad del voltaje de toque  $E_{toque70}$ . Por lo tanto, son necesarias mas evaluaciones para el diseño.

**Paso 8: Voltaje de malla.** Al utilizar la ecuación (81) hasta la ecuación (83), se calcula  $k_m$ .

$$K_m = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2+h)^2}{8Dh} - \frac{4}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2.n-1)} \right] \right] \quad (B.13)$$

Donde

y

$$(B.14)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (B.15)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (B.16)$$

Donde

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (B.17)$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (B.18)$$

$n_b = 1$  para una rejilla cuadrada

$n_c = 1$  para una rejilla cuadrada

$n_d = 1$  para una rejilla cuadrada

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_c + L_R} \quad (B.19)$$

**Paso 9:  $E_m$  vs  $E_{toque}$ .** El voltaje de malla es mas grande que el voltaje de toque tolerable (que es 1002.1 V vs 838.2 V). Se debe modificar el diseño de la rejilla.

Por comparación, el programa de computadora muestra el valor de 2.67  $\Omega$  y 984.3 V para la resistencia de la rejilla y el voltaje de toque, respectivamente, para este ejemplo.

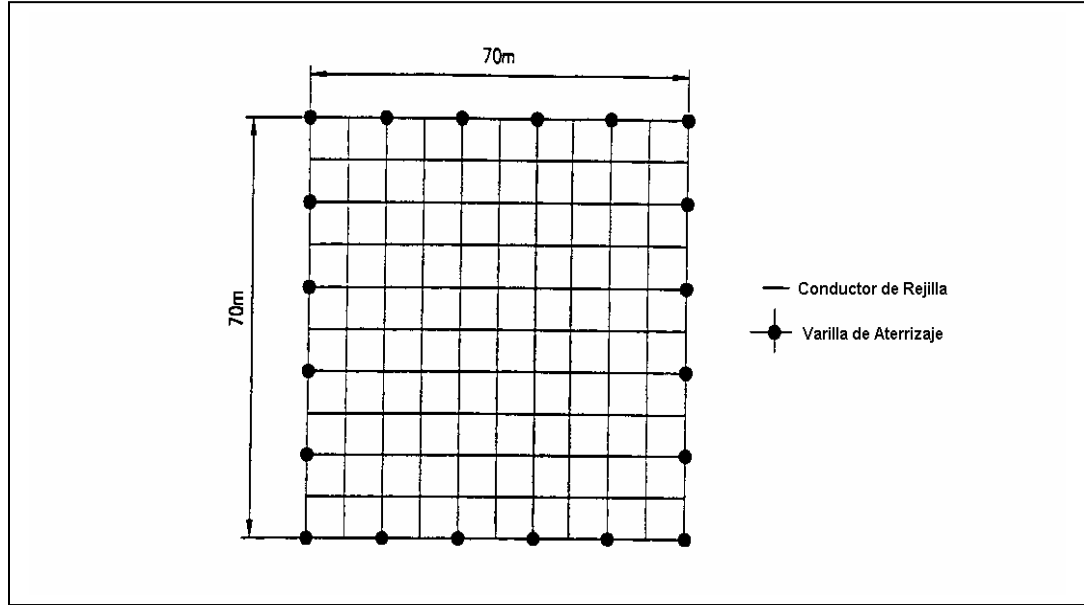
## B.2 Rejilla cuadrada con varillas de tierra – Ejemplo 2

En el ejemplo anterior B.1 no se logra el paso 10 debido a la falla para cumplir el criterio 9. Generalmente, hay dos aproximaciones para modificar el diseño de la rejilla para reunir los requisitos del voltaje de toque tolerable.

- a) Reduce el incremento de potencial a tierra abajo del voltaje de toque tolerable o a un valor lo suficientemente bajo que resulte en un valor  $E_m$  abajo del voltaje de toque tolerable.
- b) Reduce la corriente de falla a tierra disponible.

Comúnmente reducir la corriente de falla disponible es difícil o no muy practica de lograr, así que la rejilla se modifica cambiando cualquiera o todos los elementos que se mencionan a continuación: el espacio del conductor de rejilla, la longitud total del conductor, la profundidad de la rejilla, agregar mas varillas de

aterrizaje, etc. en este ejemplo, el diseño preliminar se modificara al incluir 20 varillas de tierra, cada una de 7.5 MT (24.6 ft) de largo, alrededor del perímetro de la rejilla (*Figura B.2*)



**Figura B.2 – Rejilla cuadrada con 20 varillas de 7.5 mt.**

**Paso 5.** Si utilizamos la ecuación (52) para  $L_T = 1540 + 20 (7.5 \text{ m}) = 1960 \text{ m}$ , y  $A = 4900 \text{ m}^2$  nos da el valor de la rejilla  $R_g$ :

$$R_G = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{20 A} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (\text{B.20})$$

**Paso 6 y 7.** El incremento de potencial es  $(1908) (2.75) = 5247 \text{ V}$ , el cual es mucho mas grande que  $8383.2 \text{ V}$ .

**Paso 8.** Al utilizar la ecuación (81) y la ecuación (83), se calcula  $K_m$ .

$$K_m = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2+h)}{8 \cdot D \cdot h} - \frac{4}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \quad (\text{B.21})$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (\text{B.22})$$

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R} \quad (B.23)$$

Ya que el voltaje de paso no se ha calculado todavía, se utiliza la ecuación (89) y la ecuación (92) hasta la ecuación (94) para calcular  $k_i$ ,  $E_s$ ,  $L_s$  y  $K_s$ , respectivamente. Note que el valor para  $K_i$  sigue siendo 2.722.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (B.24)$$

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R} \quad (B.25)$$

**Paso 9:  $E_m$  vs.  $E_{toque}$ .** Ahora el voltaje de malla de esquina que se calculo es mas bajo que el voltaje de toque tolerable (747.4 V vs 838. 2 V).

**Paso 10:  $E_s$  vs  $E_{paso}$ .** El voltaje  $E_s$  que se calculo esta bien abajo que el voltaje de paso tolerable, el cual se determino en el paso 3 del ejemplo 1. que es 548.9 V es mucho menor que 2686.6 V.

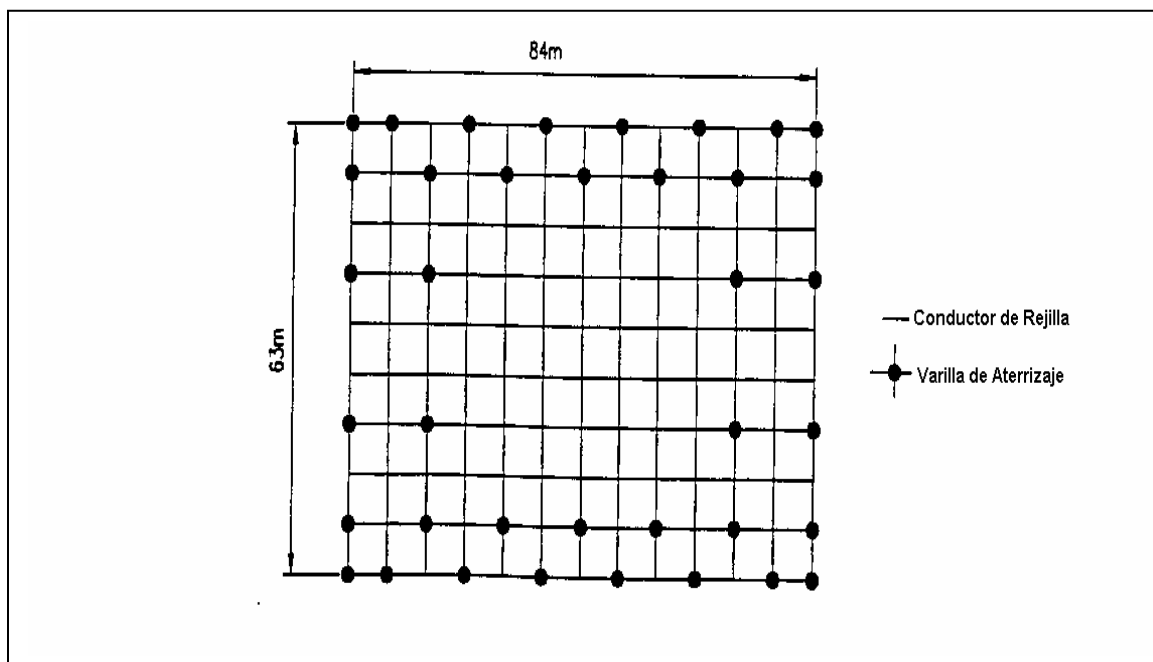
**Paso 11: Modificar el diseño.** No necesariamente para este ejemplo.

**Paso 12: Diseño detallado.** Un diseño seguro se obtuvo. En este punto, todos los equipos de mechas (pigtaills), varillas de aterrizaje adicionales para supresores de transientes, voltaje de paso y de toque, etc. se deben agregar para completar los detalles del diseño de rejilla.

### B.3 Rejilla rectangular con varillas de tierra – Ejemplo 3

En este ejemplo, el diseño preliminar de la rejilla se reconciliara en términos de la forma actual del área de aterrizaje como un diseño alternativo. Nos damos cuenta que el área del aterrizaje total es solamente el 8 % mas grande que el que se utilizo en los cálculos anteriores, la mayoría de las conclusiones del ejemplo 2 se pueden usar para llegar a una solución confiable del diseño final.

Al escoger, nuevamente, el espacio  $d = 7$  mt, para una rejilla de (63 x 84) mt, el patron de alambre de la rejilla es (10x13), y la longitud del conductor de la rejilla que se combina es  $13 \times 63 \text{ m} + 10 \times 84 \text{ m} = 1659 \text{ mt}$ . Se asume el uso de 38 varillas de tierra, cada una de 10 metros de largo, según la *figura B.3*.



**Figura B.3 – Rejilla rectangular con treinta y ocho varillas de tierra de 10 metros.**

**Paso 5.** Nuevamente, usamos la ecuación (52), pero para  $L_T = 1659 \text{ m} + (38)(10 \text{ m}) = 2039 \text{ m}$  y  $A = 63 \text{ m} \times 84 \text{ m} = 5292 \text{ m}^2$ , el cual nos da

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{20A} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (\text{B.26})$$

**Paso 6 y 7.** Al utilizar  $I_G = 1908 \text{ A}$  y  $R_g = 2.62 \Omega$ , el  $\text{GPR} = (1908)(2.62) = 4998.96 \text{ V}$ , el cual es mas grande que  $838.20 \text{ V}$ .

**Paso 8.** Para el arreglo del diseno particular de la *figura B.3*, las ecuaciones del tema voltaje de malla se pueden utilizar otra vez para estimar el voltaje de malla en la **esquina**. Sin embargo, ya que la rejilla es rectangular, el valor de  $n$  que se

va a utilizar en el votaje de malla es diferente, basandonos en los factores que se determinaron al usar las ecuaciones desde la (84) hasta la (88).

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (B.27)$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (B.28)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{294}{4 \cdot \sqrt{5292}}} = 1.005 \quad (B.29)$$

$n_c = 1$  para una rejilla rectangular

$n_d = 1$  para una rejilla rectangular

Ahora  $K_m$  se calcula al usar las ecuaciones desde la (81) hasta la (83)

$$K_m = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2+h)^2}{8 \cdot D \cdot h} - \frac{4}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \quad (B.30)$$

Donde

$K_{ii} = 1$  para una rejillas con varillas de tierra

$K_h = 1.225$

$K_m = 0.77$

La ecuación (89) se usa para calcular  $K_i$

$$K_i = 0.644 + 0.148(n) \quad (B.31)$$

Finalmente,  $E_m$  se calcula al usar las ecuaciones desde la (80) hasta la (91)

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R} \quad (B.32)$$

**Paso 9.** Este voltaje de malla que se calculo es bien abajo del  $E_{\text{toque70}}$  limite de 838.2, pero utiliza 119 m de conductor adicional y 230 m de varillas de tierra adicional, como se comparo con el ejemplo anterior. Asi, el espacio de la malla se podria reducir, el numero y/o la longitud de las varillas de tierra o ambos para lograr el mismo margen de seguridad como el ejemplo 2.

Los pasos que se mantienen son los mismos, tal como se demostró en el ejemplo 2.

#### B.4 Rejilla en forma de L con varillas de tierra – Ejemplo 4

En este ejemplo el diseno del ejemplo 2 se modifiko para mostrar el uso de las ecuaciones para una rejilla L con varillas de tierra. El área total y el espacio de malla son los mismos que el ejemplo 2, y las varilla de tierra se colocan solo alrededor del perímetro de la rejilla, según la *figura B.4*. Todos los demas parámetros son los mismos del ejemplo 2, excepto por el numero de varillas (24). Asi, los pasos del 1 – 4 son los mismos del ejemplo 2 y asi, este ejemplo inicia en el paso 5.

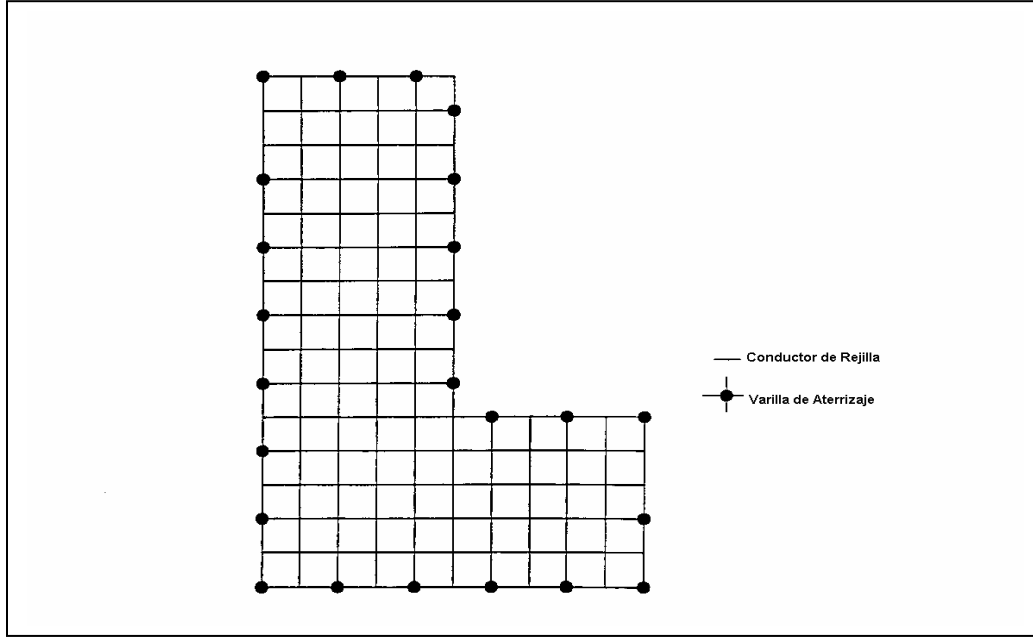
**Paso 5.** Al usar la ecuación (52) para  $L_T = 1575$  m y  $A = 4900$  m<sup>2</sup>, obtenemos

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{20 A} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (B.33)$$

**Paso 6 y 7.** El GPR que se reviso es  $(1908) (2.74) = 5528$  V, el cual es mucho mas grande que el voltaje de toque tolerable de 838.2 V.

**Paso 8.** Al usar las ecuaciones desde la (84) hasta la (88), la ecuación (81) y la ecuación (89), se calcula  $n$ ,  $K_m$  y  $K_i$ .

$$n = n_a = n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (B.34)$$



**Figura B.4 – Rejilla forma L con veinticuatro varillas de tierra de 7.5 metros.**

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (B.35)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{294}{4 \cdot \sqrt{5292}}} = 1.005 \quad (B.36)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7(4900)}{70(105)}} \quad (B.37)$$

Ahora  $K_m$  se calcula al usar las ecuaciones (81) y (83).

$$K_m = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2+h)}{8 \cdot D \cdot h} - \frac{4}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \quad (B.38)$$



la ecuación (89) se usar para calcular  $K_i$

$$K_i = 0.644 + 0.148(n) \quad (B.39)$$

Finalmente,  $E_m$ , se calcula la usar las ecuaciones (81) y (91).

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R} \quad (B.40)$$

Desde las ecuación (92) hasta (94) se calcula  $E_s$ ,  $L_s$  y  $K_s$ .

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (B.41)$$

Entonces,

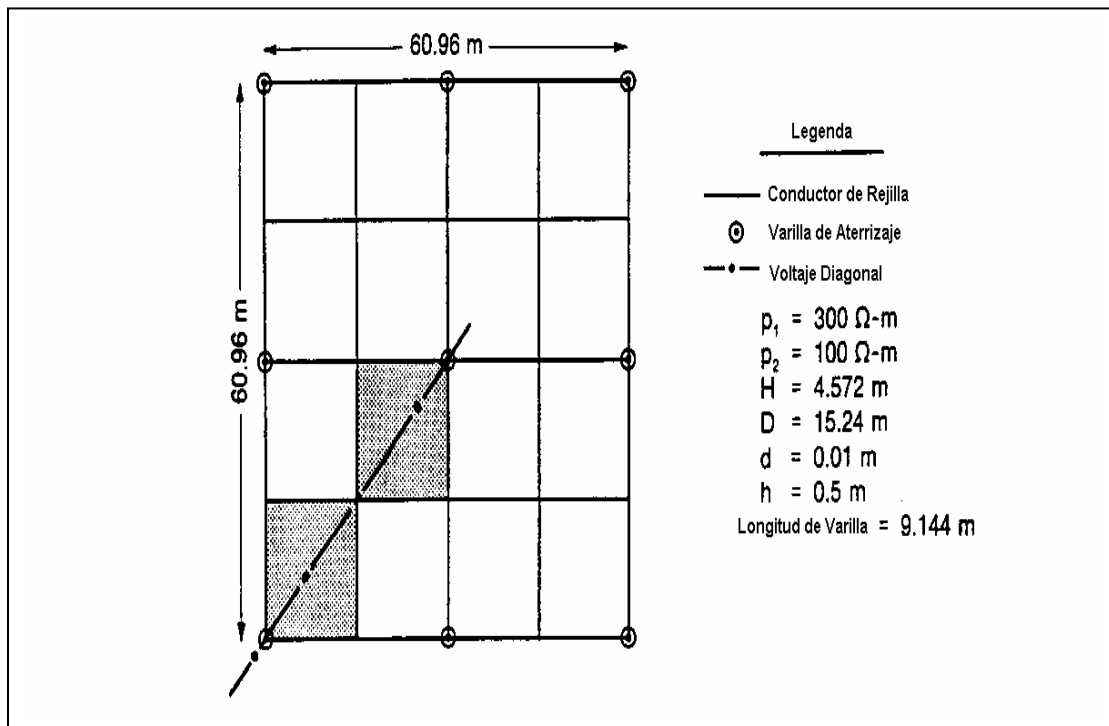
$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R} \quad (B.42)$$

**Paso 9.** Notese que este esta cerca de los resultados del ejemplo 2 y es mas bajo que el voltaje de toque tolerable limite de 838.2 V

**Paso 10.** El  $E_s$  que se calculo esta bien abajo del voltaje de paso tolerable que se determino en el paso 3 del ejemplo 1. Que es, 574.6 V es mucho menos que 2686.6 V.

**Paso 11.** No se utiliza en este ejemplo.

**Paso 12.** Un diseño seguro se obtuvo y los detalles finales, se pueden ahora agregar al diseño.



### B.5 Rejilla a espacios iguales con varillas de tierra en dos capas de suelo-muestra 1.

Como se muestra en la *figura B.5*, la rejilla de 61m x 61m (200ft x 200 ft) consiste cuatro mallas por lado y tiene nueve varilla de tierra, cada una 9.2 mt de largo. El diámetro de la varillas de tierra fueron 0.0127 mt (0.5 in). La rejilla consiste de 4 mallas por lado, formada por alambres de 0.01 m de diámetro, enterrados 0.5 mt de la superficie. La profundidad de la capa superior de 300 $\Omega$ .m fue 4.6 mt (15 ft); el suelo inferior tiene una resistividad de 100 $\Omega$ .m.

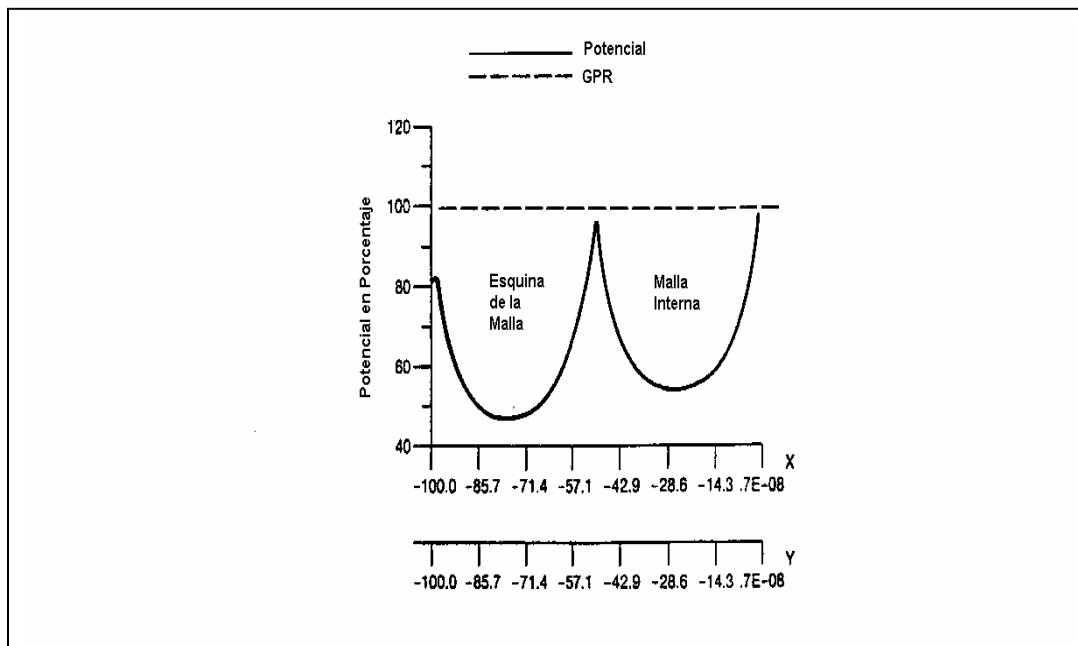
En base al programa para computadora se calcularon los valores de la resistencia, voltaje de malla de esquina y el voltaje de paso máximo, tal como se muestra:

$$R_g = 1.353 \Omega$$

$$E_m = 49.66 \% \text{ del GPR}$$

$$E_s = 18.33 \% \text{ del GPR}$$

Como se puede determinar de la *figura B.6*, las coordenadas del voltaje de mall son  $x = -75.00 \text{ ft}$  y  $Y = -75.00 \text{ ft}$ . Que es , cerca del centro de la esquina de la malla. El voltaje de paso máximo ( no se muestra) se calculo afuera de la rejilla, entre la esquina de la rejilla ( $X,Y = -100 \text{ ft}$ ) y el punto en  $X,Y = -102.12 \text{ ft}$ , que es, aproximadamente sobre 1 mt de distancia un dirección diagonal lejos de la esquina de la rejilla.



## B.6 Rejilla a espacios desiguales con varillas de tierra en un suelo uniforme – muestra 2.

Una rejilla cuadrada con espacios desiguales se muestra en la *figura B.7*.

El resultado de la computadora incluye la resistencia de la rejilla, el perfil del voltaje superficial, el voltaje de paso y la esquina del voltaje de malla.

Tal como se muestra en la *figura B.8*, la esquina del voltaje de malla es solo el 9.29 % del GPR, mientras que el voltaje de toque máximo que ocurre sobre la malla interior mas grande es el 17.08 % del GPR.

El voltaje de toque máximo, así, no ocurre en la esquina de la red. Para otras opciones de espacio del conductor, el voltaje de toque máximo puede ocurrir sobre algunas redes. Por lo tanto, para espacios desiguales, el voltaje de toque se debe investigar sobre la rejilla entera y simplificar el criterio para revisar solo la esquina del voltaje de malla no es suficiente. Por el otro lado, la resistencia  $R_g$  no es demasiado dependiente en la configuración exacta de los conductores de rejillas y las varillas de tierra. Por ejemplo,  $R_g$  se estimo por la ecuación (54) para una longitud combinada de conductores de rejilla y varillas de tierra  $L_T = 18 \times 91.44 \text{ mt} + 25 \times 9.2 \text{ mt} = 1876 \text{ mt}$ , el valor que se calculo de  $1.61 \Omega$  seria menor del 14 % que el valor que se calculo de  $1.416 \Omega$  por medio del programa de computadora.

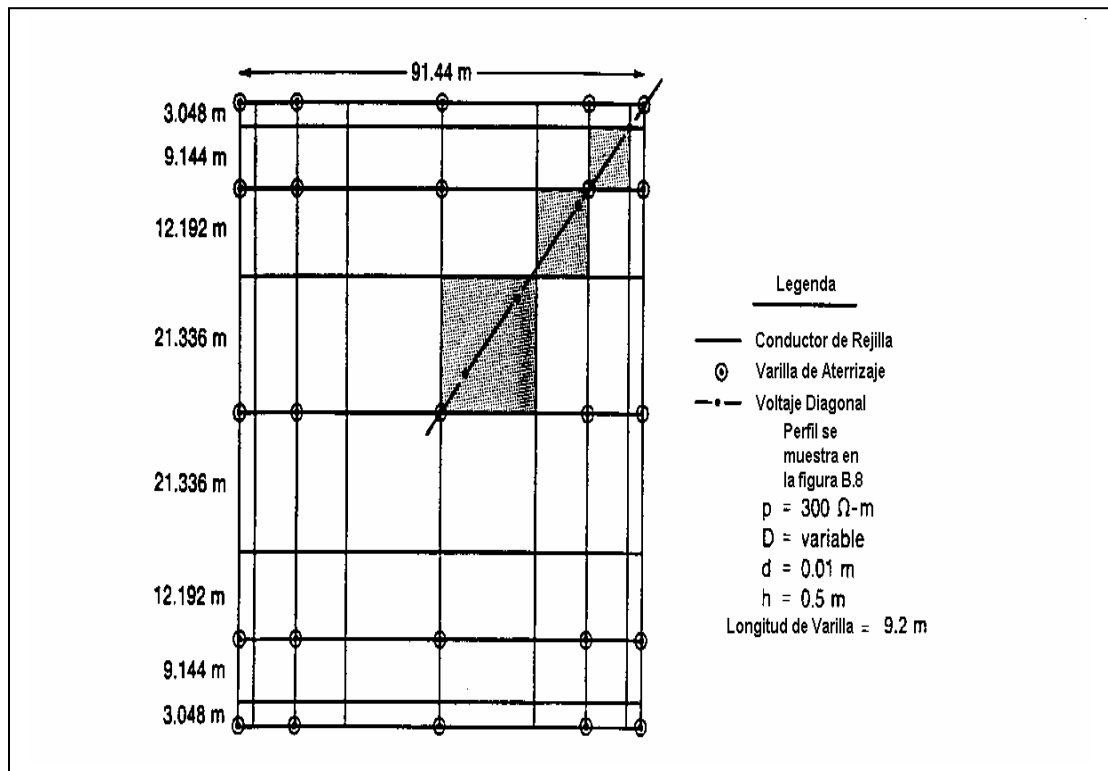


Figura B.7 – Rejilla cuadrada de espacios desiguales con veinte y cinco varillas de 9.2 metros.

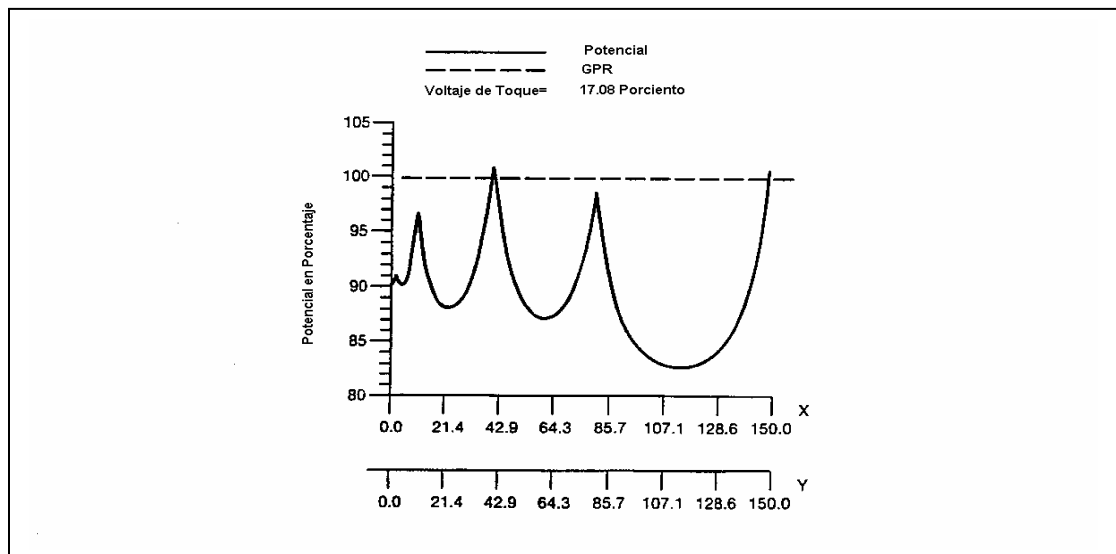


Figura B.8 – Perfil del voltaje diagonal para una rejilla de espacios desiguales de la figura B.7.

## ANEXO C

### ANÁLISIS GRAFICO Y APROXIMADO DE LA DIVISIÓN DE CORRIENTE

#### C.1 Introducción

Un método grafico para determinar la corriente de rejilla máxima, basándonos en los resultados que obtuvimos al utilizar el programa en la computadora. Este método correlaciona la falla de la secuencia cero de la subestación que se obtuvo de un estudio estándar e corto circuito hacia el flujo de corriente actual entre el sistema e aterrizaje y alrededor de la Tierra. En Garret, Myers y Patel [B73] ellos describen el análisis paramétrico y el fundamento que sí resulta de las suposiciones que utilizaron para desarrollar las curvas. Las curvas adicionales se han desarrollado para dirigir otros sistemas de configuraciones. Lo que se menciona a continuación es una explicación del uso de las graficas desde la *figura C.1* hasta la *figura C.22*.

Las graficas se dividen en cuatro categorías:

- 1) Categoría A: 100% remoto y 0 % local de la contribución de la corriente de falla, representando la típica distribución de las subestaciones con transformadores delta-estrella, con líneas de transmisión X y alimentadores Y ( ver desde la *figura C.1* hasta la *figura C.16*)
- 2) Categoría B: 75 % remoto y 25 % local contribución de la corriente de falla a tierra ( *figura C.17* hasta la *figura C.18*)
- 3) Categoría C: 50 % remoto y el 50% local, de la contribución de la corriente de falla a tierra ( *Figura C.19* hasta la *figura C.20*)
- 4) Categoría D: 25 % remoto y el 75 % la contribución de la corriente de falla a tierra (*figura C.21* hasta la *figura C.22*)

Categoría B-D representa la típica subestación de transmisión o las plantas generadoras con líneas de transmisión (en estos casos los alimentadores se consideran líneas de transmisión) y con fuentes locales de corriente de secuencia cero, tal como los auto-transformadores, generadores (estrella aterrizado), etc. La categoría A funciona bien para casos prácticos. Las categorías B-D son aproximaciones toscas y la precisión depende en varios parámetros del sistema (particularmente el origen de la corriente de falla a tierra local).

Para obtener los gráficos se usaron las siguientes suposiciones:

- a) Longitud de la línea de transmisión 23.5 mi (37.82 Km.) y una distancia entre aterrizajes de 500 ft (152ft).

- b) Resistencia de la torre de transmisión de 15 o 100 $\Omega$ .
- c) La estructura de la línea de transmisión de un polo con un hilo 1-7 # 10 con coraza de aluminio y 336.4 kcmil, conductor ACSR 26/7.
- d) La longitud de la línea de distribución de 2.5 mi (4 Km.) y una distancia entre aterrizajes de 400 ft (122mt).
- e) La resistencia de la distribución monofásica de 25 o 200 $\Omega$ .
- f) El plano triangular del polo de distribución trifásico, con 336.4 kcmil, una fase con conductor ACSR 26/7 y un conductor neutro 1/0 ACSR.
- g) La resistividad del suelo de 100 $\Omega$ .m
- h) Las resistencias del sistema de aterrizaje de la subestación de 0.1 $\Omega$ , 0.5 $\Omega$ , 1.0 $\Omega$ , 5.0 $\Omega$ , 10  $\Omega$  y 25 $\Omega$ .
- i) El número de las líneas de transmisión cambian de 0, 1, 2, 4, 8, 12 y 16.
- j) El número de las líneas de distribución cambian de 0, 1, 2, 4, 8, 12 y 16.
- k) Un origen remoto por cada dos líneas de transmisión.

## **C.2 Como utilizar los gráficos y la tabla de impedancia equivalente.**

De acuerdo a la *figura C.1* hasta la *C.22*, sé grafica una familia de curvas, con cada curva se representa un numero diferente de líneas de transmisión y alimentadores de distribución. La abcisa es un rango de las resistencias del sistema de aterrizaje desde 0.1  $\Omega$  hasta 25.0 $\Omega$ . La ordenada es el porcentaje de corriente de falla de la barra principal de la subestación de la secuencia cero total la cual fluye entre el sistema de aterrizaje y los alrededores de la Tierra.

Cuando usamos las curvas de la categoría A y la tabla C.1, la barra de corriente se falla conectado en Delta se debe usar como un multiplicador del factor de separación, ya que esta corriente de falla es la única que viene de la fuente remota y es la base de estas curvas. Cuando utilizamos las curvas B-D, la corriente de falla y las contribuciones se deben determinar por todos los niveles de voltaje y el caso que resulte en la corriente de rejilla más alta se debe utilizar.

La tabla C.1 muestra la impedancia equivalente del sistema de aterrizaje de distribución y transmisión a 1 $\Omega$  para el 100% de contribución remota con X líneas de transmisión y alimentadores de distribución Y. La primera columna de impedancias es para la resistencia del electrodo de tierra de la línea de

transmisión  $R_{tg}$  de  $15\Omega$  y la resistencia del electrodo de tierra del alimentador de distribución de  $R_{dg}$  de  $25\Omega$ . La segunda columna de impedancias es para  $R_{tg}$  de  $100\Omega$  y  $R_{dg}$  de  $200\Omega$ . Para determinar el GPR con separaciones de corriente, poner en paralelo la resistencia de rejilla con la impedancia apropiada de la tabla y multiplicar este valor por la corriente de falla total. Por ejemplo, una subestación con una línea de transmisión y dos alimentadores de distribución tienen una resistencia de rejilla a tierra de  $5\Omega$ , una corriente de falla total de  $1600\text{ A}$ .  $R_{tg}$  de  $15\Omega$  y  $R_{dg}$  de  $25\Omega$ . De la Tabla C.1, la impedancia equivalente del sistema de aterrizaje de transmisión y distribución es  $0.54 + j 0.33\Omega$ . La magnitud de la impedancia a tierra equivalente total es

$$|Z_g| = \left| \frac{(5.0)(0.54 + j0.33)}{5 + 0.54 + j0.33} \right| = 0.57\Omega$$

Y el GPR es

$$\text{GPR} = (0.57)(1600) = 912\text{ V}$$

Para calcular la corriente de rejilla, divide el GPR por la resistencia de rejilla a tierra.

$$I_g = \frac{912}{5} = 182\text{ A}$$

La corriente de rejilla se puede calcular directamente por la división de corriente.

$$|I_g| = 1600 \left| \frac{(0.54 + j0.33)}{5 + 0.54 + j0.33} \right| = 182\text{ A}$$

### C.3 Ejemplos

Para ilustrar el uso del análisis grafico, considere una subestación con dos líneas de transmisión y tres alimentadores de distribución y una resistencia de rejilla a tierra de  $1\Omega$  (ver *figura C.23*). la corriente de rejilla máxima es  $2354.6\text{ A}$ , con la falla de la barra a tierra es  $9148.7\text{ A}$ . El sistema que se trata tiene dos líneas de transmisión con  $R_{tg}$  de  $15\Omega$  y  $R_{dg}$  de  $25\Omega$ . La *figura C.3* muestra las curvas de dos líneas / dos alimentadores y dos líneas /cuatro alimentadores. Así, se necesita la interpolación para este ejemplo. De la *figura C.3* vemos que el factor de separación aproximado  $S_f$  es  $(32+23) / 2$  o  $27.5$ . la corriente de rejilla máxima es:

$$I_g = (9148.7)(0.275) = 2516 \text{ A}$$

Al usar la tabla C.1, la impedancia equivalente del sistema de aterrizaje de transmisión y distribución para dos líneas y dos alimentadores de distribución es  $0.455 + j0.241 \Omega$ , y para dos líneas y cuatro alimentadores de distribución es  $0.27 + j0.165 \Omega$ . El promedio de los factores de división para estos dos casos se usaran.

$$S_f = \left| \frac{0.455 + j0.241}{1 + 0.455 + j0.241} \right|$$

$$S_f = \left| \frac{0.27 + j0.165}{1 + 0.27 + j0.165} \right| = 0.247$$

$$\text{Así, } S_f = (0.349 + 0.247) / 2 = 0.298 \text{ o } 29.8\%$$

$$I_g = (9148.7) (0.298) = 2726$$

Ambos métodos se comparan favorablemente con el valor de 2354.6 A o 26 % de  $3I_0$  del programa de computadora, aunque el método de la impedancia equivalente es generalmente más conservativo.

Luego considere el sistema más complejo que se muestra en la *figura C.24*. Este ejemplo es similar al primero, excepto que la distribución de la subestación se reemplaza con una fuente local de generación, tal como una planta de cogeneración. Para este ejemplo, hay dos orígenes de la corriente de falla a tierra, así se debe calcular el porcentaje de la contribución de la corriente de falla a tierra local vs la falla remota. El programa por computadora calcula una corriente de falla total de 19269.6 A a 115kV, con un 48.7 % de contribución por la fuente local y 51.3 % de contribución por las fuentes remotas. Las curvas más cercanas son el 50/50 de división (*figura C.19*). Para una resistencia de rejilla de  $0.9 \Omega$ , el factor de división se determina de la curva para dos líneas y no alimentadores –  $S_f = 29\%$ . La corriente de rejilla máxima es

$$I_g = (19269.6) (0.29) = 5588 \text{ A}$$

Para este caso, el programa resulta en un valor de 4034.8 A, o 21 % de  $3I_0$ . Esto no se compara tan bien como el caso con el 100 % de contribución remota, pero continúa más cerca que al usar la corriente de falla total o incluso la contribución remota o local. El método de la impedancia equivalente (Tabla C.1) no funciona tan bien para otros casos con el 100 % de la contribución remota y no se incluye en la Tabla C.1.



## C.4 Ecuaciones para calcular las impedancias de línea

Las definiciones de los términos que se usan en las ecuaciones son:

- GMD es la distancia media geométrica entre los conductores de fase en ft.  
GMR es el radio medio geométrico del conductor en ft.  
 $d_{ab}$  es la distancia entre conductores a y b en ft.  
 $r_a$  es la resistencia en ac del conductor a una frecuencia f.  
 $X_a$  es la reactancia inductiva del conductor a un pie de espacio a una frecuencia f.  
f es la frecuencia en Hz.  
 $D_e$  es la profundidad equivalente del retorno a tierra en ft.  
R la resistividad del suelo en  $\Omega.m$

La impedancia de secuencia positiva,  $Z_1$  de una línea de transmisión (con retorno a Tierra), ignorando los efectos de los cables aéreos, es

$$Z_1 = r_a + jx_a + jx_d \quad (C.1)$$

Donde

$$X_a = 0.2794 \cdot \log_{10} \frac{1}{GMR}$$

Y

$$GMR = 0.2794 \frac{f}{60} \log_{10} \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{bc} \cdot d_{ca}}$$

La misma impedancia de secuencia cero,  $Z_{0(a)}$ , de la línea de transmisión (con retorno a Tierra), sin cables aéreos, es

$$Z_{0(a)} = r_a + r_c + jx_a + jx_c - 2x_d \quad (C.2)$$

Donde

$$r_c = 0.00477 f$$

Y

$$X_c = 0.006985 \cdot f \cdot \log_{10} (4.6655 \times 10^6 \times (\rho/f))$$

y  $r_a$ ,  $x_a$  y  $x_d$  son como se definen arriba usando las características de los conductores de fase.

La impedancia de secuencia cero,  $Z_{0(g)}$  de un cable aéreo ( con retorno a tierra) es

$$Z_{0(g)} = 3r_a + r_c + j3r_a + jx_c \quad \Omega/\text{mi} \quad (\text{C.3})$$

donde  $r_a$  y  $x_a$  son como se definen arriba usando las características del cable aéreo,  $r_e$  y  $x_e$  son como se definen arriba.

La impedancia de secuencia cero  $Z_{0(g)}$  de dos cables aéreos (con retorno a Tierra) es

$$Z_{0(g)} = 3 \cdot r_a + r_c + j\frac{3}{2} \cdot x_a + jx_c - j\frac{3}{2} \cdot x_d \quad \Omega/\text{mi} \quad (\text{C.4})$$

Donde

$$X_d = 0.2794 \frac{f}{60} \log_{10} d_{xy}$$

$D_{xy}$  es la distancia entre dos cables aéreos,  $r_a$  y  $x_a$  se definieron anteriormente usando las características del cable aéreo, y  $r_e$  y  $x_e$  se definieron anteriormente.

La impedancia mutua de secuencia cero,  $Z_{0(ag)}$  entre un circuito y  $n$  cables acorazados (con retorno a Tierra) es

$$Z_{0(ag)} = r_c + jx_c - j3 \cdot x_d \quad \Omega/\text{mi} \quad (\text{C.5})$$

Donde

$$X_d = 0.2794 \frac{f}{60} \log_{10} \left( \sqrt[3-n]{d_{ag1} \cdot d_{bg1} \cdot d_{cg1} \dots d_{agn} \cdot d_{bgn} \cdot d_{cgn}} \right)$$

$d_{ag}$  es la distancia entre la fase a y el primer cable aéreo, etc. y  $r_e$  y  $x_e$  ya se definieron.

Entonces, la impedancia de secuencia cero de un circuito con  $n$  cables aéreos (y retorno a Tierra) es

$$Z_0 = Z_{0(a)} - \frac{Z_{0(ag)}^2}{Z_{0(g)}} \quad \Omega/\text{mi} \quad (\text{C.6})$$

Estas ecuaciones se usan para  $Z_1$  y  $Z_0$ , junto con las impedancias apropiadas para transformadores, generadores, etc. para calcular la impedancia de falla equivalente.

Para calcular la impedancia de un cable aereo o un alimentador neutro para usar la formula de Endrenyi, se utiliza la impedancia sencilla (con retorno a Tierra).

$$Z_s = r_c + \frac{r_c}{3} + jx_a + j\frac{x_e}{3} \text{ } \Omega/\text{mi} \quad (\text{C.7})$$

**Tabla C.1 – Impedancias equivalente aproximadas de cables aéreos en líneas de transmisión y neutros del alimentador de distribución.**

| Numero de<br>lineas de<br>transmision | Numero de<br>neutros de<br>distribución | $R_{tg} = 15; R_{dg} = 25;$<br>$R + j x (\Omega)$ | $R_{tg} = 15; R_{dg} = 25;$<br>$R + j x (\Omega)$ |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1                                     | 1                                       | 0.91+j0.485                                       | 3.27+j6.52                                        |
| 1                                     | 2                                       | 0.54+j0.33                                        | 2.18+j4.12                                        |
| 1                                     | 4                                       | 0.295+j0.20                                       | 1.32+j2.44                                        |
| 1                                     | 8                                       | 0.15+j0.11                                        | 0.732+j0.133                                      |
| 1                                     | 12                                      | 0.10+j0.076                                       | 0.507+j0.091                                      |
| 1                                     | 16                                      | 0.079+j0.057                                      | 0.387+j0.069                                      |
| 2                                     | 1                                       | 0.685+j0.302                                      | 2.18+j0.442                                       |
| 2                                     | 2                                       | 0.455+j0.241                                      | 1.63+j0.324                                       |
| 2                                     | 4                                       | 0.27+j0.165                                       | 1.09+j0.208                                       |
| 2                                     | 8                                       | 0.15+j0.10                                        | 0.685+j0.122                                      |
| 2                                     | 12                                      | 0.10+j0.07                                        | 0.47+j0.087                                       |
| 2                                     | 16                                      | 0.08+j0.485                                       | 0.366+j0.067                                      |
| 4                                     | 1                                       | 0.45+j0.485                                       | 1.30+j0.273                                       |
| 4                                     | 2                                       | 0.34+j0.485                                       | 1.09+j0.22                                        |
| 4                                     | 4                                       | 0.23+j0.485                                       | 0.817+j0.16                                       |
| 4                                     | 8                                       | 0.134+j0.485                                      | 0.546+j0.103                                      |
| 4                                     | 12                                      | 0.095+j0.485                                      | 0.41+j0.077                                       |
| 4                                     | 16                                      | 0.073+j0.485                                      | 0.329+j0.06                                       |
| 8                                     | 1                                       | 0.27+j0.485                                       | 0.72+j0.152                                       |
| 8                                     | 2                                       | 0.23+j0.485                                       | 0.65+j0.134                                       |
| 8                                     | 4                                       | 0.17+j0.485                                       | 0.543+j0.11                                       |
| 8                                     | 8                                       | 0.114+j0.485                                      | 0.408+j0.079                                      |
| 8                                     | 12                                      | 0.085+j0.485                                      | 0.327+j0.064                                      |
| 8                                     | 16                                      | 0.067+j0.485                                      | 0.273+j0.052                                      |
| 12                                    | 1                                       | 0.191 + j0.054                                    | 0.498+j0.106                                      |

Continua...

**Tabla C.1 – Impedancias equivalente aproximadas de cables aéreos en líneas de transmisión y neutros del alimentador de distribución.**

| <b>Numero de líneas de transmisión</b> | <b>Numero de neutros de distribución</b> | <b><math>R_{tg} = 15; R_{dg} = 25;</math><br/><b><math>R + j x (\Omega)</math></b></b> | <b><math>R_{tg} = 15; R_{dg} = 25;</math><br/><b><math>R + j x (\Omega)</math></b></b> |
|----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 12                                     | 2                                        | 0.17+j0.055                                                                            | 0.462+j0.097                                                                           |
| 12                                     | 4                                        | 0.14+j0.053                                                                            | 0.406+j0.083                                                                           |
| 12                                     | 8                                        | 0.098+j0.047                                                                           | 0.326+j0.066                                                                           |
| 12                                     | 12                                       | 0.077+j0.041                                                                           | 0.272+j0.053                                                                           |
| 12                                     | 16                                       | .062+j0.035                                                                            | 0.234+j0.046                                                                           |
| 16                                     | 1                                        | 0.148+j0.04                                                                            | 0.380+j0.082                                                                           |
| 16                                     | 2                                        | 0.135+j0.041                                                                           | 0.360+j0.076                                                                           |
| 16                                     | 4                                        | 0.113+j0.041                                                                           | 0.325+j0.067                                                                           |
| 16                                     | 8                                        | 0.086+j0.038                                                                           | 0.272+j0.055                                                                           |
| 16                                     | 12                                       | 0.068+j0.034                                                                           | 0.233+j0.047                                                                           |
| 16                                     | 16                                       | 0.057+j0.03                                                                            | 0.203+j0.040                                                                           |
| 1                                      | 0                                        | 2.64+j0.60                                                                             | 6.44+j1.37                                                                             |
| 2                                      | 0                                        | 1.30+j0.29                                                                             | 3.23+j0.70                                                                             |
| 4                                      | 0                                        | 0.65+j0.15                                                                             | 1.61+j0.348                                                                            |
| 8                                      | 0                                        | 0.327+j0.074                                                                           | 0.808+j0.175                                                                           |
| 12                                     | 0                                        | 0.22+j0.049                                                                            | 0.539+j0.117                                                                           |
| 16                                     | 0                                        | 0.163+j0.037                                                                           | 0.403+j0.087                                                                           |
| 0                                      | 1                                        | 1.29+j0.967                                                                            | 6.57+j1.17                                                                             |
| 0                                      | 2                                        | 0.643+j0.484                                                                           | 3.29+j0.58                                                                             |
| 0                                      | 4                                        | 0.322+j0.242                                                                           | 1.65+j0.291                                                                            |
| 0                                      | 8                                        | 0.161+j0.121                                                                           | 0.826+j0.148                                                                           |
| 0                                      | 12                                       | 0.108+j0.081                                                                           | 0.549+j0.099                                                                           |
| 0                                      | 16                                       | 0.080+j0.061                                                                           | 0.412+j0.074                                                                           |

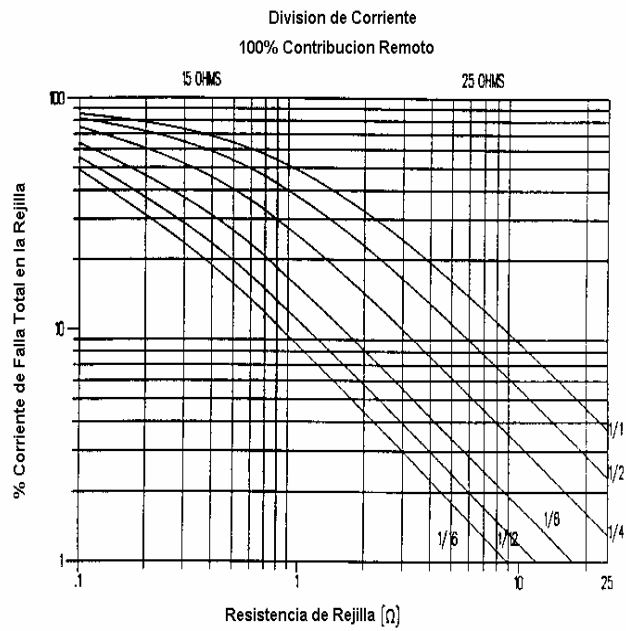


Figura C.1 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

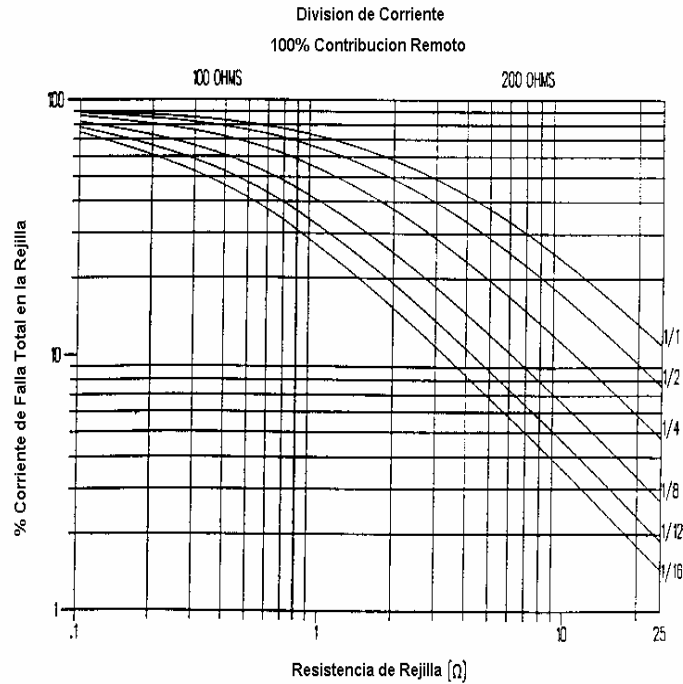


Figura C.2 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

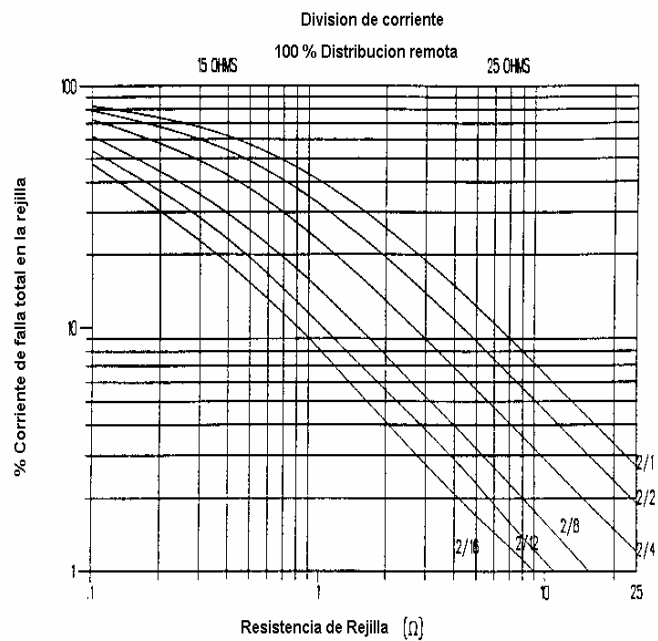


Figura C.3 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

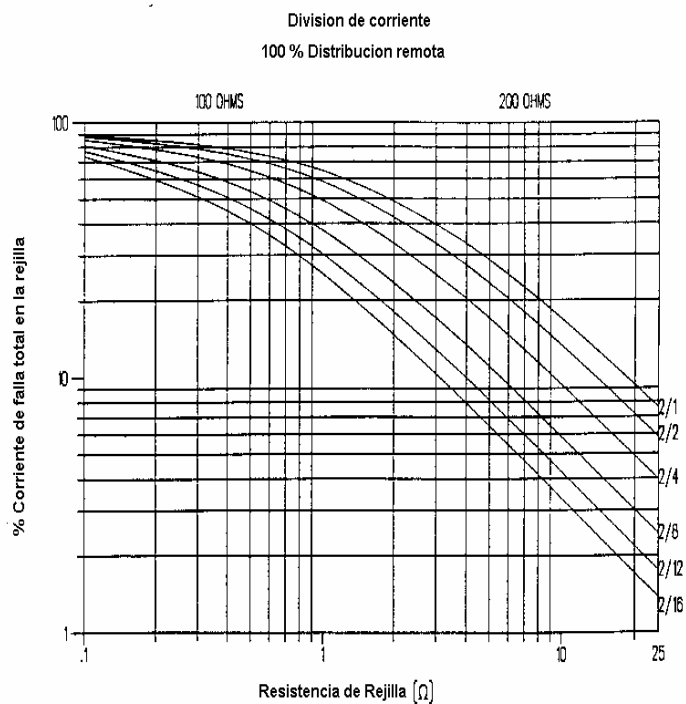


Figura C.4 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

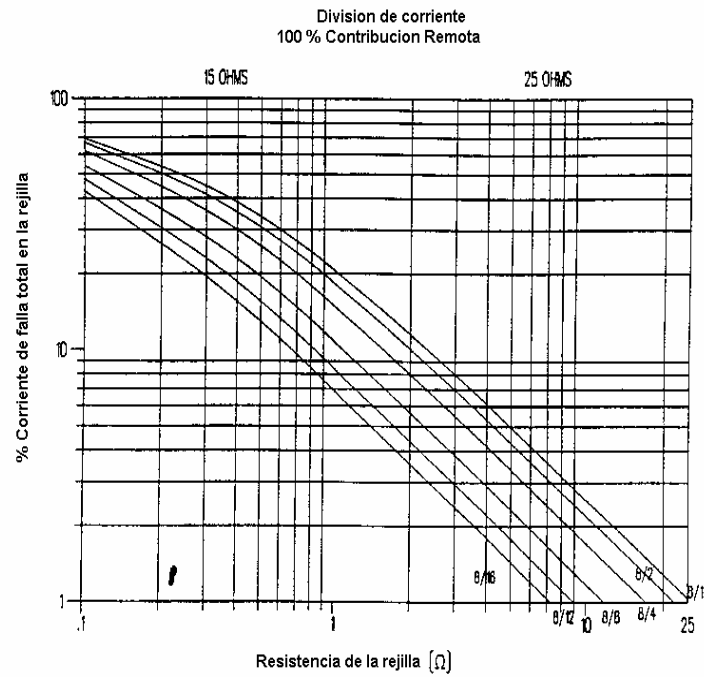


Figura C.7 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

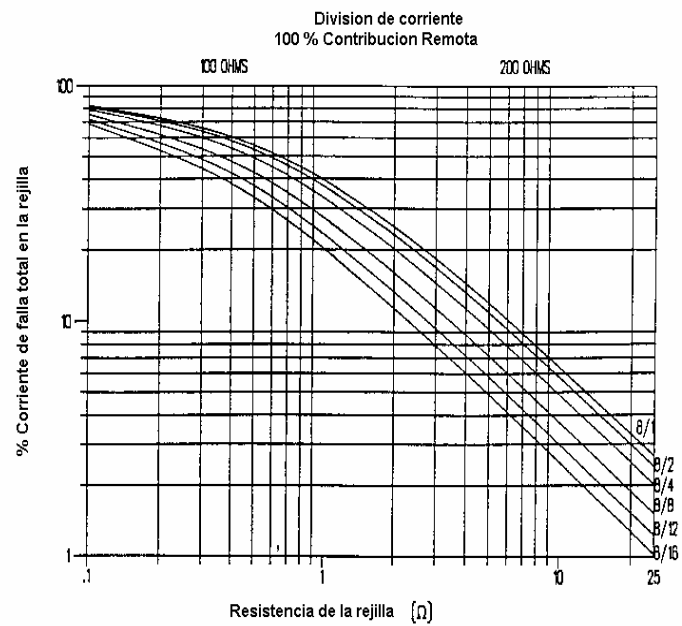


Figura C.8 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

Figura C.6 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

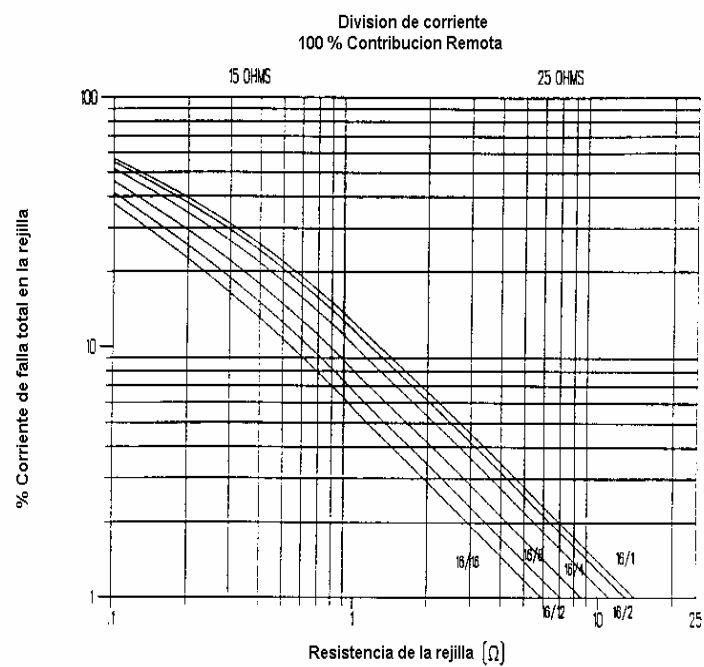


Figura C.11 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

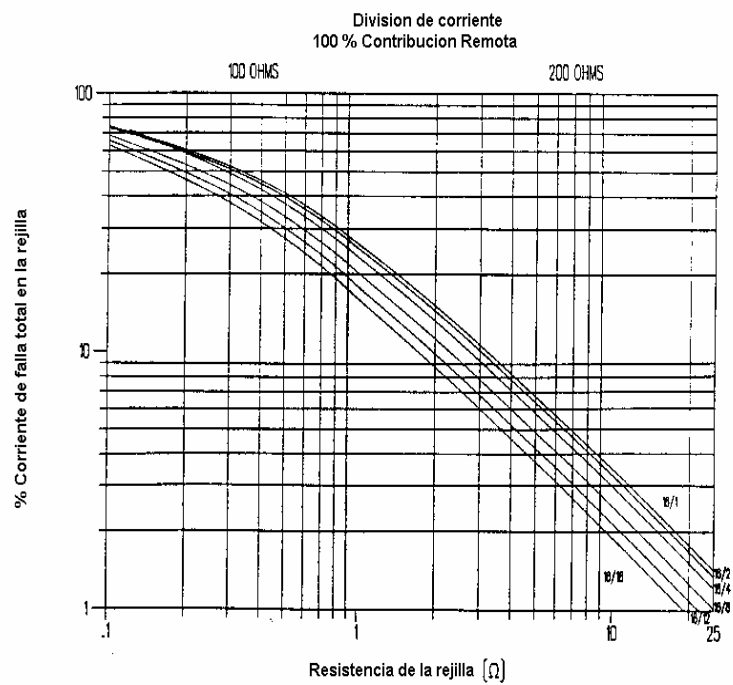


Figura C.12 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$



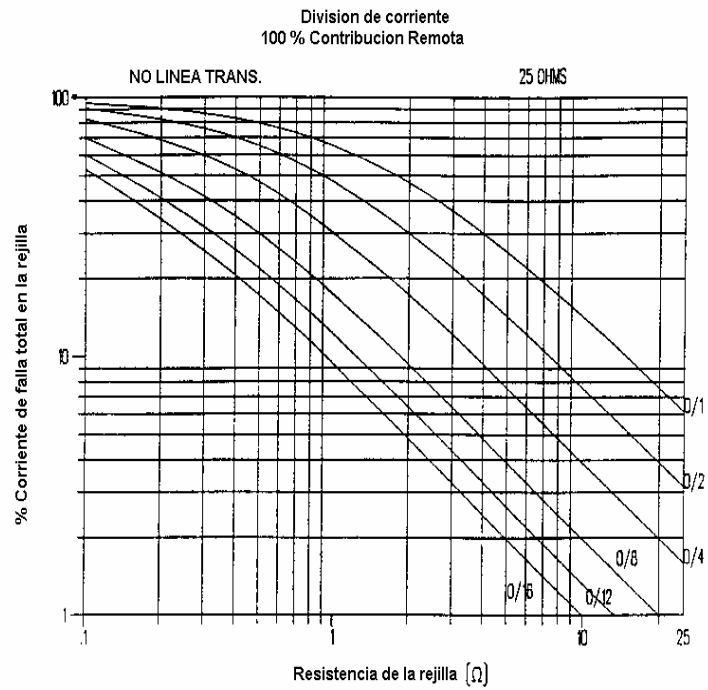


Figura C.15 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

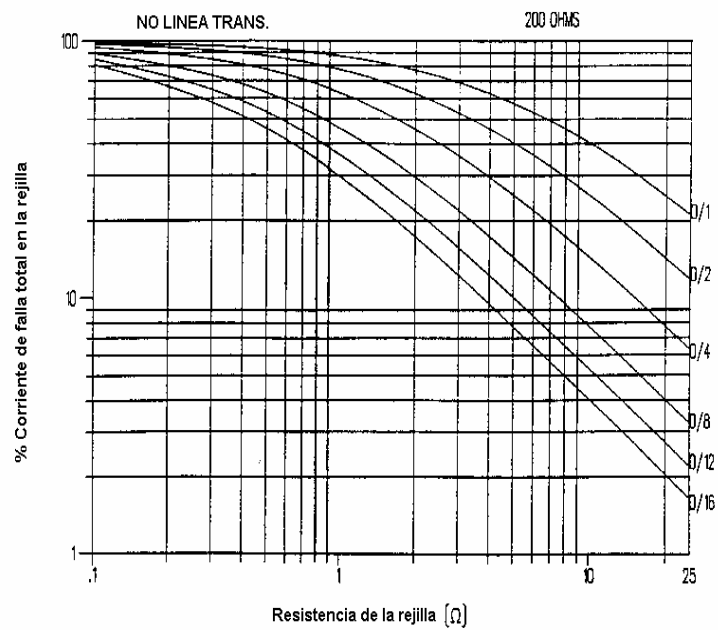


Figura C.16 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

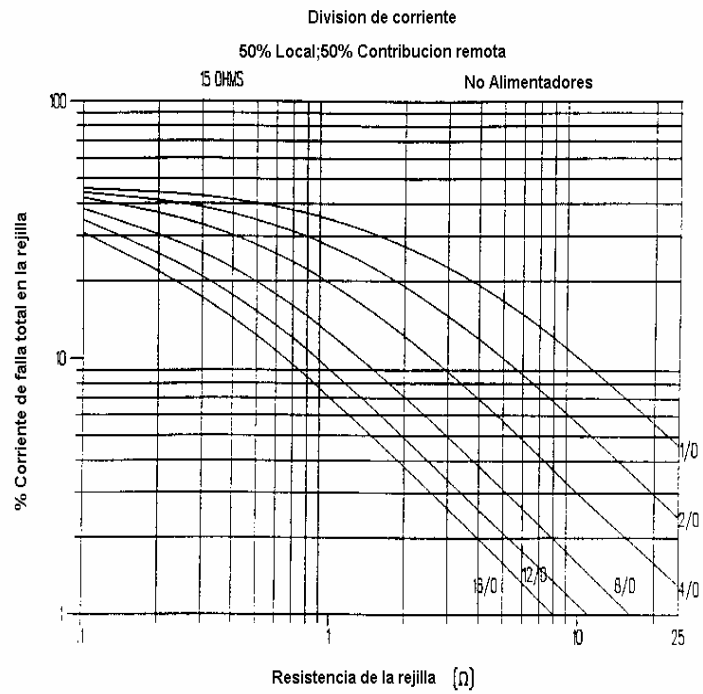


Figura C.19 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

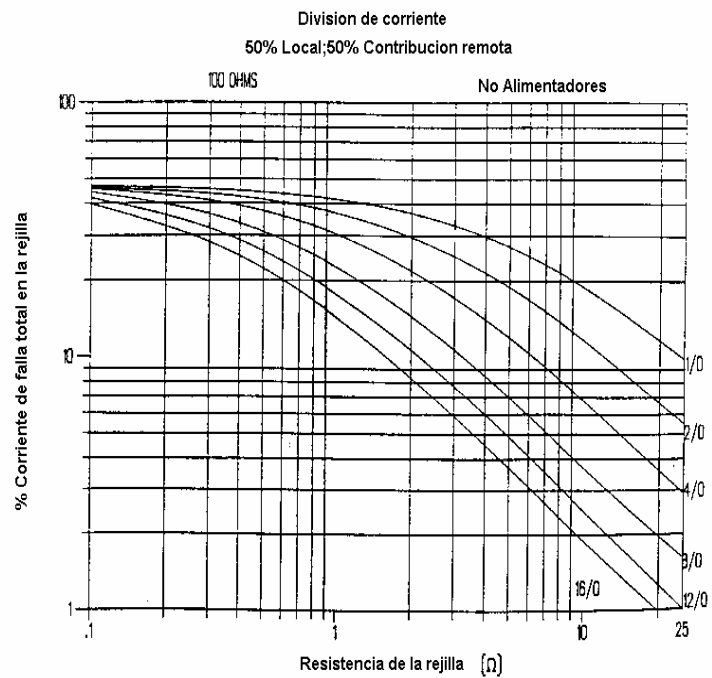


Figura C.20 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

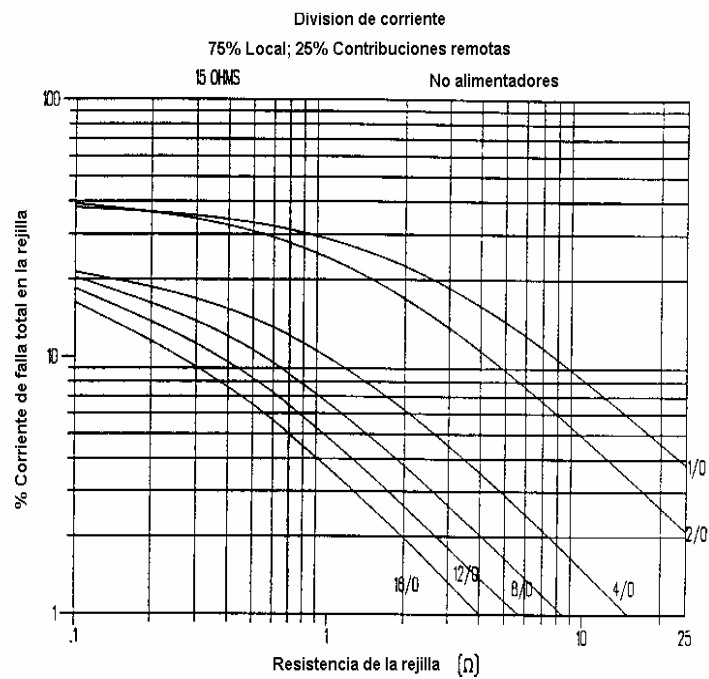


Figura C.21 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

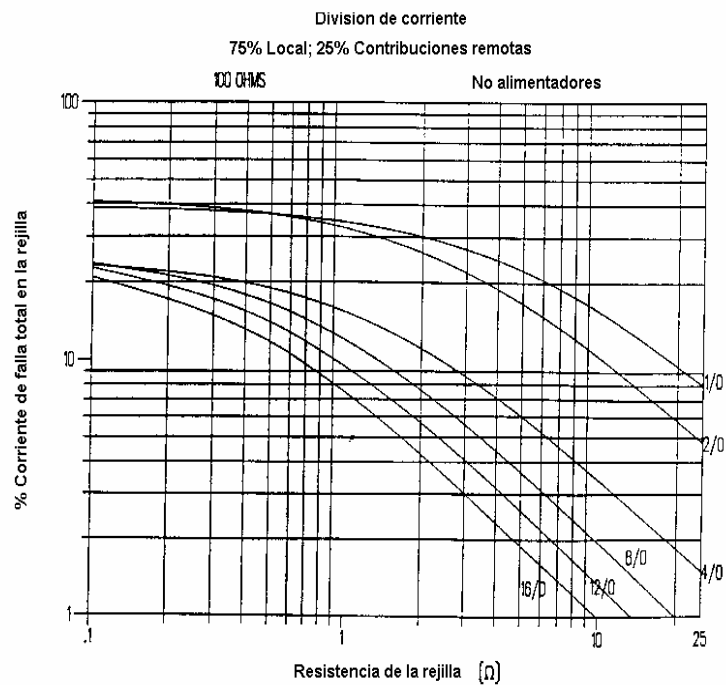


Figura C.22 - Curvas para ajustar el factor de division  $S_f$

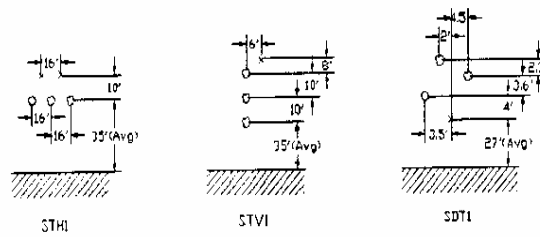
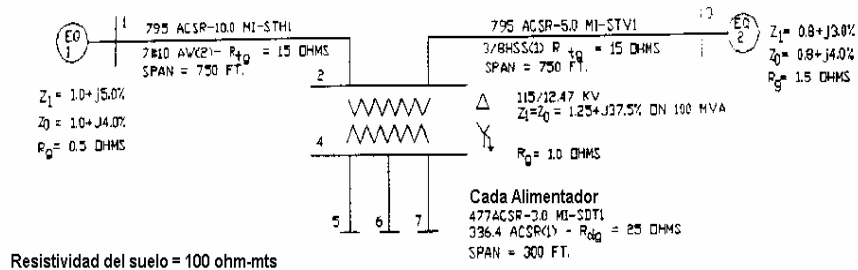


Figura C.23 - Sistema y configuracion de datos para el ejemplo 2 del punto C.3

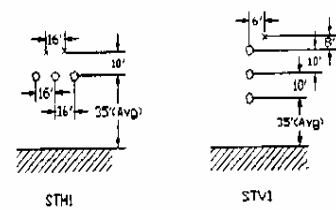
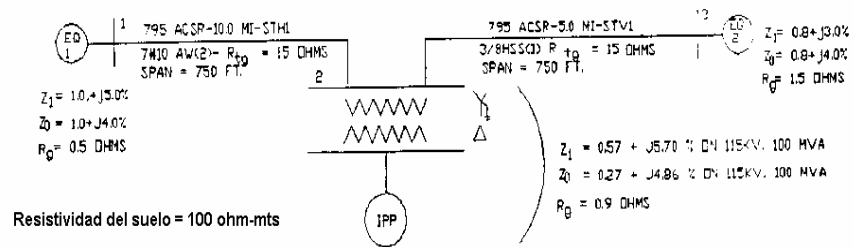


Figura C.24 - Sistema y configuracion de datos del ejemplo 2 del punto C.3

## ANEXO D

### Ecuaciones simplificadas de paso y de malla.

Al inicio de este manual, las ecuaciones siguientes se mostraron para determinar el valor de un voltaje de malla (en voltios) en la superficie de la Tierra arriba del centro de la esquina de la malla (suponiendo un espacio igual en la rejilla rectangular, la cual se entierra a una profundidad  $h$  en un suelo homogéneo de resistividad uniforme). Esta rejilla puede consistir de  $n$  conductores paralelos separados una distancia  $D$  y un número indeterminado de conexiones cruzadas. Todos los cables de la rejilla se suponen de un diámetro  $d$ .

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (D.1)$$

Donde:

- $E_m$**  es el voltaje de malla en voltios.  
 **$\rho$**  es la resistividad del suelo promedio en  $\Omega \cdot m$   
 **$I_G$**  es la corriente máxima rms que fluye entre la rejilla de aterrizaje y la Tierra en Amperios.  
 **$L_M$**  es la longitud total de los conductores enterrados, que incluyen conexiones cruzadas y opcionalmente la combinación de la varillas de tierra en mts.  
 **$K_i$**  es el factor correctivo para una irregularidad de corriente.  
 **$K_m$**  es el factor de malla que se define por  $n$  conductores paralelos.

$$K_m = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D+2+h)}{8 \cdot D \cdot h} - \frac{4}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \quad (D.2)$$

Para rejillas con varillas de tierra a lo largo de su perímetro, o para rejillas con varillas en sus esquinas, así como para rejillas con varillas de tierra a lo largo de su perímetro y en su totalidad

$$K_{ii} = 1$$

Para rejillas sin varillas de tierra o solo con unas pocas, sin que estas se coloquen en las esquinas o en el perímetro.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (D.3)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (D.4)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (D.5)$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (D.6)$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (D.7)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (D.8)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7(4900)}{70(105)}} \quad (D.9)$$

$$n_d = \left[ \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right] \quad (D.10)$$

Donde

- L<sub>c</sub>** es la longitud total de los conductores en la rejilla horizontal en metros  
**L<sub>p</sub>** es la longitud periférica de la rejilla en metros.  
**A** es el área de la rejilla en mt<sup>2</sup>.  
**L<sub>x</sub>** es la longitud máxima de la rejilla en la dirección x en mt.  
**L<sub>y</sub>** es la longitud máxima de la rejilla en la dirección y en mt.  
**D<sub>m</sub>** es la distancia máxima entre cualquiera de dos puntos en la rejilla en mt.

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R} \quad (D.11)$$

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L_s} \quad (D.12)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (D.13)$$

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R} \quad (D.14)$$

## ANEXO E

### Modelo de suelo uniforme equivalente para suelos no uniformes

En el interés de la simplicidad, muchas suposiciones se han hecho en desarrollar las ecuaciones para el diseño de la rejilla de aterrizaje de este manual. Una de esas suposiciones es que estas ecuaciones son válidas para modelos de suelo con una resistividad uniforme sin tener en cuenta el suelo bajo consideración.

Después, que se determina que el suelo se puede considerar como uniforme, el valor de la resistividad aparente promedio se calcula de la ecuación (E.1)

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (E.1)$$

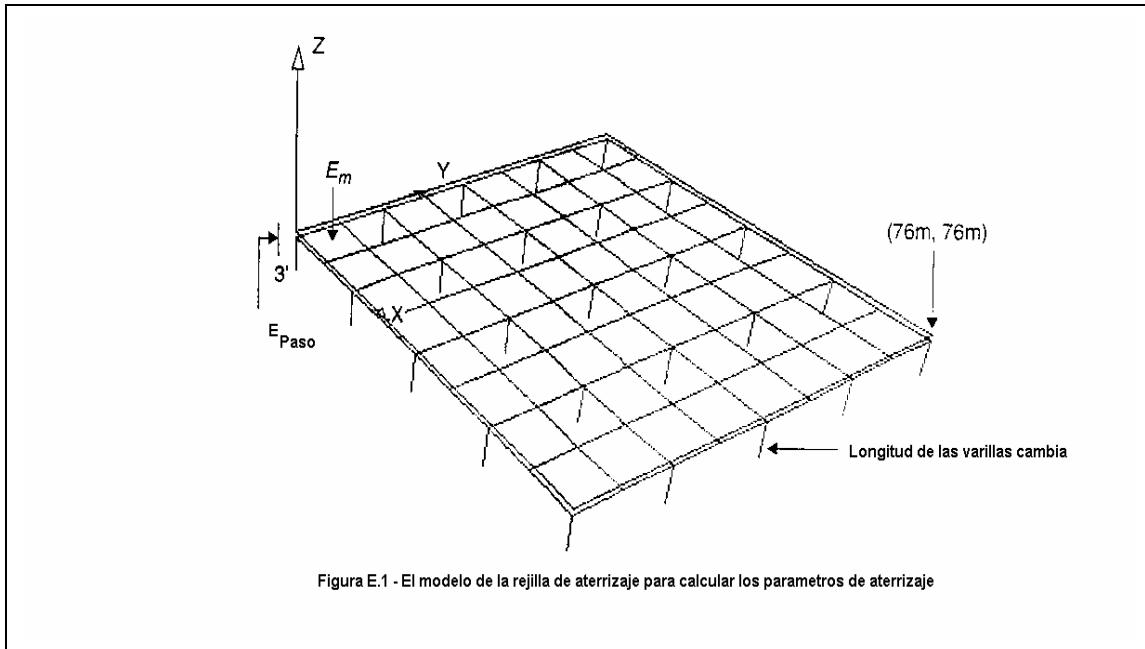
$$\rho_{a(av2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(Min)}}{2} \quad (E.2)$$

Donde

$\rho_{a(max)}$  es el valor de la resistividad máxima aparente en  $\Omega.m$

$\rho_{a(min)}$  es el valor de la resistividad mínima aparente en  $\Omega.m$

La *figura E.1* es un ejemplo de un modelo de rejilla de aterrizaje que incluye los lugares para calcular los voltajes de paso y de toque.



La tabla E.1 muestra la comparación de los parámetros de aterrizaje que se calcularon al utilizar el suelo modelo de dos capas con los cálculos al utilizar el modelo de suelo uniforme que se representa por  $\rho_{a(av2)}$  para dos suelos típicos.

**TABLA E.1 - LOS PARÁMETROS DE ATERRIZAJE QUE SE CALCULARON AL UTILIZAR EL SUELO MODELO DE DOS CAPAS CON LOS CÁLCULOS AL UTILIZAR EL MODELO DE SUELO UNIFORME**

| Tipo de Suelo | Parámetros con un suelo modelo de dos capas |                |           |           | Parámetros con un suelo modelo uniforme |              |           |           |
|---------------|---------------------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------------------------------------|--------------|-----------|-----------|
|               | $\rho_1, \rho_2, h$                         | $R_g \Omega.m$ | $E_m (V)$ | $E_s (V)$ | $\rho_{(av2)}$                          | $R_g \Omega$ | $E_m (V)$ | $E_s (V)$ |
| 1             | 100,300,6.1                                 | 1.28           | 126       | 85        | 158                                     | 0.89         | 151       | 86        |
| 2             | 300,100,6.1                                 | 0.72           | 187       | 92        | 193                                     | 1.09         | 185       | 106       |

Los valores de la resistividad del suelo se muestran en la Tabla E.2 que matemáticamente se derivaron de supuestos suelos modelos de dos capas.

**TABLA E.2 – CALCULOS DE LA RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD APARENTE PARA UN SUELO TIPO 1 Y TIPO 2 DE LA TABLA E.1, DE ACUERDO AL MÉTODO DE CUATRO PINES**



| Separación entre electrodos |        | Tipo de suelo 1      |                                           | Tipo de suelo 2      |                                           |
|-----------------------------|--------|----------------------|-------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|
| ft                          | mt     | Resistencia $\Omega$ | Resistividad Aparente $\rho_a$ $\Omega.m$ | Resistencia $\Omega$ | Resistividad Aparente $\rho_a$ $\Omega.m$ |
| 1                           | 0.305  | 29.73                | 56.94                                     | 89.13                | 170.74                                    |
| 3                           | 0.915  | 15.33                | 88.07                                     | 45.85                | 263.46                                    |
| 5                           | 1.524  | 9.97                 | 95.48                                     | 29.55                | 283.06                                    |
| 15                          | 4.573  | 3.85                 | 110.71                                    | 9.39                 | 269.67                                    |
| 20                          | 6.098  | 3.15                 | 120.76                                    | 6.46                 | 247.57                                    |
| 30                          | 9.146  | 2.49                 | 143.10                                    | 3.52                 | 202.12                                    |
| 50                          | 15.244 | 1.90                 | 181.70                                    | 1.50                 | 144.05                                    |
| 70                          | 21.341 | 1.56                 | 208.78                                    | 0.90                 | 120.28                                    |
| 90                          | 27.439 | 1.32                 | 227.75                                    | 0.64                 | 110.68                                    |
| 110                         | 33.537 | 1.15                 | 241.48                                    | 0.51                 | 106.41                                    |
| 130                         | 39.634 | 1.01                 | 251.77                                    | 0.42                 | 104.34                                    |
| 150                         | 45.731 | 0.90                 | 259.76                                    | 0.36                 | 103.16                                    |