



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA

**DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN Y SUBESTACIONES MEDIANTE UNA HERRAMIENTA
COMPUTACIONAL**

DONACION



ANA E. MORENO P.

AZULAY DEL V. SOSA T.

RECIBIDO

VALENCIA, NOVIEMBRE DE 2000

27 NOV 2000

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**

**DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN Y SUBESTACIONES MEDIANTE UNA HERRAMIENTA
COMPUTACIONAL**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

ANA E. MORENO P.

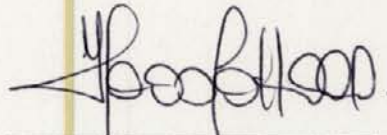
AZULAY DEL V. SOSA T.

VALENCIA, NOVIEMBRE DE 2000

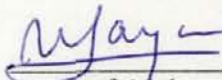
**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

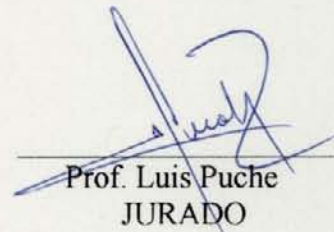
Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado **“DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y SUBESTACIONES MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL”**, realizado por las Bachilleres: Ana E. Moreno P., C.I.: 10.718.890 y Azulay del V. Sosa T., C.I.: 12.029.548, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.



Prof. Horacio Coltraro
TUTOR



Prof. Nelson Laya
JURADO



Prof. Luis Puche
JURADO

Valencia, Noviembre de 2.000

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen, por iluminarme con su bendición, acompañarme y protegerme en todo momento.

A mi Padre, porque desde donde este se que comparte la alegría y satisfacción de que yo haya culminado mis estudios en la universidad y realizara su ultimo sueño.

A mi Madre, la persona que más se merece esta dedicatoria, por ser el mejor ejemplo de fortaleza y constancia y porque gracias a su amor y sacrificios logre cumplir esta meta.

A mi Hermana Romana Aurora y a su Esposo Luis Alberto, por estar siempre a mi lado y brindarme su apoyo.

A mis Sobrinos: Baldomero, Luisana y Romina, por ser quienes siempre me han hecho sentir querida y por brindarme tantas sonrisas y alegrías.

A la persona sin la cual, no lo hubiese podido lograr, la que siempre ha estado a mi lado apoyándome y brindándome su más sincero amor, y sin la cual mi vida no tendría sentido. A ti Juan Cristóbal.

A todos mis Amigos, por ser con quienes he vivido muchos momentos felices y porque han estado a mi lado cuando los he necesitado.

¡Mi Logro es para Ustedes!

ANA

DEDICATORIA

- ◆ A Dios porque siempre esta conmigo celebrando mis triunfos y mis alegrías y en cada momento de tristeza sabía que Él estaba a mi lado apoyándome y dándome fuerzas para poder continuar.
- ◆ A mi Madre Isabel Torres porque siempre esta conmigo ayudándome a superarme, y me demuestra cada día que todo lo podemos conseguir con mucho esfuerzo y constancia.
- ◆ A mi Padre Manuel Sosa porque todos los días me enseña que uno mismo es quien se pone las barreras y solo uno debe ser capaz de superarlas, no permitiendo que el miedo y la tristeza acaben con todos nuestros sueños.
- ◆ A mis Hermanos Ismar, Hernán y Daniel porque hemos compartido muchos momentos de felicidad y tristeza juntos, viéndonos crecer y superarnos, cumpliendo cada uno de nuestros anhelos.
- ◆ A mis nuevos Hermanos Acirema Chassaigne y Martín Morles quienes celebran conmigo este triunfo y me han dado tantas alegrías.
- ◆ A mis sobrinos Claudia, Martín y el que viene en camino, porque me enseñan el valor de lo mas sencillo, porque siempre encuentran una forma para hacerme reír.
- ◆ A mis mejores amigos Gabriela Kaselow, Fabián Pernía, Avilio Aquino, Alejandro Yaguaratty, Ana Moreno y Juan Cristóbal Perdomo, porque este triunfo es también de ustedes, que me acompañaron durante toda mi carrera y es el mejor momento para expresarles todo mi agradecimiento por todos estos años de compartir y vivir tantos segundos de felicidad y de angustia, ciertamente, ustedes son el mejor ejemplo de lo que significa la palabra amistad.

Gracias a todos, nunca voy a tener como pagarles, que Dios los Bendiga y les de toda la dicha que pueda

AZULAY

AGRADECIMIENTO

Agradecemos especialmente al Profesor Horacio Coltraro por su colaboración y apoyo para realizar este trabajo

A Juan Cristóbal Perdomo por su valiosa asesoría en el área de la programación

Al Ing. Manuel H. Sosa por la ayuda prestada para el desarrollo del tema

A todo el personal Docente, Administrativo y Obrero de la Universidad de Carabobo porque siempre estuvieron a nuestra disposición contribuyendo día a día con nuestra formación.

A Dios por darnos la fortaleza para cumplir este gran sueño de culminar nuestros estudios universitarios.

A nuestros Padres y familiares quienes siempre nos brindaron su apoyo para poder culminar con éxito nuestros estudios.

A nuestros amigos Avilio, Alejandro, Juan Cristóbal, Gabriela, Fabián, Milán, Raúl, Lord, Xiomara, Rafael y Richard, por compartir con nosotras grandes momentos

Y a todas las personas que de una u otra manera nos ayudaron en el desarrollo de nuestros estudios a lo largo de todos estos años.

¡ A Todos Ustedes Mil Gracias y Dios los Bendiga. ¡

INDICE

Introducción	viii
CAPITULO I. Problema	
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Justificación	4
1.4. Alcance	5
CAPITULO II. Marco Metodológico	
2.1. Antecedentes	9
2.2. Análisis Del Suelo	
2.2.1.- Estructura y Selección del Modelo del Suelo	11
2.2.2.- Características del Suelo	16
2.2.3.- Medición de la Resistividad del Suelo	20
2.2.4.- Métodos para Medir la Resistencia de Tierra	27
2.3. Corrientes Y Voltajes Permitidos	
2.3.1.- Corriente Eléctrica a Través del Cuerpo Humano	41
2.3.2.- Límites de Corriente Permisibles en el Cuerpo	45
2.3.3.- Circuito de Tierra Accidental	49
2.3.4.- Criterios de Diferencia de Potencial Permisible	59
2.4. Sistemas De Puestas A Tierra Para Subestaciones	
2.4.1.- Principales Consideraciones de Diseño(Método de la IEEE Std 80-1986 / 1996)	67
2.4.2.- Evaluación de la Resistencia de Tierra	73
2.4.3.- Selección del Conductor	78
2.4.4.- Determinación de la Máxima Corriente en la Malla	86
2.4.5.- Diseño del Sistema de Puesta a Tierra	89
2.4.6.- Sistemas de Puesta a Tierra para Subestaciones por el Método de las Imágenes	105
2.5. Sistemas De Puestas A Tierra Para Líneas De Transmisión	
2.5.1.- Consideraciones de Diseño	106
2.5.2.- Esquemas	107
2.5.3.- Metodología de Diseño para la Puesta a Tierra de Líneas de Transmisión	111
2.6. Método De Las Imágenes	
2.6.1.- General	112
2.6.2.- Descripción del Método	112
2.6.3.- Implementación del Método de las Imágenes	117

2.6.4.- Procedimiento para Aplicar el Método	120
CAPITULO III. Programa	
3.1.- General	123
3.2.- Características del Programa	123
3.3.- Requerimientos Básicos	123
3.4.- Organigramas	124
3.5.- Consideraciones para Analizar los Resultados	130
3.6.- Pantallas del Programa	132
3.7.- Validación de Resultados	142
3.8.- Limitaciones	149
CONCLUSIONES	152
RECOMENDACIONES	154
BIBLIOGRAFÍA	155
APÉNDICES	
A.- Tratamiento Químico	164
B.- Metodología para los Cálculos de Características del Suelo	189
C.- Curvas para el Factor Divisor de Corriente (Sf)	192

INTRODUCCIÓN

La función principal de un sistema de puesta a tierra es proteger a las personas de voltajes peligrosos y evitar accidentes cuando estas circulan dentro de una subestación, en sus alrededores, cerca de una torre de línea de transmisión, o al maniobrar algún equipo.

El presente trabajo ha sido elaborado con miras a optimizar los cálculos del diseño de puestas a tierra de subestaciones (malla) y de líneas de transmisión (arreglos con jabalinas y contrapesos), debido a la importancia de estos.

Las bases teóricas han sido tomadas en su mayoría de la Guía Para El Diseño De Subestaciones De La IEEE std. 80 - 1986 en conjunto con una publicación hecha por la IEEE Titulada Progresos En Las Ecuaciones Para El Calculo De Los Voltajes De Toque Y Paso De ANSI/IEEE Std80 desarrollado por Jiri George Sverak miembro de la IEEE, así como un manual para Líneas de transmisión de una compañía Brasileira de electricidad y otra publicación de la IEEE denominado Calculo De Los Potenciales Sobre La Superficie De Una Malla Energizada U Otro Electrodo, Siguiendo Una Distribución No Uniforme De Corriente escrito por Robert J. Heppe también miembro de la IEEE para la parte de líneas de transmisión.

Hace algunos años los cálculos para el diseño de las puestas a tierra se realizaban manualmente, asumiendo valores y utilizando procedimientos de tanteo para verificar si eran correctos o no. Hoy en día con el avance tecnológico representado por las computadoras, surge la inquietud y la necesidad de crear programas capaces de realizar todos los cálculos necesarios, para su diseño de una manera rápida y efectiva

Este trabajo se desarrollo por capítulos, los cuales se estructuraron de la siguiente forma, el capítulo I contiene el planteamiento del problema, objetivos, justificaciones y alcance; el capítulo II contiene el marco teórico en el cual se desarrollan todas las bases para realizar dicho

trabajo, tales como análisis del suelo, corrientes y voltajes permitidos, consideraciones de diseño tanto para puestas a tierra de subestaciones como para líneas de transmisión, esquemas, y otros; el capítulo III se refiere al marco metodológico, características, requerimientos mínimos y estructura del programa, análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

El programa presentado en este trabajo se elaboro en un lenguaje de alto nivel como lo es Visual Basic.

CAPITULO I
PROBLEMA

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El diseño de una puesta a tierra, para una subestación o para una línea de transmisión encierra factores como la naturaleza del suelo, profundidad y geometría de la malla, futuras expansiones del sistema entre otros, estos se integran para lograr un modelo que proporcione principalmente seguridad para el personal que labora y transita por estas instalaciones.

Son muchos los autores que han estudiado el diseño de las puestas a tierra proporcionando nuevas técnicas y publicaciones, de estas resalta la gran cantidad de cálculos y mediciones que deben realizarse, las cuales requieren de la inversión de gran cantidad de horas - hombre.

Algunos institutos y empresas extranjeras que trabajan en el área de puestas a tierra han invertido gran cantidad de tiempo y dinero para realizar y poner en funcionamiento software de alta tecnología, los cuales son capaces de dar resultados donde se puede observar en pantalla, la estratificación del suelo, la ubicación de la malla, los diferentes valores de voltaje en cada punto, pero estos programas son costosos y muchas empresas nacionales no pueden tener acceso a ellos.

Debido a esto la Universidad de Carabobo especialmente la escuela de Ingeniería Eléctrica siempre en la búsqueda de información y de nuevas herramientas que permitan aumentar los conocimientos y proporcionar soluciones, ha motivado el desarrollo del tema Diseño de Puesta a Tierra para Subestaciones y Líneas de Transmisión utilizado para ello un programa actual, versátil y de fácil utilización como el Visual Basic.

1.2.- OBJETIVOS

1.2.1.- OBJETIVOS GENERALES

Elaborar un software para el diseño de puestas a tierras para subestaciones y líneas de transmisión, que evalúe los parámetros de diseño y presente resultados gráficos de voltaje, constituyéndose en una guía metodológica de diseño, disponible para la comunidad de la escuela de ingeniería eléctrica.

1.2.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la estructura del suelo y su resistencia
- Establecer los criterios de diferencia de potencial permisibles bajo condiciones de falla
- Examinar las diferentes técnicas utilizadas para hacer las puestas a tierra de subestaciones y líneas de transmisión
- Representar gráficamente algunos de los resultados obtenidos en tensiones
- Mostrar nuevas técnicas para mejorar la resistividad de los suelos
- Obtener una guía para el diseño práctico de sistemas de puestas a tierra

1.3 – JUSTIFICACION

Una de las partes más importantes en el diseño de una subestación o una línea de transmisión, y lo primero en instalarse es el sistema de puesta a tierra, el cual debe ser capaz de ofrecer seguridad al personal que estará en contacto con equipos y con el sistema en si. Las empresas eléctricas realizan constantes estudios a nivel teórico y práctico para garantizar la seguridad de sus instalaciones, la utilización de herramientas computacionales ha permitido el calculo y la verificación de los modelos teóricos con lo cual se validan los diseños de los sistemas de puesta a tierra.

Una de las herramientas más utilizadas en la actualidad son los programas de computación; hay empresas dedicadas a la elaboración de software que desarrollan y analizan el tema de puestas a tierra, estos son de gran utilidad ya que ahorran tiempo de trabajo que se traduce en un beneficio económico, además de que presentan la información de una manera más atractiva y comprensible a través de gráficos y dibujos.

El programa que se realizará permitirá a los estudiantes y profesores de la facultad de ingeniería tener una idea de lo que se puede lograr con esta herramienta ya que esta cumplirá con los requerimientos básicos para analizar un diseño de sistema de puesta a tierra y presentará resultados gráficos que serán atractivos a la vista y que presenten la información de manera clara y comprensible. Además que va acompañado de una guía que contiene los conocimientos básicos para realizar un buen diseño y nuevas técnicas que se utilizan en la actualidad para mejorar las puestas a tierra.

1.4.- ALCANCE

El presente proyecto abarca la realización de un programa en VISUAL BASIC, el cual verifica que un diseño de puesta a tierra cumpla con los requerimientos de seguridad. El programa presentará de manera gráfica algunos de los valores de potenciales del diseño. A su vez se proporcionará una guía de las diferentes estrategias utilizadas actualmente para mejorar la resistividad del suelo.

CAPITULO II
MARCO METODOLOGICO

La metodología seguida en este proyecto fue el resultado de analizar y seleccionar información y se puede resumir de la siguiente forma:

- Se escogió para el diseño de la puesta a tierra de subestaciones los procedimientos presentados en la Guía de la IEEE para Seguridad en Puestas a Tierra en Subestaciones AC, con algunas modificaciones presentadas en el artículo de la IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3 Julio 1998, Progresos en las ecuaciones de Voltajes de Toque y de Paso de ANSI/IEEE Std 80.
- Se escogió para el diseño de las puesta a tierra de Líneas de Transmisión el método presentado en el Manual de Aterramiento de la Compañía Paranaense de Energía – COPEL y en el artículo de la IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-98, No. 6 Nov./Dic. 1979, Calculo de Potenciales en la Superficie de una Malla Energizada o en Cualquier otro Electrodo, con una Distribución de Corriente no Uniforme.

Este método sirve para el diseño tanto de puestas a tierra de Líneas de Transmisión como para Subestaciones, dando resultados gráficos para ambos casos, cosa que con el método de la ANSI/IEEE 80-1986 no es posible.

- Se realizó la estructuración y diagramación de los procedimientos para luego programar.
- Se programo utilizando como lenguaje Visual Basic el cual es muy utilizado en la actualidad.
- Se hicieron corridas del programa presentadas como ejemplo y comparación de resultados.

- Por ultimo se recopiló la información para crear una guía teórica acerca del diseño de puestas a tierra y se presentaron nuevas técnicas para mejorar la resistividad de los suelos.

2.1.- ANTECEDENTES

En 1961 la IEEE publica la primera guía de seguridad para puestas a tierra en subestaciones, esta guía se formo del análisis y recopilación de informes elaborados por diferentes autores dedicados al estudio de dicho tema, tales como Sverak Balder Thapar, S.J Schwarz, E.D. Sunde, F.Dawalibi, A.P. Melipoulos, R.Rudenburg y muchos otros. Esta guía fue hecha con el propósito de presentar una recopilación de las practicas o actividades diarias que se presentan en las puestas a tierras de una subestación y dar recomendaciones al respecto.

En 1986 se publico la segunda guía referente al tema la cual es una modificación de la anterior en la cual se actualizaron tópicos y se presentaron métodos de calculo a través del uso de programas de computación para obtener resultados con menor porcentaje de error y lograr hacer el trabajo de manera mas eficiente, sin embargo esta guía a pesar de ser la ultima en publicarse los estudios no pararon hay y se han seguido haciendo modificaciones y se han mejorado algunas limitaciones.

En Venezuela EDELCA Compañía más importante de electricidad utiliza las teorías e información de estas guías de seguridad, y ha adquirido software para el diseño y verificación de sus sistemas de puesta a tierra.

En junio de 1990, la COPEL Compañía Paranaense de Energía (Brasil), Departamento de Líneas de Transmisión, elaboro un manual basado en un estudio específico, desarrollando una definición de un sistema de puesta a tierra que garantice la seguridad de personas relacionadas con las líneas de transmisión urbana.

La EPRI, ha publicado estudios en donde desarrolla el tema de puestas a tierra en los cuales presenta técnicas y metodologías innovadoras tal como es el caso de programas computacionales como el SGSYS, el cual tiene la capacidad de analizar sistemas de puesta a tierra complejos tanto

para subestaciones, líneas de transmisión y otros sistemas de puesta a tierra consistente de pocos o múltiples estructuras aterradas.

La EDSA Power System Análisis Software, es una Compañía dedicada a elaborar paquetes que realizan análisis en el campo de sistemas de potencia, entre estos se encuentra el estudio de puestas a tierra.

2.2- ANALISIS DEL SUELO

2.2.1- ESTRUCTURA Y SELECCION DEL MODELO DEL SUELO.

2.2.1.1 - INTRODUCCION

El análisis del suelo es muy importante para determinar la composición general del suelo y obtener algunas ideas básicas sobre su homogeneidad. Usualmente, excavaciones y otros trabajos de ingeniería civil se realizan en lugares donde podrían localizarse sistemas de puesta a tierra. Las tediosas pruebas a las muestras y otras investigaciones geológicas frecuentemente proveen información útil sobre la presencia de las diversas capas y la naturaleza de los materiales del suelo, principalmente nos da algunas ideas sobre la resistividad y el rango de sus valores en el lugar.

2.2.1.2 - CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS Y RANGOS DE RESISTIVIDAD

En las literaturas existe se encuentran un número de tablas que muestran los rangos de resistividad para varios tipos de suelos. La tabulación de Rudemberg [49] es de extrema simplicidad. Ver tabla # 1.

Tabla #1

Rango de resistividad de la tierra

Tipo de tierra	Resistividad calculada
Suelo orgánico húmedo	10 Ω -m
Suelo húmedo	10 ² Ω -m
Suelo árido	10 ³ Ω -m
Suelo rocoso	10 ⁴ Ω -m

2.2.1.3 - SUPOSICIÓN DE SUELO HOMOGÉNEO

Algunas veces, los suelos de múltiples capas donde la variación aparente de la resistividad del suelo con respecto a la profundidad no es tan grande, son considerados suelos homogéneos. Como una guía general, un suelo puede ser considerado uniforme si la diferencia entre dos valores extremos de resistividad aparente es menos del 30%. Esto requiere que la resistividad del suelo sea constante tanto lateralmente como en profundidades al infinito. Obviamente, este nunca es el caso. Por tanto, esta suposición puede ser hecha sin errores significantes si el suelo es esencialmente uniforme (tanto horizontal como verticalmente) para una distancia medida desde el borde de la malla de aproximadamente 3 a 5 veces la dimensión diagonal de esta.

2.2.1.4 - SUPOSICIÓN DE SUELO NO UNIFORME

Teóricamente las más exactas aproximaciones para situaciones donde la resistividad varia marcadamente con la profundidad son sugeridas por Sunde, y en algunos de los libros sobre enseñanza geofísica a los cuales él se refiere. Por ejemplo, es frecuentemente posible, tomar lecturas de campo con un rango amplio de espaciamiento de pruebas, para deducir una estratificación de la tierra dentro de dos o más capas para designar las densidades que serán calculadas para las variaciones de las pruebas. [53].

2.2.1.4.1 - MODELO DEL SUELO DE DOS CAPAS

Las observaciones de las capas son limitadas por la suposición de una más simple estratificación del suelo, esto es, un modelo de dos capas razonablemente valido para las condiciones presentes en el suelo y el rango de variaciones de resistividad tomadas en el lugar. Afortunadamente, en la practica es frecuentemente posible satisfacer esos requerimientos sin recaer en serios errores de calculo.

En principio, como muestra Sunde [53]:

1.- Un sistema de puesta a tierra en un medio ambiente de suelo de dos capas se comporta de forma diferente en comparación con el mismo sistema en suelo uniforme. Generalmente, para un sistema de puesta a tierra en suelo uniforme o en suelo de dos capas con ρ_1 menor que ρ_2 (resistividad del suelo de la capa superior menor que la resistividad de la capa inferior), la densidad de corriente es mas alta en los conductores de los bordes exteriores de la malla del sistema de puesta a tierra. En suelos de dos capas con ρ_1 mayor que ρ_2 (el suelo en la capa superior es más resistivo que el suelo de la capa inferior), la densidad de corriente es mas uniforme sobre todos los conductores del sistema de puesta a tierra. Esto es causado por la tendencia de la corriente a circular hacia la capa de menor resistividad, en vez de circular hacia el exterior de la capa superior de mayor resistividad.[57], [4].

2. - Las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento de un sistema de puesta a tierra enterrado en suelos de múltiples capas pueden ser obtenidas por la solución de las ecuaciones de Laplace por un punto de corriente origen, o por el método de las imágenes, los cuales dan resultados idénticos. El uso de cualquiera de los métodos para la determinación del potencial de tierra causado por un punto de corriente origen resulta en una serie infinita de términos representando las contribuciones de cada imagen consecutiva del punto de corriente origen, como muestra la figura # 1.[25], [32], [53].

Los cambios abruptos en la resistividad de los limites de cada capa de suelo puede ser descrita por medio de un factor de reflexión. este factor de reflexión K es definido como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1)$$

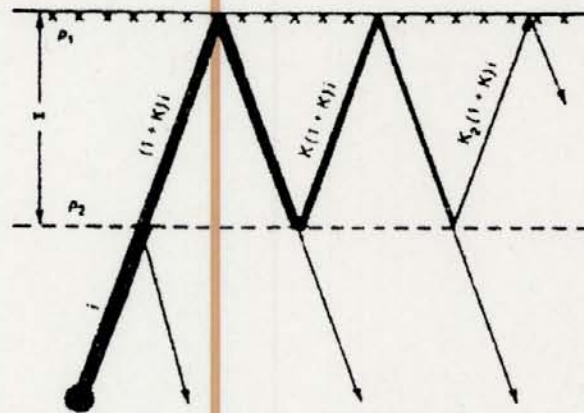


Figura #1

Reflexión de corriente en suelo de dos capas
con el origen de corriente en la capa inferior

Donde ρ_1 y ρ_2 son los valores de las resistividades de las capas superior e inferior del suelo, respectivamente. En la Fig. # 1, un observador en la capa inferior del suelo vería una corriente origen de magnitud i , una imagen reflejada desde la interfase del subsuelo de magnitud $-ki$, y una serie infinita de imágenes reflejadas desde la superficie mas alta del suelo (suelo de superficie), de magnitudes $K^n \cdot (1 - K)^2$ donde iría desde 0 hasta el infinito. Un observador en la capa superior vería un origen y las reflexiones en la capa superior del suelo, tanto con magnitudes aparentes $(1 - K) \cdot i$, y una serie infinita de pares de reflexiones teniendo magnitudes de $K^n \cdot (1 + K) \cdot i$, donde n iría desde 1 al infinito. Estas reflexiones podrían ser sucesivamente de mayores alturas y profundidades. Una figura similar podría ser dibujada para representar el caso de un origen de corriente en la capa de la superficie del suelo.

Mientras, la representación más exacta de un sistema de puesta a tierra estaría ciertamente basado en las variaciones de la resistividad del suelo presentes en el lugar de ubicación del SPT, esto será raramente justificable económicamente, o técnicamente factible para modelar todas las

variaciones. Por tanto, en casos difíciles, la representación de un electrodo de tierra basado en un modelo equivalente al modelo de tierra de dos capas es suficiente para diseñar un sistema de puesta a tierra seguro.

2.2.1.4.2 - COMPARACIÓN DEL MODELO DE SUELO UNIFORME Y DE DOS CAPAS

El modelo aproximado de dos capas ha sido basado en que es mucho más exacto que el modelo del suelo uniforme. Algunas de las razones son:

1.- Variaciones en la resistividad del suelo tienen considerable influencia en la representación de los mayores sistemas de puesta a tierra, afectando tanto el valor de la resistencia de tierra como las elevaciones del potencial de tierra y los voltajes de toque y de paso en la superficie. En general, para valores negativos de K (más resistividad en la capa superior que en la capa inferior), la resistencia es menor que la de un sistema de puesta a tierra igual en suelo uniforme con resistividad ρ_1 . En contraste, para valores positivos de K , la resistencia es generalmente más alta que aquella en suelo uniforme con resistividad ρ_1 . Una relación similar existe para el voltaje de toque y paso producida sobre la superficie de una tierra de dos capas versus aquella sobre la superficie de suelo uniforme. Para valores negativos de K , los voltajes de toque y paso son generalmente menores que los voltajes para el mismo sistema de puesta a tierra en suelo uniforme de resistividad ρ_1 . Además, para valores positivos de K , los voltajes de toque y paso son generalmente más altos que en suelo uniforme.

2.- Otros parámetros, tales como la altura H de la capa superficial, también afectan las diferencias en las representaciones de los electrodos de tierra en un medio ambiente de dos capas y en condiciones de suelo uniforme. La regla general es que cuando la capa superior de altura H llega a ser significativamente más grande que las dimensiones propias de los electrodos, la

representación del electrodo se aproxima a la representación del mismo electrodo en suelo uniforme de resistividad ρ_1 .

3.- También, podría ser reconocido que las características de arriba son basadas en la premisa de un origen de corriente de falla constante. Las corrientes actuales en el sistema de puesta a tierra pueden cambiar de caso a caso como una función de ρ_1 y ρ_2 reflejando los cambios locales relativos a todas las otras sendas de corrientes de falla predeterminada por la localización de la falla. Por lo tanto, en ciertos casos algunas de las sumisiones dadas arriba pueden no siempre poseer la verdad.

Puesto que el uso de modelos de dos capas o múltiples capas necesita de la aplicación de un computador digital o similares recursos con grandes memorias que tienen espacios disponibles, es impráctico insistir en el uso de modelos de múltiples capas para todos los estudios de puesta a tierra. Para diseñar las aplicaciones involucradas relativamente simples de arreglos de puesta a tierra con electrodos enterrados en un suelo razonablemente uniforme, existen métodos de aproximación con los cuales se obtiene un diseño realista con adecuados márgenes de seguridad. Mientras, para diseños que involucran una gran área de puesta a tierra, mallas de formas particulares, etc., o donde la resistividad del suelo no es uniforme, el ingeniero responsable del diseño decidirá cual método usará y si o no un modelo de múltiples capas es bueno, basado en toda la información disponible.[60].

2.2.2 - CARACTERISTICAS DEL SUELO

2.2.2.1 - SUELOS COMO UN MEDIO DE PUESTA A TIERRA

El comportamiento de un electrodo de tierra enterrado en el suelo puede ser analizado por medio del circuito de la figura # 2. Como muestra, la mayoría de los suelos se comportan como

un conductor de resistencia r , y como un dieléctrico. Excepto para algunos casos donde la tierra puede ser representada por una resistencia pura.

2.2.2.2 - EFECTOS DEL GRADIENTE DE VOLTAJE

La resistividad del suelo no es afectada por un gradiente de voltaje a menos que este último exceda un cierto valor crítico. El valor varía un poco con el material del suelo, pero este usualmente tiene la magnitud de varios Kilovoltios por centímetro. Una vez excedido, se desarrollarían arcos en la superficie del electrodo que viajarían hacia el interior de la tierra, incrementando el tamaño efectivo del electrodo, hasta que los gradientes sean reducidos a valores que el material del suelo pueda resistir. Esta condición es ilustrada por la presencia de boquetes en la fig. # 2. Ya que el sistema de puesta a tierra normalmente es diseñado para cumplir con criterios rigurosos mas lejos de los límites de voltaje de paso y toque, el gradiente puede siempre ser asumido menor que el rango crítico.

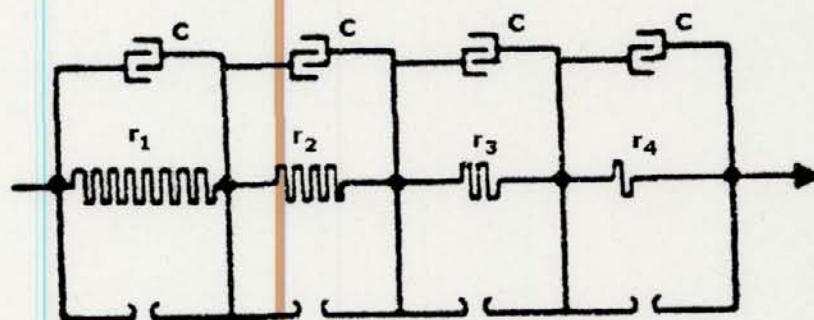


Figura #2
Modelo del suelo

2.2.2.3 - EFECTOS DE LA MAGNITUD DE CORRIENTE

La resistividad del suelo en la vecindad de los electrodos de tierra puede ser afectada por la circulación de corriente desde el interior de los electrodos hacia el suelo cercano. Las características térmicas y el contenido de humedad del suelo determinarán si una corriente de una magnitud y duración dada causará un secamiento importante y de este modo incrementa la efectividad de la resistividad del suelo. Un valor conservador de densidad de corriente, es dado por Armstrong [2], no excede de 200 A/m^2 por 1 s.

2.2.2.4 - EFECTOS DEL CONTENIDO QUÍMICO TEMPERATURA Y HUMEDAD

La conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica. Por esta razón la resistividad de la mayoría de los suelos se eleva abruptamente siempre que el calculo de contenido de humedad sea menor que 15% de la pesadez del suelo. La cantidad de agua depende del tamaño del grano, compactación, y variabilidad de los tamaños de los granos. Mientras que como se muestra en la Fig # 3, curva # 2, la resistividad es poco afectada una vez que el contenido de humedad excede el 22%.

El efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo es casi insignificante para temperaturas por encima del punto de congelamiento. A 0° C , el agua en el suelo se estremece de frío y la resistividad incrementa rápidamente. La curva # 3 muestra la variación típica para un suelo de arcilla conteniendo 15.2% de humedad por peso.[35].

La composición y la cantidad de sales solubles, ácidas, o alcalinas presentes en el suelo puede considerablemente afectar esta resistividad. La curva # 1 de la Fig. # 3 ilustra un típico efecto de las sales (cloruro de sodio) sobre la resistividad de un suelo conteniendo 30% de humedad por peso [58].

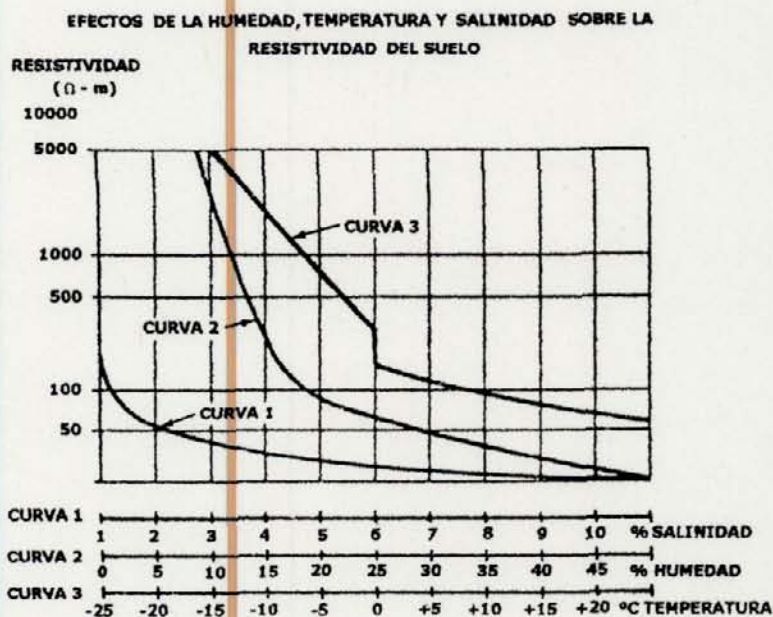


Figura # 3

Efectos de la Humedad, Temperatura y la Salinidad
en la Resistividad del Suelo

2.2.2.5 - USO DE CAPA DE PIEDRA PICADA

Proteger con piedra o roca picada, formando una capa que puede tener de 0.08-0.15 m de espesor, es muy útil ya que retarda la evaporación de la humedad y de este modo limita el secado de las capas de la superficie del suelo durante prolongados periodos de tiempo secos. También, protegiendo la superficie con un material de alta resistividad se obtiene un efecto muy valioso ya que reduce el shock de corrientes. Pero no siempre se le da a la capa de piedras picadas, que reduce el shock de corrientes, la importancia que merece. Pruebas hechas por Bodier en una estación en Francia muestra que la capa de piedras de río usada como aislamiento humedecido ha tenido una resistividad de 5.000 $\Omega \cdot m$. En una capa de 0.106-0.15 m de espesor decreció el factor peligro (proporción del cuerpo a la corriente del circuito de shock) a una proporción de 10:1,

comparado con la tierra natural humedecida. En las pruebas hechas por Langer en Alemania comparó corrientes en cuerpos cuando tocan un hidrante durante un momento parado sobre piedras rústicas húmedas de $6.000 \Omega\text{-m}$ de resistividad, con corrientes en cuerpos momentáneamente ubicados sobre tierras secas. La corriente en el caso de tierras áridas fue del orden de 20 veces el valor de las piedras rústicas húmedas. Pruebas reportadas por Elek proporcionan mas confirmaciones de sus beneficios [6], [27], [40].

El rango de valores de resistividad para una capa de piedra picada depende de muchos factores, algunos de los cuales son: tamaño, condición de la piedra, cantidad y tipo de contenido de humedad, contaminación atmosférica, etc. La tabla # 2 indica que la resistividad del agua con la cual la roca es humedecida ha tenido influencia sobre la medición de la resistividad de la capa de piedra picada. Luego, la piedra picada sometida a un rociado de agua salada puede tener sustancialmente más baja resistividad que la piedra picada utilizada en un medio ambiente árido. Históricamente, un valor de $3000 \Omega\text{-m}$ ha sido usado para la resistividad de la piedra picada húmeda. Mientras, como se indica en la tabla # 2, condiciones locales, tamaño y tipo de piedra, etc., puede dictaminar el uso de un valor mayor o menor de resistividad. Luego, es importante que la resistividad de las piedras que existen en el área dada sea medida.

La tabla # 2 da los valores de resistividades típicas para diferentes tipos de mediciones de piedras picadas por dos partes diferentes en diferentes regiones del campo. Estos valores no son validos para todos los tipos y tamaños de piedras en cualquier región dada. Como se precisa arriba, las pruebas serían ejecutadas para determinar la resistividad de la piedra típicamente utilizadas.

2.2.3 - MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

2.2.3.1 – MÉTODOS DE MEDICIÓN

A continuación se describirán los métodos de medición más comúnmente empleados:

2.2.3.1.1 - MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS

Este utiliza dos electrodos pequeños tal como se ilustra en la figura 4.

Tabla # 2
Resistividades Típicas de la capa de Piedra

Descripción de muestras de rocas	Muestras de resistividades		
	Aridas	Tierra humedecida con agua	Humedecida con agua salada
Sendero de granito picado	$141.8 \cdot 10^6$	1318.7	705.0
Granito limpio # 57	$192.5 \cdot 10^6$	8106.8	2166.5
Piedra caliza limpia	$7.3 \cdot 10^6$	2094.8	1274.8
	$68.5 \cdot 10^6$	2912.4	1470.8
Grava (tipo y tamaño desconocido)	$1.22 \cdot 10^6$	8534.4	24.4
Roca picada (tipo y tamaño desconocido)	$18.3 \cdot 10^6$	4267.2	121.9

El terminal positivo de la batería es conectado a través de un miliamperímetro al electrodo más pequeño y el terminal negativo al otro electrodo. El instrumento puede ser calibrado para leer ohm-cm para el voltaje nominal de la batería. [29].

Con este método se obtienen mediciones aproximadas para pequeños volúmenes de suelo.

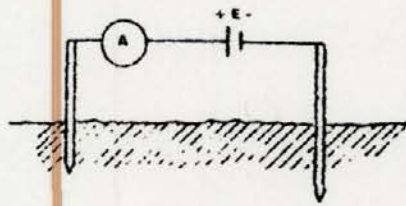


Figura # 4
Método de Los Dos Puntos

2.2.3.1.2 - MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS

Este consiste en la aplicación del método de caída de tensión para la determinación de la resistencia de puesta a tierra, de un electrodo de dimensiones conocidas colocado a diferentes profundidades conectado a dos electrodos adicionales que actúan como electrodo de tensión y de corriente (Figura 5).

La resistividad equivalente del terreno es calculada despejando el valor de la misma de la ecuación (2), que nos da a conocer el valor de la resistencia de puesta a tierra de una varilla metálica, suponiendo suelo homogéneo: [29].

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * L} * \ln \frac{2 * L}{a} \Rightarrow \rho = \frac{2 * \pi * RL}{\ln \frac{2 * L}{a}} \quad (2)$$

donde:

L = Longitud de la barra.

a: Radio de la barra.

R = Resistencia de puesta a tierra de la barra.

ρ = Resistividad del terreno.

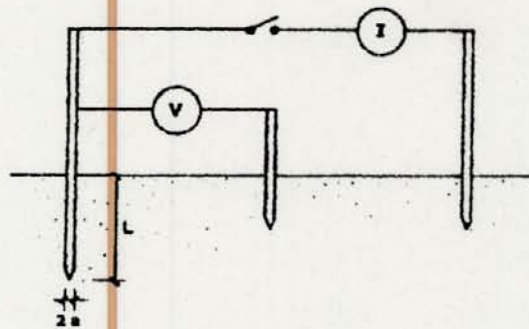


Figura #5
Método de los tres puntos

2.2.3.1.3 - MÉTODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS.

Este consiste en inyectar corriente a través de dos electrodos externos y medir la tensión entre los otros dos, tal como se muestra en la figura 6.

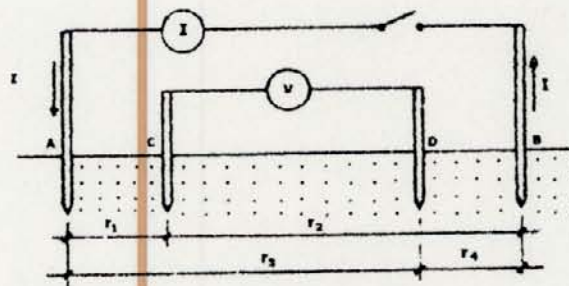


Figura #6
Método de los cuatro electrodos

Entre los electrodos A y B se inyecta una corriente I y entre C y D se mide la diferencia de potencial. Si la profundidad a la que están enterrados los electrodos es pequeña en comparación a la distancia entre ellos, puede suponerse una distribución radial de corriente y electrodos puntuales, además si suponemos homogeneidad del terreno se puede obtener que la resistividad vale:

$$\rho = \frac{2 * \pi * V}{I} * \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) * \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)} \quad (3)$$

En el caso de terrenos no homogéneos el valor de ρ es ficticio y no corresponde, en general, a ninguna de las resistividades presentes en el terreno.

Entonces para determinar la constitución del terreno investigado es necesario tener diferentes separaciones entre electrodos. Se han desarrollado varios métodos variando la configuración de los electrodos para lograr la medición en terrenos no homogéneos, siendo los más utilizados los siguientes:[29].

- CONFIGURACIÓN WENNER

En esta configuración los electrodos se ubican sobre una línea recta y la separación entre los electrodos sucesivos es siempre igual (figura # 7)[29].

En este caso

$$r_1 = r_4 = A$$

$$r_2 = r_3 = 2A$$

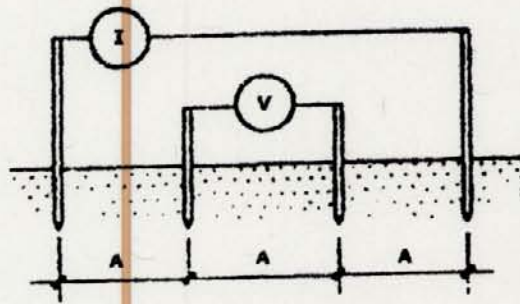


Figura # 7
Configuración Wenner

Por lo tanto la ecuación # 3 se reduce a:

$$\rho_a = 2 * \pi * \frac{V}{I} * A \quad (4)$$

- CONFIGURACIÓN SCHLUMBERGER

En esta configuración los electrodos se ubican en línea recta simétricamente con respecto a un centro de medición elegido (Figura # 8). Los electrodos de potencial permanecen fijos con una distancia de uno a tres metros trasladándose solo los de corriente, en este caso:

$$\begin{aligned} r_1 &= r_4 = na \\ r_2 &= r_3 = (n+1) * a \end{aligned}$$

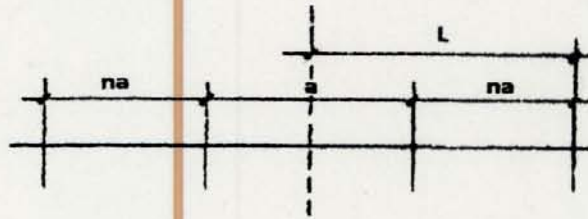


Figura #8
Configuración Schlumberger

Por lo tanto la ecuación (3) se reduce a:

$$\rho_a = \pi * \frac{V}{I} * n * (n+1) * a \quad (5)$$

En esta configuración se toma generalmente $a = 1\text{m}$, siempre y cuando el valor del voltaje sea lo suficientemente grande para no producir errores en la medición.[29].

2.2.3.2 - MÉTODO RECOMENDADO PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD.

El método de medición a utilizar será preferiblemente el de los cuatro puntos (Configuración WENNER), por las siguientes razones:

- Da resultados bastantes precisos.
- Permite visualizar fácilmente la tendencia de la medición.
- Utiliza instrumentos de menor sensibilidad que otras configuraciones, ya que a medida que se alejan los electrodos de corriente también se alejan los de tensión.

Es el método más utilizado en el mundo, 84 por ciento de un total de cuarenta y siete compañías encuestadas por IEEE.[29].

Utilizando las mediciones proporcionadas por este método, como son las distancias de medida y sus respectivas resistencias, en conjunto con la aplicación del método de paso descendente para minimizar la función error, se desarrollo el programa que proporciona las resistividades de la primera y segunda capa y el ancho de la primera capa. (Esta metodología esta explicada en el Apéndice B).

2.2.4 - METODOS PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE TIERRA

2.2.4.1 – GENERAL

En esta sección el valor ohmico es llamado “resistencia”, sin embargo debe recordarse que esta posee una componente reactiva que debe tenerse en cuenta cuando el valor ohmico de la tierra en estudio o sometida a pruebas es inferior a medio ohmio.

2.2.4.2 - MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS

En este método la resistencia total de la tierra incógnita y una tierra auxiliar es medida. La resistencia de la tierra auxiliar se presume insignificante en comparación con la resistencia de la tierra incógnita, y el valor medido en ohm es llamado resistencia de la tierra incógnita.

La aplicación usual de este método es determinar la resistencia de una simple varilla acondicionada a la tierra cerca de una residencia que además tiene un sistema suplidor de agua municipal que usa tubos de metal en las afueras de las coyunturas de los aislantes, el tubo de agua en la tierra se asume que esta en el orden de un ohm y podría ser bajo en relación al máximo valor permisible en la tierra el cual usualmente esta en el orden de 25 ohm.

2.2.4.3 - MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS

Este método involucra el uso de dos tierras auxiliares, con las resistencias de la tierra auxiliar distinguidas como “ r_2 ” y “ r_3 ” y con la tierra a ser medida designada como “ r_1 ”. La resistencia entre cada par de tierras es medida y designado como “ r_{12} ”, “ r_{13} ” y “ r_{23} ”, donde $r_{12} = r_1 + r_2$ etc. Solucionando las ecuaciones simultáneas, se obtiene lo siguiente:

$$r_1 = \frac{r_{12} - r_{23} + r_{13}}{2} \quad (6)$$

Por lo tanto midiendo las resistencias de cada par de electrodos de tierra en series y sustituyendo los valores de las resistencias en la ecuación, se puede obtener el valor de r_1 . Si las dos tierras auxiliares son materialmente de resistencias más altas que la tierra bajo prueba, los errores en las mediciones individuales podrían ser grandemente magnificados en el resultado final. Para realizar la medición es necesario que los electrodos estén distanciados mutuamente; de otra manera es posible obtener cálculos absurdos, tales como resistencias iguales a cero o negativas. Para medir tierras de manejo sencillo (pequeñas) la distancia de separación entre los tres electrodos de tierra debe ser como mínimo de 4.57 m (15 pies), con un espacio preferible de 7.62 m (25 pies) o más. Para áreas de tierras grandes (amplias), las cuales son presumiblemente de resistencias mas bajas, se requieren como mínimo espaciamientos en el orden de las dimensiones del campo de tierra. Este método puede llegar a ser un poco eficiente para grandes estaciones de tierras, y algunos métodos como el de falla o caída de potencial son preferidos.[34].

2.2.4.4 - MÉTODO DE CAIDA DE POTENCIAL.

Este método tiene diversas variaciones y es aplicable a todo tipo de mediciones de resistencia de tierra. Como mencionamos en 2.2.4.1 la “resistencia” de una gran extensión de terreno posee una componente reactiva apreciable que debe ser tomada en cuenta cuando el valor

de la resistencia sea menor de 0.5Ω ; por lo tanto el valor medido es una "impedancia" en ohm y debe ser considerada como tal. Aunque la terminología general usada es resistencia de tierra.

Este método implica pasar una corriente dentro de la tierra que va a ser analizada y observar la influencia de esta corriente en términos del voltaje entre la tierra bajo prueba y un electrodo de "potencial" auxiliar. Ver figura # 9 [34].

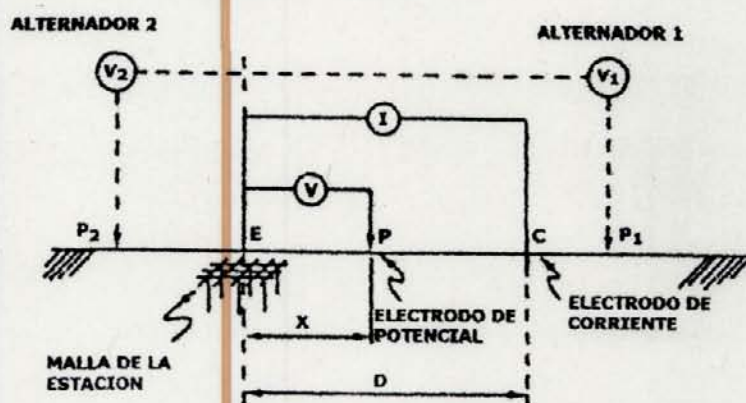


Figura # 9a Método de caída de potencial

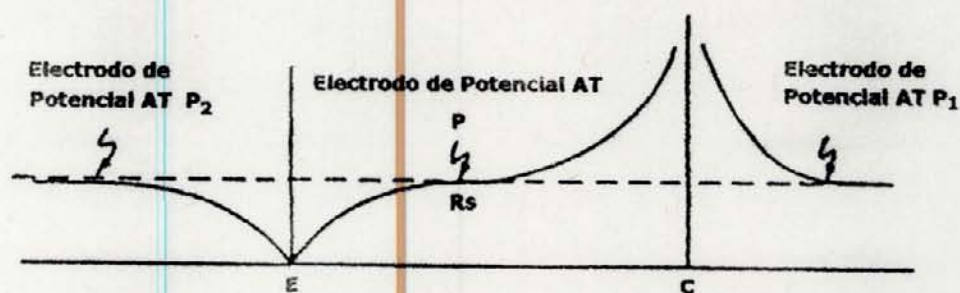


Figura # 9b. Potencial en la superficie vs. Espaciamiento X

Un electrodo de "corriente" auxiliar es usado para permitir pasar una corriente dentro de la tierra en estudio. Este electrodo de corriente podría estar efectivamente fuera de la "influencia" de dicha tierra. Esta influencia en algún tiempo fue llamada "extensión" de estación de tierra y puede ser considerada como la distancia más lejana, la cual tiene un efecto insignificante sobre la medida que surge del voltaje de tierra causado por la corriente de tierra. Teóricamente la influencia se extiende hasta el infinito; pero prácticamente este tiene un límite, porque la influencia varía inversamente con la distancia desde la tierra que va a ser medida. Esta influencia es determinada y conocida durante la prueba sobre las mallas de tierra o varillas de tierra colocadas profundamente de un ohm o menos. En el caso de tierras de áreas pequeñas o manejadas con simples varillas, se asume que la influencia es insignificante a 30.5 m (100 pies), y el electrodo de potencial es ubicado en el punto medio entre el electrodo de corriente y la tierra bajo prueba.

En una prueba para áreas grandes, tierras de baja impedancia, el electrodo de potencial es movido fuera de la tierra bajo prueba en pasos. Un valor de impedancia es obtenido para cada paso. Esta impedancia es graficada como una función de la distancia, y el valor en ohm en la cual esta curva graficada aparece nivelada se toma como el valor de la impedancia de la tierra bajo prueba.

Una curva representativa para una baja impedancia de tierra es mostrada como Curva A en la Figura #10. Los datos de esta figura fueron tomados de una prueba hecha sobre una estación que tiene una malla de tierra de aproximadamente 122 por 146 m (400 por 480 pies) (17.812 m^2). Estas distancias fueron medidas desde la cerca de la estación; por esto la impedancia no es cero en la distancia cero de la curva.

En la Curva A, Figura #10, la distancia fuera de la cual la impedancia graficada aparece nivelada es sobre los 183m (600 pies); esta distancia de 183 m podría terminar la influencia de esta tierra en particular.

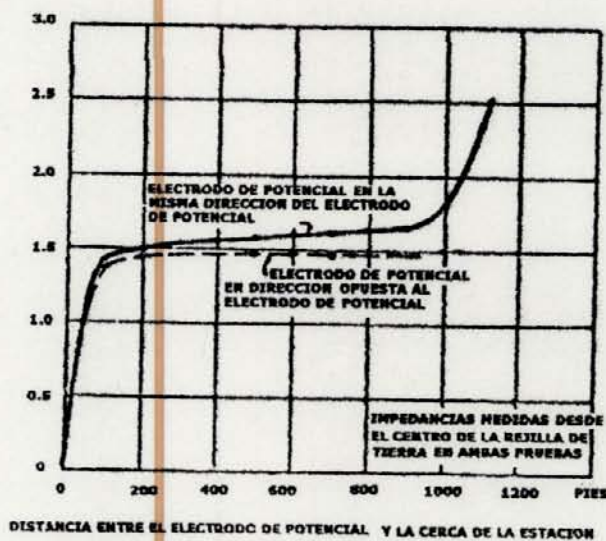


Figura # 10

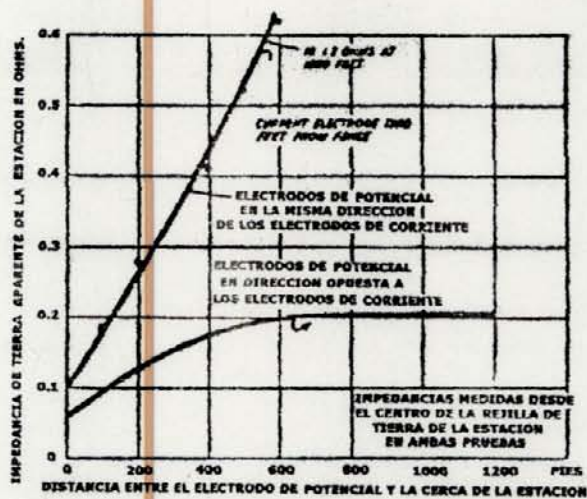


Figura # 11

Si esto es basado en pruebas donde el electrodo de corriente esta dentro de la influencia de la tierra estación, el electrodo de corriente puede ser movido mas lejos de la tierra bajo prueba, por otra parte el valor indicado de impedancia de la tierra bajo prueba podría ser bajo como la Curva A de la figura #10.

Curvas para una impedancia de tierra alta son mostradas en la figura #11. Estas no son preferiblemente empleadas para electrodos, en este caso, como puede verse en los valores indicados. Sin embargo los efectos de acoplamiento son una parte muy pequeña del valor total en ohm, la práctica más empleada para los electrodos podría ser elegida, usualmente con los electrodos de prueba en la misma dirección física.

2.2.4.5.- METODO DE INYECCIÓN DE BAJAS CORRIENTES [29]

En este método se inyectan corrientes que van desde los pocos miliamperios, hasta los cientos de miliamperios, dependiendo del tipo de instrumento utilizado. Se recomienda la utilización de inyección de corrientes bajas en las mediciones de resistencias de tierra de mallas de subestaciones construidas en el área urbana, a fin de evitar posibles potenciales transferidos peligrosos para las personas cercanas al área de la subestación.

2.2.4.5.1.- DESCRIPCIÓN DEL METODO DE INYECCIÓN DE BAJA CORRIENTE

La instrumentación que se requiere para realizar esta medida se muestra en la figura 12

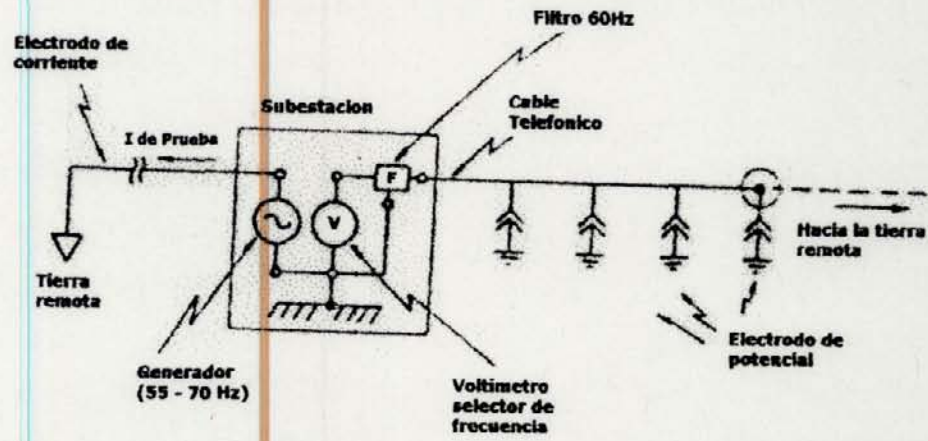


Figura #12

Instrumentación para medición con bajas corrientes

- Como fuente de corriente se utilizará un generador de frecuencia variable entre 55 y 70 Hz de una potencia de salida de al menos 100 Watt.
- El amperímetro y el milivoltímetro deben ser de sintonización variable en el rango de las frecuencias de salida del generador, a fin de que solo respondan a la corriente inyectada.
- Para determinar la frecuencia de trabajo se conecta el voltímetro al electrodo de potencial, sin el generador conectado. Barriendo lentamente la frecuencia de sintonización se obtendrá un nivel mínimo de interferencia para una cierta frecuencia, a la que se ajustará el generador.

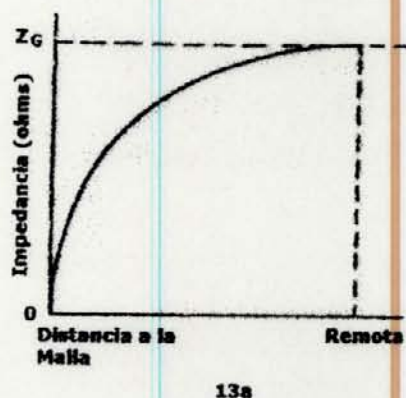
- Se coloca el electrodo de corriente a una distancia de al menos 20 veces el diámetro equivalente del área de la subestación, para estar seguro que la conexión está en la tierra remota. Sin embargo, en muchas ocasiones el área de influencia de la malla, puede ser muy grande por los efectos de elementos metálicos enterrados y la conexión de los cables de guarda de las Líneas, por tanto, se recomienda realizar una medida de resistencia colocando un segundo electrodo a una distancia mayor y si los valores no varían ostensiblemente las mediciones realizadas son correctas, en caso contrario se aumenta la distancia del electrodo de corriente, repitiéndose el procedimiento.
- Se comienzan las medidas colocando el electrodo de potencial fuera de la cerca de la subestación y gradualmente se aleja. En cada caso, se tomarán medidas de V e I, tratando de mantener la corriente en valores cercanos a 0.5 amp. Se debe graficar inmediatamente una curva de $Z_g = V/I$ vs distancia del electrodo de potencial. Las lecturas se continuaran hasta que la curva sea asintótica a un valor, el cual será el valor verdadero de la puesta a tierra de la malla (Figura # 13 a).
- La elevación del potencial de tierra EPT es el producto de la Z_g por la corriente de falla total, un perfil del EPT puede construirse mediante el perfil de impedancia, graficando los puntos

$$EPT_x = I_{f \text{ total}} * Z_x$$

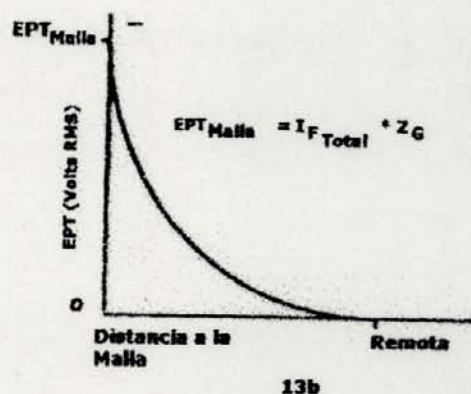
Donde:

EPT_x es el EPT desde el punto x hasta la tierra remota y

Z_x es el valor obtenido de la gráfica de la figura # 13b.



13a



13b

Figura #13

- a) Perfil de la resistencia de puesta a tierra
b) Perfil de EPT de la malla

2.2.4.5.2.- LIMITACIONES:

La principal limitación de este método la constituye el hecho de tener que alejar los electrodos a distancias muy grandes, por lo tanto es de fácil aplicación en aquellas subestaciones que no posean pares telefónicos disponibles.

Otra limitación es la impuesta por la potencia de salida del generador y la impedancia propia del voltímetro que restringen los valores de impedancia máxima de las sondas de corriente y tensión.

2.2.4.6.- METODO DE INYECCIÓN DE ALTAS CORRIENTES:[29]

En este método se inyectarán corrientes del orden de decenas de amperes. La inyección de altas corrientes se recomienda para la medición de resistencia de puesta a tierra de subestaciones ubicadas fuera de áreas urbanas donde existen probabilidades menores de que potenciales transferidos afecten personas o equipos en áreas vecinas. Es prácticamente el único método que puede utilizarse en grandes subestaciones que no tengan en sus vecindades hilos telefónicos, ya que se utilizan subestaciones remotas como electrodos auxiliares de corriente conectadas mediante las líneas de Transmisión (figura #14).

Este método nos puede proporcionar de manera directa los potenciales de paso, toque y transferidos en el área de interés, así como también el porcentaje de corriente de falla que realmente circula en la malla y el valor propio de la resistencia de la malla que no es obtenido en los métodos de bajas corrientes debido a que con éstos se determina la impedancia Thévenin equivalente del sistema de puesta a tierra.

2.2.4.6.1.- DESCRIPCIÓN DEL METODO DE INYECCIÓN DE ALTAS CORRIENTES:

- Como fuente de corriente se utilizará preferiblemente el lado de baja de un transformador monofásico de distribución. En serie con este se puede colocar un condensador cuyo valor se calcula para estar en resonancia con la parte reactiva de la Línea, adicionalmente este condensador filtra la componente continua del sistema la cual puede causar saturación del transformador.
- El amperímetro y el voltímetro a utilizar deben estar sintonizados a la frecuencia de 60 Hz y proporcionar lecturas directas en valores RMS.

- Como electrodo de corriente se utilizará la malla de tierra de una subestación remota y la sonda de corriente serán las tres (3) fases colocadas en paralelo de la Línea que interconecte las subestaciones (figura #14).
- El electrodo de tensión se ubicará a una distancia mínima de 12 veces el radio equivalente del área de la subestación y luego se harán 2 ó 3 medidas adicionales a distancias mayores para comprobar la estabilización de los valores obtenidos.
- Para eliminar la interferencia que pueda tenerse por la presencia de campos magnéticos actúan sobre las sondas de tensión y corriente inicial I_0 y la tensión inicial V_0 sin conectar la fuente de alimentación. Luego se realizan dos medidas de voltaje y corriente, conectando la fuente con polaridades que se invierten en cada ocasión (figura #14). La corriente y el voltaje de la malla de tierra se obtienen a través de las ecuaciones (7) y (8):

$$I_m = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2}{2} - I_0^2} \quad (7)$$

$$V_m = \sqrt{\frac{V_a^2 + V_b^2}{2} - V_0^2} \quad (8)$$

Entonces:

$$Req = \frac{V_m}{I_m} \quad (9)$$

- El ángulo de la impedancia de puesta a tierra puede determinarse directamente, mediante la medición del defasaje entre V_m e I_m .

- Si se desea conocer realmente el porcentaje de corriente realmente dispersa en la malla se deben medir las corrientes en los cables de guarda de todas las líneas conectadas a la subestación.

Entonces:

$$I_{Malla} = I_m - \sum_1^n I_{cable\ guarda} \quad (10)$$

Por lo tanto:

$$R_{Malla} = \frac{V_m}{I_{Malla}} \quad (11)$$

Este valor debe ser muy cercano al calculado durante el diseño de la malla de tierra.

- Si se desean efectuar las mediciones de potenciales de paso y toque, al mismo tiempo que se realizan la medición de la resistencia se deben efectuar medidas como las indicadas en la figura #15. Siendo los electrodos auxiliares de tensión placas de cobre con el peso equivalente de un operador sobre ellas. Las mediciones deben ser efectuadas utilizando la resistencia R_c , la cual simula la resistencia del cuerpo humano, en caso de realizarse sin R_c se estarán midiendo la caída total entre la resistencia de contacto y el cuerpo humano.

Para determinar los valores reales de potenciales de toque y paso se multiplica los valores obtenidos por la razón entre: I_{fmax}/I_m .

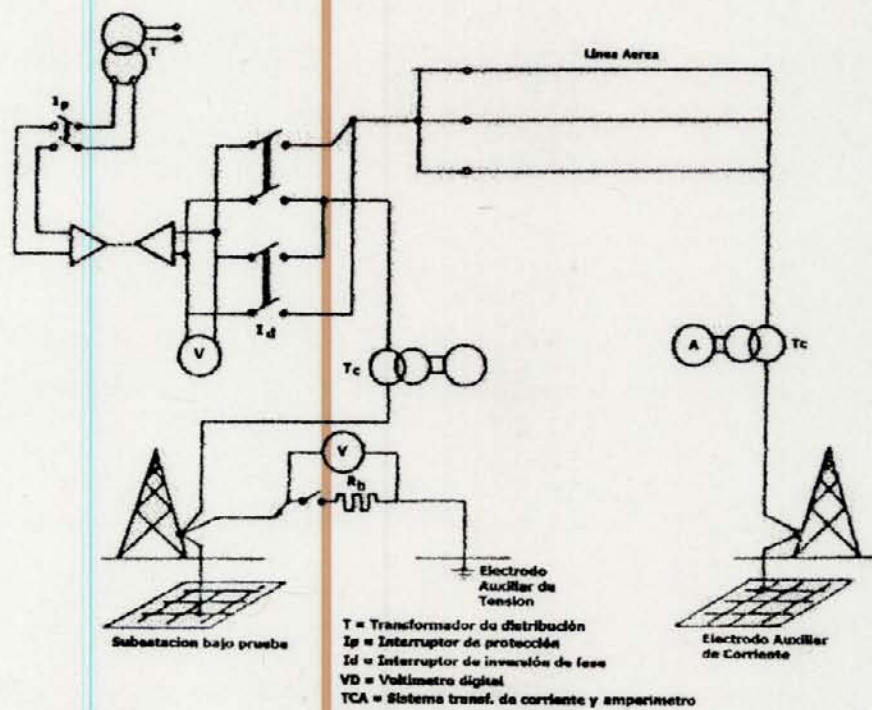


FIGURA # 14
METODO DE INYECCION DE ALTAS CORRIENTES

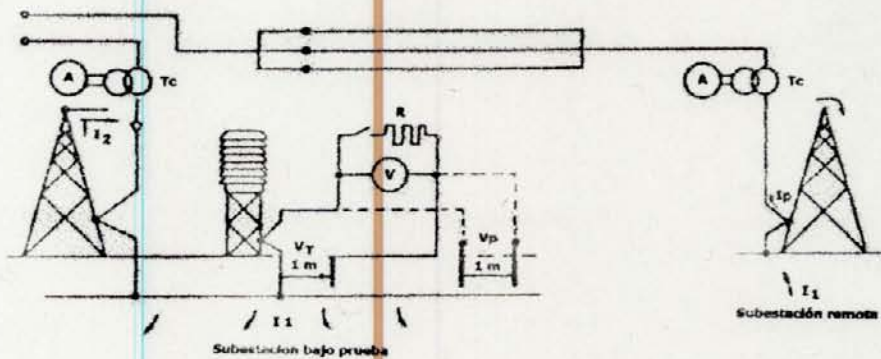


FIGURA # 15
MEDICION DE POTENCIAL DE PASO Y TOQUE

2.2.4.6.2.- LIMITACIONES

Para la utilización de este método es necesario tener fuera de servicio una línea entre las subestaciones.

En algunos casos se necesitan sondas de tensión de muy larga longitud, por lo tanto sería aconsejable utilizar pares telefónicos existentes que no estuviesen influenciados por el circuito de corriente.

2.3 – CORRIENTES Y VOLTAJES PERMITIDOS

2.3.1- CORRIENTE ELECTRICA A TRAVES DEL CUERPO HUMANO

2.3.1.1 - EFECTOS SOBRE EL CUERPO HUMANO[12].

Básicamente las situaciones que provocan la circulación de corriente eléctrica por el cuerpo humano son:

- Un shock eléctrico propiamente dicho, definido como una sensación desagradable de acción temporal que ocurre cuando una corriente sobrepasa el límite de percepción.
- Pérdida del control muscular, que ocurre cuando una corriente es tal que una persona sujeta a un electrodo energizado no consigue soltarlo espontáneamente.
- Pérdida de la respiración, puede ser consecuencia tanto de una contracción prolongada de los músculos respiratorios como por efectos de la corriente sobre el centro de control de la respiración en el cerebro.
- Interrupción de la circulación sanguínea, en general originada por la fibrilación del corazón, que es la causa mas frecuente de muerte de las víctimas de accidentes eléctricos.
- Producción de quemaduras, que ocurre cuando un accidente envuelve tensiones elevadas.

2.3.1.2 - RANGO DE CORRIENTE TOLERABLE

Los efectos de una corriente eléctrica que pasa a través de partes vitales de un cuerpo humano dependen de la duración, magnitud, y frecuencia de esa corriente. La consecuencia más peligrosa de tal exposición es una condición del corazón conocida como fibrilación ventricular, resultando en la inmediata detención de la circulación de la sangre.[35].

2.3.1.2.1 - EFECTOS DE LA FRECUENCIA

Los humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica a frecuencias de 50 o 60 Hz. , corrientes de aproximadamente 0.1 A pueden ser letales. Algunos autores generalmente concuerdan en que el cuerpo humano puede tolerar una corriente ligeramente elevada a 25 Hz y aproximadamente una corriente directa cinco veces una más alta. A frecuencias de 3000-10.000 Hz, igualmente se pueden tolerar elevadas corrientes [21],[23]. En algunos casos, el cuerpo humano es capaz de tolerar corrientes muy elevadas, como son las originadas por descargas atmosféricas.

2.3.1.2.2 - EFECTOS DE LA MAGNITUD Y DURACIÓN

El más común de los efectos fisiológicos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo, en orden de crecimiento de la magnitud de la corriente, son percepción, contracción muscular, inconsciencia, fibrilación del corazón, bloqueo de los nervios respiratorios y quemaduras [30].

La corriente de 1 mA es generalmente reconocida como el umbral de percepción, esto es, la magnitud de corriente en la cual una persona es capaz de detectar una ligera sensación de picazón en sus manos o en la punta de los dedos causado por la corriente transitoria [15].

Corrientes de 1 a 6 mA, muchas veces llamadas corrientes let-go, aunque desagradables, generalmente no disminuyen la habilidad de una persona que toca un objeto energizado, de controlar sus músculos y soltarlo. Los experimentos clásicos de Dalziel con 28 mujeres y 134 hombres provee de datos indicando que un promedio de corriente let-go de 10.5 mA para mujeres y 16 mA para hombres, y 6 mA y 9 mA como el respectivo valor umbral [22].

En un rango de 9 a 25 mA, las corrientes pueden ser dolorosas y puede hacerse difícil o imposible soltarse de los objetos energizados empuñados por la mano. Al aplacarse las altas corrientes, contracciones musculares podrían hacer difícil la respiración. Semejantes a los casos de inhibición respiratoria de las grandes corrientes mencionadas mas adelante, esos efectos no son permanentes y desaparecen con la interrupción de la corriente, a menos que la contracción sea muy severa y la respiración es detenida, no por segundos, sino por minutos. Sin embargo algunos casos frecuentemente responden a la resucitación. [18].

No son útiles magnitudes de corriente en el rango de los 60 a 100 mA, estas pueden llegar a la fibrilación ventricular, deteniendo el corazón, o inhibiendo la respiración causando un gran daño o la muerte. Una persona entrenada en resucitación cardiopulmonar podría administrarla hasta que la víctima pueda ser tratada por un médico especializado [20].

Por lo tanto, se recalca la importancia del umbral de fibrilación. Si la corriente de shock puede ser mantenida en valores bajos estos pueden ser cuidadosamente diseñados en un sistema de puesta a tierra, evitando de esta manera daños o la muerte.

En muestras de Dalziel y otros autores [19], [22], la corriente que no produce fibrilación, de magnitud I_B cuya duración fluctúa desde los 0.03 - 3.0 s, es relacionada con la energía absorbida por el cuerpo como se describe en la siguiente ecuación:

$$S_B = I_B^2 * t_s \quad (12)$$

donde:

I_B : Magnitud de corriente rms a través del cuerpo.

t_s : Duración de la exposición de la corriente en segundos.

S_B : Constante empírica que relaciona el shock eléctrico de energía tolerada por un cierto por ciento de una población dada.

2.3.1.2.3 - IMPORTANCIA DEL DESPEJE DE LA FALLA A ALTA VELOCIDAD

Considerando la importancia de la duración de la falla tanto en los términos de la ecuación (12) e implícitamente como un factor de exposición accidental, el despeje a alta velocidad de las fallas a tierra es ventajoso por dos razones:

1- La probabilidad de un shock eléctrico es grandemente reducido, por el rápido tiempo de despeje de la falla, en contraste a situaciones en las cuales las corrientes de falla podrían persistir por varios minutos o posiblemente horas.

2- Tanto pruebas como experiencias muestran que el riesgo de severos daños o la muerte es grandemente reducido si la duración de un flujo de corriente a través del cuerpo es muy breve; el valor de corriente permitido puede por lo tanto estar basado en el tiempo de despeje del mecanismo de protección del primario, o de la protección back-up.

Si los aspectos probabilísticos no son tomados en cuenta, la selección del tiempo de despeje del relé back-up es desde luego mas conservadora esto asegura mayores márgenes de seguridad con respecto a la ecuación (12).

Una alternativa adicional es usar tiempos de suicheo menores de 0.5 s, valor obtenido de una investigación hecha por Biegelmeier y Lee [5]. Sus investigaciones proporcionaron evidencias de que un corazón humano puede llegar a ser crecientemente susceptible a la fibrilación ventricular cuando el tiempo de exposición a la corriente es aproximado al periodo del latido del corazón, pero el peligro es mucho menor sí el tiempo de exposición a la corriente esta en la región de 0.06-0.3 s.

2.3.2 - LIMITES DE CORRIENTE PERMISIBLES EN EL CUERPO

La magnitud y duración de la corriente conducida a través del cuerpo humano a 50 ó 60 Hz, han de ser inferiores a las que causan fibrilación ventricular.

2.3.2.1 - DURACIÓN

La duración para la cual una corriente a 50 ó 60 Hz puede ser tolerada por la mayoría de las personas esta relacionada por la ecuación (12). Basándose en los resultados de los estudios de Dalziel, se puede asumir que el 99.5% de las personas pueden seguramente resistir sin fibrilación ventricular, una corriente pasajera en magnitud y duración determinada por la siguiente formula:

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_s}} \quad (13)$$

donde, en adición a los términos previamente definidos por la ecuación (12).

$$K = \sqrt{S_B} \quad (14)$$

Dalziel fundamenta que este shock de energía puede ser soportado por 99.5 por ciento de las personas cuyo peso es de aproximadamente 50 Kg (110 lbs), esto resulta en un valor de S_B de

0.0135. Entonces, $K_{50} = 0.116$ y la formula para la corriente admisible en el cuerpo se convierte en:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un cuerpo con un peso de 50 Kg.} \quad (15)$$

Note que la ecuación de arriba resulta en valores de 116 mA para 1 s y 367 mA para 0.1 s.

Pues la ecuación (13) esta basada en límites de pruebas de un rango de 0.03 - 3.0 s, esto obviamente no es válido para tiempos muy cortos o largos, y algunos valores de corriente pueden ser tolerados indefinidamente. [14], [17].

En una perspectiva de los 40 años de investigaciones de I_B , en 1936 Ferris et al., [28] sugirió 100 mA como el umbral de fibrilación si la duración del encuentro no es especificada. El valor de 100 mA se derivó de extensivas experiencias en la Universidad de Columbia, en animales con cuerpos y corazones de pesos comparables al hombre, para un máximo de duración del shock de 3 s. Algunos de los más recientes experimentos sugieren la existencia de dos distintos umbrales: Uno donde el tiempo de exposición es mas corto que un período del latido del corazón y otro donde la exposición a la corriente es mas larga que un latido del corazón. Para un adulto de 50 Kg (110 lbs), Biegelmeier propuso los valores umbrales en 500 y 50 mA, respectivamente [3], [4]. Otros trabajos más recientes sobre este tema fueron sugeridos por Lee y Kouwenhoven [20], [39], [42].

2.3.2.2 - SUPOSICIONES ALTERNATIVAS

La corriente de fibrilación es actualmente una función del peso del cuerpo del individuo, como se ilustra en la fig. 16. Este muestra la relación entre la corriente crítica y el peso del

cuerpo para diversas especies de animales (terneros, perros, ovejas, cerdos) y un 0.5 por ciento de los mamíferos tienen una región umbral común.

En la edición de 1961 de la IEEE Guide For Safety In AC Substation Grounding, las constantes S_B y K de la ecuación (12) y (13), se daban como 0.0272 y 0.165, respectivamente, se había asumido válido para 99.5 por ciento de todos los hombres con un peso de aproximadamente 70.3 Kg (155 lbs). Los estudios de Dalziel (en 1968), sobre los cuales está basada la ecuación (13), conducen a los valores alternativos de $K=0.157$ y $S_B=0.0246$ como estados aplicables a personas con un peso de 70 Kg (155 lbs) [16], [17]. Entonces:

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para 70 Kg de peso en el cuerpo (16)}$$

El máximo para 3 s de corriente sin fibrilación es de 91 mA para la base de 70 Kg es, no obstante, inferior del umbral de fibrilación de 107 mA a 50 Kg (110 lbs), como se muestra en la figura #16.

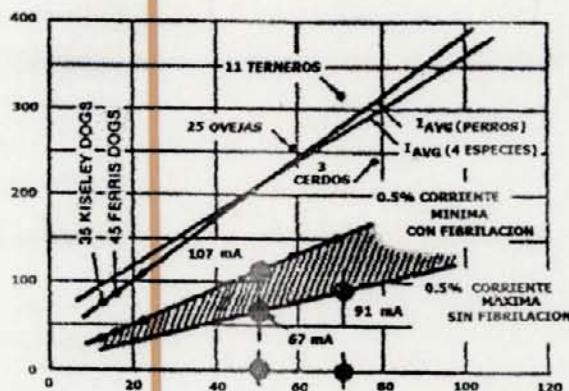


Figura # 16

Corriente de Fibrilación Vs. Peso del Cuerpo

Para Algunos Animales, Basados en un Shock de 3 seg.

La ecuación (13) indica que muchas corrientes altas, pueden ser eliminadas donde existan mecanismos de protección de operación rápida diseñados para limitar la duración de la falla. Un juicio decidido es necesario para así usar el tiempo de despeje de los reles de relativas altas velocidades, o los de protección back-up, como la base para los cálculos.

2.3.2.3 - REENGANCHE

Reenganchar después de una falla a tierra es común en prácticas operaciones modernas. En tales circunstancias una persona pudiera estar sujeta al primer shock, el cual pudiera no causar daño permanente en él, pero podría trastornarlo y perturbarlo temporalmente. Además un solo reenganche automático veloz podría resultar en un segundo shock, iniciado dentro de un tiempo menor a los 0.5 s de haber comenzado el primero. Este es el segundo shock, ocurriendo después de un intervalo de tiempo relativamente corto antes de que la persona este recobrada, esto puede causar un serio accidente. Con un recierre manual, la posibilidad de exposición a un segundo shock es reducida ya que el intervalo de tiempo de recierre puede ser sustancialmente grande.

El efecto acumulativo de dos o más shocks en espacios cerrados no puede haber sido enteramente evaluado, pero una consideración razonable puede ser, utilizar la suma de la duración de los shock individuales como el tiempo de una sola exposición.

2.3.2.4 – RESUMEN

Como resultado de las secciones anteriores, los siguientes valores pueden ser tomados como referencia para choques con corrientes de frecuencia 50 / 60 Hz:

0.5 mA Limite de percepción de la corriente eléctrica.

1.1 mA. Limite de percepción para 50 % de la población.

6 mA. Pérdida del control muscular en 0.5 % de las mujeres.

9 mA. Perdida del control muscular en 0.5 % de los hombres.

10.5 mA. Perdida del control muscular en 50 % de las mujeres.

16 mA. Perdidas del control muscular en 50% de los hombres.

20 - 30 mA. Probabilidad de asfixia.

116/ \sqrt{t} mA. Fibrilación del corazón ($0.083 < t < 5$ seg.) en 0.5 % de la población con 50 Kg de peso. Conf. Dalziel (1968).

2.3.3 - CIRCUITO DE TIERRA ACCIDENTAL

2.3.3.1- RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO

Para DC y AC a frecuencia de potencia normal, el cuerpo humano puede ser representado por una resistencia no inductiva. La resistencia se establece entre extremidades, esto es, desde una mano hasta ambos pies, o de un pie al otro. En cualquier caso, el valor de esta resistencia es difícil de establecer. La resistencia del tejido del cuerpo interno, sin incluir la piel, es de aproximadamente 300 Ω , mientras que la resistencia del cuerpo incluyendo la piel, esta entre los 500 y los 3000, sugerida en la literatura [14], [30], [31], [37], [47].

Como se mencionó antes en la Sección 2.3.1.2.2, Dalziel condujo extensivas pruebas para determinar la seguridad de las corrientes let-go, con manos y pies mojados (húmedos), en agua salada. Valores obtenidos usando 60 Hz para hombres estuvieron como sigue: la corriente fue de 9.0 mA; correspondiendo a los voltajes que fueron, de mano a mano, 21.0 V, y de mano a pie, 10.2 V. Luego, la resistencia AC de un contacto mano a mano es igual a $21.0/0.009$ ó 2330 Ω la resistencia mano a pie igual a $10.2/0.009$ ó 1130 Ω , basado en esos experimentos [22].

Para voltajes mas elevados (cerca de 1Kv), y corrientes (cerca de 5 A), la resistencia humana es disminuida por detrimento ó perforación de la piel en el punto de contacto. Mientras que, una resistencia de contacto con la mano húmeda puede ser muy baja a cualquier voltaje. La resistencia de los zapatos es incierta, (desconocida), aunque esta puede ser muy baja para cuero húmedo.

Por lo tanto, para nuestros propósitos:

- Las resistencias de contacto de mano y zapato serán asumidas como iguales a cero.
- Un valor de 1000 Ω es seleccionado para los cálculos siguientes para representar la resistencia del cuerpo humano de mano a pie húmedo y también de mano a mano ó de un pie al otro pie:

$$R_B = 1000 \Omega \quad (17)$$

2.3.3.2 - GRANDES CORRIENTES A TRAVÉS DEL CUERPO

Podría recordarse que la elección de un referido valor de resistencia de 1000 Ω para sendas tal como aquellas entre la mano y uno o ambos pies, donde la mayor parte de la corriente pasa a través de las partes del cuerpo que contienen órganos vitales, incluyendo el corazón. Generalmente se establece que el flujo de corriente de un pie al otro es menos peligroso. Refiriéndose a pruebas hechas en Alemania, Loucks mencionó que corrientes más elevadas de pie a pie, que de mano a pie tuvieron que ser usadas para producir la misma corriente en la región del corazón precisándose que la proporción es tan alta como 25:1 [42].



Basado en esas conclusiones, valores de resistencias más grandes de 1000Ω podrían posiblemente ser permitidos, donde un paso de un pie al otro pie es involucrado. Sin embargo los siguientes factores podrían ser considerados. :

- Un voltaje entre los dos pies, es doloroso pero no fatal, pudiendo resultar en una disminución que podría causar un flujo de corriente a través del área del pecho. El grado de este peligro pudiera además depender de la duración de la falla y la posibilidad de otras fallas sucesivas quizá por recierres.
- Una persona pudiera estar trabajando o reposando en una posición inclinada donde ocurra una falla.

Es evidente que el peligro de contacto pie a pie es menos probable que los demás. Por tanto, la muerte puede ocurrir de esta forma, y este es un riesgo que no debe ser ignorado. [6], [40].

2.3.3.3 - CIRCUITO EQUIVALENTE ACCIDENTAL

Usando el valor de corriente tolerable por el cuerpo establecida por la ecuación (15) o (16) y las constantes del circuito apropiadas, es posible determinar el voltaje tolerable entre dos puntos críticos cualesquiera de contacto.

Para que esto pueda ser notado en el circuito equivalente accidental, se utilizan las siguientes notaciones:

I_A = Corriente a través del circuito accidental

R_A = Resistencia efectiva total del circuito accidental

I_B = Corriente permisible en el cuerpo definida en la ecuación (15) ó (16).

Obviamente:

$$I_A < I_B \quad \text{es siempre requerido por seguridad.}$$

Puesto que la resistencia del cuerpo es asumida constante, requerir que $I_A < I_B$ es equivalente a asegurar que la fibrilación pueda ser prevenida asegurando que el total de watt-sg (Ws) de energía absorbida por el cuerpo durante un shock sea inferior a un valor seguro. Este valor es 0.0135 Ws para $K_{50} = 0.116$ A, y 0.0246 Ws para $K_{70} = 0.157$ A, respectivamente. De este modo, puede ser visto que la formula de Dalziel actualmente representa la relación entre la magnitud de la corriente de shock y la duración de una energía de shock constante.

La resistencia del circuito accidental R_A , es una función de la resistencia del cuerpo R_B y la resistencia de paso R_F (resistencia de la tierra justo debajo del pie). La resistencia de paso puede afectar apreciablemente el valor de R_A , una realidad que puede ser mas útil en algunas situaciones difíciles. Para el propósito del análisis del circuito, el pie humano es usualmente representado como un disco metálico conductor y la resistencia de contacto de los zapatos y calcetines es despreciable. Como mostró Sunde [53], la resistencia propia y mutua para dos discos metálicos de radios b , separados por una distancia d_F sobre la superficie de un suelo homogéneo de resistividad ρ son:

$$R_{pie} = \frac{\rho}{4 * b} \quad (18)$$

$$R_{M_{pie}} = \frac{\rho}{2 * \pi * d_{pie}} \quad (19)$$

donde:

R_{pie} : Resistencia propia de cada pie con respecto a la tierra remota.

R_{Mpie} : Resistencia Mutua entre los pies en Ω .

b : radio equivalente de un pie en m.

d_{pie} : distancia de separación entre los pies en m.

La resistencia de la tierra bajo los dos pies en series y en paralelo es:

$$R_{2Ps} = 2 * (R_{pie} - R_{Mpie}) \quad (20)$$

$$R_{2Pp} = \frac{1}{2} * (R_{pie} + R_{Mpie}) \quad (21)$$

donde, en adición a los símbolos descritos arriba:

R_{2Ps} : Resistencia de dos pies en serie

R_{2Pp} : Resistencia de dos pies en paralelo.

La figura #17 describe el circuito equivalente de un contacto pie a pie. Aquí, el potencial U bifurcado por el cuerpo, es la diferencia de potencial máximo entre los dos puntos accesibles sobre la superficie de la tierra separado por la distancia de un paso.

La resistencia del circuito equivalente del circuito de potencial de paso es dada por la ecuación (22).

$$R_A = R_B + 2 * (R_{pie} - R_{Mpie}) \quad (22)$$

Luego, el circuito equivalente para un contacto mano y dos pies es ilustrado en la figura # 18.

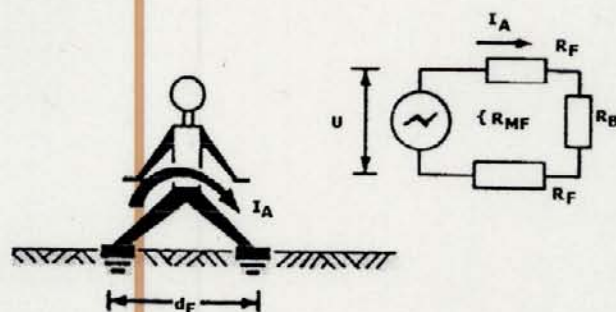


Figura # 17
Circuito de voltaje de paso

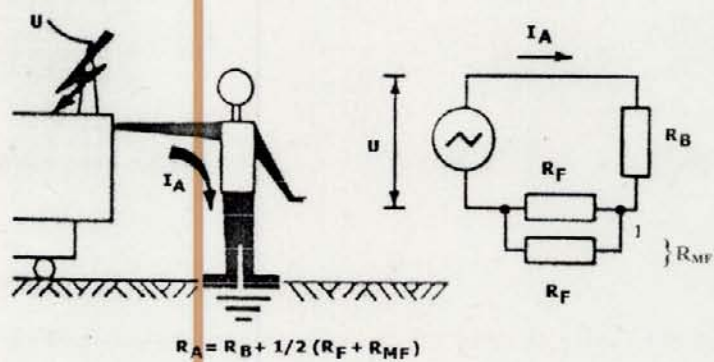


Figura # 18
Circuito de voltaje de toque

La resistencia del circuito equivalente para el circuito de potencial de toque es dada por la ecuación (23):

$$R_A = R_B + \frac{1}{2} * (R_{pie} + R_{M_{pie}}) \quad (23)$$

Se escoge un radio de 0.08 m (3 in) para el disco que representa al pie y se desprecia el termino de resistencia mutua.

Con solo una pequeña aproximación, las ecuaciones para las resistencias series y paralelas de dos pies pueden ser determinadas en forma numérica y expresadas en términos de ρ , como se muestra abajo:

$$R_{2PS} = 6 * \rho \quad (24)$$

$$R_{2Pp} = 1 \frac{1}{2} \rho \quad (25)$$

Por lo tanto, para todos los propósitos prácticos, la resistencia de un pie es igual a 3ρ . La ecuación (24) es usada cuando se calcula la corriente del cuerpo que resulta del voltaje de paso y la ecuación (25) se aplica cuando se calcula la corriente del cuerpo producida por un potencial de malla o toque con ambos pies enterrados a profundidad cero en el suelo cerca de la superficie.

Por ejemplo, si $\rho = 2000 \Omega \cdot m$, las ecuaciones 24 y 25 producen 12.000 y 3.000 Ω para las resistencias en series y en paralelo respectivamente.

Para obtener un calculo más exacto de los valores de resistencias propias y mutuas se utiliza 1m de separación y esto da como resultado $R_{2PS} = 11.863 \Omega$ y $R_{2Pp} = 3.284 \Omega$. El uso de un valor de $d_{pie} = 1 \text{ m}$ es conservador en cálculos de R_{2PS} . No obstante esto pudiera producir un valor ligeramente mayor de resistencia que el que tendría con una separación más pequeña entre los

pies, el resultado del voltaje de paso también es mucho mayor con una separación grande que el que tendría con una más pequeña, y que sería el denominado efecto sobre la corriente en el cuerpo.

La separación grande es también conservativa en cálculos de R_{2Pp} porque esta produce una resistencia mas baja que con una pequeña separación.

2.3.3.4 - EFECTOS DE UNA CAPA SUPERFICIAL DELGADA DE PIEDRAS PICADAS

Las ecuaciones (18) y (19) son derivadas basadas en la suposición de resistividad de suelo uniforme. Sin embargo, una capa de 0.08 - 0.15 m (3 - 6 in) de piedras picadas es muchas veces esparcida sobre la superficie de la tierra sobre la malla de tierra para incrementar la resistencia de contacto entre el suelo y el pie de las personas en las subestaciones. Las piedras picadas también mejoran la superficie para el movimiento de equipos y vehículos en las subestaciones. El área cubierta por este estrato de piedras picadas es generalmente de un tamaño suficiente para validar la suposición de la existencia del pie en contacto con un material de resistividad uniforme en la dirección lateral. No obstante, la relativamente trivial profundidad de las piedras picadas comparada con el radio equivalente del pie impide la suposición de resistividad uniforme en la dirección vertical cuando se calculan las resistencias propias y mutuas del pie.

Si el suelo bajo la capa de piedra tiene una resistividad más baja que estas, solamente algunas corrientes en la malla irían hacia arriba dentro de la delgada capa superior de piedra picada y el voltaje superficial estaría muy cerca de ser el mismo que existiría sin la capa de piedras. La corriente a través del cuerpo sería considerablemente mas baja con la adición de la superficie de piedra picada por la gran resistencia de contacto entre la tierra y el pie. No obstante esta resistencia puede ser considerablemente menor que la de una capa de piedra picada de mayor grueso. (Esta es, bastante gruesa para asumir resistividad uniforme en todas las

direcciones). Un caso típico descrito en la literatura muestra que la resistencia efectiva de una capa de 0.25 m de piedra de cal teniendo una resistividad de 5000 Ω -m (en condición húmeda) es aproximadamente equivalente a 75 por ciento de este valor nominal si la resistividad del suelo de la tierra es 250 Ω -m. [33].

Las siguientes ecuaciones de R_{pie} y R_{Mpie} son derivadas de [22]:

$$R_{pie} = \frac{\rho_1}{4 * b} F_{(x_1)} \quad (26)$$

$$R_{Mpie} = \frac{\rho_1}{2 * \pi * d_{pie}} F_{(x_2)} \quad (27)$$

En las ecuaciones (26) y (27), b y d_{pie} son definidas en 2.3.3.3 y $F_{(x)}$ es una función basada en el espaciamiento del pie y los valores relativos de las resistividades de la tierra y la piedra picada:

$$F_{(x)} = 1 + 2 * \sum_{n=1}^{\infty} Q \quad (28)$$

$$Q = \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2 * n * X)^2}} \quad (29)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (30)$$

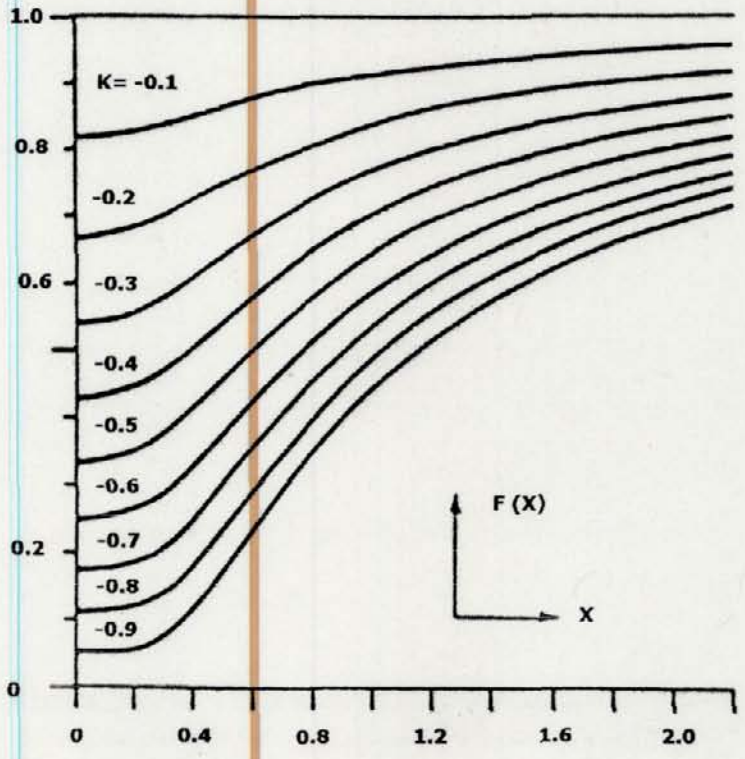


Figura # 19
Función $F(X)$ versus X y factor de reflexión K

donde:

ρ_s : Resistividad de la piedra picada en Ω - m.

ρ : Resistividad de la Tierra en Ω - m.

$X = X_1 = h_s / b$ para R_{pic} .

$X = X_2 = h_s / d_{pie}$ para R_{Mpie} .

h_s : Grueso de la capa superficial de piedra picada en m.

Estas ecuaciones podrían también ser derivadas por la publicación del método de las imágenes de las ecuaciones de Sunde [53]. No obstante, desde entonces la cantidad $F(X)$ es bastante tediosa para evaluar sin un computador o calculadora programable, esos valores han sido precalculados y graficados para un rango ancho de valores (X) y factor K , como se muestra en la figura # 19.

2.3.4 - CRITERIOS DE DIFERENCIA DE POTENCIAL PERMISIBLE

2.3.4.1 - SITUACIONES DE SHOCKS TÍPICOS

Las figuras #20 y #21 muestran situaciones básicas que involucran a una persona y a una instalación conectada a tierra durante una falla. Para un contacto de pie a pie el circuito equivalente accidental es el de la figura #17, y este es conductor del voltaje U que es igual a E_p (voltaje de paso). Para los tres restantes ejemplos de un contacto mano a ambos pies, la figura #14 se aplica, y U es igual a E_t (voltaje de toque), E_m (voltaje de malla), o E_{trrd} (voltaje transferido), respectivamente.

Durante una falla, la tierra llega a estar saturada, por las corrientes emanadas de la malla y otros electrodos de tierra permanentemente enterrados bajo la superficie de la tierra. El gradiente de potencial resultante tiene un efecto primario sobre el valor de U .

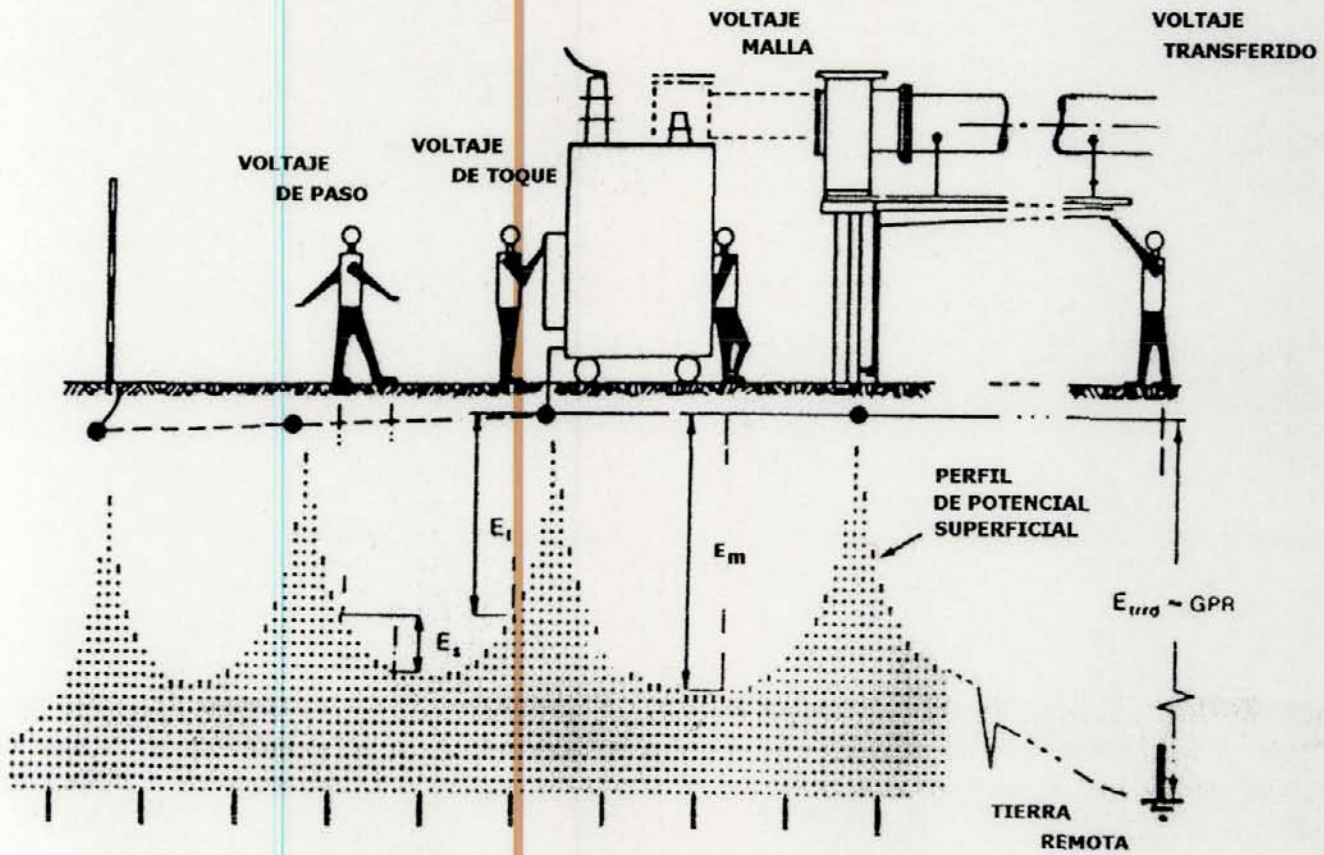


Figura # 20
Situaciones básicas de shock

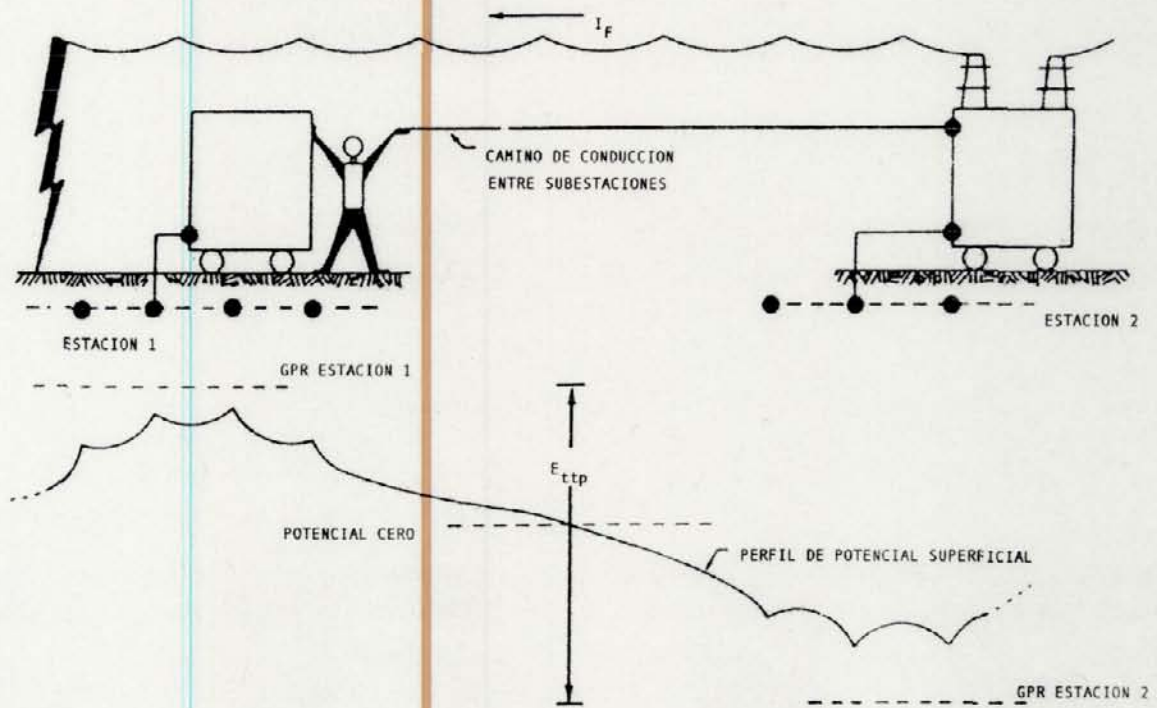


Figura # 21
Situación típica de un potencial externo transferido

Para aclarar, tenemos las siguientes definiciones:

2.3.4.2 - ELEVACIÓN DEL POTENCIAL DE TIERRA (GPR)

Es el máximo voltaje que una malla de puesta a tierra puede alcanzar con respecto a una tierra remota.

Durante una falla a tierra, la porción de corriente de falla que es conducida por la malla de puesta a tierra causa la elevación del potencial en la malla con respecto a la tierra remota. Este aumento del voltaje, GPR, es proporcional a la magnitud de la corriente en la malla, y a su resistencia.

2.3.4.3 - VOLTAJE DE PASO

Es la diferencia de potencial en la superficie experimentado por una persona, cuyos pies están separados a un metro de distancia y no está en contacto con otro objeto puesto a tierra.

2.3.4.4 - VOLTAJE DE TOQUE

Es la diferencia de potencial entre la elevación del potencial de tierra (GPR) y el potencial en la superficie del suelo en el punto en donde la persona está parada, mientras al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura conectada a tierra.

Nota: En una subestación convencional, el peor voltaje de toque se presenta cuando la distancia entre una mano y un pie alcanza una distancia máxima generando una diferencia de potencial máxima. Mientras, en el caso de un contacto metal a metal de mano a mano ó de mano a pie, son de interés en una subestación a gas Figura #22.

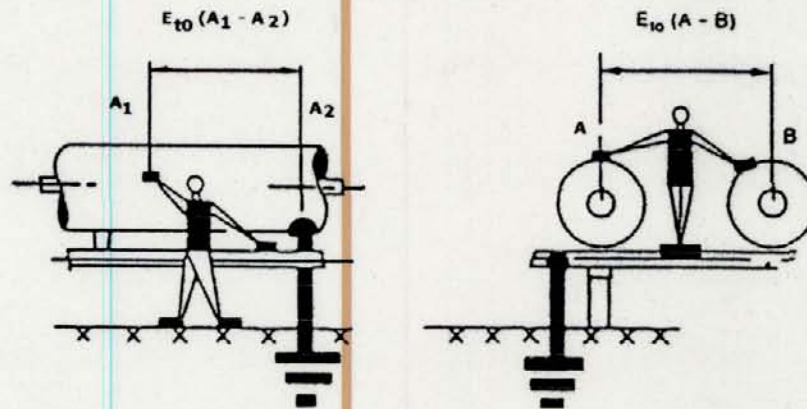


Figura # 22

Toques típicos metal – metal en una subestación a gas

2.3.4.5 - VOLTAJE DE MALLA

Es el máximo voltaje de toque que se presenta dentro de una malla puesta a tierra.

2.3.4.6 - VOLTAJE TRANSFERIDO

Es un caso especial del voltaje de toque donde un voltaje es transferido dentro o fuera de la subestación.

Típicamente, el caso de voltaje transferido ocurre cuando una persona parada fuera del área de la estación toca un conductor aterrado a un punto remoto o una persona parada en un punto remoto toca un conductor conectado a la malla de puesta a tierra de la estación. Durante condiciones de falla, el resultante potencial de tierra puede igualar o exceder el máximo GPR de una malla de puesta a tierra.(ver figura #21). En realidad, el voltaje transferido puede exceder la

suma de los GPR de ambas subestaciones, debido a voltajes inducidos sobre circuitos de comunicación, conductores estáticos o neutrales, tubos, etc. es impráctico y frecuentemente imposible diseñar una malla de puesta a tierra basada en el voltaje de toque causado por voltajes transferidos externos. Riesgos de esos voltajes transferidos externos son evitados usando aislamientos y otros métodos no expuestos aquí.

2.3.4.7 - CRITERIOS DE VOLTAJE DE PASO Y TOQUE

La seguridad de una persona depende de las precauciones que se tengan para prevenir que esta absorba una cantidad crítica de energía de shock antes de que la falla sea eliminada y el sistema desenergizado. El máximo manejo del voltaje para cualquier circuito accidental no excedería los límites definidos antes. Para voltajes de paso el límite es:

$$E_{paso} = (R_B + R_{2FS}) * I_B \quad (31)$$

Combinando las ecuaciones (31), (17) y una cualquiera entre la (15) ó (16):

$$E_{paso_{50}} = (1000 + 6 * C_{S(hs,K)} * \rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (32)$$

$$E_{paso_{70}} = (1000 + 6 * C_{S(hs,K)} * \rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (32 a)$$

El actual voltaje de paso E_p , sería menor que el máximo voltaje de paso permitido, E_{paso} , para reforzar la seguridad. Similarmente, el límite del voltaje de toque es:

$$E_{toque} = (R_B + R_{2T_r}) * I_B \quad (33)$$

Combinando las ecuaciones (31), (17) y una cualquiera entre la (15) ó (16):

$$E_{\text{toque}_{50}} = (1000 + 1.5 * C_s(h_s, K) * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (34)$$

$$E_{\text{toque}_{70}} = (1000 + 1.5 * C_s(h_s, K) * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (34 a)$$

donde:

C_s : factor de reducción para disminuir el valor nominal de la resistividad de la capa superficial, determinado como sigue:

$C_s = 1$ cuando la resistividad de la capa de piedra es igual a la resistividad del suelo, o:

$$C_s = \frac{1}{0.96} * \left[1 + 2 * \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2 * n * h_s / 0.08)^2}} \right] \quad (35)$$

ρ_s : la resistividad del material de la superficie en Ω - m.

t_s : Duración de la corriente de shock en sg.

El actual voltaje de shock, voltaje de malla, o voltaje transferido sería menor que el máximo voltaje de toque permitido, E_{toque} , para fortalecer la seguridad.

2.3.4.8 - EFECTO DE CORRIENTES SOSTENIDAS

Después de que los límites seguros de voltajes de toque y paso son establecidos, el sistema de puesta a tierra puede entonces ser diseñado con las corrientes disponibles de cortocircuito y el

conjunto de tiempos de despeje. El diseño también consideraría mantener un nivel bajo (menor al establecido por los relés de protección) de magnitudes de falla que puede ser superior al umbral de corriente let-go. Algunos mantienen fallas por encima de la corriente let-go pero inferior al umbral de fibrilación, esto puede causar asfixia debido a contracciones prolongadas de los músculos del pecho. Mientras, no sería práctico diseñar contra shocks inferiores que son dolorosos, pero no causan daño permanente.

2.4 - SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA SUBESTACIONES

2.4.1 - PRINCIPALES CONSIDERACIONES DE DISEÑO (METODO DE LA IEEE STD 80-1986/1996)

2.4.1.1- CONCEPTO GENERAL

Un sistema de puesta a tierra, será instalado de manera que limite el efecto de los gradientes de potencial de tierra, a voltajes y corrientes que no pongan en peligro la seguridad de personas o equipos bajo condiciones normales o de falla, así como asegurar la continuidad del servicio. Definiciones relacionadas son:

- Electrodo de puesta a tierra:

Es todo material conductor, por lo general metálico, en perfecto contacto con el terreno, encargado de introducir en él las corrientes de falla o de origen atmosférico canalizadas a través de una instalación de protección

- Malla de puesta a tierra:

Es un sistema de electrodos de tierra horizontal, que consiste de un número de barras de conductores interconectados, enterrados en la tierra, proveyendo de una tierra común a aparatos eléctricos o estructuras metálicas, ubicada en una localización específica.

Nota: Mallas enterradas horizontalmente cerca de la superficie de la tierra son efectivas controlando los gradientes de potencial en la superficie. Una malla típica es usualmente suplementada por un número de jabalinas de tierra y puede ser además de eso conectada a electrodos de tierra auxiliares, de menor resistencia con respecto a la tierra remota.

- Puesta a tierra para operación:

Es un sistema cerradamente espaciado de barra de conductores que son conectados a y frecuentemente ubicados en profundidades superficiales encima de una malla de tierra o en otra parte de la superficie de la tierra, para obtener una medición de protección extra, minimizando el peligro de la exposición a voltajes de paso o toque altos en una área de operación crítica o lugares que son frecuentemente usados por personas. Mallas de metal aterrado, en lugares sobre o encima de la superficie del suelo o malla de conductores ubicados directamente sobre la capa de piedra picada, son formas comunes de una puesta a tierra para operación.

- Sistema de Puesta a Tierra:

Es el que consta de todas las puestas a tierra interconectadas en un área específica.

Para este caso el sistema de electrodos de tierra tiene la forma de una malla de conductores enterrados horizontalmente, suplementados por un numero de jabalinas de tierra verticales conectadas a la malla.[1].

Algunas razones para usar el sistema combinado de jabalinas verticales y conductores horizontales son las siguientes:

(1).- En subestaciones un simple electrodo es, por si mismo, inadecuado para proveer un sistema de tierra seguro. En cambio, cuando diversos electrodos, tal como jabalinas de tierra, son conectadas mutuamente y a todos los neutros de equipos, armazones, y estructuras que serán conectadas a tierra, el resultado es, esencialmente, un arreglo de malla de electrodos de tierra. Si sucede que los vínculos de conexión están enterrados en un suelo de buena conductividad esta red solo puede representar un excelente sistema de aterramiento. En parte por estas razones, algunos servicios dependen del uso de una sola malla.

(2).- Si la magnitud de una corriente disipada dentro de la tierra es alta, rara vez es posible instalar una malla con resistencia tan baja como para asegurar que la elevación de un potencial de tierra no genere en la superficie gradientes peligrosos para el contacto humano. Entonces, el riesgo puede ser eliminado solamente por control de los potenciales locales de extremo a extremo del área cubierta por la malla. Un sistema que combina una malla horizontal y un número de jabalinas de tierra verticales penetrando más abajo del suelo tiene las siguientes ventajas:

(a).- Mientras los conductores horizontales (malla) son más efectivos reduciendo el peligro de altos voltajes de toque y paso sobre la superficie de la tierra, si la malla es instalada en una profundidad superficial de bajo nivel usualmente de 0.3-0.5 m (12-18 in). Las jabalinas de tierra suficientemente largas estabilizarían el funcionamiento del sistema combinado. Para muchas instalaciones esto es importante debido a que condiciones climáticas extremas que producen congelamiento o aridez (falta de humedad), modifican la resistividad de las capas superiores del suelo con el tiempo, mientras que la resistividad de las capas inferiores del suelo permanece casi constante.

(b).- Jabalinas enterradas en suelos de poca resistividad son más efectivas en la disipación de las corrientes de falla siempre que se encuentre en un suelo de dos o múltiples capas y la capa superior del suelo tenga más alta resistividad que las capas inferiores. Para muchas subestaciones de gas aislado (GIS) y otras instalaciones de espacio limitado, esta condición llega a ser, en realidad, una de las más deseables de que ocurra, para ser ejecutada por medio de un diseño apropiado (jabalinas de tierra de extra longitud pueden dar favorables puestas a tierra, etc.).

(c).- Si las jabalinas son instaladas predominantemente a lo largo del perímetro de la malla en condiciones del suelo cuyas resistividades sean altas, bajas o uniformes, las jabalinas moderarían considerablemente el incremento del gradiente de la superficie en las cercanías del perímetro de las mallas.

2.4.1.2 - ELECTRODOS DE TIERRA PRIMARIOS Y AUXILIARES

En general, la mayoría de los sistemas de puesta a tierra utilizan dos grupos de electrodos de tierra: los diseñados específicamente para proyectos de puesta a tierra y los electrodos que incluyen varias estructuras de metal bajo tierra instaladas para otros objetivos de puesta a tierra, como se define mas adelante

- Electrodo de tierra primario:

Es un electrodo de tierra específicamente diseñado o adaptado para dispersar la corriente de falla a tierra dentro de la tierra, frecuentemente modelado para una descarga específica, requerida por el diseño del sistema de puesta a tierra.

- Electrodo de Tierra Auxiliar:

Es un electrodo de tierra que opera como diseño efectivo o que puede tener restricciones. Esta es su función primaria pero puede tener otra, además de conducir la corriente de falla de tierra dentro de la tierra.

Las mallas de puesta a tierra, conductores de contrapeso, jabalinas de tierra y fuentes son electrodos primarios típicos. Estructuras de metal bajo tierra y barras reforzadas encerradas en concreto, si están conectadas a las mallas de puesta a tierra, son electrodos auxiliares típicos que pueden tener una capacidad límite de conducción de corriente.

2.4.1.3 – ASPECTOS BÁSICOS DE DISEÑO DE MALLAS

El análisis de un sistema de puesta a tierra horizontal (malla), usualmente comienzan con el diseño de la distribución de la estación, mostrando todos los equipos mayores y estructuras. Para

establecer las ideas básicas y los conceptos, los siguientes puntos pueden servir para determinar un típico diseño de malla de puesta a tierra:

(1) Un anillo de conductor continuo podría cercar el perímetro para encerrar de forma practica las áreas. Estas mediciones ayudan a evitar la concentración de altas corrientes y por esto altos gradientes tanto en el área de la malla como cerca de los extremos de los conductores. Encerrando mas área también se reduce la resistencia de la malla de puesta a tierra.

(2) Dentro del anillo, podrían ser colocados conductores en líneas paralelas y, donde sea preciso, a lo largo de estructuras o hileras de equipos, para proveer de cortas conexiones de tierra.

(3) Un típico sistema de malla para una subestación, puede incluir barras de conductores de cobre 4/0 enterrados a 0.3m - 0.5 m (12-18 in), separados entre si con distancias de 3m a 7 m (10-20 ft), en un modelo de malla. En las conexiones de los cruces los conductores deberán indudablemente garantizar su unión. Las jabalinas pueden estar en las esquinas y en cada punto de unión a lo largo del perímetro. Las jabalinas también pueden ser instaladas a equipos mayores. En suelos de múltiples capas o muy resistivos, puede ser provechoso usar jabalinas largas (longitudes que exceden los 30.5 m –100pies- han sido usadas para algunos propósitos).

(4) Este sistema de malla debe ser extendido sobre la subestación y frecuentemente mas allá de la cerca. Múltiples cables de tierra o conductores de gran tamaño deben usarse en lugares donde pueden ocurrir altas concentraciones de corriente, tales como en las conexiones tierra neutro de generadores, banco capacitivos o transformadores.

(5) La relación de los tamaños de la malla van de 1:1 a 1:3, a menos que un análisis preciso (con ayuda de un computador) garantice valores mas extremos. Frecuentemente las conexiones en los cruces tienen un efecto relativamente pequeño sobre la disminución de la resistencia de la malla. Su rol primario es asegurar un adecuado control de los potenciales en la superficie. Las

conexiones en los cruces son también útiles, aseguran múltiples caminos para la corriente de falla, minimizando la elevación de voltaje en la malla.

2.4.2 - EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE TIERRA.

2.4.2.1 - REQUERIMIENTOS USUALES

Un sistema de puesta a tierra ideal debería tener una resistencia cercana a cero con respecto a la tierra remota. En la práctica la elevación del potencial de tierra en la subestación incrementa proporcionalmente con la corriente de falla; para la mayor corriente se debe obtener el valor más bajo de resistencia total del sistema. Para grandes subestaciones la resistencia de tierra deberá estar cerca de 1Ω o menos. En pequeñas subestaciones de distribución el rango usualmente aceptado es de 1Ω a 5Ω dependiendo de las condiciones locales.

2.4.2.2 - FORMULA DE SCHWARZ.

La resistencia total de un sistema que consiste de una combinación de electrodos horizontales (malla) y verticales (jabalinas) es más baja que la resistencia de cualquier componente solo, pero aun más alta que su combinación paralela. La resistencia total es:[50],[53]

$$R_g = \frac{R_1 * R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 * R_{12}} \quad (36)$$

donde:

R_1 : Resistencia de los conductores de la malla

R_2 : Resistencia de todas las jabalinas de tierra

R_{12} : Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla y el grupo de jabalinas de tierra.

Schwarz determina un grupo de formulas, definiendo a R_1 , R_2 , y R_{12} en términos de los parámetros de diseño básico, asumiendo condiciones de suelo uniforme.[51].

Mientras, en la práctica, es frecuentemente deseable dirigir las jabalinas de tierra hacia las profundidades del suelo para obtener un suelo más conductivo. En las ecuaciones siguientes, las expresiones de R_2 y R_{12} han sido modificadas para cada una de las posibilidades

$$R_1 = \left(\frac{\rho_1}{\pi * l_1} \right) * \left(\ln \left(\frac{2 * l_1}{h'} \right) + K_1 \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - K_2 \right) \quad (37)$$

$$R_2 = \left(\frac{\rho_a}{2 * n * \pi * l_2} \right) * \left[\ln \left(\frac{8 * l_2}{d_2} \right) - 1 + 2 * K_1 * \left(\frac{l_2}{\sqrt{A}} \right) * (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (38)$$

$$R_{12} = \left(\frac{\rho_a}{\pi * l_1} \right) * \left[\ln \left(\frac{2 * l_1}{l_2} \right) + K_1 * \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - K_2 + 1 \right] \quad (39)$$

donde:

ρ_1 : resistividad del suelo encontrada por los conductores de la malla enterrados a profundidad h in Ω -m.

ρ_a : resistividad aparente del suelo vista por una jabalina de tierra en Ω -m,

H : grueso de la capa superior del suelo en m,

ρ_2 : resistividad del suelo mas abajo de la profundidad H en Ω -m

l_1 : longitud total de los conductores de la malla en m

l_2 : longitud determinada de una jabalina de tierra en m

h : profundidad de entierro de la malla en m

h : $\sqrt{d_1 h}$ para conductores enterrados a profundidad h , o $0.5d_1$ para conductores a $h = 0$ (sobre la superficie de la tierra).

A : área cubierta por una malla de dimensiones $a * b$ en m^2

n : número de jabalinas de tierra ubicadas en el área A

K_1, K_2 : constantes relacionadas con la geometría del sistema (figuras #23 (a) y (b))

d_1 : diámetro del conductor de la malla en m

d_2 : diámetro de las jabalinas de tierra en m

a : lado más corto de la longitud de la malla en m

b : lado más largo en m .

Las ecuaciones anteriores (37), (38) y (39) son válidas para un suelo de dos capas, con la capa superior de un espesor H , en la cual las jabalinas de tierra penetran la capa más baja y más conductiva. En el caso, que $\rho_1 \geq \rho_2$, donde la malla es enterrada en la capa superior ρ_1 , pero las jabalinas de tierra están parte en ρ_1 y parte en ρ_2 , R_2 , y R_{12} son calculadas con el uso de una resistividad de suelo aparente vista por las jabalinas de tierra, ρ_a , definida como sigue:

$$\rho_a = l_2 * (\rho_1 * \rho_2) * (\rho_2 * H + \rho_1 * (l_2 - H)) \quad (40)$$

Si el tope de cada jabalina de tierra está parejo con la superficie de la tierra.

Para el caso más usual donde el tope de las jabalinas está a la misma profundidad de la malla,

$$\rho_a = l_2 * (\rho_1 * \rho_2) / (\rho_2(H - h) + \rho_1 * (l_2 + h - H)) \quad (41)$$

Para suelos uniformes, $\rho_1 = \rho_2$.

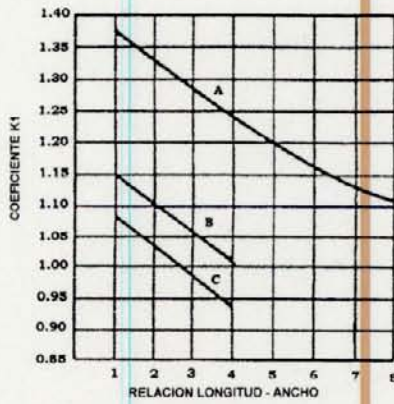
Si la diferencia entre ρ_1 y ρ_2 no es tan grande (preferiblemente cuando ρ_2 no sea ni pequeña que $0.2\rho_1$), y la primera capa de grueso h esta a menos de $0.1b$, las ecuaciones resultantes son razonablemente exactas y proporcionan cálculos prácticos y relativamente fáciles de usar.[45], [46]. Además, la habilidad para trabajar con expresiones separadas de una malla y una serie de jabalinas se vuelve ventajoso en cálculos simplificados.

Un pequeño problema con la aplicación de estas ecuaciones es que los factores (coeficientes) K_1 , y K_2 han sido originalmente presentados por Schwarz solo en una forma gráfica.

Sin embargo, dada la característica de las curvas a aproximarse a una línea recta, es posible usar un linealizador donde $y = px + q$ para obtener K_1 y K_2 y no utilizar el rango de valores mostrados en la figura 23 (a) y (b); o también se podría utilizar la interpolación lineal en varios puntos tomados de la curva original.

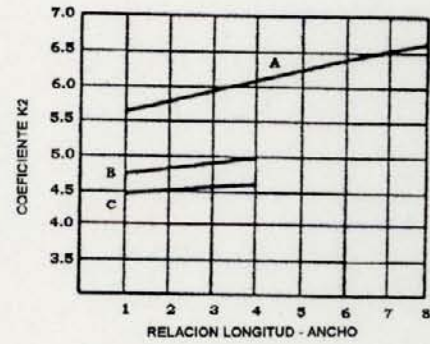
Tabla #3
Resistencias Típicas de una Malla

Parámetros Del Suelo	Sub1 Sand&Grave	Sub2 Sandy Loam	Sub3 Sand&Clay	Sub4 Sand&Gravel	Sub5 Soil &Clay
Resistividad	2000	800	200	1300	28
Area de la Malla	15159	60939	18849	15759	61479
Longitud de Enterramiento	3120	9500	1775	3820	3000
Rg(calculada)	25.7	4.97	2.55	16.15	0.19
Rg (medida)	39.0	4.10	3.65	18.2	0.21



CURVA A - PARA PROFUNDIDAD $h = 0$
 $y_A = -0.04x + 1.41$
 CURVA B - PARA PROFUNDIDAD $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$
 $y_B = -0.05x + 1.20$
 CURVA C - PARA PROFUNDIDAD $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$
 $y_C = -0.05x + 1.13$

a) Coeficiente K1



CURVA A - PARA PROFUNDIDAD $h = 0$
 $y_A = 0.15x + 5.50$
 CURVA B - PARA PROFUNDIDAD $h = 1/10 \text{ AREA}$
 $y_B = 0.10x + 4.68$
 CURVA C - PARA PROFUNDIDAD $h = 1/6 \text{ AREA}$
 $y_C = -0.05x + 4.40$

b) Coeficiente K2

Figuras # 23

Coefficientes K1 y K2 de la Formula de Schwarz

2.4.3 - SELECCIÓN DE CONDUCTORES

Implica escoger el material del conductor, su tamaño y el límite máximo de temperatura que se necesita para realizar un diseño de puesta a tierra, en la selección final se deben reflejar las siguientes consideraciones.

2.4.3.1 - REQUERIMIENTOS BÁSICOS

Cada elemento de un sistema de puesta a tierra, incluyendo mallas, conductores, uniones, conexión de canales, y todos los electrodos de puesta a tierra primario, estarán diseñados para permanecer en buen estado durante la vida del diseño proyectado, los elementos deberán:

- Tener suficiente conductividad, tal que no contribuyan sustancialmente a diferencias de voltajes locales.
- Que la fundición de la resistencia y deformación del material sea bajo la más adversa combinación de una corriente de falla en magnitud y duración.
- Ser mecánicamente confiable y robusto en un alto grado, especialmente en lugares expuestos a la corrosión o al abuso físico.

El primer requerimiento para seleccionar un conductor con suficiente conductividad es usualmente realizado cuando los otros dos requerimientos de habilidad para llevar corrientes y resistencia mecánica son satisfechos.

2.4.3.2 - SELECCIÓN DEL MATERIAL Y PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA CORROSIÓN

El cobre es el material más usado para puestas a tierra en USA. Los conductores de cobre, además de su alta conductividad, tiene la ventaja de ser resistentes a la corrosión bajo tierra pues el cobre es catódico con respecto a otros metales que son ligeramente enterrados en la vecindad. El acero cubierto de cobre es usualmente usado para jabalinas de tierra y ocasionalmente para mallas de tierra. El uso del cobre, o en un menor grado, acero cubierto de cobre, asegura que la integridad de una red bajo tierra será mantenida por años, en tanto los conductores sean de adecuado tamaño y no se dañen.

No obstante, una malla de cobre o de acero cubierto de cobre forma una celda galvánica con estructuras de acero enterradas, tubos, y cualquiera de las mezclas basadas en diseños que pueden ser presentados en cable forrado, lo que también probablemente acelera la corrosión.

El estaño de cobre ha sido probado para algunos usos; este reduce el potencial de celda con respecto al acero y al zinc por cerca de 50% y prácticamente elimina este potencial con respecto a la guía. La desventaja del uso del conductor de cobre estañado es que acelera y concentra la corrosión natural del metal en una pequeña área. Otros métodos frecuentemente usados son:

- Aislar las perdidas de la superficie del metal con cinta aislante plástica, compuesta de asfalto, o ambos.
- Una protección catódica en el área donde halla perdidas de metales o, donde sea factible, el uso de conductos no metálicos y tubos.

El aluminio ha sido usado frecuentemente para mallas de tierra menores. Por tanto en un primer vistazo el uso del aluminio parecería ser una opción natural seleccionado para equipos de

gas puesto que el cercado es hecho de aluminio o una mezcla de aluminio, estas son varias desventajas a considerar:

- El aluminio por si mismo puede corroerse en suelo seco, la capa de material corroído es no conductivo para todos los propósitos prácticos de enterramiento.
- La corrosión gradual es causada por corrientes alternas que puede también ser un problema bajo algunas condiciones.

De este modo, el aluminio sería usado solo después de una completa investigación de todas las circunstancias, desechando el hecho de que, como el acero, aliviaría el problema de contribuir a la corrosión de otros objetos enterrados y eliminaría más dificultades manteniendo una conexión eléctrica fiable entre metales similares. Si son tan usados, los conductores eléctricos con alto grado de pureza son mas recomendados por ser más convenientes que las mezclas. Un cable todo de aluminio de la misma conductancia que un conductor de cobre equivalente también hubiera tenido un tiempo igual de corto de capacidad.

Esto proviene del hecho de que el coeficiente de temperatura respectivo, calor específico, y la densidad del cobre y del aluminio son tales como para causar sus respectivos puntos de fusión alcanzándose en aproximadamente las mismas longitudes de tiempo.[59]

El acero ha sido usado en conductores para mallas de tierra en muchos países Europeos y esta gradualmente ganando aceptación en USA, principalmente debido al beneficio de eliminar algunos de los efectos adversos del cobre ya mencionados. La aplicación de un acero galvanizado resistente a la corrosión, en combinación con la protección catódica, es típica.[43].

2.4.3.3 - FORMULA DEL TAMAÑO MÍNIMO

Una determinación cuantitativa de la elevación de temperatura en tiempo corto en un conductor de tierra puede ser obtenida de la ecuación (42), tomada de los estudios de Sverak [55]. Esta ecuación evalúa la capacidad de cualquier conductor, para lo cual las constantes del material son conocidas, o pueden ser determinadas por calculo. Las constantes de los materiales de puesta a tierra mas comúnmente usados son listados en la tabla 4.

$$I = A * \sqrt{\frac{(TCAP * 10^{-4})}{(t_r * \alpha_r * \rho_r)} * \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)} \quad (42)$$

donde:

I: corriente rms. en KA.

A: Sección del conductor en mm².

Tm: Temperatura máxima permisible en °C.

Ta: Temperatura ambiente en °C.

Tr: Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.

α_0 : Coeficiente térmico de resistividad a 0 °C.

α_r : Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia Tr.

ρ_r : Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia Tr en $\mu\Omega/\text{cm}^3$.

Ko: $1/\alpha_0$, o $(1/\alpha_r) - Tr$

tc: tiempo de flujo de corriente en s.

TCAP: Factor de capacidad térmica de la tabla 4. En $\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$ (definido por la ecuación 44).

Si el tamaño del conductor es dado en circular mils, la ecuación (42) queda igual a:

$$I = 5.0671 * 10^{-6} A * \sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c * \alpha_r * \rho_r}\right) * \ln\left(\frac{K_O + T_m}{K_O + T_a}\right)} \quad (43)$$

La ecuación (44) (La cual define a TCAP), refleja dos suposiciones básicas: 1.- todo el calor sería retenido en el conductor, y 2.- el producto del calor específico (SH) y el peso específico (SW), TCAP, es aproximadamente constante por lo cual SH incrementa y SW decrece a más o menos la misma tasa. Para la mayoría de los metales, estas premisas son aplicables sobre un ancho rango de temperatura, tan largo como la duración de la falla esta dentro de unos pocos segundos. El error esta siempre sobre el tamaño conservativo.

2.4.3.4 - FORMULAS ALTERNATIVAS

Cuando se trabajan con materiales que no son listados en la tabla 4, la mayoría de los libros de ingeniería proveen suficiente información, incluyendo los valores de calor y peso específicos, para determinar TCAP.

El calor específico (cal/gram/°C) y el peso específico (gram/cm³) están relacionados a la capacidad térmica por unidad de volumen en (Ws/cm³) como sigue:

$$(\text{cal/gram/}^\circ\text{C}) * (\text{gam/cm}^3) = 4.184 (\text{Ws/cm}^3/^\circ\text{C})$$

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$$

Por tanto, TCAP esta definida por:

$$TCAP = 4.184 * SH * SW \quad (44)$$

donde:

SH : Calor específico en cal/gram/°C

SW : Peso específico en gram/cm³

Tabla 4
Constantes de Materiales

Descripción	Conductividad Del Material (%)	Factor α_r a 20°C	K (1/ α_0) a 0°C	Temperatura de Fundición (°C)	ρ_r a 20°C ($\mu\Omega/cm$)	Factor TCAP Valor Efectivo ($J/cm^3/°C$)
Cobre Blando	100.0	0.00393	264	1083	1.7241	3.422
Cobre Duro	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Copperweld	40.0	0.00378	245	1084/1300	4.397	3.846
Copeprweld	30.0	0.00378	245	1084/1300	5.862	3.846
Aluminio Grado EC	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aleación de Aluminio 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aleación de Aluminio 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Allumoweld	20.3	0.00360	258	660/1300	8.4805	2.670
Acero Galvanizado	8.5	0.00320	293	419/1300	20.1	3.931
Acero Inoxidable 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

Una vez que el TCAP es determinado, las ecuaciones (42) y (43) pueden ser usadas para determinar la capacidad del conductor.

Las ecuaciones (42) y (43) pueden ser arregladas para obtener el tamaño del conductor requerido como una función de la corriente del conductor.

$$A_{mm^2} = I * \frac{\sqrt{\frac{t_c * \alpha_r * \rho_r * 10^4}{TCAP}}}{\sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_O + T_a} \right) \right]}} \quad (45)$$

$$A_{cmils} = 1973.52 * I * \frac{\sqrt{\frac{t_c * \alpha_r * \rho_r * 10^4}{TCAP}}}{\sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_O + T_a} \right) \right]}} \quad (46)$$

2.4.3.5 - ELECCIÓN FINAL DEL TAMAÑO DEL CONDUCTOR

En la practica, los requerimientos sobre seguridad mecánica señalarían un mínimo tamaño de conductor. Las guías de la AIEE y de la IEEE recomendaban tamaños mínimos de 1/0 y 2/0 de cobre para soldaduras y uniones de piezas, respectivamente. Un reciente estudio internacional muestra que cerca de 66 por ciento de los encuestados utiliza conductor de cobre No 4/0 para mallas y aproximadamente 16 por ciento prefiere usar conductores tan grandes como 500kcmils. Sobre otra encuesta cerca de 25 por ciento de los encuestados reportan el uso de conductores de cobre tan pequeños como 1/0 sin cualquier problema mecánico [24].

Por lo cual pudiera parecer apropiado para el diseñador establecer tamaños mínimos para condiciones locales, la necesidad de conservación merece consideración. Algunas de las razones específicas son:

- Relés que funcionan mal y errores humanos que pueden resultar en un exceso de tiempo de despeje primario de la falla. El tiempo de despeje back-up es usualmente adecuado para dimensionar el conductor. Para subestaciones pequeñas, este puede acercarse a 3 s

o más. Mientras que subestaciones grandes usualmente tienen protección química compleja o redundante, y la falla generalmente sería despejada en 1s o menos.

- En el último valor de corriente usado para determinar el tamaño del conductor sería tomado en cuenta la posibilidad de un futuro crecimiento. Es menos costoso incluir un adecuado margen en el tamaño del conductor durante el diseño inicial que intentar reforzar un número de conductores de tierra un tiempo después.

2.4.4 - DETERMINACION DE LA MAXIMA CORRIENTE EN LA MALLA

2.4.4.1 - PROCEDIMIENTO Y DEFINICIONES RELACIONADAS [35]

Los siguientes pasos se involucran para la determinación del valor de diseño correcto de máxima corriente de malla I_G para usarla en los cálculos del sistema de puesta a tierra de la subestación.

- Paso a: imponga el tipo y localización de aquellas fallas que son probablemente las que pueden producir los más grandes flujos de corrientes entre la malla de puesta a tierra y la tierra cercana y de aquí la mayor elevación del potencial de la malla con respecto a la tierra remota (GPR) y los más grandes gradientes de potencial de la superficie local en el área de la subestación.
- Paso b: determine, por cálculos, el factor de división de corriente de falla S_f para cada una de las fallas seleccionadas en el paso (a), y establezca los valores correspondientes de la corriente de malla simétrica I_g .
- Paso c: para cada falla, basándose en el tiempo de duración t_f . Determine el factor de decrecimiento D_f para permitir los efectos de asimetría de las fluctuaciones de la corriente de falla.
- Paso d: seleccione el producto más grande de $D_f * I_g$, y de aquí la peor condición de falla, y establezca el valor de un factor de proyección C_p para obtener el margen para el aumento futuro del sistema.

Las definiciones relacionadas a los términos dados arriba se dan a continuación:

- **Corriente Simétrica de la Malla:** Es la porción de la corriente de falla a tierra simétrica que fluye entre la malla y la tierra cercana puede ser expresada como:

$$I_g = S_f * I_f \quad (47)$$

donde:

I_g : Corriente simétrica en la malla en A.

I_f : Valor rms de la corriente de falla a tierra simétrica en A.

S_f : Factor de división de corriente que relaciona la porción de la magnitud de corriente que fluye entre la malla de puesta a tierra y la tierra cercana.

- **Máxima corriente de Malla:** Es el valor de diseño de la máxima corriente de malla, esta definido por la siguiente ecuación:

$$I_G = C_p * D_f * I_g \quad (48)$$

donde:

D_f : Factor de disminución para el valor entero de duración de la falla t_f , dando t_f en s. Y se calcula a través de la siguiente formula:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_x}{t_c} * \left(1 - \text{EXP}^{-\frac{t_c}{T_x}}\right)} \quad (48a)$$

T_x : Constante de tiempo subtransitoria en s.

t_c : Duración de la corriente de falla en s.

I_G : Máxima corriente de malla en A.

C_p : Factor de proyección correctivo para el incremento relativo de las corrientes de falla durante la vida de la estación; para un incremento futuro nulo del sistema $C_p = 1$.

I_g : Corriente de malla simétrica rms en A.

- **Factor de división de corriente de falla:** Es un factor que representa el inverso de una relación de la corriente de falla simétrica esta porción de corriente fluye entre la malla de puesta a tierra y la tierra cercana.

Nota : Para los propósitos de calculo del valor de diseño de la máxima corriente de la malla y de la corriente simétrica de esta por definición de ellas, estas pueden asumirse como una relación constante durante toda la permanencia de una falla dada. Consecuentemente, este factor puede ser expresado como:

$$Sf = I_g / (3 \cdot I_o) \quad (49)$$

donde:

I_g : Corriente de la malla simétrica.

I_o : Corriente de falla se secuencia cero.

Los valores del Factor de Divisor de Corriente de Falla (Sf) han sido graficados para distintos casos de sistemas y fallas, estas graficas se encuentran en el apéndice C.

2.4.5 – DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

2.4.5.1 - CRITERIO DE DISEÑO[35]

Existen dos metas principales para lograr el diseño del sistema de puesta a tierra de cualquier subestación, tanto en condiciones normales como de falla.

Primero hay que proporcionar una disipación de las corrientes eléctricas a la tierra sin exceder cualquier límite de operación de los equipos; y segundo y último, asegurar que las personas que estén en las vecindades de medios conectados a tierra se expongan al peligro de un choque eléctrico fuerte.

El procedimiento de diseño descrito en las secciones siguientes se apunta a lograr la seguridad de los voltajes de toque y paso dentro de una subestación. En la sección 2.3.4.1 se indicó que es posible que los potenciales transferidos excedan el GPR de la subestación durante las condiciones de falla.

Así, el procedimiento de diseño descrito aquí se basa en proporcionar seguridad en presencia de voltajes peligrosos de toque y paso dentro, inmediatamente fuera y cerca del área de la subestación.

Como el voltaje de la malla es el peor voltaje de toque dentro de la subestación (excluyendo los potenciales transferidos), el voltaje de la malla se usará como base en el procedimiento de diseño.

Los voltajes de paso son inherentemente menos peligrosos que los voltajes de la malla. Sin embargo, la seguridad dentro del área conectada con tierra se logra con la ayuda de una capa superficial de alta resistividad (piedra picada), que no se extiende fuera del cerco, entonces los voltajes del paso pueden ser peligrosos. En todo caso, los voltajes de paso calculados deben

compararse con los voltajes de paso permisibles después de que una malla se ha diseñado y que satisface el criterio de voltaje de toque.

Para las mallas cuyas retículas están igualmente espaciadas, el voltaje de la malla aumentará a lo largo de esta desde el centro hacia las esquinas de la malla. La proporción de este aumento dependerá del tamaño de la malla, número y ubicación de las jabalinas, espaciamiento de los conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores, y de los perfiles de resistividad de la tierra. En un estudio de los cálculos de tres mallas de tierra típicas con una resistividad del suelo uniforme, se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 5. Estas mallas están simétricamente formadas, cuadradas sin jabalinas e igual espaciamiento entre los conductores paralelos. El E_m se calculo en el centro de la malla y en las esquinas. El peor caso real ocurrió ligeramente descentrado (hacia la esquina de la malla), pero sólo es ligeramente superior al E_m del centro de la malla.

Como se indico en la tabla 5, el voltaje de malla en la esquina generalmente es más alto que en el centro de la malla. Esto es verdad a menos que la malla sea asimétrica (es decir, tiene proyecciones, forma de L, etc.), tenga jabalinas localizadas sobre o cerca del perímetro o tenga espaciamientos entre conductores extremadamente desiguales.

En las ecuaciones simplificadas para el voltaje de la malla E_m dadas en la sección 2.4.5.5 solamente el voltaje en el centro de la esquina de la malla se usa como base en el procedimiento de diseño. Puede usarse esta aproximación del voltaje en la esquina de la malla, o en el peor de los casos el voltaje de toque encontrado en cualquier parte del área conectada a tierra como la base del procedimiento de diseño.

En cualquier caso, el criterio inicial para un diseño seguro es limitar el calculo de los voltajes de la malla o de toque a que sean menores que el voltaje de toque tolerable en las ecuaciones (34) o (34a).

Tabla 5
Relación típica de voltaje de malla de esquina al centro

Nº de la Malla	Tamaño de la Malla	Em Esquina / Centro
1	10 * 10	2.71
2	20 * 20	5.55
3	30 * 30	8.85

2.4.5.2 - PARÁMETROS CRÍTICOS

A continuación se nombrarán los parámetros que tienen un sustancial impacto en el diseño de la malla: máxima corriente de la malla (I_G), duración de la falla (t_f), duración del shock (t_s), resistividad del suelo (ρ), alta resistividad del material superficial (ρ_s), y geometría de la malla. Varios parámetros definen la geometría de la malla, pero el área del sistema de puesta a tierra, el espaciamiento entre conductores, y la profundidad de la malla de tierra tienen el mayor impacto en el voltaje de la malla, otros parámetros tales como el diámetro del conductor y el espesor de la capa de piedra picada tienen menos impacto. [1], [24], [26], [52]. Una breve discusión o revisión de los parámetros críticos es dada posteriormente.

2.4.5.2.1 - MÁXIMA CORRIENTE DE LA MALLA (I_G)

La evaluación del máximo valor de diseño de la corriente de falla que fluye a través de la malla de tierra de la subestación dentro de la tierra, I_G , ha sido descrita en 2.4.4. En la determinación de la máxima corriente I_G , por medio de la ecuación (48) debe tomarse en consideración a la resistencia de la malla de tierra, a la división de la corriente de falla a tierra entre los caminos de retorno alternativos y la malla, al factor de decrecimiento, y a la futura expansión del sistema de potencia.

2.4.5.2.2 - DURACIÓN DE LA FALLA (t_f) Y DURACIÓN DEL SHOCK (t_s)

La duración de la falla y la duración del shock se asumen normalmente iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de sucesivos shocks, debido a los recierres (sección 2.4.4). La selección de t_f debe reflejar un tiempo rápido de despeje para subestaciones de transmisión y un tiempo de despeje lento para subestaciones industriales y de distribución. Los cambios de t_f y t_s deben resultar en la combinación más pesimista del factor de decrecimiento de la corriente de falla y la corriente admisible del cuerpo.

Un rango de valores típicos para t_f y t_s es 0.25s – 1.0 s.

2.4.5.2.3 - RESISTIVIDAD DEL SUELO (ρ)

La resistencia de la malla y los gradientes de voltajes en una subestación son directamente dependientes de la resistividad del suelo.

Realmente la resistividad del suelo varía tanto horizontal como verticalmente, por lo tanto deben recolectarse en el patio de la subestación suficientes datos.

En la simplificación de las ecuaciones de E_m y E_s dadas en 2.4.5.5 donde se asume suelo de resistividad uniforme puede usarse solamente un valor para la resistividad. Hay un método no tan simple para determinar un valor a partir de los datos de las pruebas de campo, que pueden dar un análisis exacto de la malla de tierra usando estas ecuaciones simplificadas. Sin embargo, los siguientes puntos pueden suministrar una guía general:

- El suelo puede considerarse uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de resistividades dados en las pruebas de campo es igual o menor al 30 por ciento. En este

caso un simple promedio de todos los valores de resistividades puede usarse en las ecuaciones (50) y (57).

- Cuando se determina un modelo equivalente de suelo de dos capas (ver 2.2.1.4.2) y el sistema de puesta a tierra esta en la capa superior, el valor de ρ_1 (resistividad del suelo de la capa superior) puede usarse en las ecuaciones simplificadas. Como se indico en 2.2.1.4.2 para valores negativos del factor de reflexión K, los diseños de mallas usando el análisis de suelo uniforme tendrán mayores voltajes de toque y paso que los diseños de mallas con el modelo equivalente de dos capas, si ρ_1 se usa como la resistividad del suelo en las ecuaciones (50) y (57).

2.4.5.2.4 - RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERIOR (ρ_s)

Una delgada capa superficial de piedra picada ayuda a limitar la corriente del cuerpo, por adición de resistencia a la resistencia equivalente del cuerpo. Valores desde 1000 a 5000 Ω/m se han usado para ρ_s .

2.4.5.2.5 - GEOMETRÍA DE LA MALLA

En general, las limitaciones de los parámetros físicos de la malla de tierra están basadas en las limitaciones económicas y físicas de la instalación de la malla.

El área del sistema de puesta a tierra es más importante que el factor geométrico en la determinación de la resistencia de la malla.

2.4.5.3 - INDICE DE PARÁMETROS DE DISEÑO

La tabla 6 contiene los parámetros usados para realizar el procedimiento de diseño sistema de puesta a tierra.

Tabla 6

Lista de parámetros para el diseño del sistema de puesta a tierra

Símbolos	Descripción	Unidades
$3I_0$	Corriente de falla simétrica en la subestación para dimensionar el conductor.	Amp
I_G	Corriente máxima de la malla que fluye entre la malla de tierra y la tierra circundante (incluyendo DC offset).	Amp
ρ	Resistividad del suelo.	$\Omega \cdot m$
ρ_s	Resistividad de la capa superficial.	$\Omega \cdot m$
h_s	Espesor de la capa superficial.	Mt
C_p	Factor de corriente, que proyecta futuras expansiones del sistema	
C_s	Factor de decrecimiento de resistividad de la capa superficial.	
t_c	Duración de la corriente de falla, para dimensionar el conductor de tierra.	Seg.
t_f	Duración de la corriente de falla, para determinar el factor de decrecimiento.	Seg.
t_s	Duración de shock, para determinar la corriente del cuerpo.	Mt
d	Profundidad de enterramiento del conductor de la malla.	Mt
D_1	Diámetro del conductor de la malla.	Mt^2
A	Area total encerrada por la malla de tierra.	
D	Espaciamiento entre los conductores paralelos.	
D_f	Factor de decrecimiento para determinar I_G .	
n	Numero de conductores paralelos en una dirección.	
K_m	Factor de espaciamiento, para el voltaje de la malla.	

K_s	Factor de espaciamento, para voltaje de paso.	
K_i	Factor de corrección por geometría de la malla.	
K_{ii}	Factor de corrección de peso que ajusta los efectos del interior de los conductores en la esquina de la malla.	
K_h	Factor de corrección de peso que recalca los efectos de la profundidad de la malla.	
L_S y L_m	Longitud total de conductor del sistema de puesta a tierra, incluyendo malla y jabalinas.	Mt.
R_g	Resistencia del sistema de puesta a tierra.	Ω
E_m	Voltaje de la malla en el centro de la esquina de la malla.	Volt.
E_s	Voltaje de paso entre un punto sobre la esquina mas lejana de la malla y un punto a 1m diagonalmente fuera de la malla.	Volt.
$E_{toque50}$	Voltaje tolerable de toque para una persona con 50Kg de peso corporal	Volt.
$E_{toque70}$	Voltaje tolerable de toque para una persona con 70Kg de peso corporal	Volt.
E_{paso50}	Voltaje tolerable de paso para una persona con 50Kg de peso corporal.	Volt.
E_{paso70}	Voltaje tolerable de paso para una persona con 70Kg de peso corporal.	Volt.

2.4.5.4 - PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

A continuación se presenta la secuencia de los pasos para el diseño de la malla de tierra.

- El mapa de propiedad y la localización general del plano de la subestación deben prever una buena estimación del área que será puesta a tierra. La prueba de resistividad del suelo, descrita en la sección 2.2.1, determinara el perfil de resistividad del suelo y el modelo de suelo necesario (uniforme o dos capas).

- El tamaño del conductor es determinado por la ecuación dada en 2.4.3.3 y 2.4.3.4. La corriente de falla $3I_o$ debe ser la máxima corriente de falla esperada en el futuro, que será conducida por algún conductor en el sistema de puesta a tierra, y el tiempo t_f deberá reflejar el máximo tiempo posible de despeje (incluyendo el back-up).
- Los voltajes de toque y paso tolerables son determinados por las ecuaciones dadas en 2.3.4.7. El cambio de tiempo t_s esta basado en el criterio de diseño del ingeniero.
- El diseño preliminar debe incluir un conductor que rodee toda el área donde estará el SPT, más un conductor adecuado en los cruces para proporcionar un acceso conveniente a la tierra de los equipos, etc.. La estimación inicial del espaciamiento del conductor y la ubicación de las jabalinas debe estar basado en la corriente I_G y en el área que ocupara el SPT.
- Se puede estimar la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra, esta puede ser determinada por la ecuación dada en 2.4.2.2 y 2.4.2.3. Para el diseño final, se debe considerar mas precisión en la estimación de la resistencia especialmente cuando son usadas jabalinas para alcanzar mas conductividad en el subsuelo. Para esta aplicación las ecuaciones (37) – (39) deben ser utilizadas incluyendo los efectos de dos diferentes resistencias del suelo, calculando la resistencia de la malla y la resistencia de las jabalinas. Con el análisis de calculo basado en los modelos de las componentes del sistema de puesta a tierra, puede calcularse la resistencia con un alto grado de exactitud asumiendo los cambios del modelo del suelo correctamente.
- La corriente I_G esta determinada por la ecuación (48). Con el propósito de prevenir sobre diseño del sistema de puesta a tierra, solamente la porción de la corriente de falla $3I_o$ que fluye a través de la malla hacia la tierra remota (y que contribuye en las tensiones de paso y toque y en el GPR) debe ser usada en el diseño de la malla. La

corriente I_G debe sin embargo, reflejar la peor falla, tipo y localización, el factor de decrecimiento y alguna futura expansión del sistema.

- Si el GPR del diseño preliminar es menor que el voltaje de toque tolerable no es necesario más análisis. Es necesario solamente adicionar el conductor requerido para proveer acceso a la conexión a tierra de los equipos.
- El cálculo de los voltajes de malla y de paso para el diseño pueden ser hechos por técnicas de análisis de aproximación o para mayor precisión por técnicas de análisis de cálculo.
- Si el cálculo de la malla es menor al voltaje de toque tolerable el diseño estará completo. Si el cálculo del voltaje de la malla es mayor que el voltaje de toque tolerable el diseño preliminar deberá ser revisado.
- Si ambos cálculos, el voltaje de toque y el de paso, son menores que los voltajes tolerables, el diseño solamente necesitara el refinamiento requerido para suministrar acceso a la conexión a tierra del equipo. Si no el diseño preliminar deberá ser revisado.
- Si cualquiera de los límites tolerables de toque y paso son excedidos, se requiere la revisión del diseño de la malla. Esta revisión debe incluir espaciamiento menor entre conductores, adición de jabalinas, etc.
- Después de satisfacer los requerimientos de los voltajes de toque y paso, se requiere adicionar conductor a la malla y jabalinas. Esto será necesario si el diseño de la malla no incluye conductor cerca de algún equipo que vaya a ser aterrado, y las jabalinas serán necesarias en la base de descargadores de sobretensiones y en los neutros de los transformadores, etc.

2.4.5.5 - CALCULO DE LOS VOLTAJES DE TOQUE Y PASO

Generalmente :

$$E_m = \frac{\rho * K_m K_i * I_G}{L} \quad (50)$$

$$E_s = \frac{\rho * K_s * K_i * I_G}{L} \quad (51)$$

Los valores de los voltajes de malla y de paso son obtenidos como un producto de factores geométricos (K_m y K_s respectivamente), un factor de corrección (K_i) el cual cuenta para el incremento de la densidad de corriente en los extremos de la malla, la resistividad del suelo (ρ) y el valor de la densidad de corriente por unidad de conductor enterrado (I_G/L).[35].

Las ecuaciones (50) y (51) no difieren de las ecuaciones usadas anteriormente; las formulas para K_m y K_s han sido cambiadas y desarrolladas diferentemente a las del pasado. Los cambios de las formulas para K_m y K_s pueden verse con más detalle en [56].

2.4.5.5.1 - VOLTAJE DE LA MALLA (E_m)

La relación entre K_m y E_m depende en gran parte de la densidad de corriente en el perímetro del conductor versus la densidad de corriente en el interior de este. Para reflejar estos efectos de densidad de corriente y para corregir algunas diferencias en la ecuación de K_m de años pasados, la función de K_m ha sido reevaluada y dos términos adicionales de peso han sido incluidos en la nueva formula, K_{ii} y K_h desarrollada por Sverak [54], además del término n el cual fue redefinido para poder analizar mallas de otras formas geométricas (rectangulares, en forma de L o en forma de T) este cambio fue desarrollado por Sverak [56],[35].

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} * \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 * d * D_1} + \frac{(D + 2 * d)^2}{8 * D * D_1} - \frac{d}{4 * D_1} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} * \ln \left(\frac{8}{\pi * (2 * n - 1)} \right) \right] \quad (52)$$

donde:

D_1 = diámetro del conductor de la malla

D = espaciamiento entre los conductores paralelos

d = profundidad de enterramiento de la malla

$K_{ii} = 1$, para mallas con jabalinas a lo largo del perímetro o con jabalinas tanto en las esquinas como en el interior del área de la malla, o

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^n}, \text{ para mallas con pocas jabalinas o sin ellas.}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{d}{h_0}}$$

$h_0 = 1\text{m}$ (profundidad de referencia de la malla)

$$n = n_I * n_{II} * n_{III} * n_{IV}$$

donde:

$n_{II} = 1$ para mallas cuadradas

$n_{III} = 1$ para mallas cuadradas y rectangulares

$n_{IV} = 1$ para mallas cuadradas, rectangulares, y en forma de L.

y

$$n_I = \frac{2 * Lc}{Lp}$$

$$n_{II} = \sqrt{\frac{Lp}{4 * \sqrt{A}}}$$

$$n_{III} = \left[\frac{Lx * Ly}{A} \right]^{0.7 * A / Lx * Ly}$$

$$n_{IV} = \frac{D_m}{\sqrt{Lx^2 + Ly^2}}$$

A : área de la malla en m².

Lc: longitud total del conductor que forma la malla en m.

Lp : longitud perimetral de la malla en m.

Lx: máxima longitud de la malla en la dirección x en m.

Ly: máxima longitud de la malla en la dirección y en m.

D_m: máxima diagonal de la malla en m.

El factor de corrección, K_i, es necesario para compensar el hecho de que el modelo matemático de N conductores paralelos no puede contar completamente con los efectos de la geometría de la malla de tener dos grupos de conductores paralelos que son perpendiculares entre sí e interconectados en los puntos de conexión de las esquinas.[35], [56].

Este factor de corrección ha tenido varias modificaciones, la ultima fue hecha por Thapar, aquí se hizo un ligero ajuste tanto en la pendiente como en el punto de partida de la curva.

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n \quad (53)$$

La longitud L para el caso del voltaje de la malla es llamada L_m y esta definida como la combinación de longitudes (longitud total de conductor, longitud total de las jabalinas y longitud de una jabalina) de los conductores y jabalinas que conforman la malla de puesta a tierra.

$$L_m = L_c + \left[1.55 + 1.22 * \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] * L_R \quad (54)$$

donde,

L_c : longitud total del conductor de la malla en m.

L_R : longitud total de todas las jabalinas en m.

L_r : longitud de cada jabalina en m.

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_G}{L} \quad (55)$$

2.4.5.5.2 - VOLTAJE DE PASO

El factor K_s esta basado en la geometría de la malla de tierra con o sin jabalina. Al igual que con el voltaje de la malla, K_s es proporcional al voltaje de paso E_s .

$$K_s = \frac{1}{\pi} * \left[\frac{1}{2 * d} + \frac{1}{D + d} + \frac{1}{D} * (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (56)$$

Donde las variables implicadas ya fueron definidas para K_m , y con la restricción de que $h \geq 0.25m$.

$$E_s = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{L_s} \quad (57)$$

Donde L_s al igual que L_m ha sufrido algunos cambios [56] quedando definida como:

$$L_s = 0.75 * L_c + 0.85 * L_R \quad (58)$$

2.4.5.6 - ESTIMACIÓN DE LA MÍNIMA LONGITUD DE CONDUCTOR ENTERRADO

Una simple ecuación puede ser desarrollada para permitir una determinación preliminar del conductor de la malla, necesario para tener el máximo voltaje de toque dentro del área puesta a tierra, bajo los límites de seguridad establecidos por las ecuaciones (34) y (34a) de 2.3.4.7.

Esto es hecho igualando la ecuación (55) con la ecuación (34) o (34a) de 2.3.4.7 como se muestra a continuación:

Para $E_m < E_{toque}$, combinando la ecuación (55) y (34), obtenemos:

$$\frac{K_m * K_i * \rho * I_G}{L} < (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (59)$$

Acomodando la ecuación (59) para L obtenemos:

$$L > \frac{K_m * K_i * \rho * I_G * \sqrt{t_s}}{(116 + 0.174 * C_s * \rho_s)} \quad (60)$$

Similarmente, para $E_m < E_{toque70}$, combinando y reordenando las ecuaciones (55) y (34) obtenemos:

$$L > \frac{K_m * K_i * \rho * I_G * \sqrt{t_s}}{(157 + 0.235 * C_s * \rho_s)} \quad (61)$$

En algunos casos pueden ocurrir ciertas situaciones tales como:

Que la longitud del conductor obtenida a partir de las ecuaciones (60) y (61) sea muy grande para ser económicamente factible.

Que la resistividad del suelo y la corriente total de tierra sean muy bajas, y la longitud obtenida a partir de las ecuaciones (60) y (61) pueda dar una longitud total de conductor que sea pequeña para conectar como es debido a todos los equipos que serán conectados a tierra. En este caso será necesario más conductor, aunque esto no sea necesario por razones de seguridad.

2.4.5.7 - REFINAMIENTO DEL DISEÑO PRELIMINAR

Si el cálculo basado en el diseño preliminar indica que pueden existir diferencias de potenciales peligrosos dentro de la subestación. Las siguientes correcciones deben ser estudiadas y aplicadas donde sea necesario:

- Disminuyendo la resistencia total de la malla disminuirá el valor del máximo potencial de la malla de tierra y de aquí el máximo potencial de transferencia. El camino más efectivo para disminuir la resistencia de la malla de tierra es incrementando el área ocupada por la malla de tierra. El manejo de la profundidad de la malla debe ser usado si el área disponible es limitada. Disminuyendo la resistencia en la subestación, puede o no disminuir apreciablemente los gradientes locales, dependiendo del método usado.
- Aplicando el control de gradiente. Reduciendo los espacios entre los conductores de la malla, pueden ser eliminados potenciales peligrosos dentro de la subestación. Los problemas en el perímetro pueden ser más difíciles, especialmente en una pequeña subestación donde la resistividad de la tierra es muy alta. Sin embargo, es posible, enterrar un conductor en el perímetro cerca de la línea de afuera de la malla de tierra, para asegurarse de que los elevados gradientes inmediatamente fuera del perímetro de la malla no contribuyan más a peligrosos contactos de toque. Otro efectivo y económico

camino para controlar los gradientes en el perímetro es incrementar la densidad de jabalinas en el perímetro. Esta densidad debe ir disminuyendo hacia el centro de la malla. También para controlar los gradientes del perímetro y los potenciales de paso se entierran dos o más conductores paralelos alrededor del perímetro a diversas profundidades a distancias que se incrementan a partir de los límites de la subestación. [1], [4], [41].

- Desviando una gran parte de la corriente de falla hacia otro sendero, por ejemplo, conectando cable de guarda a las líneas de transmisión o *disminuyendo la resistencia* al pie de las torres vecinas a la subestación. En condiciones como la segunda, los efectos sobre los gradientes de falla cerca del pie de las torres serán de peso.
- Limitar a valores bajos la corriente de cortocircuito que fluye por la malla de tierra. Si esto es *factible*, *naturalmente* disminuirán el voltaje total de la malla y todos los gradientes. Otros factores usualmente hacen esto impracticable, por otra parte, si esto es realizado se sacrifica el tiempo de despeje de la mayor falla, el peligro se ira incrementado en lugar de disminuido.

Usando uno o más de estos métodos donde sea necesario, el diseño puede estar completo para el propósito de construcción, quedando a juicio del diseñador, siempre y cuando la puesta a tierra sea factible y pueda ser instalada a menor costo y todo forme parte del trabajo general de construcción, sin la necesidad de adicionar luego más construcción.

2.4.6.- SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES POR EL METODO DE LAS IMÁGENES.

El análisis de campo generado por una malla de puesta a tierra, se puede realizar mediante una consideración no homogénea del suelo, mediante un modelo consistente de n capas horizontales indefinidas que tienen resistividades constantes (suelo de múltiples capas).

De este modo el cálculo de los potenciales producidos por una fuente puntual de corriente inmersa a cualquier profundidad, se puede realizar a través del principio de las imágenes eléctricas.

Con la aplicación de este método se puede obtener el potencial de la malla, la resistencia equivalente de esta y el voltaje en cualquier punto que se seleccione. Ver sección 2.6

2.5 - SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA LINEAS DE TRANSMISION

2.5.1 - CONSIDERACIONES DE DISEÑO[9]

Para una línea de transmisión la puesta a tierra esta formada por dos elementos principales:

- Las partes de la estructura que se encuentran enterradas en el terreno o que forman parte de la fundación.
- Electrodo y contrapesos adicionales o suplementarios.

Debido a que las partes metálicas de la estructura que están enterradas son relativamente cortas y se encuentran por lo general en forma vertical, se puede realizar una equivalencia entre esta parte y un electrodo concentrado. Esta equivalencia en algunos casos es sencilla, y en otros requiere de un análisis complicado.

En el caso de que la resistencia alcanzada por la estructura misma no sea suficiente, de acuerdo al diseño deseado, es necesario colocar otros elementos para así lograr la resistencia de puesta a tierra requerida.

La colocación de un sistema de puesta a tierra adicional para líneas de transmisión esta dirigido a minimizar problemas de operación del sistema de transmisión y a mantener condiciones de seguridad. Mas específicamente se requiere limitar las tensiones de toque y paso producidas por condiciones de fallas y conducir a tierra las corrientes producidas por impactos de descargas atmosféricas en el sistema, limitando el voltaje en la estructura y evitando el contorno del aislamiento.

Cualquier metal enterrado en el suelo sirve de electrodo de puesta a tierra, pero para obtener una adecuada puesta a tierra estos deben cumplir con ciertos requisitos. Los fundamentales son:

- Ser conductor eléctrico, no debe provocar gradientes de potencial peligrosos en el terreno, o entre terreno y objetos vecinos.
- Ser capaz de soportar corrientes de corto circuito y corrientes de descargas atmosféricas, sin deterioro de sus elementos durante el tiempo de duración del evento.
- Debe soportar esfuerzos mecánicos durante la instalación y la vida útil de la línea.
- Debe tener una resistencia de puesta a tierra tal que durante el evento de una descarga atmosférica no se produzca una descarga retroactiva. Este valor de resistencia debe mantenerse durante cualquier época del año.
- Debe soportar la acción corrosiva del suelo.
- El costo del sistema de puesta a tierra debe ser lo mas bajo posible.

En líneas de transmisión se usan electrodos instalados cerca de las estructuras y confinados en el derecho de paso de las mismas. Entre los esquemas utilizados están los convencionales y los no convencionales.

2.5.2 - ESQUEMAS

2.5.2.1 - ESQUEMAS CONVENCIONALES

2.5.2.1.1 - JABALINAS

Las jabalinas pueden ser de acero galvanizado o de copperweld. Son las más usadas en líneas de transmisión debido a su bajo costo de construcción, y a la pequeña área que se requiere para su colocación.

Los diámetros más comunes de las jabalinas son $5/8''$ o $3/4''$, mientras que las longitudes más frecuentes son de cinco, ocho y diez pies. Cabe mencionar que los diámetros de las jabalinas son seleccionados en base a su resistencia mecánica y no en base a las características eléctricas ya que la resistencia de puesta a tierra varía muy poco con el diámetro, produce una disminución de solamente el 20 por ciento en la resistencia de puesta a tierra.

En la práctica el diámetro de la jabalina debe ser tal que permita la inserción en el terreno sin que se doble. Si una sola jabalina no permite reducir la resistencia de puesta a tierra a un valor deseado, es preferible colocar más jabalinas que aumentar el diámetro de la misma, aunque el solapamiento del campo conductivo no permita que la reducción sea directamente proporcional al número de jabalinas colocadas en paralelo. En la figura #25 se muestra la reducción de la efectividad de las jabalinas en paralelo cuando aumenta el número de ellas.

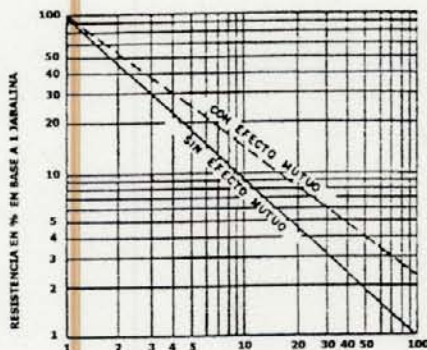


Figura # 25

Línea entera sin efecto mutuo

Línea punteada con efecto mutuo

2.5.2.1.2 - JABALINAS PROFUNDAS

Este es un método menos común. Se trata de alcanzar estratos de terreno más profundos cuando se conoce que éstos tienen menor resistividad específica que los estratos superiores.

Se utilizan jabalinas profundas, ensambladas en secciones de 10 pies u 8 pies, para tratar de alcanzar las capas de baja resistividad. Si la resistividad del suelo es uniforme la variación de la resistencia de puesta a tierra, es pequeña con relación a la longitud de la jabalina y por lo tanto convendría mucho más colocar varias jabalinas cortas en paralelo.

El uso adecuado de las jabalinas profundas es evidente cuando nos encontramos en una situación como la que se presenta en la figura # 26.

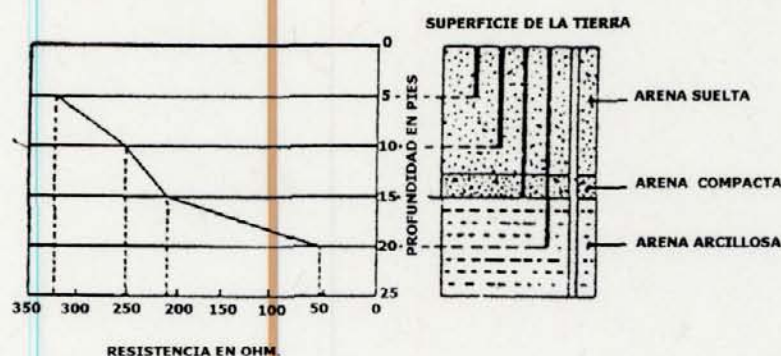


Figura # 26

Variación de la resistencia con relación a la profundidad

2.5.2.1.3 - CONTRAPESOS

Son conductores de acero galvanizado o de copperweld enterrados. El diámetro más usual es de 5/16" y N° 4 respectivamente, encontrándose muchas veces en combinación con jabalinas para lograr la resistencia de puesta a tierra deseada.

Son usados en áreas de alta resistividad con suelos conformados por rocas a poca profundidad y cuando capas profundas no poseen resistividades específicas más bajas.

Existen tres tipos de configuraciones de contrapeso que son las más comunes:

- Contrapesos continuos, que van enterrados a lo largo de la línea y unen las estructuras entre sí.
- Contrapesos radiales, están conectados a las patas de las estructuras y extendidos radialmente. En este tipo de configuración se usan radiales de 4 puntas o estrellas de 8 puntas.
- Contrapesos circulares, van enterrados alrededor de la estructura. Se utilizan en aquellos sitios donde se desea uniformizar los potenciales durante la falla (potenciales de toque y paso).

2.5.2.2 - ESQUEMAS NO CONVENCIONALES

Como esquemas no convencionales o no tradicionales se consideran aquellos esquemas no muy comunes que pueden contener, además de los elementos fundamentales, jabalinas y contrapesos, otros materiales adicionales u otras formas diferentes de instalación, a las utilizadas comúnmente.

El uso de los esquemas no convencionales hasta ahora se ha restringido a suelos de muy alta resistividad o suelos rocosos donde por lo general el costo de instalación y materiales se justifica. El principio básico de los esquemas no convencionales son las prácticas no constructivas o uso de materiales que aumenten las sales disueltas en el terreno y el porcentaje de humedad, disminuyendo así la resistividad en el área próxima al electrodo.

Entre los diferentes tipos de esquemas no convencionales se mencionan los siguientes:

- Tratamiento químico del suelo
- Electrodo con relleno de Bentonita
- Electrodo cargado químicamente
- Electrodo encapsulado en concreto
- Conductores de cobre en fundaciones de concreto

Estos esquemas están explicados en el Apéndice A.

2.5.3 - METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA LA PUESTA A TIERRA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.5.3.1 - PASOS PARA ANALIZAR UNA CONFIGURACIÓN DE ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA [12]

- Calcular la resistencia propia de cada elemento.
- Calcular las resistencias mutuas entre cada uno de los elementos que integran el sistema.
- Determinar la resistencia equivalente del arreglo.
- Determinar los potenciales.

Para la realización de los pasos anteriores se debe seguir la metodología descrita en el método de las imágenes explicado con detalle en la sección (2.6)

2.6- METODO DE LAS IMÁGENES.[7]

2.6.1.- GENERAL

Un enfoque exacto para predecir la resistencia de puesta a tierra de los electrodos enterrados es muy deseable a la hora de diseñar una subestación o una torre de transmisión. Esta no es una tarea fácil debido a las dos dificultades siguientes. Primero la tierra es un medio conductor no homogéneo con muchas capas diferentes. Los espesores de las capas y las conductividades son normalmente desconocidos y pueden variar de estación en estación climática anual. Segundo aun cuando se conozcan los espesores y las conductividades estos requieren un análisis extensivo y esfuerzos de cálculos con una computadora de alta velocidad.

Con la aplicación del método de las imágenes se pueden calcular la distribución de voltaje y la resistencia de puesta a tierra en un suelo de múltiples capas.

2.6.2.- DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

En un medio conductor homogéneo, una fuente puntual de corriente con resistencia unitaria produce una densidad de corriente \vec{J} a una distancia r_0 , debido a una simetría esférica.

$$J(r_0) = \frac{1}{4 * \pi * r_0^2} * r \quad (62)$$

La ley de Ohm requiere que $\vec{E} = \sigma \vec{J}$, donde σ es la conductividad. Por integración del campo eléctrico \vec{E} , el potencial a una distancia r_0 es

$$V_{(r_0)} = \frac{1}{4 * \pi * \sigma * r_0} \quad (63)$$

la cual cumple con la ley de Coulomb en un campo electrostático.

Para una forma arbitraria de electrodos en un medio conductor homogéneo, suponiendo que el potencial de superficie sea V_0 , la densidad de corriente que fluye hacia fuera desde la superficie del electrodo se puede resolver mediante las siguientes integrales,

$$V_0 = \iint_S G(r,r') J_{S(r')} ds' \quad (64)$$

donde $G(r,r') = 1/4\pi * \sigma * r_0$ es el potencial generado por un punto de corriente de resistencia unitaria como dado en (63), y $J_S(r')$ es la densidad de corriente desconocida alrededor del electrodo. La integral (64) se puede convertir en una ecuación matricial mediante la segmentación de la superficie del electrodo. Como resultado, la densidad de corriente desconocida se resuelve numéricamente a partir de la ecuación matricial. La corriente total que fluye desde el electrodo se calcula mediante la siguiente ecuación

$$I = \iint_S J_{S(r')} ds' \quad (65)$$

Por lo tanto la resistencia de los electrodos indicada arriba se puede calcular fácilmente mediante:

$$R_g = \frac{V_0}{I} \quad (66)$$

la función $G(r,r')$ en la ecuación integral (64) se conoce como la función Green dando el potencial de un punto origen de corriente con longitud unitaria. Para un medio conductor infinito

y homogéneo, la función de Green esta dada en (63). Si el medio se cambia en estructura, la distribución de potencial de una fuente puntual y la función de Green también cambiarán. Por ejemplo si una fuente puntual de corriente de resistencia unitaria es enterrada en un medio conductor infinito como se muestra en la figura # 27 entonces la función de Green en la mitad del espacio conductor es obviamente la suma de los potenciales de Coulomb

$$G_{(r,r')} = \frac{1}{4 * \pi * \sigma_1} * \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_0'} \right) \quad (67)$$

donde las distancia r_0 y r_0' son medidas desde el punto de observación hasta la fuente origen y su imagen respectivamente

Si la tierra tiene dos capas de diferentes conductividades y una carga puntual de resistencia unitaria es enterrada en la capa superior como se muestra en la figura # 28, las múltiples reflexiones debido a las interfaces de $z = 0$ y $z = h_1$ generan infinito numero de imágenes de resistencia decreciente. Siguiendo la ecuación (67) la distribución de potencial en la capa superior es evidentemente la suma de los potenciales de Coulomb, debido a la fuente y a una serie infinita de imágenes. La función de Green en la capa superior esta descrita en la siguiente ecuación

$$G_{(r,r')} = \frac{1}{4 * \pi * \sigma_1} * \left[\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_0'} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{r_{n1}} + \frac{1}{r_{n2}} + \frac{1}{r_{n3}} + \frac{1}{r_{n4}} \right) \right] \quad (68)$$

se puede notar que en la figura # 28 cada conjunto de 4 imágenes de orden n ésimo tiene una misma resistencia K^n y los mismos desplazamientos mas menos z' a partir de las posiciones de z_n .

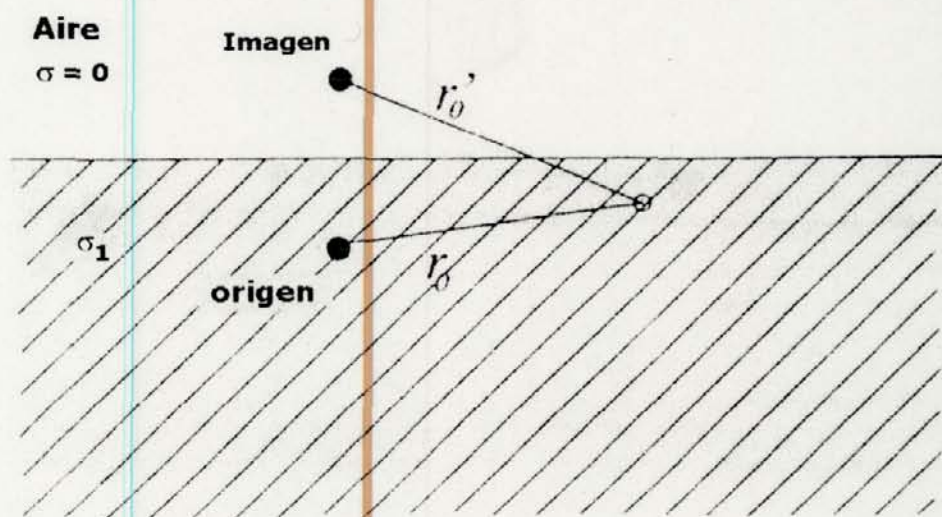


Figura 27

Fuente de corriente origen en un medio conductivo

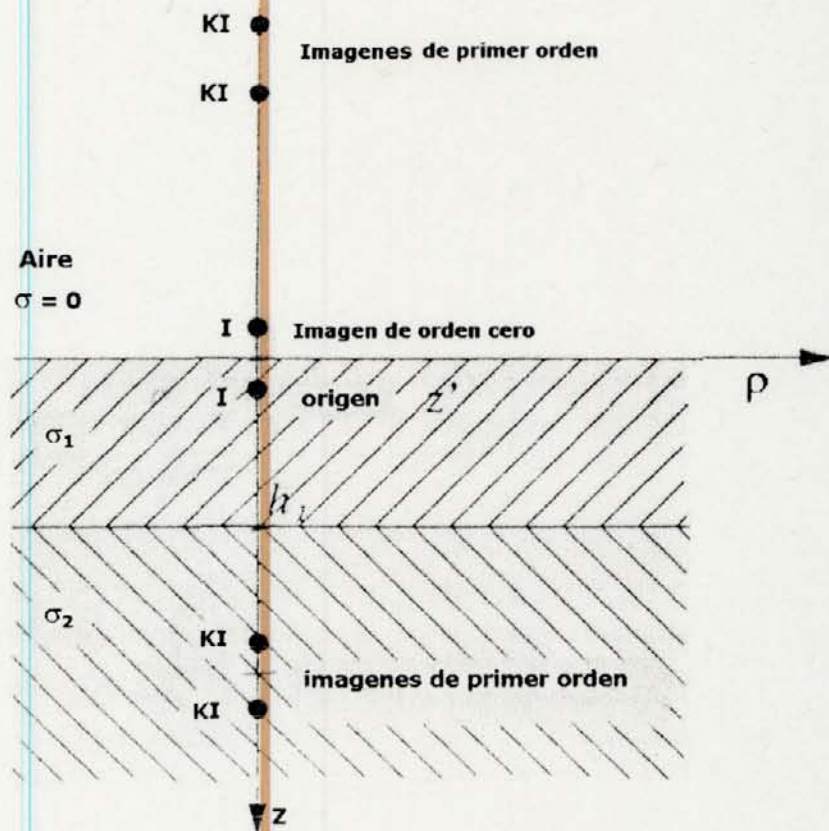


Figura 28

Fuente de corriente en suelo de dos capas, mostrando solo las imágenes de primer orden y de orden cero

2.6.3.- IMPLEMENTACIÓN DEL METODO DE LAS IMÁGENES.[12]

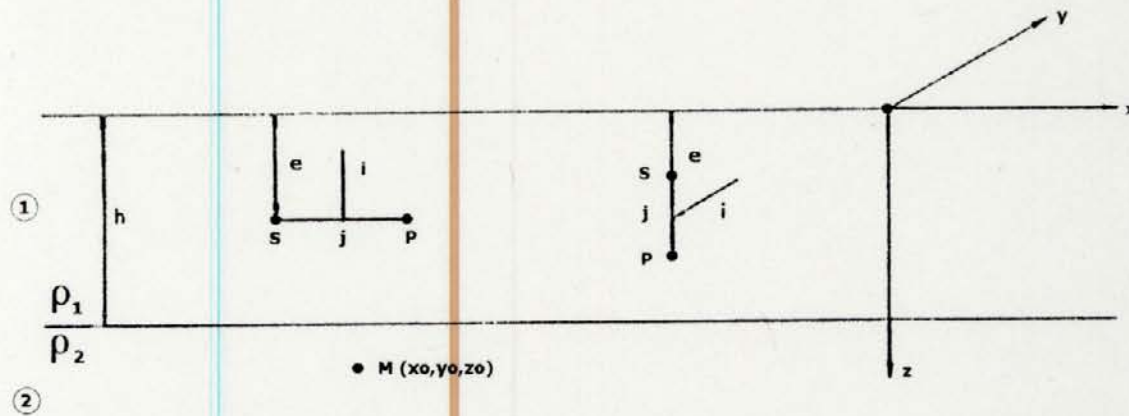


Figura # 29

Para el desarrollo de las formulas que se muestran abajo se utiliza el modelo de suelo de dos capas.

En la figura se muestra una línea "j" enterrada en el suelo (la línea puede estar horizontal o verticalmente) a una profundidad "D", a la cual se le inyecta una corriente "I", produciendo un potencial eléctrico en el punto "M".

Las expresiones que definen el potencial producido en "M" varían de acuerdo a la ubicación tanto de la línea "j" como del punto "M", como puede observarse a continuación:[12]

- Si "j" está en la primera capa y "M" está en la primera capa.

$$V_j(M) = \frac{I * \rho_1}{4 * \pi * L_j} * \left\{ \varphi_{(0)} + \varphi_{(D)} + \sum_{n=1}^{\infty} [\varphi_{(n*H)} + \varphi_{(n*H+D)} + \varphi_{(-n*H)} + \varphi_{(-n*H+D)}] * K^n \right\} \quad (69)$$

- Si "j" esta en la primera capa y "M" esta en la segunda capa.

$$V_j(M) = \frac{I * \rho_1 * (1 + K)}{4 * \pi * L_j} * \left\{ \varphi_{(0)} + \varphi_{(D)} + \sum_{n=1}^{\infty} [\varphi_{(n*H)} + \varphi_{(n*H+D)}] * K^n \right\} \quad (70)$$

- Si "j" esta en la segunda capa y "M" esta en la primera capa

$$V_j(M) = \frac{I * \rho_2}{4 * \pi * L_j} \left\{ \varphi_{(0)} + \varphi_{(D)} + \sum_{n=1}^{\infty} [\varphi_{(-n*H)} + \varphi_{(n*H+D)} - \varphi_{(-n*H+H)} - \varphi_{(n*H-H+D)}] * K^n \right\} \quad (71)$$

- Si "j" esta en la segunda capa y "M" esta en la segunda capa.

$$V_j(M) = \frac{I * \rho_2}{4 * \pi * L_j} * \left[\varphi_{(0)} + \varphi_{(D)} + \sum_{n=1}^{\infty} [\varphi_{(n*H+D)} - \varphi_{(n*H-2*H+D)}] * K^n \right] \quad (72)$$

donde:

L_j : longitud del segmento "j".

$\varphi_{(X)}$: Varia con la ubicación del punto "M".

$\varphi_{(X)}$, para "j" en posición horizontal:

$$\varphi_{(X)} = Ln \left[\frac{(L_j - \mu_0) + \sqrt{(L_j - \mu_0)^2 + \nu_0^2 + \varpi_0^2 + (2 * X + \varpi_0)^2}}{-\mu_0 + \sqrt{\mu_0^2 + \nu_0^2 + \varpi_0^2 + (2 * X + \varpi_0)^2}} \right] \quad (73)$$

$$\nu_0 = -(X_0 - X_S) * \text{sen } \alpha + (Y_0 - Y_S) * \text{cos } \alpha \quad (74)$$

$$\mu_0 = (X_0 - X_S) * \text{cos } \alpha + (Y_0 - Y_S) * \text{sen } \alpha \quad (75)$$

$$\varpi_0 = Z_0 - Z_s \quad (76)$$

$$\alpha = \text{arctg} \frac{Y_p - Y_s}{X_p - X_s} \quad (77)$$

Para "j" vertical

$$\varphi_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{Ln} \left[\frac{\sqrt{2} * (L_j - \mu_0 - X) + \sqrt{(L_j - \mu_0)^2 + \nu_0^2 + \varpi_0^2} + [2 * X - (L_j - \mu_0)^2]}{-\sqrt{2} * (\mu_0 + X) + \sqrt{\mu_0^2 + \nu_0^2 + \varpi_0^2} + [2 * X + \mu_0]^2} \right] \quad (78)$$

$$\nu_0 = Y_0 - Y_s \quad (79)$$

$$\mu_0 = Z_0 - Z_s \quad (80)$$

$$\varpi_0 = -X_0 + X_s \quad (81)$$

Las ecuaciones anteriores son básicas para el cálculo de resistencias de puesta a tierra y potenciales producidos por un electrodo de una configuración cualquiera.

Es importante señalar que cuando a un sistema de puesta a tierra compuesto de electrodos horizontales y/o verticales, de longitud l , enterrados en una o en las dos capas de resistividades, se le inyecta una corriente total I , esta se distribuye igualmente en cada electrodo a razón de I/L amper./metro, siendo mas intensa en sus extremidades. Para este análisis se asume que la densidad de corriente en cada electrodo es constante.

2.6.4. – PROCEDIMIENTO PARA APLICAR EL METODO

- Se divide y se numera el sistema de puesta a tierra en n elementos sabiendo que en cada elemento se considera una densidad de corriente δ constante en todos sus puntos.
- Se calcula la resistencia mutua entre dos segmentos designada por $R_{jk} = R_j(M_k)$, o sea, entre el segmento j y un punto medio de la superficie del segmento k equivale al potencial producido en k cuando en j se inyecta una corriente “ I ” de 1 amper por metro. Por lo tanto $R_j(M_k)$ se obtiene a partir de las ecuaciones (69 a 72) haciendo $I / j = 1$.
- Se calcula de la resistencia propia de un segmento designada por $R_{jj} = R_j(M_j)$, o sea, entre el segmento j y el punto medio de éste, se utiliza el mismo procedimiento explicado para las resistencias mutuas teniendo en cuenta en las coordenadas del punto M el radio del conductor para evitar de esta manera que las ecuaciones se indeterminen.
- Una vez obtenidas todas las resistencias mutuas y propias del arreglo se plantea el siguiente sistema de ecuaciones.[12],[8]

$$R_{11}*\delta_1 + R_{12}*\delta_2 + \dots + R_{1n}*\delta_n = V$$

$$R_{21}*\delta_1 + R_{22}*\delta_2 + \dots + R_{2n}*\delta_n = V$$

$$R_{n1}*\delta_1 + R_{n2}*\delta_2 + \dots + R_{nn}*\delta_n = V \quad (82)$$

$$\delta_1*L_1 + \delta_2*L_2 + \dots + \delta_n*L_n = I$$

donde

I : es la corriente dispersa en el suelo

V : es el potencial del sistema de puesta a tierra.

δ : es la densidad de corriente en cada segmento.

L : longitud del segmento.

Con el cual se obtendrán los valores de densidades de corrientes δ y del potencial “ V ” del sistema de puesta a tierra.

- Conocido el valor de la corriente “ I ”. La resistencia equivalente del arreglo se obtiene de:

$$R = V / I \quad (83)$$

- Para conocer el potencial en cualquier punto M del suelo, este puede ser calculado como

$$V(M) = \sum_{j=1}^n V_j(M) \quad (84)$$

CAPITULO III
PROGRAMA

3.1.- GENERAL

En el programa que se desarrollo se implementaron dos metodologías existentes para el diseño de puestas a tierra las cuales son el método de las Imágenes[12]y la norma de seguridad para subestaciones de la IEEE Std 80 1986[35] con las modificaciones hechas en el año de 1996 publicadas en una de las revistas que hace la IEEE[56].

3.2.- CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

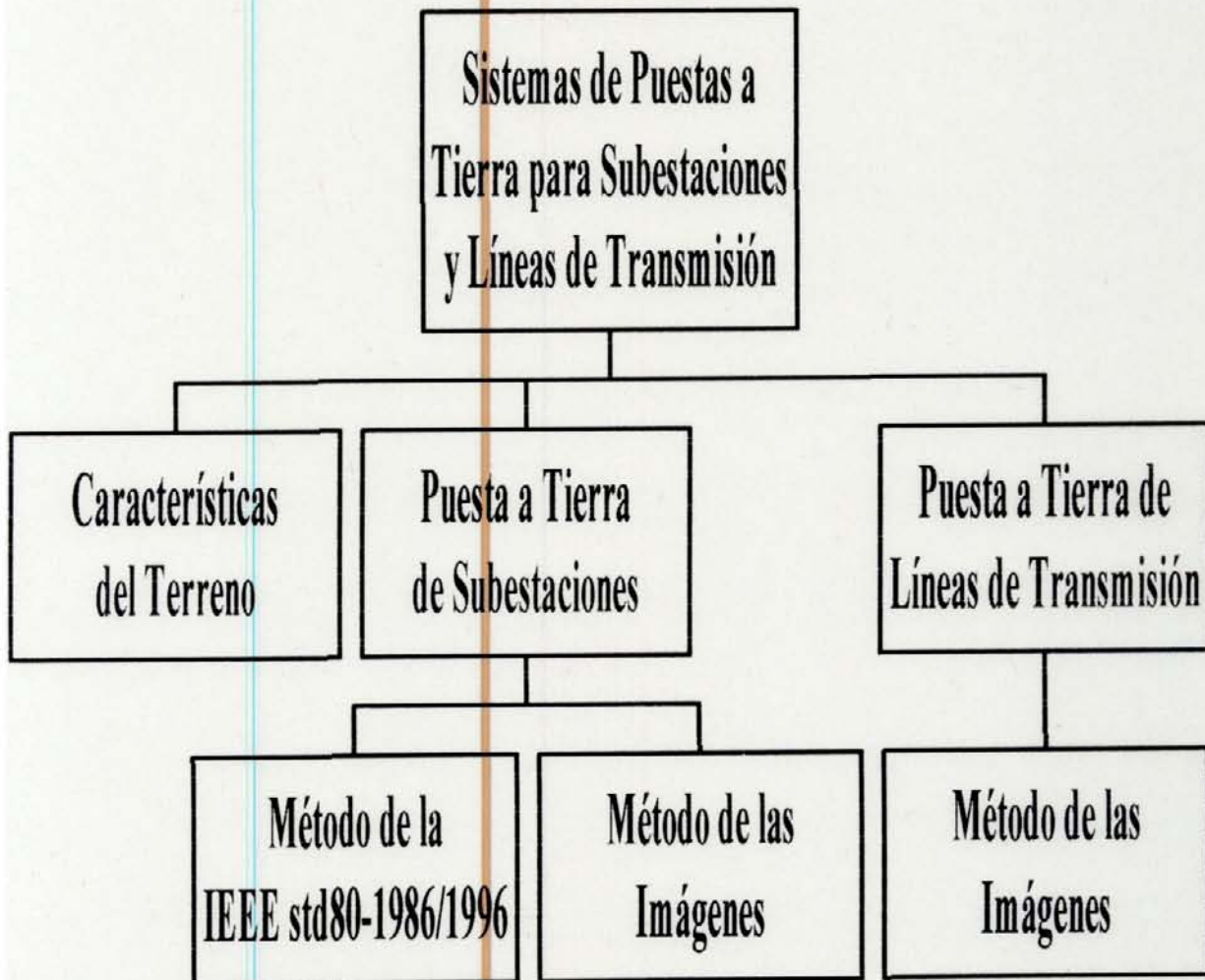
- Esta realizado en Visual Basic 6.0
- Es una aplicación para el sistema operativo Windows 9X.
- Es un programa amigable. Ya que la manera de ingresar los datos es sencilla, y la presentación de los resultados obtenidos es clara, por lo tanto hace que el análisis de estos sea rápido y simple.

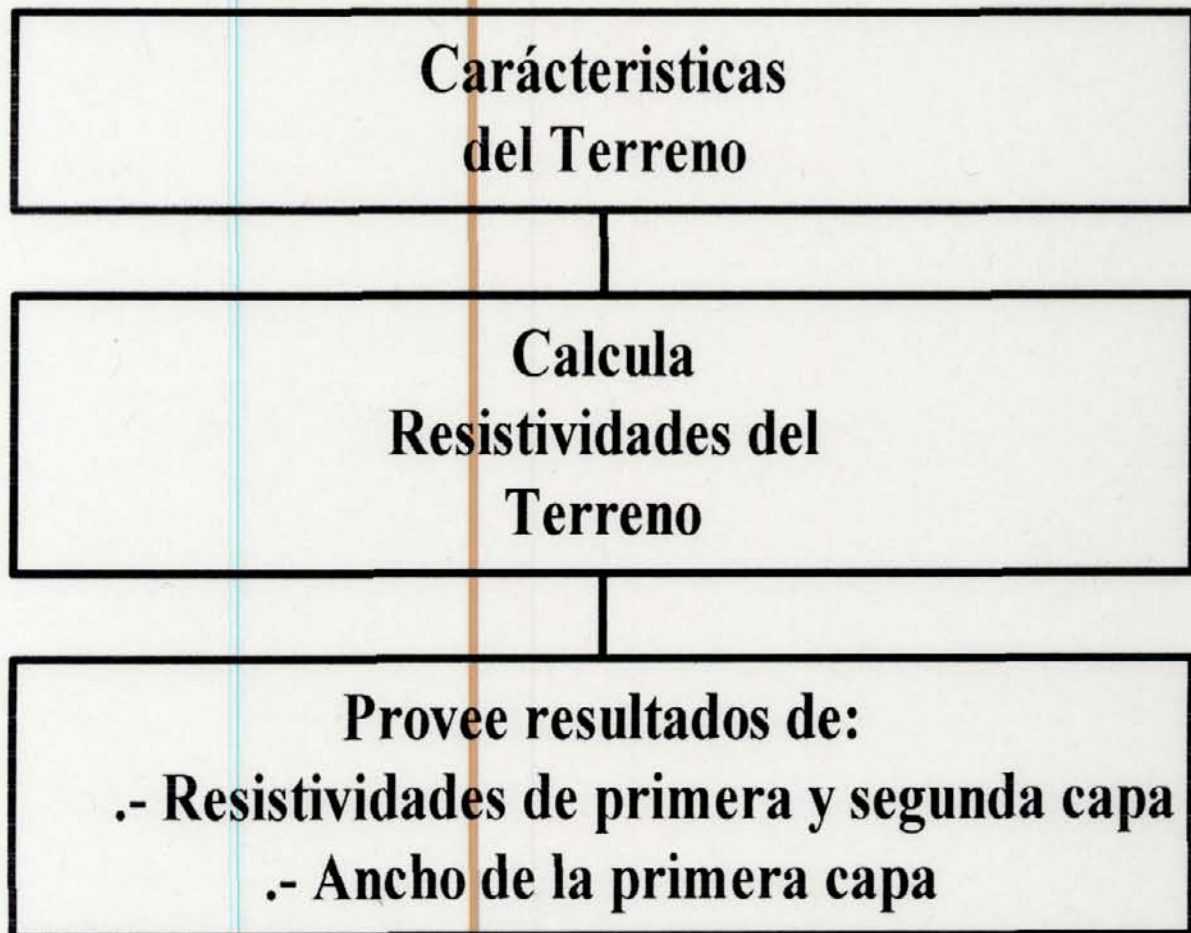
3.3.- REQUERIMIENTOS BÁSICOS

- Un procesador Pentium de 166 MHz.
- 32 Mb de memoria RAM.
- 15 Mb de espacio físico en Disco Duro
- Mouse.

3.4.- ORGANIGRAMA

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA





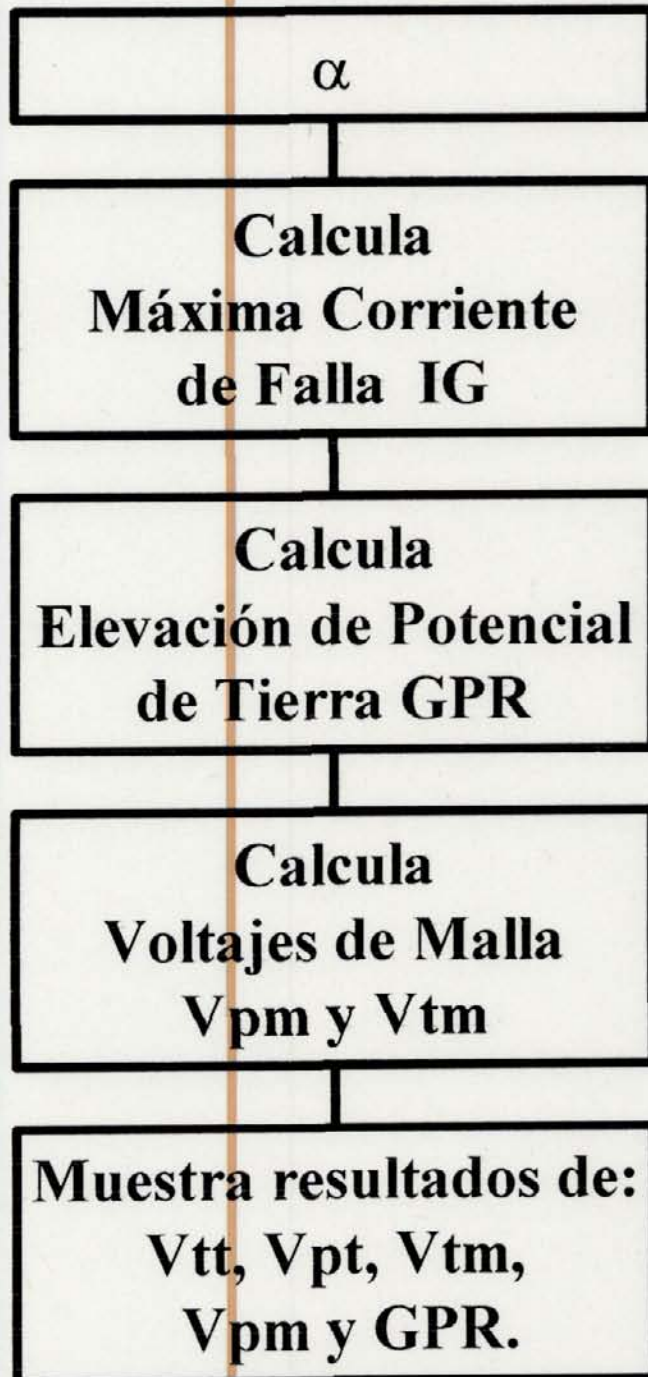
**Método de la
IEEE std80-1986/1996**

**Determina Calibre
del Conductor**

**Calcula
Voltajes Tolerables
(V_{tt} y V_{pt})**

**Calcula
Resistencia de
Puesta a Tierra**

α



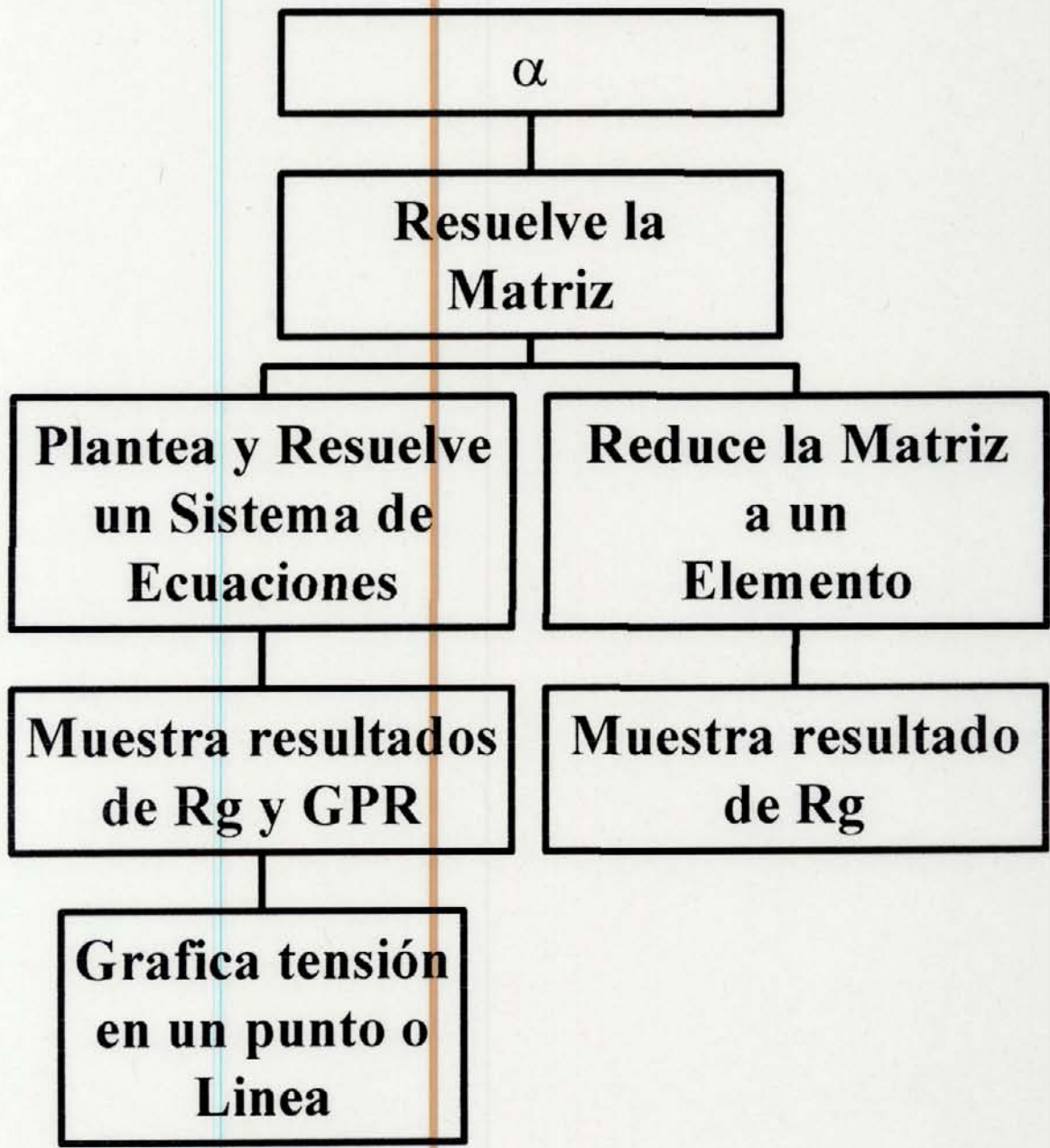
**Método de las
Imágenes**

**Divide el arreglo
en n elementos**

**Calcula
Resistencias Propias
y Mutuas (R_p , R_m)**

**Genera la
Matriz de Resistencias**

α



3.5.- CONSIDERACIONES PARA ANALIZAR LOS RESULTADOS

Por la implementación de la metodología de la IEEE[35], [56] se obtienen los siguientes resultados:

Voltajes de toque tolerable (V_{tt})

Voltaje de paso tolerable (V_{pt})

Voltaje de toque en la malla (V_t)

Voltaje de paso en la malla (V_p)

Elevación de potencial de tierra (GPR)

Los cuales deben ser analizados por el usuario de la siguiente manera, para verificar si el diseño propuesto que se está analizando es seguro:

Voltaje de toque tolerable < Voltaje de toque en la malla,

Voltaje de paso tolerable < Voltaje de paso en la malla

O que:

La elevación de potencial a tierra < Voltaje de toque tolerable

Una vez verificadas estas comparaciones, si no se cumplen, el usuario puede hacer alguna de las siguientes modificaciones para que el diseño mejore:

Se puede aumentar o disminuir el ancho de la retícula,

Adicionar jabalinas y

Variar la longitud de las jabalinas o su diámetro.

Por la implementación del método de las Imágenes se obtienen los resultados de.

La Elevación de potencial a tierra (GPR),

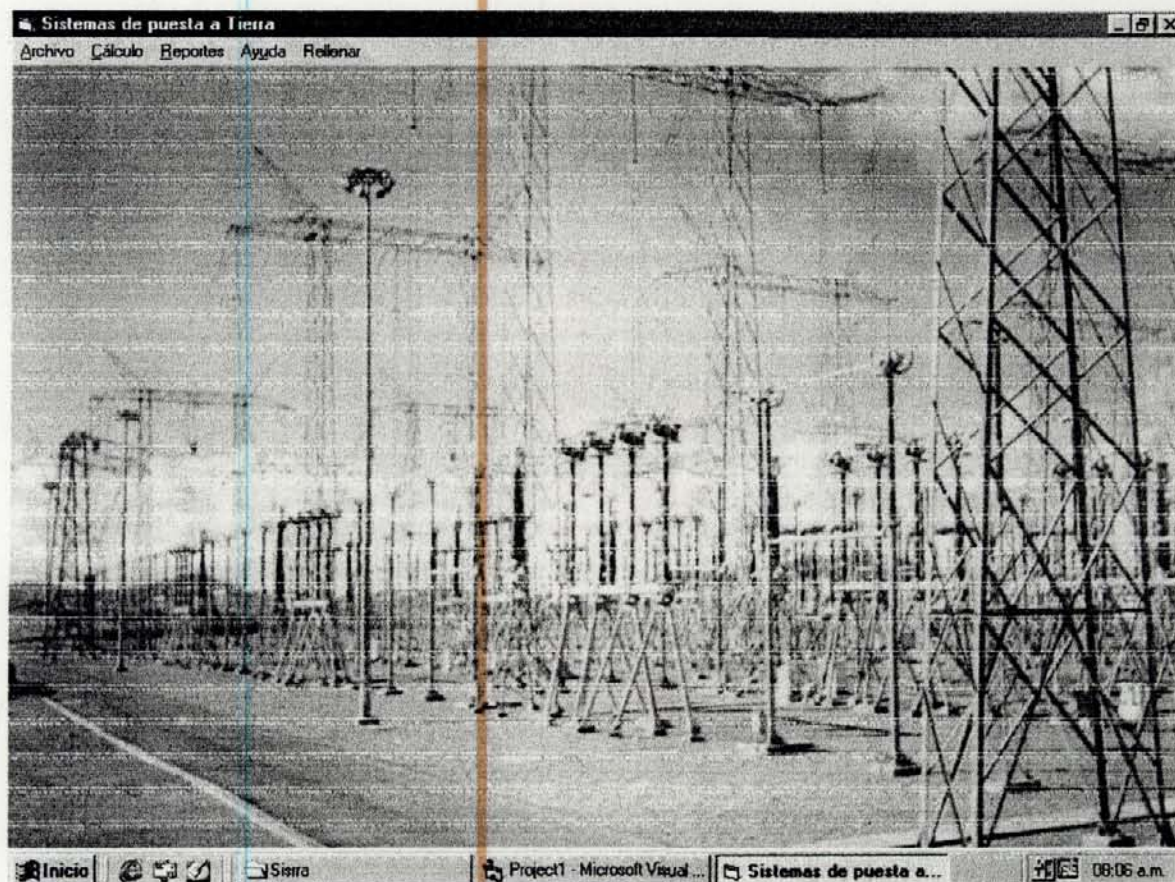
La resistencia de puesta a tierra por reducción de matriz y

La resistencia de puesta a tierra por la resolución del sistema de ecuaciones.

Por otro lado también podemos obtener la tensión superficial en cualquier punto del arreglo y la gráfica de tensión en una línea ya sea en el eje de las "X" o en el eje de las "Y". A través de los cuales se pueden hacer análisis de las distintas tensiones que se pueden presentar en el arreglo de puesta a tierra

3.6.- PANTALLAS DEL PROGRAMA

- PANTALLA INICIAL



- **FORMULARIO # 1**

Sub-Estaciones (IEEE STD 80-1986) / Paso 1 de 4

Tipo de Conductor

Corriente de Corto Circuito RMS [kA]

Duración de la corriente de Falla [s]

Factor de Capacidad Térmica [J/°C-cm³]

Resistividad del Cable a Temperatura de referencia [m-ohm/cm³]

Coefficientes

Térmico de Resistividad a 0 °C

Térmico de Resistividad a Temperatura de Referencia

Temperaturas [°C]

Máxima permitida

Ambiente

Referencia

- **FORMULARIO # 2**

Sub-Estaciones (IEEE STD 80-1986) / Paso 2 de 4

Capa de Piedra Picada

Resistividad [ohm-m]

Ancho [m]

Constante dependiente del Peso del Individuo

Características del Suelo

Autocalcular

1ra Capa [ohm-m] 2da Capa [ohm-m]

Profundidad de la 1ra Capa [m]

- FORMULARIO # 3

Sub-Estaciones (IEEE STD 80-1986) / Paso 3 de 4

Geometría de la Malla

Longitudes [m]

La Ld

Lb Le

Lc Lf

Longitudes Máximas [m]

En el Eje X

En el Eje Y

Diagonal

Ancho de la Redicula [m]

- FORMULARIO # 4

Sub-Estaciones (IEEE STD 80-1986) / Paso 4 de 4

Corriente Simétrica de Falla (RMS) [A]

Factor divisor de Corriente

Factor de corrección por incremento en el nivel de Corto Circuito

Constante de tiempo Subtransitoria [s]

Profundidad de Referencia [m]

Profundidad de Enterramiento [m]

¿Contiene Jabalinas?

Jabalinas

Cantidad Longitud Promedio [m]

Diámetro [m]

- FORMULARIO # 5

Sub-Estaciones IEEE STD 80-1986 / Resultados

Valores Calculados	
Tensión de Toque Tolerable	664.3719
Tensión de Paso Tolerable	2.165.3413
Tensión de Toque de la Malla	463.1965
Tensión de Paso de la Malla	274.7292
GPR	2.470.1857

Parámetros

Numero de Jabalinas: Longitud de la Jabalinas:

Diámetro de las Jabalinas:

Ancho de la Retícula:

Buttons:

- FORMULARIO # 6

Sub-Estaciones / Método de la Imágenes

- FORMULARIO # 7

Malla (Propiedades)

Profundidad [m] Corriente [A]

Radio del Conductor [m]

Eje X

Longitud [m] N° de Segmentos

Eje Y

Longitud [m] N° de Segmentos

Características del Suelo

Resistividad 1ª Capa [ohm/m] Profundidad 1ª Capa [m]

Resistividad 2ª Capa [ohm/m]

- FORMULARIO # 8

Sub-Estaciones / Método de las Imágenes

Jabalinas

¿Desea asignar una Jabalina?

- FORMULARIO # 9

The screenshot shows a software window titled "Sub-Estaciones / Método de la Imágenes". Inside, a dialog box titled "Jabalinas (Propiedades)" is open. It contains the following fields and controls:

- Longitud [m]:
- Radio [m]:
- Posición:
 - Eje X:
 - Eje Y:
- Buttons: "Aceptar" and "Cancelar"

On the right side of the main window, there are four buttons: "Datos", "Calcular", "Cancelar", and "Aceptar".

- FORMULARIO # 10

The screenshot shows the same software window "Sub-Estaciones / Método de la Imágenes". A dialog box titled "Método de la Imágenes / Resultados" is open, displaying the following data:

GPR	809.7573
RG (Imágenes)	8.097572
RG (Reducción)	8.097571

There is an "Aceptar" button next to the data. On the right side of the main window, the buttons "Datos", "Calcular", "Cancelar", and "Aceptar" are visible.

- FORMULARIO # 11

Líneas de Transmisión

Datos

Calcular

Aceptar

Cancelar

Tensión

- FORMULARIO # 12

Líneas de Transmisión / Datos

Características de la Base

Longitud en el Eje X [m]

Longitud en el Eje Y [m]

Profundidad de Enterramiento [m]

Corriente de Corto Circuito [A]

Aceptar

Cancelar

Características del Suelo

¿AutoCalcular?

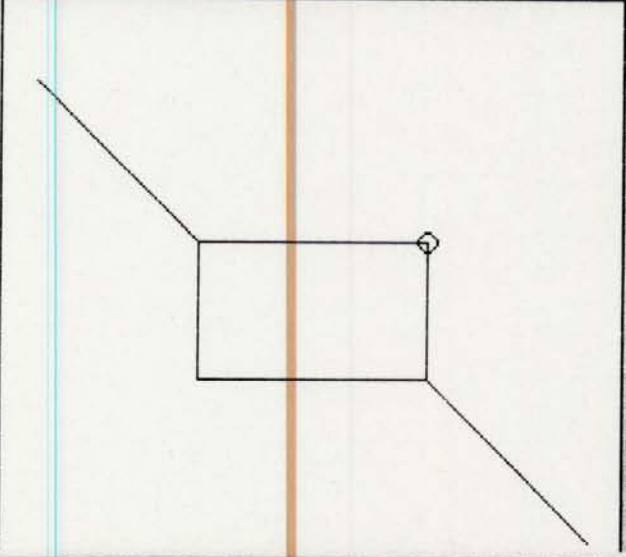
Resistividad de la 1ra Capa [ohm-m]

Resistividad de la 2da Capa [ohm-m]

Profundidad de la 1ra Capa [m]

- FORMULARIO # 13

Lineas de Transmision



Datos
Calcular
Aceptar
Cancelar
Tension

Lineas de Transmision / Adición de Elemento

Jabalina Contrapeso

Longitud [m]

Radio [m]

Angulo [°]

Aceptar
Cancelar

- FORMULARIO # 14

Líneas de Transmisión / Resultados

GPR	9673.96	<input type="button" value="Aceptar"/>
RG (Imágenes)	96.7396	<input type="button" value="Datos"/>
RG (Reducción)	96.7396	<input type="button" value="Calcular"/>

- FORMULARIO # 15

Características del Suelo

Cantidad de Mediciones

Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	<input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Resultados"/>
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>	

• FORMULARIO # 16

Cantidad de Mediciones

Distancia [m]	<input type="text" value="1"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text" value="154"/>	<input type="button" value="Calcular"/>
Distancia [m]	<input type="text" value="5"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text" value="75"/>	
Distancia				<input type="button" value="Resultados"/>

Características del Suelo / Resultados

Resistividad de la 1ra Capa 157.789 [ohm]

Resistividad de la 2da Capa 27.9474 [ohm]

Profundidad de la 1ra Capa 2.7771 [m]

Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>
Distancia [m]	<input type="text"/>	Resistencia Aparente [ohm]	<input type="text"/>

3.7.-VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para validar los resultados obtenidos por el programa SISRRA elaborado en este trabajo, se desarrollaron algunos casos tanto para líneas de transmisión como para subestaciones y se compararon con otros valores dados por otros métodos o programas.

3.7.1.- CASOS EVALUADOS PARA SUBESTACIONES:

- Caso A:

Una malla rectangular de área: $84\text{m} * 63\text{m}$, enterrada a una profundidad de 0.5m con espaciamentos iguales entre conductores de 7m . Se considera suelo homogéneo de resistividad $400 \Omega\text{-m}$. La corriente de corto circuito es de 3180A con una duración de 0.5s y un factor divisor de corriente entre la corriente de la malla y la corriente que retorna a la fuente igual a 0.6 y un factor de corrección por posible crecimiento en la subestación de 1 . Posee una capa de piedra picada con una resistividad de $2500\Omega\text{-m}$ y un ancho de 0.102m , se utiliza conductor de material copperweld con una temperatura máxima de fusión de 700°C . Se considera un peso del individuo de 70Kg .

- Caso B:

Es el mismo Caso A adicionando 38 jabalinas de 10 m de longitud y 0.016m de diámetro.

- Caso C:

Reticula cuadrada de $8\text{ m} * 8\text{ m}$, enterrada a 0.5m de profundidad, en un suelo homogéneo de resistividad $1000 \Omega\text{-m}$, elaborada con conductor $4/0$ de radio 0.007m , la corriente drenada por la retícula es de 234 A .

- Caso D:

Malla cuadrada de 24m * 24m con un ancho de retícula de 8m, enterrada a 0.5m de profundidad, en un suelo homogéneo de resistividad 1000 Ω -m, elaborada con conductor 4/0 de radio 0.007m, la corriente drenada por la retícula es de 728 A.

- Caso E:

Malla cuadrada de 56 m * 56 m con un ancho de retícula de 8m, enterrada a 0.5m de profundidad, en un suelo homogéneo de resistividad 1000 Ω -m, elaborada con conductor 4/0 de radio 0.007m, la corriente drenada por la retícula es de 1781 A.

3.7.2.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS

- Caso A:

Valores Calculados	Publicación IEEE Transaction on Power Delivery (IEEE80-1986/1996)[56]	SISRA Método de la IEEE80-1986/1996
Voltaje de Toque Et	943.59	936.3681
n	11.344	11.344
Lm	1659	1659
Ki	2.323	2.3229
Kii	0.57	0.5767
Km	0.883	0.8760
Voltaje de Paso Ep	578.68	578.8303
n	11.344	11.344
Ls	1244.3	1244.25
Ks	0.406	0.4061

Valores Calculados	SISRA	
	Método de la IEEE80-1986/1996	Método de las Imágenes
Elevación de Potencial GPR	4651.7516	4783.14
Resistencia de Puesta a Tierra R_G	2.4374	2.5068

- Caso B:

Valores Calculados	Publicación IEEE Transaction on Power Delivery (IEEE80-1986/1996)[56]	SISRA Método de la IEEE80-1986/1996
Voltaje de Toque E_t	590.50	586.569
n	11.344	11.344
Lm	2292.2	2292.1523
Ki	2.323	2.3229
Kii	1.0	1.0
Km	0.763	0.7582
Voltaje de Paso E_p	459.14	459.5371
n	11.344	11.344
Ls	1567.3	1567.25
Ks	0.406	0.4061

Valores Calculados	SISRRA	
	Método de la IEEE80-1986/1996	Método de las Imágenes
Elevación de Potencial GPR	4439.8468	4161.3640
Resistencia de Puesta a Tierra R_G	2.3264	2.1810

La resistencia calculada por el método de las imágenes se calculo tanto por reducción de matriz como por resolución del sistema de ecuaciones arrojando aproximadamente el mismo resultado.

- Casos C, D y E:

Casos	Valores Calculados	Publicación IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems[32]	SISRRA
C	Resistencia de Puesta a Tierra (Ω)	64.16	64.43578 (Met. Imag.)
			64.43578 (Met. Reduc)
	Elevación de Potencial de la Malla (V)	15000	15077.97
D	Resistencia de Puesta a Tierra (Ω)	20.6	20.24393 (Met. Imag.)
			20.24393 (Met. Reduc)
	Elevación de Potencial de la Malla (V)	15000	14737.58
E	Resistencia de Puesta a Tierra (Ω)	8.42	8.307168 (Met. Imag.)
			8.307162 (Met. Reduc)
	Elevación de Potencial de la Malla (V)	15000	14795.07

3.7.3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

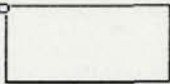
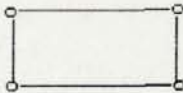
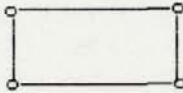
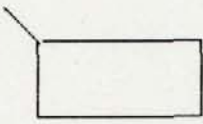
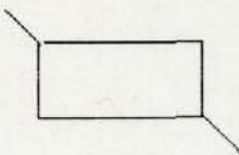
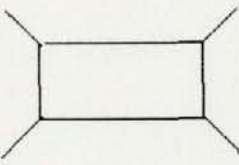
Como se observa en las tablas de resultados de los casos A y B ,hay diferencias al comparar los valores de la publicación de la IEEE [56] y SISRRA (usando la metodología de la IEEEStd80-1986/1996), esta se debe a que en la publicación de la IEEE asumen una condición especial de diseño en la selección del conductor, que el programa SISRRA no toma y esto se ve reflejado en el valor de Km, factor que depende de la geometría y en cuya formula interviene el diámetro del conductor .En consecuencia esto afecta el valor de la tensión de toque.

Como se puede observar, las variaciones entre los valores comparados se debe a una diferencia de criterios al hacer los cálculos. En consecuencia se puede afirmar que la metodología de la IEEE implementada en SISRRA arroja valores que cumplen con la norma .

En las tablas de los casos A y B, también se comparan los valores obtenidos por SISRRA en sus dos metodologías (IEEE 80-1986/1996 e Imágenes) observándose, pequeñas diferencias entre los resultados.

En la tabla de resultados de los casos C, D y E, se observa que los valores de resistencia de puesta a tierra son prácticamente iguales y que entre los valores de tensión se presenta una pequeña variación, que no es relevante.

3.7.4.- CASOS EVALUADOS PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Caso #	Características	Figura
1	$\rho_1 = 33\Omega\text{-m}$ $\rho_2 = 322\Omega\text{-m}$ $H = 4.2\text{m}$ $L_{\text{Jabalina}} = 3\text{m}$	
2	$\rho = 470\Omega\text{-m}$ $L_{\text{Jabalina}} = 6\text{m}$	
3	$\rho_1 = 530\Omega\text{-m}$ $L_{\text{Jabalina}} = 6\text{m}$	
4	$\rho_1 = 33\Omega\text{-m}$ $\rho_2 = 322\Omega\text{-m}$ $H = 4.2\text{m}$ $L_{\text{contrapeso}} = 5\text{m}$	
5	$\rho = 103\Omega\text{-m}$ $L_{\text{contrapeso}} = 5\text{m}$	
6	$\rho_1 = 597\Omega\text{-m}$ $\rho_2 = 60\Omega\text{-m}$ $H = 2\text{m}$ $L_{\text{contrapeso}} = 10\text{m}$	

Profundidad de enterramiento: 0.8 m.

Radio de una jabalina: 0.0079 m.

Radio de un contrapeso: 0.0026 m.

3.7.5.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

Casos #	ATERRA*	SISRRA	
		R _G (Método de Imágenes)	R _G (Método de Reducción de Matriz)
1	13.26	11.50358	11.50358
2	25.90	30.95759	30.95758
3	29.20	34.90962	34.90961
4	10.7501	11.70514	11.70514
5	14.122	15.75018	15.75018
6	18.595	19.35	19.35

* ATERRA es un programa que fue desarrollado por EDELCA, para el diseño de puestas a tierra de líneas de transmisión.

3.7.6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para los casos evaluados para líneas de transmisión se observa que se presentan diferencias entre los valores calculados por ATERRA y los calculados por SISRRA. Sin embargo podemos decir que con el programa SISRRA obtenemos valores conservadores ya que estas diferencias no son mayores.

3.8.- LIMITACIONES

Para el caso de la metodología suministrada por la norma IEEE Std 80 – 1986/1996 tenemos que adolece de ciertas restricciones que, limitan su aplicabilidad a los casos en que éstas se satisfacen. En la práctica, las restricciones más importantes de este modelo son:

- La formulación de la norma IEEE 80 se fundamenta en un espaciamiento constante entre los conductores paralelos, y la determinación del número de conductores paralelos del arreglo se basa en que independientemente de la forma de la malla las retículas deben ser cuadradas.
- La profundidad a la que estén enterrados los conductores debe estar entre 0.25 m y 2.5 m, restricción que en la mayoría de los casos coincide con la realidad.
- El diámetro de los conductores debe ser menor que el 25% de la profundidad de instalación, condición que generalmente coincide con la realidad.
- El espaciamiento entre conductores paralelos debe ser mayor de 2.5 m.
- El terreno solo puede ser representado por un modelo homogéneo. El método ofrecido por la norma IEEE Std 80 – 1986/1996 no permite la modelación biestratificada del terreno

Cuando en terrenos multiestratificados, la resistividad aparente varía poco con la profundidad (menos de un 30%), el mismo puede ser modelado como un terreno uniforme con una resistividad correspondiente al promedio de los valores medidos.

En un terreno biestratificado, generalmente los arreglos mallados se encuentran ubicados en el estrato superior. Bajo tal consideración, si la resistividad del estrato superior del modelo es mayor que la del estrato inferior, la resistencia a tierra y los voltajes de paso y de contacto serán mayores a los correspondientes al mismo arreglo ubicado en un terreno uniforme de resistividad igual a la del estrato inferior.

La diferencia entre los valores reales y los calculados dependerá fundamentalmente del espesor y resistividad del estrato superior, de la resistividad del estrato inferior, y de las características del arreglo de tierra. En la medida en que el espesor del estrato superior aumenta, el comportamiento del arreglo se aproxima al que ofrecería en un terreno homogéneo con resistividad igual a la del estrato del terreno real.

Por el contrario, si la resistividad del estrato superior es menor que la del estrato inferior, el empleo del valor de la resistividad del estrato inferior como valor de resistividad de un terreno homogéneo que contiene al arreglo, conduce a un diseño conservador.

- No permite determinar los gradientes de potencial en puntos de interés. El método en cuestión solamente suministra el voltaje de toque en el centro de una de las cuadrículas perimetrales del arreglo, y el voltaje de paso que se produce a una distancia igual a la profundidad del arreglo justo fuera del perímetro del conductor. Para las condiciones que asume la norma IEEE Std 80- 1986/1996 las tensiones calculadas son las mayores y más severas, este método no permite determinar los voltajes de paso y contacto en puntos que no sean los mencionados.
- No permite considerar la proximidad de arreglos recolectores de corriente de falla, ni de otros elementos metálicos enterrados que puedan deformar los perfiles de potencial, incrementar los potenciales de toque y paso, y transferir potenciales a regiones remotas.

El método de la IEEE 80 asume que el o los sistemas de retorno de corriente de falla a la red de potencia y la configuración dispersora se encuentran suficientemente alejados entre sí como para permitir el completo desarrollo de las “resistencias a tierra“ de todos los arreglos involucrados.

En contraposición a las limitaciones expuestas hasta el momento, es importante resaltar que el método sugerido por la norma IEEE 80 es sumamente rápido y sencillo de aplicar y constituye una herramienta valiosa de pre-diseño, y en el caso que se cumpla todas las premisas en que se fundamenta su formulación, constituye un buen procedimiento de diseño.

Para el caso de la metodología del método de las imágenes aplicada tanto para líneas de transmisión como para subestaciones tenemos que esta tiene las siguientes restricciones

CONCLUSIONES

Con la instrumentación del programa para el Diseño de Sistemas de Puesta a Tierra para Subestaciones y Líneas de Transmisión al que se le dio el nombre de SISRRA, fueron cubiertos los objetivos tanto generales como específicos planteados. Un buen diseño de puesta a tierra es de vital importancia, ya que de ello dependen vidas humanas. A lo antes expuesto puede agregarse entonces, lo importante de realizar un diseño, teniendo plena confianza en la veracidad de los resultados obtenidos con la utilización de un mínimo de tiempo (esta confiabilidad, así como la optimización del tiempo a utilizar en el diseño de la puesta a tierra es factible con la utilización de este programa).

Las puestas a tierra diseñadas haciendo uso del programa SISRRA cumplen con el requerimiento básico de cualquier sistema de puesta a tierra para una subestación o línea de transmisión (bien sea bajo condiciones de falla o condiciones normales de operación).

Muestra si los voltajes de malla, toque y paso están dentro de los límites máximos aceptables; razón por la cual certifica que una persona situada en la cercanía de una subestación o dentro de esta, no se vea expuesta a peligrosos de conmociones eléctricas críticas.

Ya que el programa, usando cualquiera de las metodologías, fue diseñado asumiendo condiciones extremas o críticas, las mallas de puesta a tierra obtenidas son más seguras.

El programa por dar resultados gráficos de tensiones en cualquier punto deseado del área de la malla en estudio usando la metodología de las imágenes, constituye una herramienta aun más útil ya que este tipo de resultados facilitan más el análisis de cualquier estudio que se realice.

Los resultados obtenidos mediante el uso del programa para diseñar los sistemas de Puesta a Tierra son más precisos y exactos que los obtenidos manualmente, esto se debe básicamente a

la cantidad de decimales con los cuales trabajan cada uno de los métodos antes mencionados. Los reportes generados muestran los datos mas importantes que el usuario introdujo en el programa y los resultados obtenidos, de esta manera el usuario puede chequear los datos de entrada.

RECOMENDACIONES

El programa realizado para el Diseño de Puestas a Tierra para Subestaciones y Líneas de Transmisión puede ser mejorado en ciertos detalles tales como los que listan seguidamente:

- Una malla de conductores o espaciamiento entre barras desiguales no puede ser analizado.
- El método de las imágenes no se aplico a mallas en forma de L y T.
- Las gráficas de tensión se pueden expandir a tres dimensiones

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- AIEE Working Group on Substation Grounding Practices. Application Guide on Methods of substation grounding. AIEE Transactions, vol 73, part III-A, 1954, pp 271-278.
- 2.- ARMSTRONG, H.R. Grounding Electrode Characteristics from Model Tests. AIEE Transactions, vol 72, part III, 1953, pp 1301-1306.
- 3.- BIEGELMEIER, U.G. Die Bedeutung der Z-Schwelle des Herzkammerfilimmerns für die Festlegung von Berührungsspannungs greuzeu bei den Schutzma Bradhmer gegen elektrische Unfälle. E&M, vol 93, no 1, 1976, pp 1-8.
- 4.- BIEGELMEIER, U.G. and ROTTER, K. elektrische Widerstrande und Strome in Menschlicken Korper. E&M, vol 89, 1971, pp 104-109.
- 5.- BIEGELMEIER, U.G. and LEE, W.R. New Considerations on the Threshod of Ventricular Fibrillation for AC Shocks at 50-60 Hz, Proceedings of the IEEE, vol 127, 1980, pp 103-110.
- 6.- BODIER, G. La Secrites des Personnes et la Question des Mises a la Terre dans les Postes de Distribution, Bulletin de la Societé Francaise des Electriciens, se 6th, vol VII, no 74, Oct 1947, pp 545-562.
- 7.- CHOW, Y.L., Elsherbiny, M.M.; Yang, J.J, and Srivastava, K.D. Grounding Resistance of Buried Electrodes in Multi-Layer Earth Predicted by Simply Voltage Measurements along Earth Surface- A Theoretical Discussion. IEEE Transactions on Power delivery, Vol. 10, no 2, April 1995, pp 707-715.

8.- COKKINIDES, G.J., Joy , E.B.; Meliopoulos, A.P.; and XIA, Feng. An Advanced Computer Model for Grounding System Analysis. IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 8, N° 1, January 1993, pp. 13-23.

9.- COLTRARO, H. Revisión de los Sistemas de Puesta a Tierra para Líneas de transmisión de EDELCA, C. V. G. Electrificación del Caroní, C. A.

10.- COLTRARO, H., y MARTÍN, J. R. Sistemas de Puesta a Tierra para el Bajo Caroní, EDELCA II Jornadas Profesionales, Oct. 1991.

11.- COLTRARO, H, y MARTÍN, J. R. Guía Metodológica Para El Diseño de Mallas de Puesta a Tierra según la Norma IEEE- 80 1986, Diciembre 1991.

12.- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. Manual de Aterramiento. Departamento de Linhas de Transmissao, Curitiba 1990.

13.- CRAINIC, E.D., FORTÍN, J., and LAGACE, P.J. Interpretation of Resistivity Sounding Measurements in N- Layer Soil Using Electrostatic Images. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, N° 3, July 1996, pp 1349-1354.

14.- DALZIEL, C.F. Dangerous Electric Currents. AIEE Transactions, vol. 65, 1946, pp 579-585, 1123-1124.

15.- DALZIEL, C.F. Effect of Wave Form on Let-go currents. AIEE Transactions, vol 62, 1943, pp 739-744.

16.- DALZIEL, C.F. Electric Shock Hazard. IEEE Spectrum, Feb 1972, pp 41-50.

17.- DALZIEL, C.F. and LEE, R.W. Reevaluation of Lethal Electric currents. IEEE Transactions on Industry and General Applications, vol. IGA-4, no 5, Oct 1968, pp 467-476.

18.- DALZIEL, C.F. Temporary Paralysis Following Freezing to a Wire. AIEE Transactions, vol. 79, part III, 1960, pp 174-175.

19.- DALZIEL, C.F., LAGEN, J.B., and THURSTON, J.L. Electric Shock. AIEE Transaction, vol. 60, 1941, pp 1073-1079.

20.- DALZIEL, C.F. and LEE, W.R. Lethal Electric Currents. IEEE Spectrum, Feb 1969, pp 44-50.

21.- DALZIEL, C.F. and MANSFIELD, T. H. Effect of Frequency on Perception Currents. AIEE Transaction, vol. 69, 1950, pp 1161-1168.

22.- DALZIEL, C.F. and MASSOGLIA, F.P. Let-Go Currents and Volt-Voltages. AIEE Transactions, vol. 75, part II, 1956, pp 49-56.

23.- DALZIEL, C.F., OGDEN, E., and ABBOTT, C.E. Effect of frequency on Let-Go Currents. AIEE Transactions, vol. 62, Dec 1943 pp 745-750 and 1000.

24.- DAWALIBI, F., BOUCHARD, M., and MUKHEDKAR, D. Survey on Power System Grounding Design Practices. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-99, no 4, July/Aug 1980, pp 1396- 1405.

25.- DAWALIBI, F. and MUKHEDKAR, D. Optimum Design of Substation 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, Mar/Apr 1975, pp 252-261, 262-266, 267-272.

26.- DAWALIBI, F. and MUKHEDKAR, D. Parametric Analysis of grounding Systems. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS- 98, no 5, Sept/Oct 1979, pp 1659-1668.

27.-ELEK, A. Hazards of Electric Shock at Station During Fault and Method of Reduction. Ontario Hydro Research News, vol. 10, no 1, 1958, pp 1-6.

28.- FERRIS, L. P., KING, F. G., SPENCE, P. W., and WILLIAMS, H. Effect of Electric Shock on the Heart. AIEE Transactions, vol. 55, May 1936, pp 498-515, 1263.

29.- GARCIA, G., y MANINAT, P., Medición de Resistividad de Suelos y Resistencia de Puesta a Tierra en Subestaciones, III Jornadas de Potencia, Mayo 1982.

30.- GEDDES; L. A. and BAKER, L. E. Response to Passage of Electric Current Through the Body. Journal of Association for the Advancement of Medical Instruments, vol. 2, Feb. 1971, pp 13-18.

31.- GEIGES, K: S. Electric Shock Hazard Analysis. AIEE Transactions, vol. 75, part III, 1956, pp1329-1331.

32.- HEPPE, R. J. Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Nonuniform Current Distribution. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, Nov / Dec. 1979, pp. 1978-1989.

- 33.- HEPPE, R. J. Step Potentials and Body Current for Near Grounds in Two-Layers Earth, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no 1, Jan/Feb 1979, pp 45-59.
- 34.- IEEE Recommended Guide for Measuring Ground Resistance and Potential Gradients in the Earth Std 81- 1962.
- 35.- IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding ANSI / IEEE Std 80- 1986.
- 36.- KERCEL, S. W. Design of Switchyard Grounding Systems Using Multiple Grids, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no 3, Mar 1981, pp. 1341-1450.
- 37.- KESELEV. Research into Electric Shock Electrical Review, vol. 31, Dec. 1965.
- 38.- KOSTIC, M. B. , Radakovic, Z. R. , Radovanivic, N. S. , and Tomasevic, M. R. Improvement of Electrical Properties of Grounding Loops by Using Bentonite and Waste Drilling Mud. IEE Proc.-Genec. Transm. Distrib. , vol. 145, no. 1, January 1999, pp. 1-6.
- 39.- KOUWENHOVEN, W. B., et al. AC Schock of Varying Parameters Affecting The Herat. AIEE Transaction, vol. 78, part 1, 1959, pp 163-169.
- 40.- LANGER, H. Messungen von Erderspannungen in einem 220 kV Umspanwerk. Electrotechnische Zietschrift, vol. 75, no 4, Feb 1954, pp97-105 (English translation available in AIEE No.80-1961, Appendix V, pp 91-102.
- 41.- LAURENT, P.G. Les Bases Generales de la Thechnique des Mises a la Terre dans les Installations Electriques. Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens, vol. 1, ser 7, July 1951, pp 368-402 (English translation available in Appendix I).

42.- LOUCKS, W. W. A. New Approach to Substation grounding. *Electrical News and Engineering*, May 15, 1954.

43.- MAHONAR, V. N. And NAGAR, R. P. Design of steel Earthing grids in India. *IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no 6, Nov/Dec 1979, pp. 2126-2134.

44.- MARTINEZ, H. E., and PEDREROS, S. Nuevo Producto que Reduce Artificialmente La Resistencia de las Puestas a Tierra en Suelos de Alta Resistividad. *IEEE I Conferencia Internacional del Area Andina*, Septiembre 1999 pp. 897-901.

45.- NAHMAN, J. M. and SALAMON, D. D. Analytical Expressions for the Resistance of Grounding grids in Nonuniform Soil. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol PAS-103, pp 880-885, Apr 1984.

46.- NAHMAN, J. M. and SALAMON, D.D. Analytical Expressions for the Resistance of Rodbeds and of Combined Grounding Systems in Nonuniform Soil. *IEEE Paper 86 WM126-7*, presented at the IEEE-PES Winter Meeting, New York, Feb 2-7, 1986.

47.- OSYPKA, P. Quantitative Investigation of current Strength and Routing in AC Electrocutation Accident Involving Human Beings and Animals. *Technische Hochschule Braunschweig, Brunswick, West Germany, 1966/SKA Translation Center TT-6611470*.

48.- *Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986, IEEE Guide for Safety*.

49.- RUDENBERG, R. Basic Considerations Concerning Systems. *Electrotechnische Zeitschrift*, vols. 11 and 12, 1926.

50.- RUDENBERG, R. Grounding Principles and Practices-1, Fundamental considerations on Grounding currents. Electrical Engineering, vol. 64, no 1, Jan 1945, pp 1- 13.

51.- SCHWARZ, S. J. Analytical Expression for Resistance of grounding Systems. AIEE Transactions, vol 73, part III-B, 1954, pp 1011-1016.

52.- Substation Grounding Scale Model Tests. EPRI Interim Report EL-3099, May 1983.

53.-SUNDE; E.D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems. New York: McMillan,1983

54.- 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, Jan 1984, pp 2 – 25.

55.- SVERAK, J. G. Sizing of Ground Conductors Against Fusing. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no 1, Jan 1981, pp 51 – 59.

56.- SVERAK, G.J. Progress in Step and Touch Voltage equations of ANSI / IEEE Std80- Historical Perspective. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no 3, 1998, pp 762-767.

57.- THAPAR, B. and GROSS, E. T. B. Grounding Grids for High Voltage Station – Part IV – Resistance of Grounding Grinds in Nonuniform Soil. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-82, Oct 1963, pp 782- 788.

58.- TOWNE, H. M. Lightning Arrester Grounds – Parts I, II, and III. General Electric Review, vol. 35, Mar – May, 1932, pp 173 – 280.

59.- Use of Aluminum for Substation Buses. Working Group 57.1. IEEE Paper 62-280.

60.- ZABORSZKY, J. Efficiency of Grounding Grids with Nonuniform soil. AIEEE
Transaction, vol. 74, Dec 1955, pp 1230 – 1233.

APENDICES

APENDICE A

A.1 - TRATAMIENTO QUÍMICO [9],[10].

El tratamiento químico es recomendable cuando se presentan las siguientes situaciones:

- Resistencia del sistema muy elevada
- Cambios considerables en la resistencia por variaciones de la temperatura y la humedad.
- Cuando se quiere utilizar menor cantidad de electrodos.
- Instalaciones donde es muy difícil y por lo tanto costoso poder colocar electrodos de longitud considerable.

El tratamiento químico disminuye la resistividad del suelo, permitiendo una buena conducción en un área relativamente grande.

La figura # A1 muestra la disminución de la resistencia con este tipo de tratamiento y la mejoría que se consigue a los meses de haber acondicionado el suelo.

Existen diversas formas de realizar el acondicionamiento, una de ellas es utilizando diversas sales químicas como lo son el sulfato de cobre, sulfato de sodio, sulfato de magnesio, carbonato de sodio, cloruro de sodio, etc., sin embargo este tipo de mejora pierde efecto al cabo de varios meses debido a que las lluvias y la porosidad del suelo hacen que estos compuestos se disuelvan y migren totalmente.

Otros materiales utilizados en la reducción de la resistividad del suelo son los derivados del carbono, los cuales, cuando son llevados a diámetro de una granulometría muy pequeña proporcionan elementos estabilizadores de muy baja resistividad. Las arcillas osmóticas por su propiedad de retener el agua durante varios periodos de tiempo también son utilizadas en el tratamiento de suelos, sin embargo hay que tener cuidado con la contracción y expansión de estas arcillas en los periodos de lluvia y de sequía.

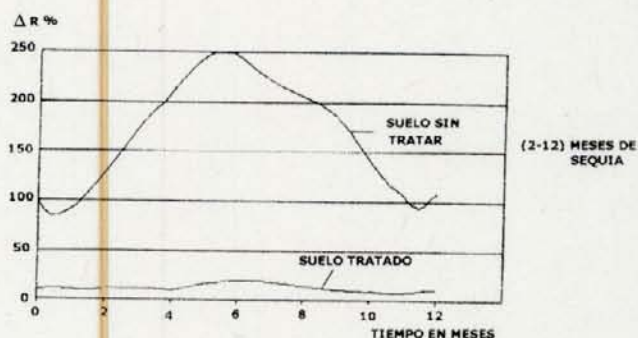


Figura A1

Variación de la resistencia de puesta a tierra en función de las estaciones en un suelo con y sin tratamiento químico

Existen varios métodos de instalación que dependen del químico, entre estos se mencionan:

A.1.1 - MÉTODO TIPO CUENCA

El químico está en contacto directo con el electrodo y se usa para químicos tales como sal común y grafito. Tiene el inconveniente que para químicos, sal y grafito pueden ocasionar corrosión en los electrodos de puesta a tierra. En la figura # A2 se observa la forma de construcción de este método

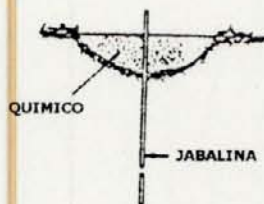


Figura A2
Método tipo cuenca

A.1.2 - MÉTODO TIPO CONTAINER

El químico se encuentra colocado en un trozo de tubería de asbesto, arcilla o cemento, con el fin de evitar el contacto directo con el electrodo y disminuir el riesgo de corrosión producido por algunos químicos. En la siguiente figura se muestra este método:

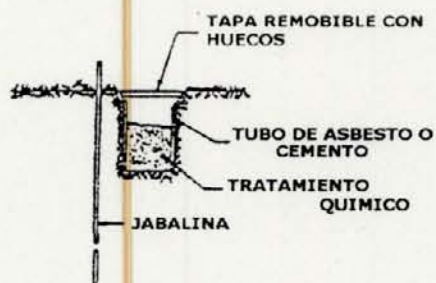


Figura A3
Método tipo container

A.1.3 - MÉTODO TIPO ZANJA

El químico es colocado en una zanja alrededor de las jabalinas. En el caso de contrapesos el químico se vacía de tal manera que forme una cama para el conductor utilizado como contrapeso. En la siguiente figura se muestra este método:



Figura A4

Método tipo zanja

A.1.4 - INYECCIÓN DE QUÍMICOS

Este método es muy usado con químicos que forman geles, sales como acrylamida, silicatos, sanick, bentonita, ect.. Consiste en preparar los químicos en soluciones y luego inyectarlos en el terreno. La cantidad de solución necesaria de tratamiento depende del sitio y de la resistencia de puesta a tierra final que desee.

En la figura # A5 se muestra la variación de la resistencia de puesta a tierra con relación al volumen de solución de sal utilizada y para un esquema en particular.



Figura A5

Variación de la resistencia vs. Volumen de solución
para una jabalina de 7' y $\frac{3}{4}$ '

A.2 - ACONDICIONAMIENTO MINERAL AUTOMATIZADO

Entre los dispositivos de acondicionamiento automático de suelos se encuentra la barra XIT (XIR Rod). La barra XIT es un tubo de cobre de dos pulgadas de diámetro relleno con sal de piedra y perforado con respiraderos en la parte superior y con agujeros de filtración en la parte de abajo, como se muestra en la figura siguiente:



Figura A6
Barra XIT

Las sales contenidas en el tubo, absorben humedad del aire, creando una solución saturada de esa sal, la cual se filtra hacia fuera por la base de la barra acondicionando así el suelo en el área. Como resultado, se logró una reducción significativa en la resistividad del suelo en los lugares donde la humedad es alta, pero en los lugares desérticos esta barra XIT tiene pocas ventajas sobre la varilla convencional.

Los sistemas, como la varilla XIT, que trabajan con el concepto de 'respiración de aire' sufren de dos limitaciones:

- Requieren de aire cargado de humedad.
- Solo acondicionan el suelo alrededor de la base de la barra.

Para lograr mejores resultados se debe de acondicionar la mayor cantidad de suelo del hemisferio de Interfase. Puesto que el Hemisferio de Interfase forma por lo menos el 90-95% de la conexión a tierra del electrodo, solamente se necesita acondicionar el suelo contenido en ese

volumen. El suelo externo a ese volumen tiene poca influencia en la resistividad final del electrodo de internarse a tierra (5-10%).

A.3 - BARRA QUIMICA TIPO CHEM-ROD

Bajo un principio de humedad, la barra química Chem-Rod se asemeja a la barra XIT con la variante de tener varios orificios de salida a lo largo del electrodo. Logrando una equiparación del volumen acondicionado.

La tabla A1 compara el rendimiento del chem-Rod con una barra convencional de $\frac{3}{4}$ de pulgada por 10 pies, con terreno mezclado con sal simple (Na Cl); y una barra del tipo XIT rellena de sal (Na Cl). Estas medidas se hicieron para cinco suelos diferentes, en un margen de tres años.

El Chem-Rod produjo una resistencia más baja y tuvo la menor variación de resistencia en el periodo de un año. De esta forma se puede pensar que el mejoramiento mineral automatizado permitirá alcanzar una resistencia más baja, siempre que haya suficiente humedad.

Para que este tipo de barras logre su objetivo es necesario que pase cierto tiempo con la finalidad de que se puedan drenar las sales a la tierra. La barra XIT requiere de 4 meses bajo condiciones ideales, la barra Chem-Rod toma 10 semanas para empezar a tener una buena efectividad. Este proceso es dependiente de las condiciones del medio, cuando las sales migran muy lentamente se puede llegar hasta 6 meses para poder lograr una resistencia de tierra estabilizada.

Tabla A1

Comparación de la Chem-Rod y otros Electroodos

Electrodo	Resistividad (Ω -m)	Resistencia (Ω)	Variación Durante un Año (%)
Varilla Convencional de Cobre (3/4" * 10')	9 62 270 3.7K 30K	7.2 2.2 65 430 10K	250
Varilla Convencional de Cobre (3/4" *10') en Suelo Salado con NaCl 1 er Año	9 62 270 3.7K 30K	2.3 18 44 350 1.5K	200
Varilla Convencional de Cobre (3/4" * 10') en Suelo Salado con NaCl 3 er Año	9 62 270 3.7K 30K	5 30 80 400 3K	200
Varilla XIT con Respiración de Aire	9 62 270 3.7K 30K	0.5 9 22 240 2K	200
Chem-Rod	9 62 270 3.7K 30K	0.2 2 10 90 1K	40

La figura A7 muestra la resistencia del Chem-Rod en función del tiempo.

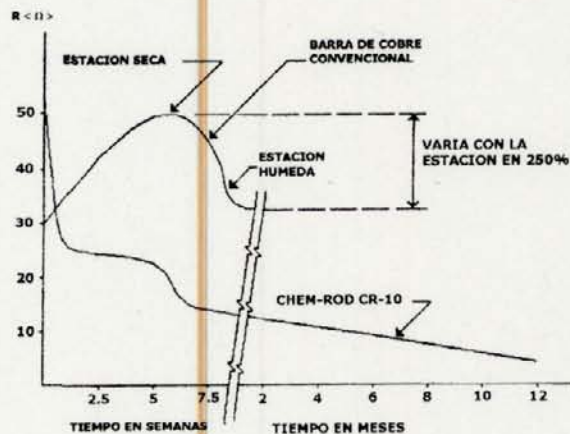


Figura A7

Resistencia del chem – rod como función del tiempo

A.3.1 - MEJORAMIENTO DE HUMEDAD AUTOMATIZADO PARA LAS CHEM-ROD

Debido a que la humedad es el medio que forma el electrolito en el suelo dándole su verdadero carácter conductivo, el contenido de humedad es quizás el factor más importante en la resistencia a tierra de un electrodo. Sin esto se pierde gran parte del contacto con el suelo, haciendo dificultoso tener una buena resistencia de tierra para lugares que son considerados desérticos. Para un sistema convencional este tipo de reto puede involucrar un costo excesivo y para muchos casos no logran el objetivo de una resistencia a tierra baja.

Para los ambientes secos, las barras químicas Chem-Rod se les provee un acondicionamiento automatizado de humedad, tal que el suelo dentro del Hemisferio de Interfase pueda mantenerse al nivel de humedad requerido para cualquier situación. Para lograr esto, la humedad es inyectada directamente dentro de la varilla en forma de vapor.

Hay dos formas que se ofrecen para el humedecimiento automatizado:

- A través de una fuente de agua controlada centralmente. Un sensor abre la válvula del agua cuando esa se necesita, entonces se inyecta la humedad a la barra a través de un atomizador.
- Una unidad autónoma motivada solamente, como se muestra en la figura siguiente. Esta incluye su propia fuente de agua que se encuentra situada en un reservorio que tiene una membrana que se expande y contrae con los efectos de temperatura. En el día se produce una evaporación debida al aumento de temperatura producido por el sol, luego con los cambios de temperatura la membrana se contrae formando una presión dentro del reservorio que inyecta la humedad que se queda en los ductos que comunican dicho reservorio y barra.

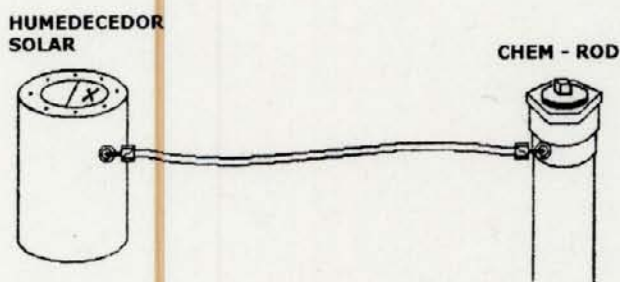


Figura A8

Humedecedor autónomo movido por energía solar

A.4 - UTILIZACION DE BENTONITA [38].

A.4.1 - ELECTRODOS CON RELLENO DE BENTONITA

Debido a los problemas que a veces se presentan cuando se trata de clavar la jabalina en el terreno, se ha desarrollado este método que consiste en abrir el hueco antes de introducir la jabalina y luego para asegurar el contacto entre la jabalina y el terreno, se rellena el resto del hueco con la solución química.

Para terrenos con muy alta resistividad se puede decir que la relación de resistencia antes y después de la aplicación del tratamiento esta en la relación de radios de la jabalina y el hueco a ser rellenado. Esto es:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

donde:

R2: es la resistencia después del tratamiento en ohms.

R1: es la resistencia antes del tratamiento en ohms.

r1: es el radio de la jabalina, en m

r2: es el radio del hueco, en m.

En zonas muy rocosas es necesario producir pequeñas explosiones que abran grietas en el terreno para que el tratamiento penetre por ellas. La instalación con bentonita tiene la ventaja de proteger los electrodos contra la corrosión, permitiendo el uso de acero sin galvanizar como electrodo de puesta a tierra.

La reducción de la resistencia de puesta a tierra por este método teóricamente puede ser muy grande sin embargo solo se tienen muy pocas pruebas para determinados terrenos en donde se consiguió una reducción de 23 a 36 % aproximadamente. En la figura A9 se muestra la forma de instalación.

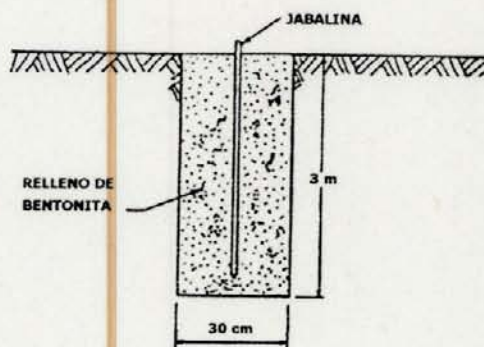


Figura A9

Electrodo relleno con bentonita

La bentonita es una arcilla natural que contiene el mineral montmorillonita, este consiste de átomos de aluminio coordinados octahedricamente, colocados entre átomos de silicio coordinados tetrahedricamente. Al agregarle agua la resistividad de esta disminuye (2.5 ohms por metro al 300% de humedad), esto es causado principalmente por un proceso electrolítico entre el agua, NaO (soda), K₂O (potasio), CaO (calcio) y otras sales minerales que se encuentran en la bentonita que ionizan formando un electrolito fuerte (PH = 8 – 10) diferente a un yacimiento de sal, este electrolito no lixiviará gradualmente fuera, porque es parte de la propia arcilla. Hay algunos procedimientos tecnológicos para las sustituciones del catión dentro de la bentonita, la celosía de cristal (procedimiento de activación de bentonita), habilitando un aumento de conductividad de suspensión de bentonita. La bentonita puede aumentar 13 veces su volumen seco, y lo que es más importante se adhiere a casi cualquier superficie que toque. Sus propiedades conductivas excelentes y sus habilidades de absorber y retener grandes cantidades de agua, hacen recomendable la bentonita como un material de relleno, sobre todo para sistemas de puesta a tierra instalados en suelos con piedras o arenosos.

A.4.2 - PRUEBAS DE CAMPO

Se seleccionaron dos sitios de prueba, el primero un terreno arenoso en el área de New Belgrade y el segundo localizado a 50 Km., de Belgrado. Estos sitios fueron seleccionados por

estar distantes de instalaciones y edificios circundantes (para evitar influencias de otras corrientes), y además estos poseen propiedades eléctricas prácticamente idénticas (resistividad).

De las mediciones de campo se obtuvo que la resistividad de la primera capa ρ_1 es igual a $2259 \Omega \cdot m$., y la profundidad de ésta es de $H_1 = 0.3 \text{ m}$ y consiste en una tierra ordinaria, la segunda capa de tierra arenosa cuyo espesor $H_2 = 6.5 \text{ m}$ con una resistividad $\rho_2 = 675 \Omega \cdot m$.. Estas medidas fueron realizadas durante un largo periodo de lluvia en julio de 1995.

En estos dos sitios se instalaron los mismos arreglos de puesta a tierra, dicho arreglo se muestra en la siguiente figura

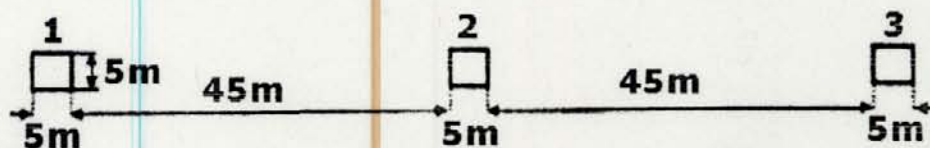


Figura A10
Arreglo de puesta a tierra

La instalación de la bentonita se muestra en la siguiente figura

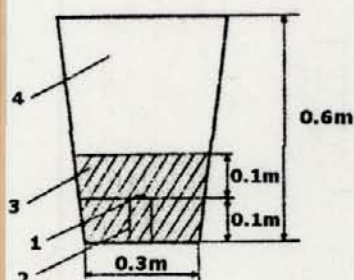


Figura A11

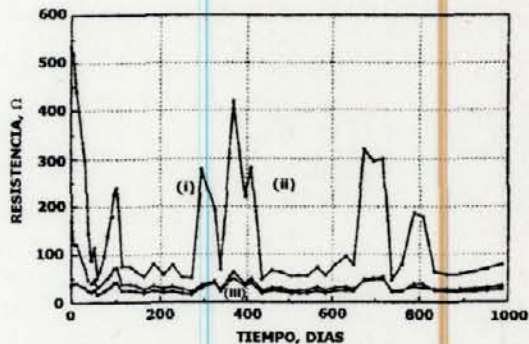
Instalación de suspensión de bentonita en una franja de terreno

- 1) Franja de acero cubierta de zinc. 2) Bloque soporte de la franja de acero. 3) Suspensión de bentonita. 4) Material de excavación

Para estas pruebas se utilizó polvo de bentonita en lugar de suspensión de bentonita.

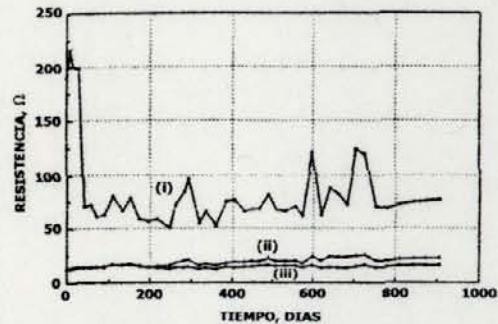
De estas pruebas de campo se obtuvieron las siguientes gráficas que muestran la variación de la resistencia de puesta a tierra debido a la bentonita y de los potenciales obtenidos o presentados en los arreglos de puesta a tierra.

En los resultados presentados se puede ver las mejoras del sistema de puesta a tierra usando la bentonita ya que se observa una disminución de la resistencia de tierra significativa, sobre todo durante los periodos de sequía además de una reducción múltiple en los voltajes de toque máximo. También fue demostrado que pudiera usarse polvo de bentonita con éxito en lugar de suspensión de bentonita cuya preparación, transporte e instalación son más difíciles y bastante más caras.



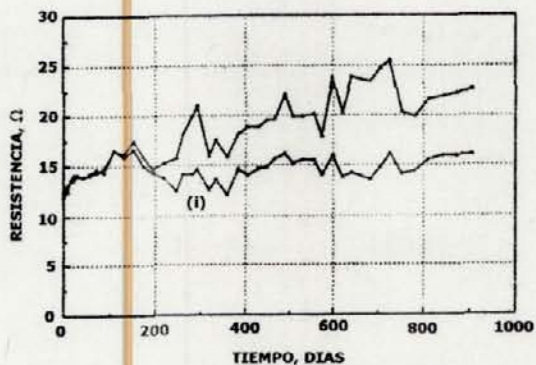
a) Variación de la resistencia de puesta a tierra para un terreno arenoso

- i) Arreglo convencional
- ii) Arreglo con suspensión de bentonita
- iii) Arreglo con bentonita en polvo



b) Variación de la resistencia de puesta a tierra para un terreno pedregoso

- i) Arreglo convencional
- ii) Arreglo con suspensión de bent.
- iii) Arreglo con residuos de perforaciones



c) Variación de la resistencia de puesta a tierra para terreno relleno con suspensión de bentonita y residuos de perforaciones

- i) Arreglo con suspensión de bentonita
- ii) Arreglo con residuos de perforaciones

Figura A12

A.5 - NUEVO PRODUCTO QUE REDUCE ARTIFICIALMENTE LA RESISTENCIA DE LAS PUESTAS A TIERRA EN SUELOS DE ALTA RESISTIVIDAD [44]

El departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Antofagasta (Chile) desarrollado un producto, compuesto de materias primas y sales orgánicas residuales del lugar, que reduce la resistencia de puesta a tierra y la mantiene en el tiempo.

A.5.1 - ENSAYOS QUÍMICOS

En la Tabla A2 se muestran resultados de las medidas de conductividad volumétrica y PH del: nuevo producto, tierra del suelo donde se encuentran algunos electrodos testigo y combinaciones de este suelo con tres masas distintas (1, 2 y 3 g) del nuevo producto. Se destaca el hecho de que el resultado de estas combinaciones corresponde a un suelo menos ácido y más conductor.

Tabla A2
Ensayos Químicos

Sustrato	Masa (g)	Vol. H ₂ O (ml)	PH*	Conduc. (mS/cm)
Nuevo Producto	2	80	9.25	12.8
Tierra	2	80	8.96	1.03
Tierra	15.+1	80	9.73	7.57
+	15+2	80	9.75	12.01
Nuevo Producto	15+3	80	9.76	15.00

* Temperatura de medida 20°C.

A.5.2 - ENSAYOS SIN INYECCIÓN DE CORRIENTE

Los ensayos considerados sin inyección de corriente, corresponden a barra o picas de cobre de 5/8" por 1 metro de largo, que son enterradas en una zanja de 0.6 m de profundidad.

A.5.2.1 - PRIMERAS MUESTRAS

En la figura A13 se presentan 5 muestras de puestas a tierra del tipo testigo, que son montadas en noviembre de 1997 en los terrenos de la Universidad de Antofagasta, quedando separadas entre ellas a más de cinco veces su largo, con fin de saber la mejor forma de poner el nuevo producto en el electrodo. La mejor forma de poner el nuevo producto en el electrodo. La primera, Ra, se instala en el suelo primitivo (no hay mejoramiento). La segunda, Rb, se mejora con el producto que se vende en el comercio electrotécnico. Las otras tres restantes se mejoran con el nuevo producto, donde Rc, se instala idénticamente a como se hace con el producto de venta comercial; la muestra, Rd, se montan cubriendo el electrodo con unos 10 cm de tierra, se agregan 20 a 25 cm del nuevo producto para finalmente cubrirse con tierra; y finalmente cubrirse al electrodo, Re, se cubre con unos 15 cm del nuevo producto, y se le pone tierra. A todas las muestras testigos, menos Ra, se le agregan 20 litros de agua del grifo.

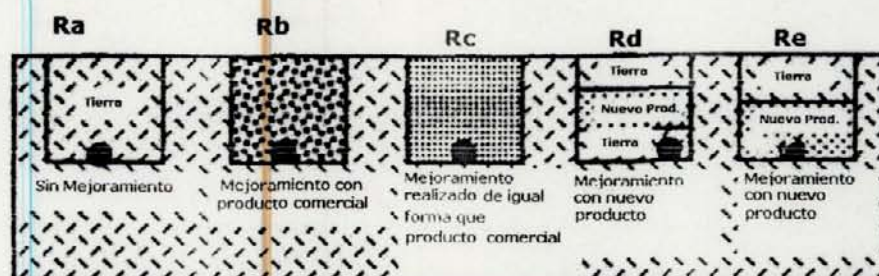


Figura A13

Esquema de montaje de cinco muestras

En la figura A14 se presentan los resultados de las medidas de resistencia de puesta a tierra, en el tiempo, luego de 2 años de instaladas las puestas a tierra, aproximadamente.

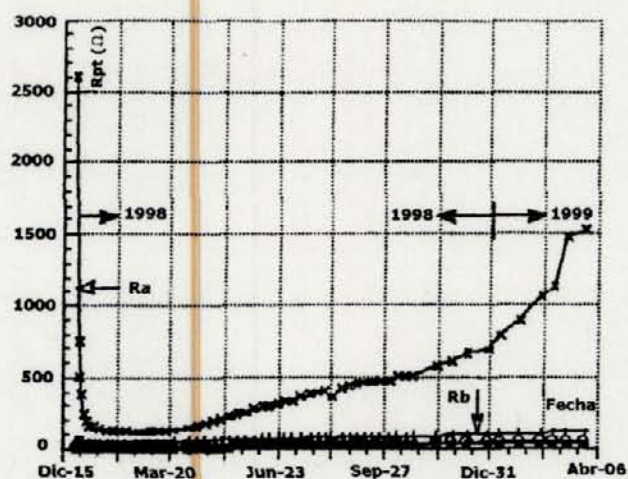


Figura A14

Medidas de resistencias de puesta a tierra de cinco muestras

En la figura A15, y con el fin de ver con más detalle la evolución de las resistencias de puesta a tierra, se muestra una ampliación de la figura A14

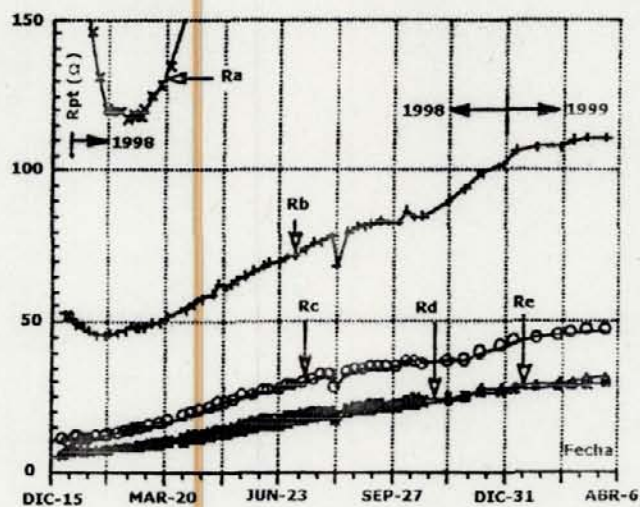


Figura A15

Ampliación de la figura A14

A.5.2.2 - SEGUNDAS MUESTRAS

Como es necesario saber el comportamiento del nuevo producto en zonas donde la resistividad del suelo es extremadamente elevada, con alta corrosión, a mediados de enero de 1998 se instalan 3 muestras testigos en el pueblo de Mejillones, sitio distante a 80 Km de la ciudad de Antofagasta, las que se montan físicamente de la misma forma que las primeras muestras. La primera se instala sin mejoramiento del suelo, la segunda es tratada con el producto comercial y la tercera con el nuevo producto, pero siendo montada de acuerdo a como se hace con la disposición **Re** de la figura # 39, por ser la que mejor resultados ha dado.

En la figura A16 se presenta la evolución de las tres muestras de puesta a tierra del tipo testigo.

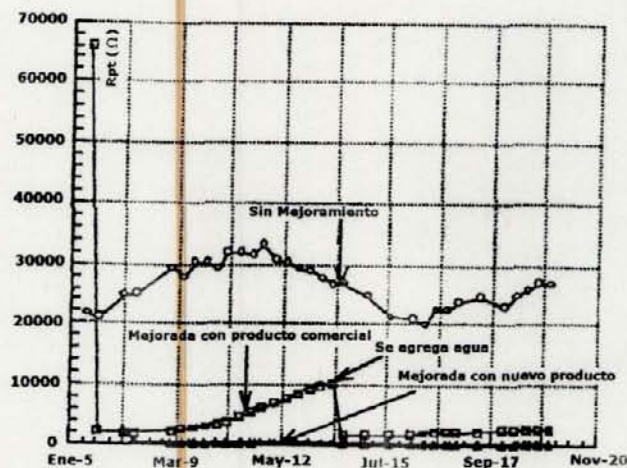


Figura A16

Resistencia de puesta a tierra en sitio de alta resistividad

Con el fin de ver con más detalle la evolución de las resistencias de puesta a tierra mejoradas con el nuevo producto en la figura A17, se muestra una ampliación de la figura A16.

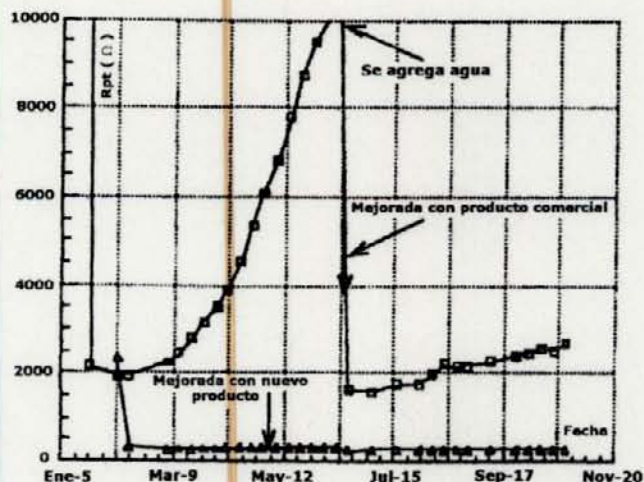


Figura A17

Ampliación de la figura A16

A.5.3 - ENSAYOS CON INYECCIÓN DE CORRIENTE

A.5.3.1 - ENSAYOS EN CUBOS

Dado que también era necesario saber acerca del comportamiento de las puestas a tierra mejoradas con el nuevo producto, con corriente con forma de onda no senoidal, para comenzar, se construyen cubos transparentes de 1 dm^3 , donde en su interior se pone un trozo de barra o pica de cobre, previamente pesada, el cual es cubierto con el nuevo producto, convertido en una masa humedecida con una cantidad de agua específica. El otro electrodo corresponde a una lámina de cobre, que cubre enteramente una de las caras del cubo, cuyo peso también se conoce. La forma de onda de la corriente se desforma con un dimmer, de los usados para regular la intensidad luminosa de las lámparas.

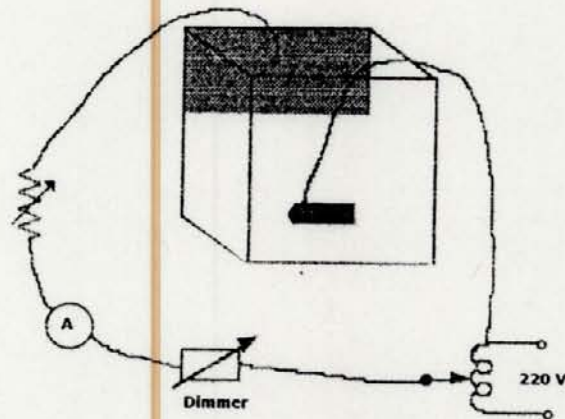


Figura A18

Esquema para medidas electroquímicas del nuevo producto

Las medidas que se comienzan a registrar, en el tiempo, son tensión entre electrodos, intensidad de corriente y temperatura, para una tensión de alimentación que se mantiene fija.

En la figura A19 se muestra un registro de la forma de onda de la corriente que se inyecta en el cubo

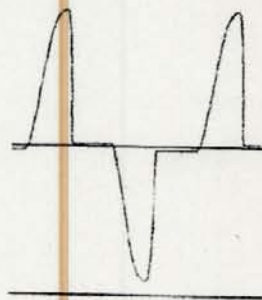


Figura A19

Registro de forma de onda de corriente

En la figura A20 se puede ver el comportamiento de la resistencia del electrodo en el interior del cubo en función del tiempo del nuevo producto.

Paralelamente se realiza el mismo ensayo con el producto comercial.

En la figura A21 se muestra el tiempo que duró la circulación de la corriente a través del producto comercial, el cual alcanzó a durar 12 horas, aproximadamente.

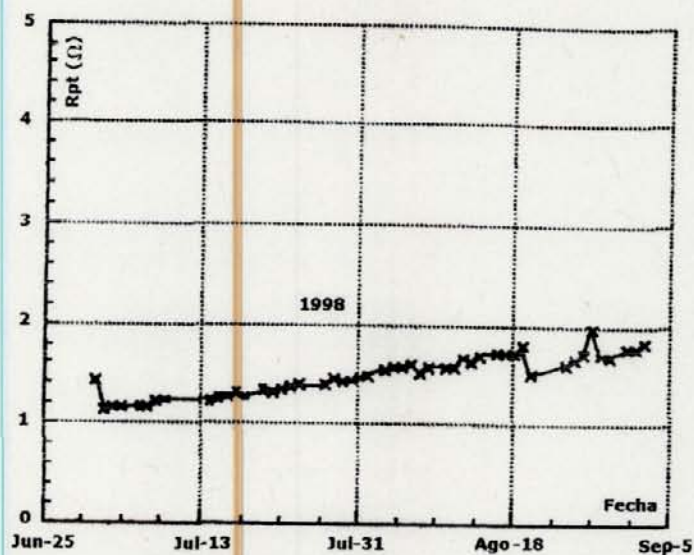


Figura A20

Resistencia del electrodo en función del tiempo

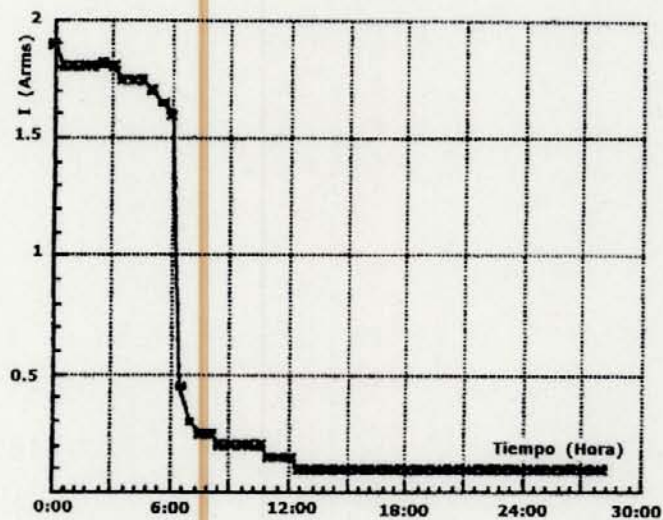


Figura A21

Intensidad de corriente en cubo con producto comercial

4.5.3.2 - ENSAYOS EN TERRENO

Luego de ver el buen comportamiento del nuevo producto en los cubos, después de varios ensayos, se decide probar éste en puestas a tierra reales, en suelos donde la resistividad es elevada, con inyección de corriente, y forma de onda deformada. Es así como en los terrenos de la Universidad de Antofagasta, se instalan los mismos tipos de electrodos de la configuración sin inyección de corriente y se montan cuatro muestras del tipo testigo. La primera se mejora con una dosis del producto comercial (bolsas de 7 kilos). La segunda se mejora con una dosis del nuevo producto (misma cantidad de dosis del producto comercial). La tercera con dos dosis y la cuarta con tres dosis del nuevo producto. La fecha de comienzo de estos ensayos es a mediados del mes de noviembre del año 1998.

En la figura A22 se muestra de forma esquemática el circuito usado para seguir la evolución de las cuatro resistencias de las puestas a tierra, las cuales se distancian entre ellas más de cinco veces el largo de los electrodos de puesta a tierra.

El objetivo de este ensayo tiene como meta saber el tiempo que se mantiene la corriente en cada una de las cuatro puestas a tierra del tipo testigo. Como así mismo el efecto corrosivo que se produzca en ellas, ya que al ser éstas instaladas se les conoce su peso.

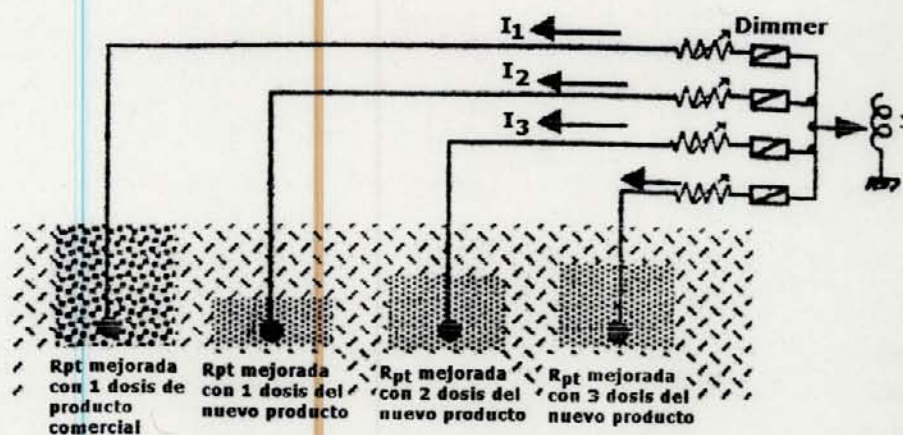


Figura A22

Esquema de circuito de medida

En la figura A23 se muestran los resultados de las intensidades de corriente en las 4 resistencias de las puestas a tierra del tipo testigo en función del tiempo.

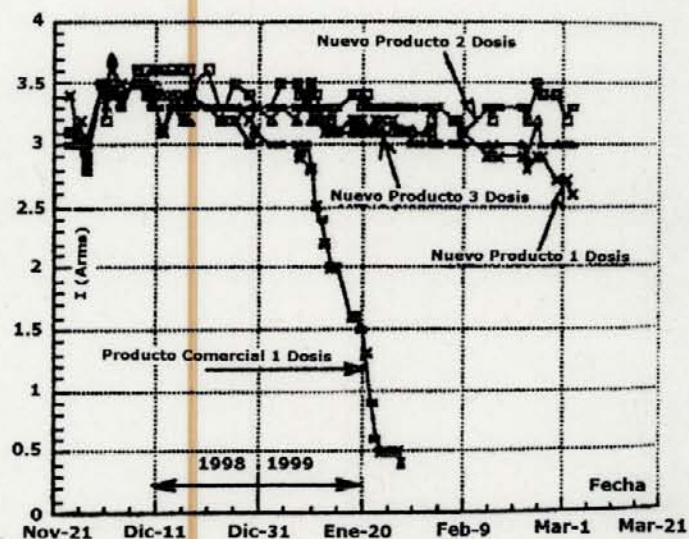


Figura A23

Intensidad de corriente en las 4 puestas a tierra

A.5.4 - CONCLUSIÓN

Se a logrado desarrollar un nuevo producto, compuesto por sales residuales, elaborado en Chile, que permite rebajar de forma efectiva las resistencias de puesta a tierra.

Es importante saber que los ensayos, además, han permitido ir conociendo mayores ventajas de este nuevo producto, como es el mayor tiempo de duración de la puesta a tierra, al está esta con corriente. Por este motivo se puede usar en el mejoramiento de puestas a tierra de neutros en redes de distribución.

APÉNDICE B

METODOLOGÍA PARA LOS CALCULOS DE CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

B.1.-ESTRATIFICACION DEL SUELO EN DOS CAPAS

Una determinación de ρ_1 , ρ_2 y h del suelo a partir de los valores medidos de resistividades por el Método Wenner, puede obtenerse por medio del computador, utilizándose el método iterativo de "pasos-descendentes", descrito a continuación:

Sea $\rho_a(d_j)$, con $j = 1, n$, los valores de las n resistividades medidas con espaciamentos d_j .

Sea $\rho_c(d_j)$, con $j = 1, n$, los valores de resistividades calculados con los mismos espaciamentos d_j .

Donde:

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n (A^{-1/2} - B^{-1/2}) \right] \quad (B1)$$

donde

$$A = 1 + \left(\frac{2 * n * h}{d} \right)^2 \quad (B2)$$

$$B = 4 + \left(\frac{2 * n * h}{d} \right)^2 \quad (B2 a)$$

Cuando la diferencia entre los valores medido y calculados es inferior a un cierto limite, el proceso iterativo ha encontrado una solución.

El error será:

$$\varphi_{(\rho_1, k, h)} = \sum_{j=1}^n \left[\frac{\rho^0 a(dj) - \rho a(dj)}{\rho^0 a(dj)} \right] \quad (B3)$$

en cada iteración las variables ρ_1 , k y h son modificadas por:

$$\Delta \rho_1 = -\tau \frac{\partial \varphi}{\partial \rho_1} \quad \Delta k = -\tau \frac{\partial \varphi}{\partial k} \quad \Delta h = -\tau \frac{\partial \varphi}{\partial h} \quad (B4)$$

donde τ es una constante de convergencia,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \rho_1} = -2 * \sum_{j=1}^n \left[\frac{\rho^0 a(dj) - \rho_a(dj)}{\rho^0 a(dj)} \right] * \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_1}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial k} = -2 * \sum_{j=1}^n \left[\frac{\rho^0 a(dj) - \rho_a(dj)}{\rho^0 a(dj)} \right] * \frac{\partial \rho_a}{\partial k}$$

(B5)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial h} = -2 * \sum_{j=1}^n \left[\frac{\rho^0 a(dj) - \rho_a(dj)}{\rho^0 a(dj)} \right] * \frac{\partial \rho_a}{\partial h}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_1} = 1 + 4 * \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left\{ \left[1 - \frac{n * (1 - K^2)}{2 * K} \right] * (A^{-1/2} - B^{-1/2}) \right\}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial k} = 4 * \rho_1 * \sum_{n=1}^{\infty} n * K^{n-1} (A^{-1/2} - B^{-1/2})$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial h} = \frac{16 * \rho_1 * h}{d^2} * \sum_{n=1}^{\infty} K^n (B^{-3/2} - A^{-3/2})$$

Siendo A y B definidos en las ecuaciones (B2) y (B2 a).

Por lo tanto, en cada iteración, la función error varía de:

$$\Delta \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1 + \frac{\partial \varphi}{\partial k} \Delta k + \frac{\partial \varphi}{\partial h} \Delta h \quad \text{ó}$$

(B6)

$$\Delta \varphi = -\tau * \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \rho_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial k} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial h} \right)^2 \right]$$

El proceso termina cuando $\Delta \varphi = 0$, o $\Delta \varphi < \varepsilon$, donde ε es la precisión requerida.

Los pasos para el cálculo son:

- 1.- Estimar los valores iniciales de ρ_1 , k y h
- 2.- Determinar ρ_1 , k y h
- 3.- Determinar los nuevos valores

$$\rho_1^i = \rho_1^{i-1} + \Delta \rho_1$$

$$K^i = K^{i-1} + \Delta k \quad (B7)$$

$$h^i = h^{i-1} + \Delta h$$

- 4.- Calcular $\Delta \varphi$. Si $\Delta \varphi > \varepsilon$, se repite el paso 2

APÉNDICE C
CURVAS PARA EL FACTOR S_F

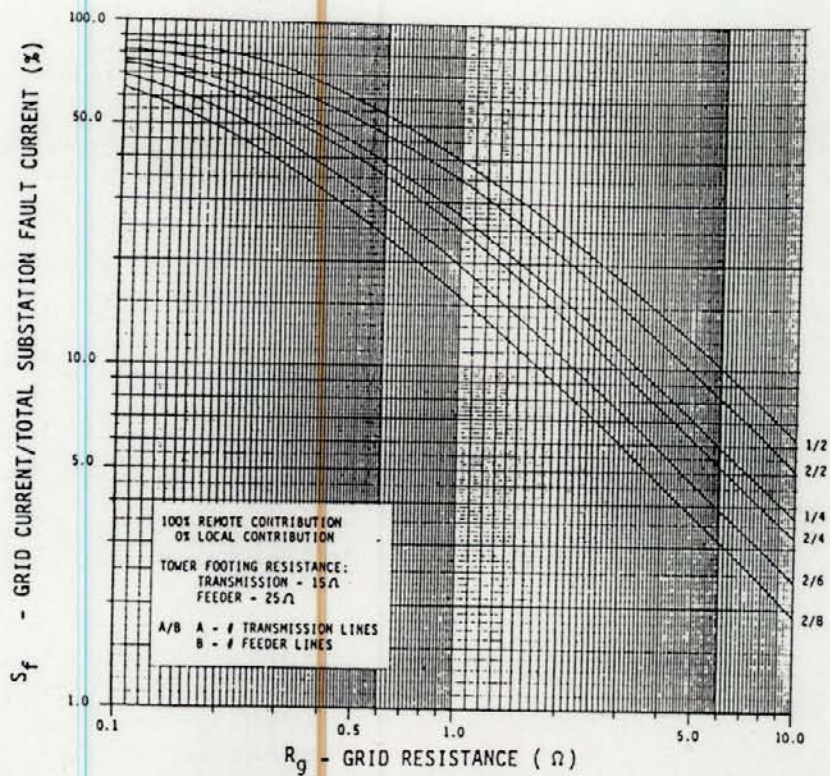


Figure 9. Split factor curves - S_f vs R_g .

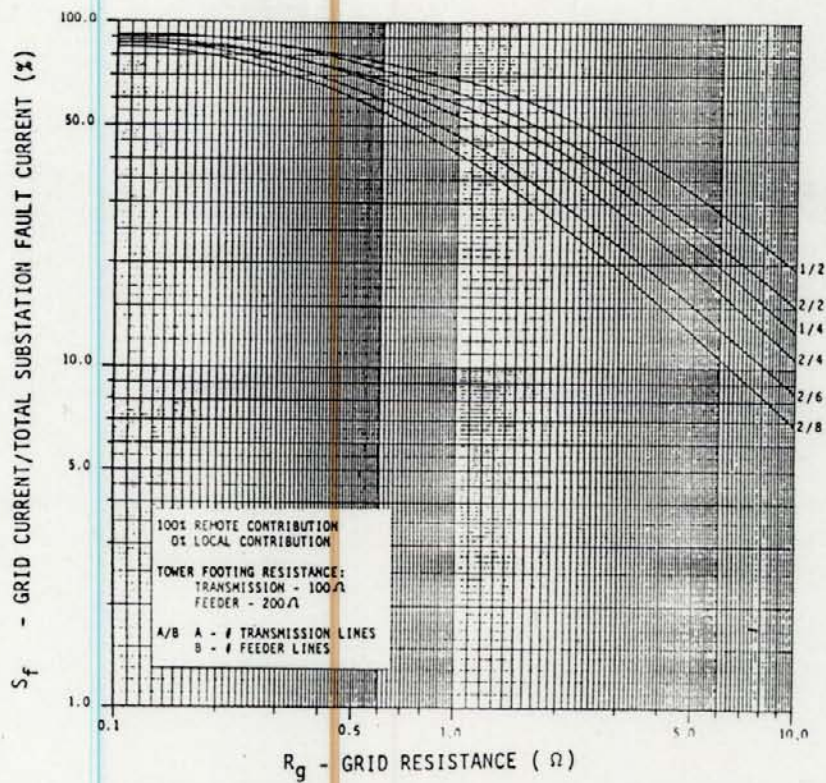


Figure 10. Split factor curves - S_f vs R_g .

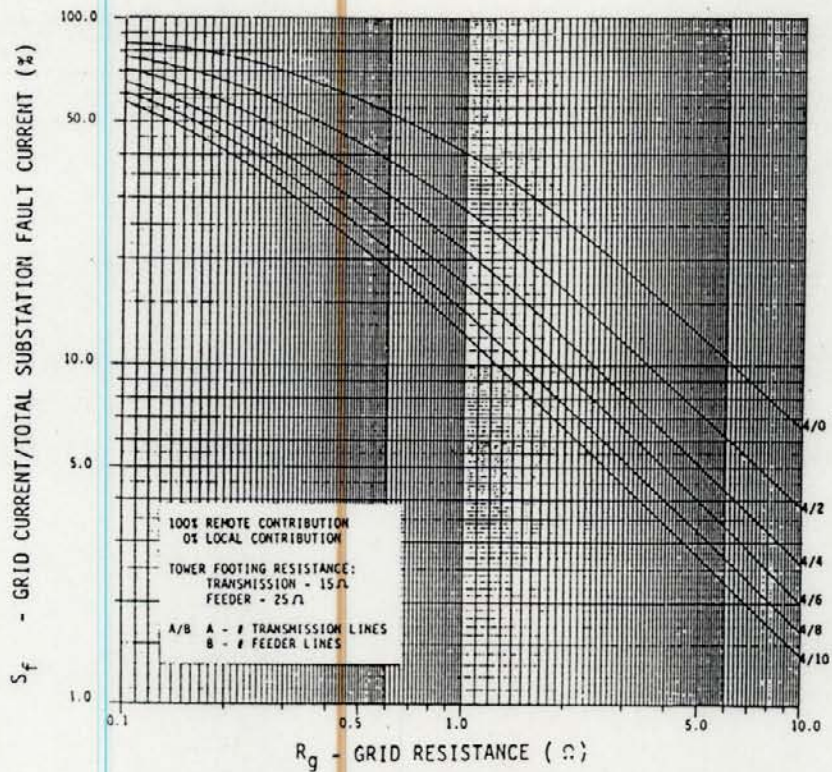


Figure 11. Split factor curves - S_f vs R_g .

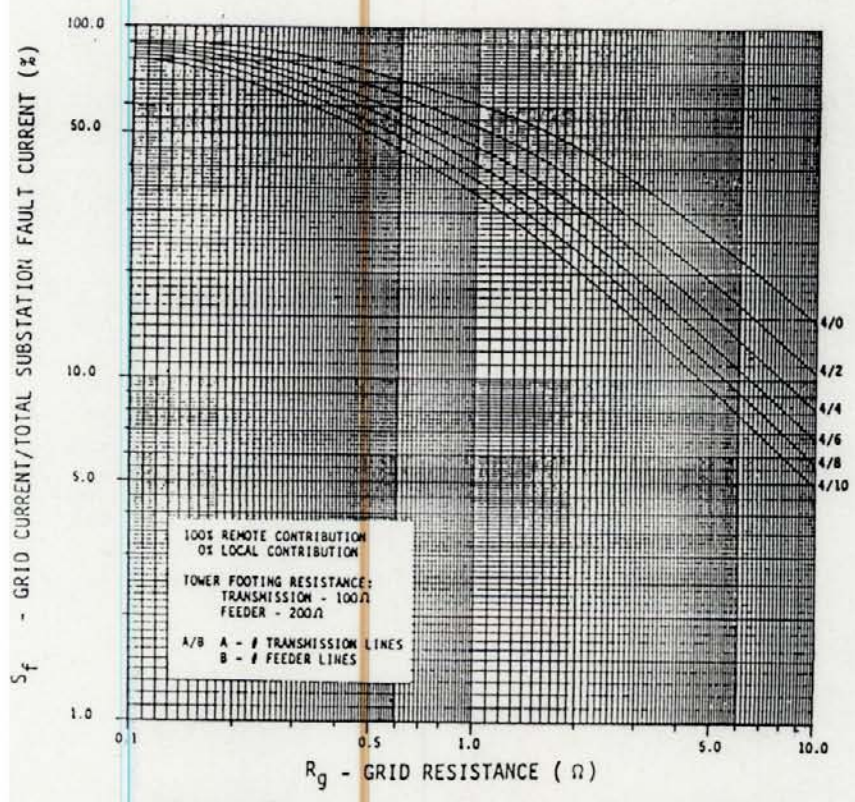


Figure 12. Split factor curves - S_f vs R_g .

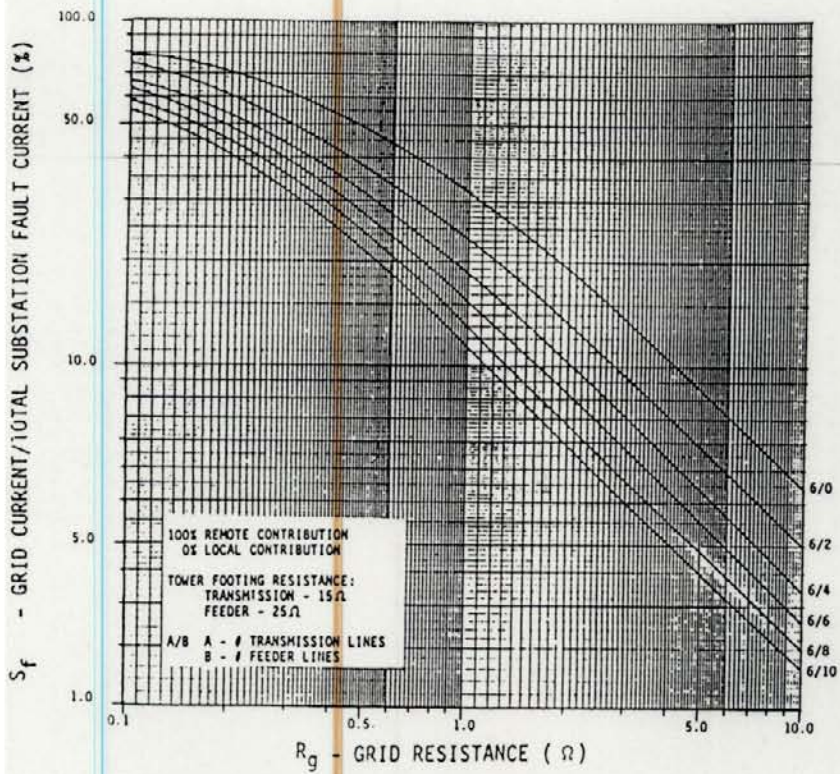


Figure 13. Split factor curves - S_f vs R_g .

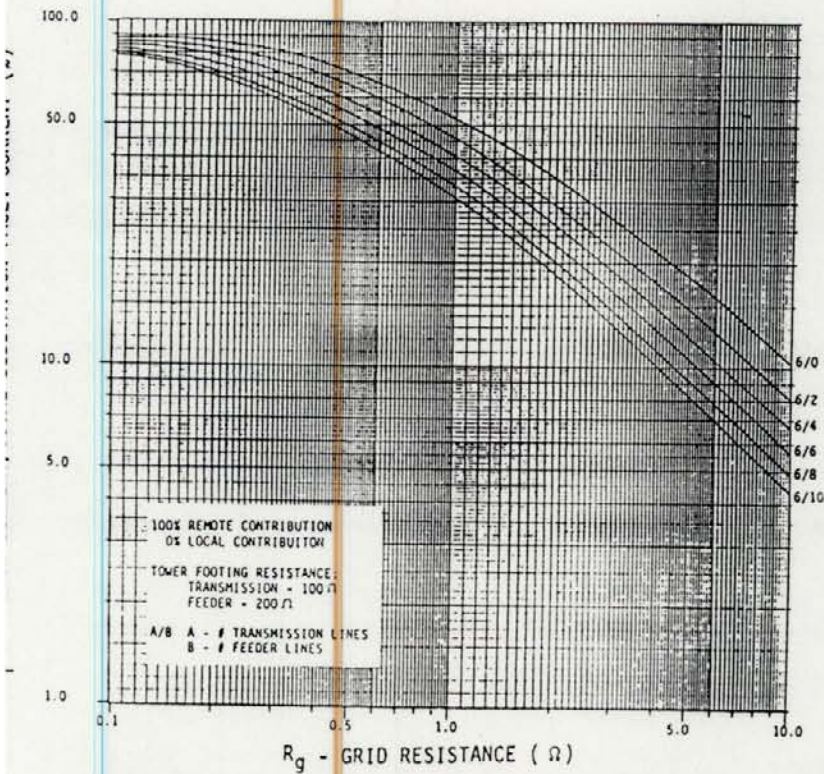


Figure 14. Split factor curves - S_f vs R_g .

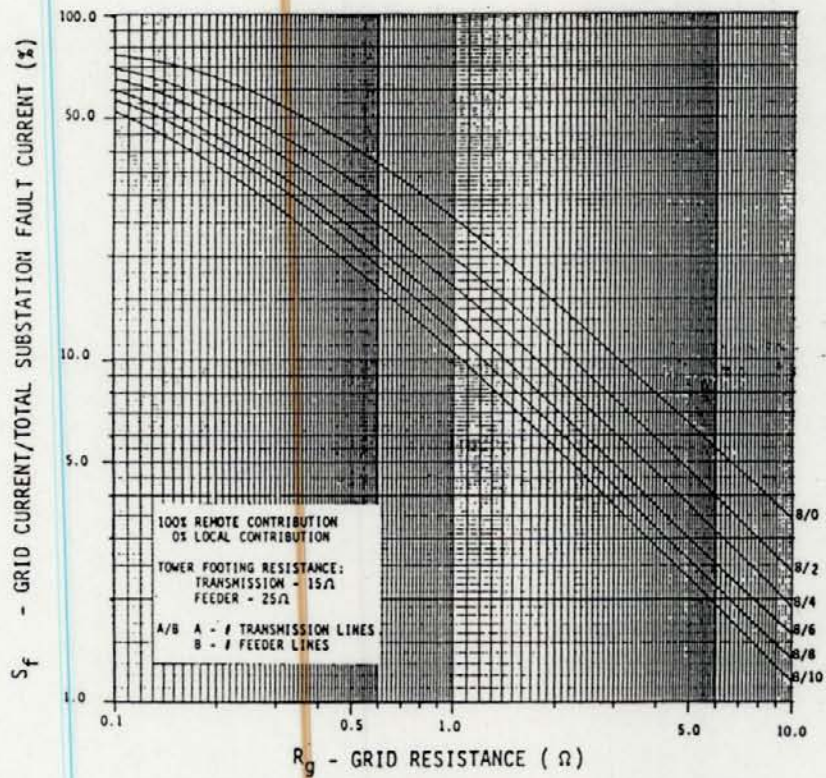


Figure 15. Split factor curves - S_f vs R_g .

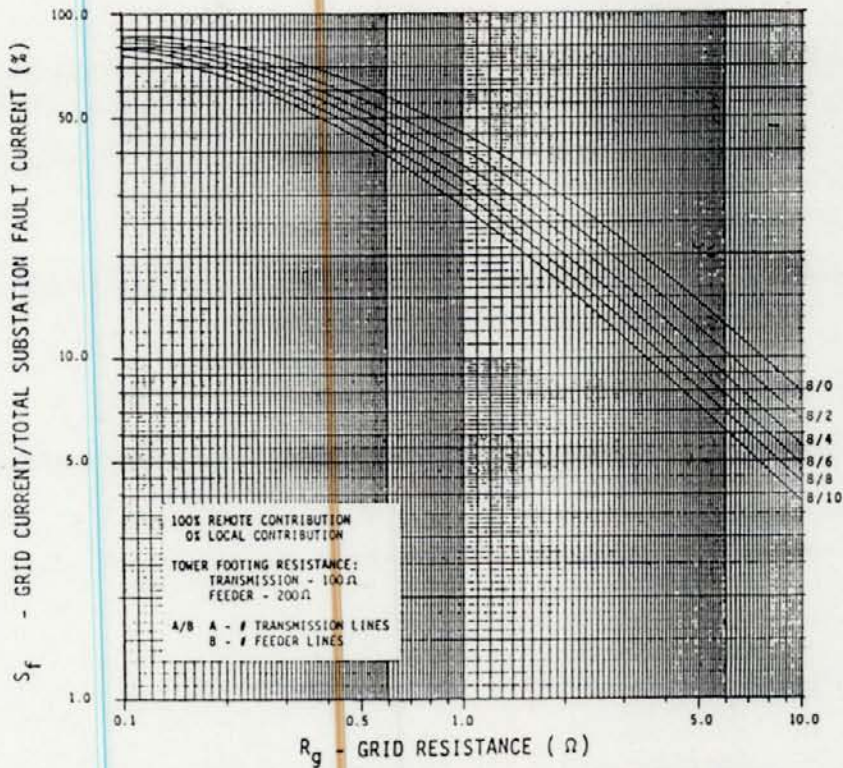


Figure 16. Split factor curves - S_f vs R_g .

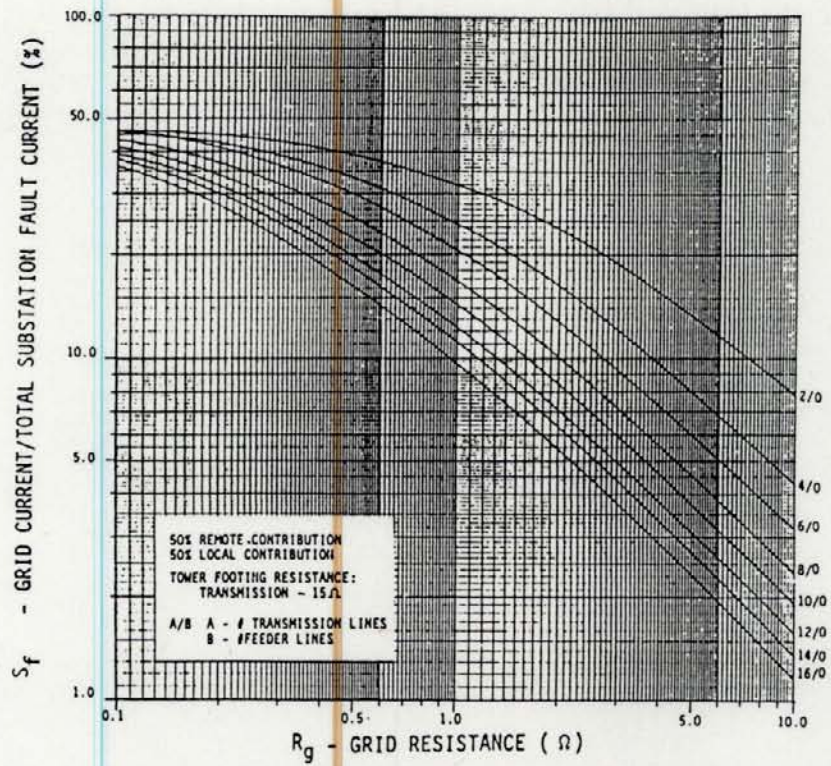


Figure 17. Split factor curves - S_f vs R_g .

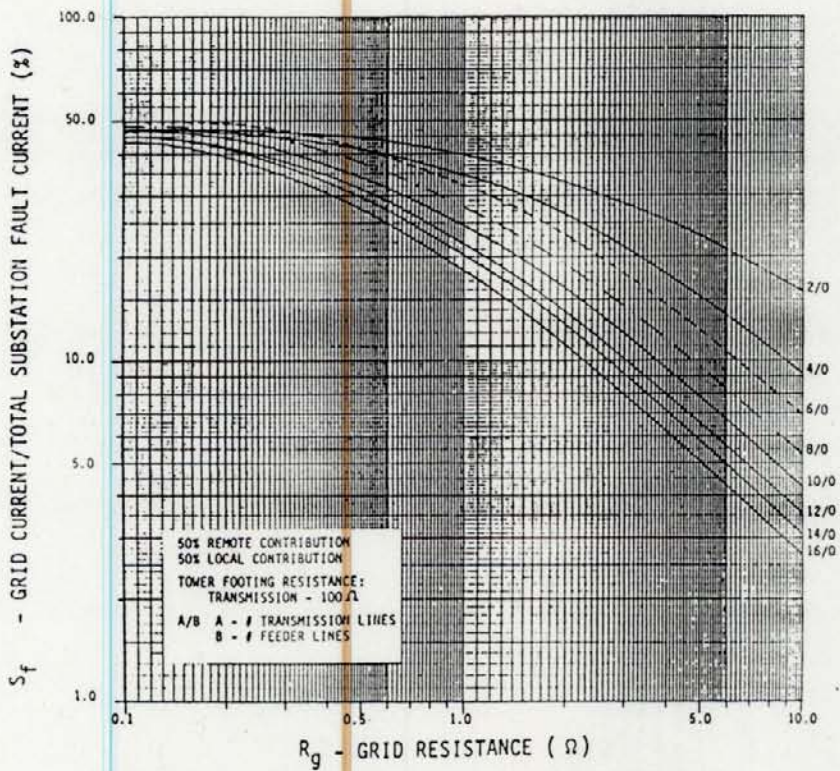


Figure 18. Split factor curves - S_f vs R_g .

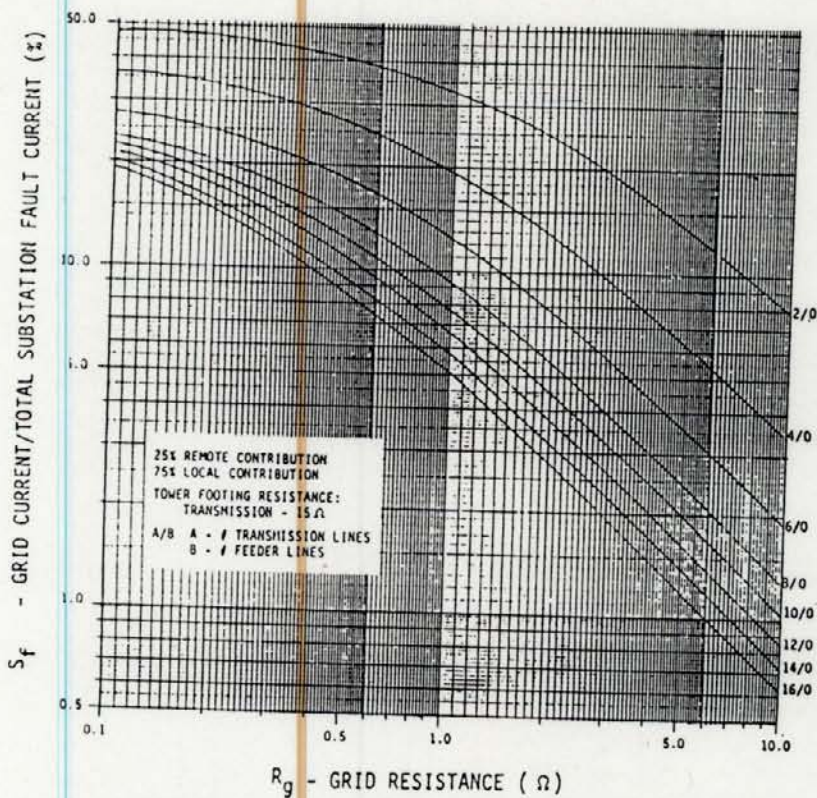


Figure 19. Split factor curves - S_f vs R_g .

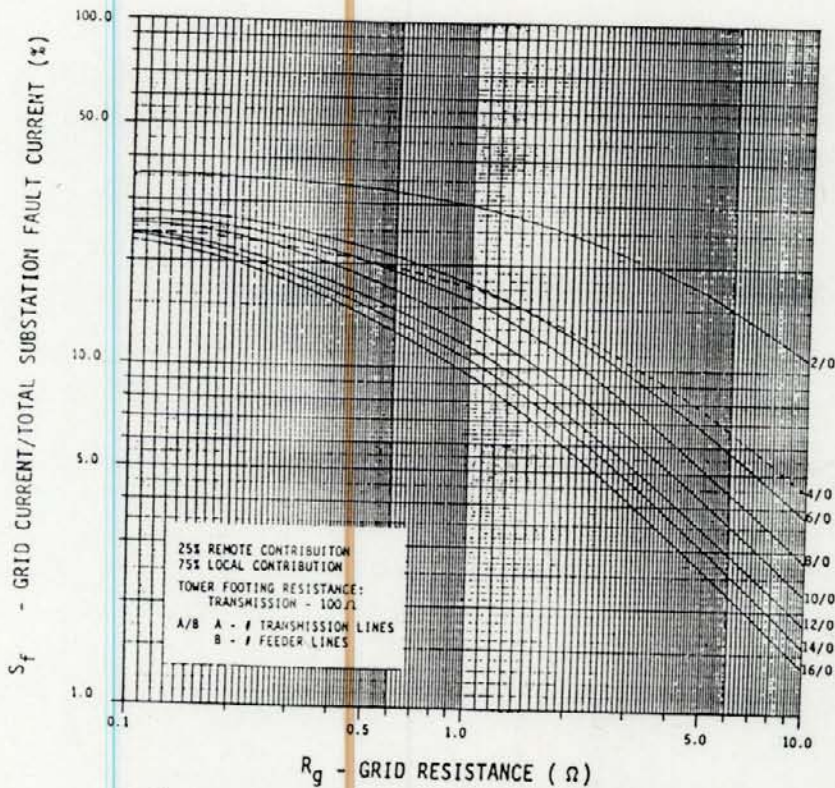


Figure 20. Split factor curves - S_f vs R_g .