



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

**APLICACIÓN DE POZOS DE MATERIALES DE BAJA RESISTIVIDAD EN  
SUBESTACIONES ELÉCTRICAS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LA RED DE  
TIERRAS**

**Boris Walter Ronald Cordova Maas**

Asesorado por el Ing. José Guillermo Bedoya Barrios

Guatemala, noviembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE POZOS DE MATERIALES DE BAJA RESISTIVIDAD EN SUBESTACIONES  
ELÉCTRICAS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**BORIS WALTER RONALD CORDOVA MAAS**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA BARRIOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |                                     |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos     |
| VOCAL I    | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II   | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  |
| VOCAL III  | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón   |
| VOCAL IV   | Br. Juan Carlos Molina Jiménez      |
| VOCAL V    | Br. Mario Maldonado Muralles        |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez     |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

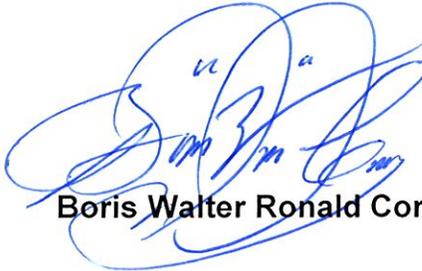
|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| DECANO     | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Fernando Rodas       |
| EXAMINADOR | Ing. Armando Gálvez Castillo     |
| EXAMINADOR | Ing. Romeo Neftali López Orozco  |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Veliz Vargas |

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

### APLICACIÓN DE POZOS DE MATERIALES DE BAJA RESISTIVIDAD EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha octubre de 2007.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Boris Walter Ronald Cordova Maas', written over a circular stamp or seal.

**Boris Walter Ronald Cordova Maas**



Guatemala, 10 de junio de 2011

FACULTAD DE INGENIERIA

Ing. Jorge Pérez  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Ing. Pérez reciba un atento saludo,

Por este medio me permito informarle que he revisado el trabajo de graduación del estudiante BORIS WALTER RONALD CORDOVA MAAS, con carné 199819569, titulado: **APLICACIÓN DE POZOS DE MATERIALES DE BAJA RESISTIVIDAD EN SUBESTACIONES ELECTRICAS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS.**

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,



  
Ing. José Guillermo Bedoya Barrios  
Colegiado No. 4846  
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 72. 2011

Guatemala, 7 de OCTUBRE 2011.

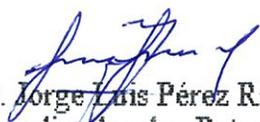
Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**APLICACIÓN DE POZOS DE MATERIALES DE BAJA  
RESISTIVIDAD EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS PARA  
REDUCIR LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS,** del  
estudiante **Boris Walter Ronald Córdova Maas**, que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Jorge Luis Pérez Rivera  
Coordinador de Potencia

JLPR/sro





FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 62. 2011.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; BORIS WALTER RONALD CÓRDOVA MAAS titulado: APLICACIÓN DE POZOS DE MATERIALES DE BAJA RESISTIVIDAD EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 13 DE OCTUBRE 2011.



DTG. 457.2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE POZOS DE MATERIALES DE BAJA RESISTIVIDAD EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS PARA REDUCIR LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS**, presentado por el estudiante universitario **Boris Walter Ronald Cordova Maas**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 4 de noviembre de 2011.



/gdech

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por guiarme en todo momento, darme retos en la vida y la fortaleza para salir adelante.
- Mi padre** Por su enseñanza a ver los obstáculos que debo superar antes de que sucedan y con ello prepararme con antelación, narrándome sus vivencias, errores, y éxitos.
- Mi madre** Por su apoyo incondicional, palabras de aliento, guiar mis primeros pasos, creer siempre en mí y demostrar su gran amor de madre.
- Mis hermanos** Por su solidaridad, consejos y confianza, así como estar siempre cuando Más los he necesitado. Especialmente a Luis y Brenda Cordova ya que han sido un ejemplo profesional a seguir así como no dejar que desista de mis metas.
- Mi hija** Por ser mi angelito que Dios me ha dado, y con ello convertirse en la razón más importante de mi vida para seguir adelante y lograr ser su ejemplo a seguir.

**Mi pareja**

Por apoyarme y comprender de la mejor manera las difíciles decisiones que tomamos con el objetivo de resolver los distintos inconvenientes que a ambos nos presenta la vida, tanto en el ámbito laboral, social familiar y personal.

**Mis amigos**

Por escucharme, darme sus consejos y brindarme su apoyo, en el transcurso de mi vida.

**Mi asesor**

Ing. Guillermo Bedoya por guiarme con su amplia experiencia para poder culminar satisfactoria esta fase académica y convertirse en un amigo y mentor.

**A los profesionales**

Ingenieros Guillermo Puente, Edgar Montufar, Gustavo Orozco, Armando Gálvez e Ing. Armando Rivera que me brindaron sus consejos y guía cuando lo necesité, así como a todos aquellos que me ayudaron de una u otra manera a completar esta etapa de mi formación profesional.



|      |          |   |    |
|------|----------|---|----|
|      | 1.2.5.3. | Descargas positivas.....  | 14 |
| 1.3. |          | Probabilidad de descargas electroatmosféricas y pararrayos...                                   | 15 |
|      | 1.3.1.   | Pararrayos, estructura, funcionamiento y sus efectos con las descargas electroatmosféricas..... | 16 |
| 1.4. |          | Nivel Isoceráunico.....   | 17 |
|      | 1.4.1.   | Densidad de Rayos Eléctricos a Tierra (DRT).....  | 19 |
|      | 1.4.2.   | Incidencia de rayos en función de la latitud... ..  | 18 |
|      | 1.4.3.   | Nivel ceráunico por cada estación sinóptica... ..   | 19 |
|      | 1.4.4.   | Líneas isoceráunicas (isolíneas).....   | 20 |
|      | 1.4.5.   | Mapa isoceráunico de la República de Guatemala... ..  | 21 |
| 1.5. |          | Efecto general de una descarga en subestaciones eléctricas..                                    | 22 |
|      | 1.5.1.   | Efecto de falla a tierra en una subestación eléctrica. .  | 23 |
|      | 1.5.2.   | Efecto de la resistencia a tierra de la subestación eléctrica.....                              | 24 |
|      | 1.5.3.   | El efecto de la resistencia de falla.....   | 24 |
|      | 1.5.4.   | Efecto del cable de guarda y del conductor neutro....   | 25 |
|      | 1.5.5.   | Efecto de tuberías y cables enterrados directamente.....  | 26 |
|      | 1.5.6.   | El efecto de la asimetría.....  | 26 |
|      | 1.5.7.   | Efecto de cambios futuros.....  | 28 |
| 1.6. |          | Tipos de fallas que pueden ocurrir en una subestación eléctrica.....                            | 28 |
|      | 1.6.1.   | Sobretensiones externas.....  | 28 |
|      | 1.6.2.   | Sobretensiones internas.....  | 29 |
|      | 1.6.3.   | Sobretensiones por desconexión brusca de cargas..   | 30 |
|      | 1.6.4.   | Fallas a tierra en una subestación eléctrica.....   | 30 |
|      | 1.6.5.   | Los peores tipos de fallas y su ubicación.....  | 32 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 2.       | MÉTODOS DE PUESTAS A TIERRA A SUELOS.....                      | 33 |
| 2.1.     | Qué es una puesta a tierra.....                                | 33 |
| 2.1.1.   | Componentes de la resistencia de un electrodo a tierra.....    | 33 |
| 2.2.     | Beneficios de las tierras físicas.....                         | 35 |
| 2.3.     | Métodos de puestas a tierra.....                               | 35 |
| 2.3.1.   | Método Norteamericano.....                                     | 35 |
| 2.3.2.   | Métodos de puntas de inicio.....                               | 36 |
| 2.3.3.   | Métodos de protección para subestaciones eléctricas.....       | 38 |
| 2.3.3.1. | Métodos de los ángulos fijos.....                              | 39 |
| 2.3.3.2. | Método promedio del modelo electrogeométrico.....              | 40 |
| 2.4      | Sistemas y finalidad de puestas a tierra.....                  | 42 |
| 2.4.1.   | Estándares de protección para sistemas a tierra.....           | 43 |
| 2.4.2.   | Sistemas de tierra para equipos de comunicaciones.....         | 43 |
| 2.4.3.   | Sistemas de tierra grupo electrógeno.....                      | 44 |
| 2.4.4.   | Sistemas de tierra para la limpieza del neutro... ..           | 44 |
| 2.4.5.   | Sistemas de tierras estáticas.....                             | 44 |
| 2.4.6.   | Sistema de protección de puesta a tierra <i>Franklin</i> ....  | 44 |
| 2.4.7.   | Sistema tipo jaula de <i>Faraday</i> .....                     | 45 |
| 2.5.     | Propiedades electromagnéticas de los sistemas de tierras. .... | 46 |
| 2.6.     | Tipos geofísicos de suelos.....                                | 48 |
| 2.6.1.   | Composición del terreno.....                                   | 49 |
| 2.6.2.   | Sales solubles en el suelo.....                                | 49 |
| 2.6.3.   | Estratigrafía del suelo.....                                   | 49 |
| 2.6.4.   | Granulometría del suelo.....                                   | 50 |
| 2.6.5.   | Higrometría del suelo.....                                     | 50 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.6.6.  | Temperatura del suelo.....   | 50 |
| 2.6.7.  | Compactación del suelo.....  | 51 |
| 2.7.    | Conceptos generales de la resistividad.....                              | 51 |
| 2.7.1.  | Importancia de medir la resistividad del suelo... ..                     | 51 |
| 2.8.    | Resistividad de suelos.....  | 52 |
| 2.8.1.  | Clasificación de resistividad promedio de suelos .....                   | 53 |
| 2.8.2.  | Perfiles de resistividad.....  | 54 |
| 2.8.3.  | Resistencia total de un sistema de tierra... ..                          | 55 |
| 2.9.    | Influencia de la humedad.....  | 56 |
| 2.10.   | Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica... ..              | 56 |
| 2.10.1. | Aumento del número de electrodos en paralelo .....                       | 56 |
| 2.10.2. | Aumento del diámetro del electrodo.....                                  | 57 |
| 2.10.3. | Aumento de la longitud de penetración del<br>electrodo.....              | 58 |
| 2.10.4. | Tratamiento químico del terreno.....                                     | 58 |
| 2.11.   | Redes de tierras.....  | 58 |
| 3.      | INSTRUMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE SUELOS Y<br>RESISTIVIDAD.....           | 63 |
| 3.1.    | Tipos y modelos de medidores de resistividad.....                        | 63 |
| 3.2.    | El Medidor de tierras ( <i>Megger</i> ).....                             | 65 |
| 3.3.    | Medición de la resistividad del terreno.....                             | 66 |
| 3.3.1.  | Método <i>Wenner</i> (4 puntos) de resistividad del<br>terreno.....      | 66 |
| 3.3.2.  | Método <i>Schlumberger</i> o electrodos espaciados no<br>igualmente..... | 68 |
| 3.3.3.  | Interpretación de la curva de resistividad aparente ...                  | 71 |
| 3.3.4.  | Resistividad equivalente del terreno.....                                | 72 |
| 3.3.5.  | Incremento de profundidad de enterramiento                               |    |

|         |   |    |
|---------|---|----|
|         | vertical.....   | 74 |
| 3.3.6.  | Efecto de profundidad de enterramiento.....   | 75 |
| 3.3.7.  | Efecto de profundidad de electrodos.....  | 75 |
| 3.3.8.  | Medición de resistencia método de la caída<br>de potencial.....   | 76 |
| 3.3.9.  | Prueba en una subestación grande.....   | 79 |
| 3.3.10. | Medición de la Resistencia de sistemas de<br>electrodos de tierra grandes, método<br>de pendiente... .. | 81 |
| 3.3.11. | Verificaciones periódicas de los sistemas<br>de aterrizaje.....   | 84 |
| 4.      | POZOS A TIERRAS DE MATERIAL DE BAJA RESISTIVIDAD<br>Y ANÁLISIS QUÍMICO-ELÉCTRICO.....                   | 85 |
| 4.1.    | Método del cambio del terreno por otro de menor<br>resistividad.....                                    | 85 |
| 4.2.    | Formato químico electrolítico del terreno.....  | 87 |
| 4.3.    | Tipos de tratamiento químico del terreno.....   | 87 |
| 4.3.1.  | Bentonita.....  | 88 |
| 4.3.2.  | Compuesto <i>THOR-GEL</i> .....   | 89 |
| 4.3.3.  | Compuesto <i>TERRAL – LÍQUIDO</i> .....   | 90 |
| 4.3.4.  | Compuesto <i>PROGAS</i> .....   | 91 |
| 4.3.5.  | Compuesto <i>ION-FORTE</i> .....  | 92 |
| 4.3.6.  | Compuesto <i>QUIBACSOL</i> .....  | 93 |
| 4.3.7.  | Compuesto <i>SAN –EARTH</i> (cemento conductor).....  | 94 |
| 4.4.    | Características químicas y eléctricas de los tratamientos.....  | 94 |
| 4.5.    | Componentes químicos equivalentes a los tratamientos.....   | 95 |
| 4.5.1.  | Cloruro de sodio... ..  | 96 |
| 4.5.2.  | Carbón vegetal.....   | 96 |

|                       |   |     |
|-----------------------|---|-----|
| 4.5.3.                | Polvo de grafito.....   | 96  |
| 4.6.                  | Estabilidad y durabilidad de los tratamientos.....  | 97  |
| 4.7.                  | Procedimiento para la creación de un pozo a tierra.....   | 98  |
| 4.7.1.                | Instalación de pozo a tierra vertical.....  | 100 |
| 4.7.2.                | Sistemas de puestas a tierra a pozos<br>horizontales.....   | 104 |
| 4.7.3.                | Influencia recíproca entre pozos de electrodo... ..   | 107 |
| 4.7.4.                | Descripción general del procedimiento y<br>pasos a seguir para el sistema de tierras<br>de una subestación eléctrica..... | 108 |
| 4.7.5.                | Ejemplificación de la creación de un pozo de<br>materiales de baja resistividad.....                                      | 116 |
| CONCLUSIONES .....    |   | 123 |
| RECOMENDACIONES ..... |   | 125 |
| BIBLIOGRAFÍA .....    |   | 127 |
| ANEXOS .....          |   | 129 |





# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| 1. Perfiles verticales de conductividad eléctrica .....                | 4  |
| 2. Circuito global Simplificado .....                                  | 6  |
| 3. Separación de carga .....   | 8  |
| 4. Modelo inductivo de <i>Elster – Geitel</i> .....                    | 9  |
| 5. Modelo inductivo de <i>Wilson</i> .....                             | 10 |
| 6. Generación de un rayo a tierra.....                                 | 12 |
| 7. Campo eléctrico generado por un rayo .....                          | 14 |
| 8. Descargas positivas en una nube convectiva.....                     | 15 |
| 9. Curva de rayos en función de la latitud .....                       | 19 |
| 10. Mapa de niveles isocerámico en la República de Guatemala .....     | 21 |
| 11. Contorno equipotencial de una rejilla .....                        | 23 |
| 12. Falla dentro de una subestación local, con neutro aterrizado ..... | 25 |
| 13. Fallas por corto circuito a tierra en un sistema de potencia.....  | 31 |
| 14. Componentes de la resistencia de la tierra en un electrodo.....    | 34 |
| 15. Área de protección utilizando el método de puntas .....            | 37 |
| 16. Cono de protección .....   | 40 |
| 17. Método de la esfera rodante.....                                   | 41 |
| 18. Blindaje por mástil de protección para corriente de rayo.....      | 42 |
| 19. Sistema <i>Franklin</i> de potencias con pararrayos.....           | 45 |
| 20. Sistema de protección de <i>Faraday</i> con paraguas .....         | 46 |
| 21. Trayectorias de corriente en varios neutros a tierra .....         | 47 |
| 22. Trayectorias de corriente en varios neutros a tierra .....         | 49 |
| 23. Gráfico de perfil de resistividad .....                            | 55 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 24. | Rejilla con electrodos embebidos verticalmente y uniones .....  | 60  |
| 25. | Descripción de botonería e indicadores en la pantalla del <i>Megger</i> .....   | 65  |
| 26. | Método de <i>Wenner</i> para la medición de la resistividad .....   | 67  |
| 27. | Electrodos no igualmente espaciados, <i>Schulemberger</i> o <i>Palmer</i> .....   | 69  |
| 28. | Curva de resistividad aparente por sondeo vertical con curva .....  | 72  |
| 29. | Resistencia vs. longitud de barra .....   | 74  |
| 30. | Resistencia vs. longitud .....  | 75  |
| 31. | Medición de resistencia método de la caída de potencial .....   | 77  |
| 32. | Curvas de resistencia (a) e intersección (b) de la resistencia .....  | 80  |
| 33. | Localización de la sonda de potencial para el método de pendiente .....   | 82  |
| 34. | Instalación pozo vertical .....   | 101 |
| 35. | Pozo vertical.....  | 103 |
| 36. | Pozo horizontal .....   | 105 |
| 37. | Configuraciones que se pueden armar .....   | 106 |
| 38. | Influencia entre pozos de electrodos.....   | 107 |
| 39. | Gráfico comparativo entre curvas .....  | 109 |
| 40. | Gráfico comparativo entre curvas real y esperada.....   | 114 |
| 41. | Vista de planta subestación 230 kV, escala 1/300, sistema de tierra<br>con aplicación de pozos y sus áreas de influencia (círculos) ..... | 116 |
| 42. | Detalle de un pozo de baja resistividad.....  | 121 |

## TABLAS

|      |   |     |
|------|---|-----|
| I.   | Valores cerámicos de red de estación sinóptica Meteorológica..... | 20  |
| II.  | Radios de protección, según la norma C 17-102 .....               | 38  |
| III. | Rangos generales de resistividad del suelo.....                   | 53  |
| IV.  | Rangos de Resistividad del suelo .....                            | 54  |
| V.   | Valores de O/C para varios valores de $\mu$ .....                 | 83  |
| VI.  | Dosis de <i>Thor-Gel</i> para distintos tipos de terreno.....     | 90  |
| VII. | Dosis <i>Thor-Gel</i> por metro cúbico .....                      | 100 |

|  |     |
|--|-----|
| VIII. Distribución de valores de la medición de la resistencia ..... | 111 |
| IX. Rangos de resistividad del suelo .....                           | 112 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo  | Significado   |
|----------|---|
| S        | Área cubierta por el perímetro del electrodo de tierra, en metros cuadrados |
| E        | Campo eléctrico   |
| Ng       | Cantidad de rayos a tierra  |
| Tc       | Corresponde al nivel cerámico de una zona específica                        |
| Is       | Corriente de rayo   |
| Is       | Corriente del rayo, en kA   |
| NN       | Dentro de la nube o entre nube y nube                                       |
| S        | Distancia de impacto  |
| NT       | Entre la nube y tierra  |
| $\theta$ | Es el ángulo de fase del circuito, en radianes                              |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b><math>\alpha</math></b>  | Es el ángulo del voltaje de la corriente de iniciación en radianes   |
| <b>Ta</b>                   | Es el valor de la constante de tiempo de la compensación de CD, en segundos                                      |
| <b><math>i_f(t)</math></b>  | Es el valor de la corriente asimétrica de falla, en amperios, en cualquier instante t, donde t está, en segundos |
| <b>E</b>                    | Es el voltaje rms del pre falla en voltios, línea a neutro   |
| <b><math>\lambda</math></b> | Es igual a la latitud  |
| <b>Yac</b>                  | Es la admitancia del sistema equivalente de CA, en mhos  |
| <b>Nc</b>                   | Es la cantidad de rayos entre nubes  |
| <b>Ng</b>                   | Es la densidad de rayos eléctricos o número de rayos/km <sup>2</sup> /año  |
| <b><math>\omega</math></b>  | Es la frecuencia del sistema, en radianes / segundos   |
| <b>Nc/Ng</b>                | Es la relación de número de rayos en función de la latitud,  |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Df</b>             | Factor de decremento   |
| <b>Z<sub>0</sub></b>  | Impedancia característica de la línea, en $\Omega$                               |
| <b>MgO</b>            | Magnesia   |
| <b>B</b>              | Máxima profundidad de conductor enterrado, medida desde la superficie, en metros |
| <b>K<sub>2</sub>O</b> | Potasio  |
| <b>B</b>              | Profundidad de los electrodos, en m o cm   |
| <b>hi</b>             | Profundidad desde la superficie al estrato i, en metros                          |
| <b>X<sub>2</sub></b>  | Reactancia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia (-)                 |
| <b>X<sub>1</sub></b>  | Reactancia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia (+)                 |
| <b>X<sub>0</sub></b>  | Reactancia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia cero                |
| <b>Rf</b>             | Resistencia de falla   |
| <b>R<sub>2</sub></b>  | Resistencia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia (-)                |

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>R0</b>              | Resistencia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia cero |
| <b>R1</b>              | Resistencia equivalente del sistema ( $\Omega$ ), de secuencia (+) |
| <b>Rf</b>              | Resistencia estimada de la falla ( $\Omega$ ) se asume $R_f=0$     |
| <b>R</b>               | Resistencia medida, en $\Omega$                                    |
| <b>P</b>               | Resistividad aparente del suelo, en $\Omega\text{-m}$              |
| <b>A</b>               | Separación entre electrodos adyacentes, en m. o cm                 |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b> | Soda   |
| <b>I<sub>0</sub></b>   | Valor rms simétrico de la corriente de falla de secuencia cero(A)  |
| <b>E</b>               | Voltaje de fase-neutro (V)   |

## GLOSARIO

**Cumulonimbus o  
cumulonimbos Cb**

Son nubes de gran desarrollo vertical, que internamente están formadas por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva en forma de espiral rotatoria que tiene un sentido anti horario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur.

**Descarga electrostática**

Conocido por sus siglas en inglés: *electrostatic discharge* (ESD), es un fenómeno electrostático que hace que circule una corriente eléctrica repentina y momentáneamente entre dos objetos de distinto potencial eléctrico

**Escala Sinóptica**

En meteorología se conoce como escala grande o escala ciclónica es una escala de longitud horizontal del orden de los 1.000 km o más

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Pulso Electromagnético</b>       | Conocido por sus siglas en inglés <i>Electromagnetic pulse</i> (EMP) puede referirse a: Radiación electromagnética proveniente de una gran explosión (especialmente una explosión nuclear) o un campo magnético que fluctúa intensamente causado por la fuerza de empuje del efecto <i>Compton</i> en electrones y fotoelectrones de los fotones dispersados en los materiales del aparato electrónico o explosivo, o a su alrededor. |
| <b>Radiación terrestre natural</b>  | Principalmente sobre los continentes y de un efecto muy pequeño comparado con otras   |
| <b>Radiación ultravioleta solar</b> | Produce la ionización por un fotón. Este fenómeno ocurre principalmente en la alta atmósfera, por encima de 70 km. y, aunque su efecto puede llegar a la superficie terrestre, su efecto queda muy atenuado   |
| <b>Rayos cósmicos</b>               | En general son protones muy energéticos que penetran en la atmósfera chocando con las moléculas neutras del aire de forma que se puede liberar algún electrón   |

**Tropopausa**

Marca el límite entre la tropósfera, la capa inferior de la atmósfera terrestre, y la estratósfera. Es una región de relativa calma ya que todos los fenómenos meteorológicos y climáticos tienen lugar por debajo de esta capa.



## RESUMEN

En Guatemala según nuestro mapa cerámico el cual se presenta en este documento, tenemos regiones altos niveles de probabilidad que existan descargas electroatmosféricas, que pueden provocar resultados catastróficos, tanto para las personas como para los equipos instalados en una subestación eléctrica, otro tipo de efectos indeseables son las sobretensiones y fallas internas o externas.

Las subestaciones eléctricas son instalaciones de vital importancia para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, cuentan con equipos de alto costo para la transformación y regulación de la energía eléctrica que consumimos, es por ello que su diseño contempla métodos seguros para su operación y protección. Por lo que se diseñan sistemas de aterrizaje y disipación de corrientes indeseables y peligrosas, basándose sobre las normas y estándares nacionales e internacionales.

Este documento contempla y da a conocer un método innovador que propone utilizar la aplicación de pozos rellenos con materiales de baja resistividad aplicado a las subestaciones eléctricas como una opción técnico científica aceptable para proteger dichas instalaciones de los efectos mencionados, con la aplicación de estos métodos se garantiza la buena operación y confiabilidad del sistema de puestas a tierra SPT, y con ello la continuidad del servicio energético, desde su generación hasta su consumo, esperando con ello contribuir con el desarrollo de nuestro país.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Brindar un método y procedimiento técnico-científico de mayor seguridad y confiable para la protección contra descargas y fallas en subestaciones eléctricas.

### **Específicos**

1. Poder prever la peligrosidad de descargas atmosféricas y nivel cerámico donde se encuentra ubicada la subestación eléctrica.
2. Poder aplicar un método innovador de alta confiabilidad para la protección de las subestaciones eléctricas.
3. Contar con un método práctico y efectivo para realizar mediciones del estado de los sistemas de puestas a tierra en subestación eléctrica.
4. Contar con distintas opciones de materiales de baja resistividad para realizar mantenimientos preventivos ó correctivos a los sistemas de puestas a tierra en una subestación eléctrica.
5. Garantizar que las subestaciones se encuentran debidamente protegidas y monitoreadas.

## HIPÓTESIS

La humedad, temperatura, grado de sales disueltas en un suelo varían según la localidad, clima, composición y compactación del terreno; toda esta información es utilizada para elegir un buen método natural o químico del tratamiento de suelos con bases técnico-científicas para una mejor disipación de corrientes y tensiones indeseables provocadas por descargas electroatmosféricas, sobretensiones o fallas internas y externas que ocurran en una subestación eléctrica.

El estudio se enfoca en demostrar que la aplicación del método de creación de pozos de material de baja resistividad en subestaciones eléctricas, nos proporciona y permite una vía más eficiente que ofrezca menor oposición y así conduzca y absorba todas las corrientes anormales, para evitar que aparezcan tensiones peligrosas para la vida humana y los equipos instalados que son de alto costo.

Así como la preservación en condiciones óptimas del sistema de puestas a tierra en una subestación eléctrica, representan en definitiva instalaciones más seguras tanto en subestaciones para generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, ya que sus subestaciones eléctricas elevadoras, reductoras, de maniobra y de paso, que estén instaladas, posean un método de protección que se considera eficiente para absorber y disipar estos efectos dañinos que pudiera ser que ocurran en estas instalaciones.

## INTRODUCCIÓN

El rayo puede originar descargas de hasta 100 000 000 de voltios, con una energía de hasta 200 000. Por lo mismo, para evitar y atenuar la peligrosidad de estas perturbaciones, es necesario contar con sistemas que ofrezcan una mínima resistencia al paso de esta energía y la canalicen de forma segura tanto para las personas como para la red interconectada y los equipos instalados en una subestación eléctrica.

Uno de los aspectos principales para la protección contra sobre tensiones es disponer de una red de tierras adecuada, de baja resistividad a la cual se conectan los neutros de los aparatos, los cables de guarda, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

La protección eléctrica y electrónica tiene dos componentes fundamentales, que son indisolubles uno de otro: los equipos protectores (pararrayos, filtros, supresores, etc.) y el sistema dispersor o sistema y puesta a tierra (SPT), entendiéndose este como el pozo infinito donde ingresan corrientes de falla o transitorios y no tienen retorno porque van a una masa neutra y son realmente dispersados.

Un pozo de tierra es una obra que se hace en la instalación interna, con el fin de dirigir la energía perdida a la tierra, eliminando el riesgo de electrizamientos y descargas en caso de fallas. Podemos decir que un pozo contiene tierra tratada y aditivos químicos especiales que aseguran una baja resistencia del terreno al paso de la corriente eléctrica, hasta donde se conecta

el circuito de tierra de las instalaciones internas (en caso lo tuviera), con la finalidad de proteger a las personas e instalaciones de posibles descargas eléctricas.

# **1. CONCEPTOS GENERALES Y DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

## **1.1. Definición y formación de las descargas atmosféricas**

Una tormenta es un fenómeno atmosférico caracterizado por la coexistencia próxima de dos o más masas de aire de diferentes temperaturas. El contraste térmico y otras propiedades de las masas de aire (humedad) dan origen al desarrollo de grandes y fuertes movimientos ascendentes y descendentes (convección) produciendo una serie de efectos característicos, como fuertes lluvias y viento en la superficie e intensa actividad eléctrica. Las descargas atmosféricas se interpretan como actividad eléctrica, la cual se pone de manifiesto cuando se alcanza la tensión de ruptura del aire, momento en el que se establece el rayo eléctrico que da origen a los fenómenos característicos de relámpago y trueno.

La aparición de relámpagos depende de factores tales como el grado de ionización atmosférico y el tipo y concentración de precipitación. Las tormentas obtienen su energía de la liberación de calor latente que se produce en la condensación del vapor de agua en las parcelas ascendentes de la tormenta. El ciclo de actividad de una tormenta típica presenta varias facetas; una fase inicial de formación, intermedia de madurez y final de decaimiento que dura en torno a una o dos horas.

Típicamente, una célula convectiva de tormenta posee una extensión horizontal de unos 10 x 10 kilómetros. Sin embargo, frecuentemente se

producen simultánea o casi simultáneamente varias células convectivas que desencadenan fuertes precipitaciones durante un período de tiempo más largo.

### **1.1.1. Condiciones atmosféricas para su formación**

Los requisitos iniciales para la formación de Cumulonimbus que desemboquen en tormenta son: Primero, es la presencia de aire húmedo en un considerable espesor de la atmósfera, esto garantiza que el aire arrastrado mantenga un suministro adecuado de humedad a medida que prosigue el desarrollo vertical de la nube convectiva.

Segundo, es que exista un gradiente vertical de temperatura superior al de la saturación, hasta grandes alturas, esto implica que el gradiente típico del ambiente será tal que la atmósfera se encuentre en un estado condicional, por un gran espesor.

El tercero es un fuerte mecanismo de elevación para forzar el aire hacia arriba, a niveles altos, esto provoca que el aire se sature antes que se realice la inestabilidad. Se precisa un mecanismo de elevación para provocar la expansibilidad con enfriamiento; ello se consigue con procesos tales como el ascenso orográfico, la elevación frontal, la convergencia, la insolación etc.

## **1.2. Teoría de la formación del rayo y fallas de efecto similar**

El rayo es una poderosa descarga electrostática natural, producida durante una tormenta eléctrica; la descarga eléctrica precipitada del rayo es acompañada por la emisión de luz y se le denomina relámpago, siendo la electricidad o corriente eléctrica que pasa a través de la atmósfera caliente y

expande rápidamente el aire, produciendo el ruido característico del rayo (trueno). Generalmente, los rayos son producidos por partículas positivas por la tierra y negativas a partir de nubes de desarrollo vertical llamadas cumulonimbos.

Cuando un cumulonimbo alcanza la tropopausa, las cargas positivas de la nube atraen a las cargas negativas, causando un relámpago o rayo. Esto produce un efecto de ida y vuelta; se refiere a que al subir las partículas instantáneamente regresan causando la visión de que los rayos bajan. La descarga eléctrica sigue siendo un tema de debate, existen varias teorías de formación de los rayos, que van desde las perturbaciones atmosféricas (viento, humedad y presión) hasta los efectos del viento solar y la acumulación de partículas solares cargadas. Se cree que el hielo es el elemento clave en el desarrollo, propiciando una separación de las cargas positivas y negativas dentro de la nube.

### **1.2.1. Circuito eléctrico global y efectos similares**

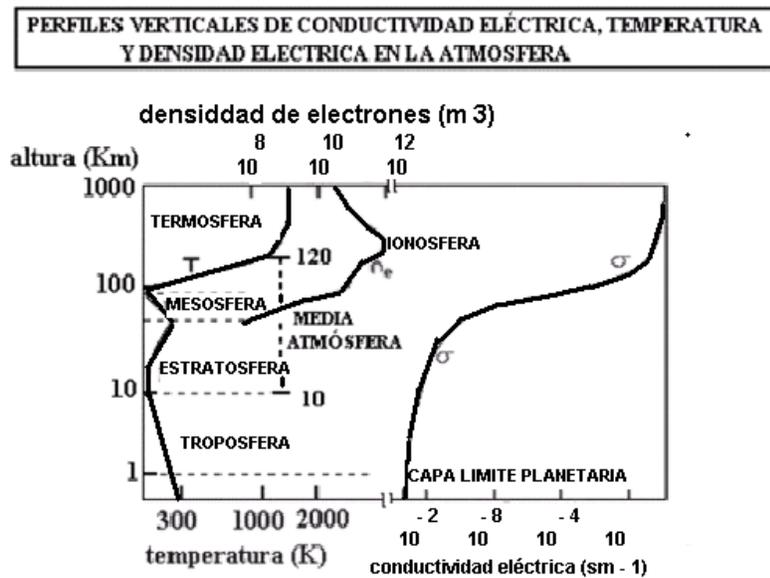
Los aspectos que dan lugar y forma a un circuito eléctrico, de movimientos de cargas en forma global, enfocado a la tierra y nubes son: Un aislante casi perfecto, campo eléctrico en la superficie, punto de referencia de potencial 0, punto de referencia de potencial positivo y conductividad necesaria para que se de el evento. En la mayoría de los fenómenos atmosféricos se puede considerar al aire como un aislante casi perfecto; sin embargo, siempre es posible detectar y medir una corriente eléctrica débil en la atmósfera (con o sin nubes). En ausencia de nubes, es decir, en condiciones de buen tiempo, se puede detectar la existencia de un campo eléctrico muy tenue normal a la superficie terrestre, orientada de arriba a abajo y cuyo valor decrece con la altura.

Como referencia se considera a la tierra con potencial cero y positivo a la atmósfera. El campo eléctrico detectado cuando hay buen tiempo se debe a la pequeña conductividad que poseen los iones encontrados en la atmósfera. Los iones producidos por efectos similares son, los rayos cósmicos, la radiación ultravioleta solar y la radiación terrestre natural.

### 1.2.2. Perfiles verticales de temperatura, conductividad y densidad eléctrica en la atmósfera

Como consecuencia de los procesos anteriores que dan forma al circuito eléctrico global aparece una capa atmosférica, llamada ionosfera, caracterizada por un brusco aumento de la conductividad eléctrica.

Figura 1. Perfiles verticales de conductividad



Fuente: <http://books.google.com/books?id=0MvCfacWoLcC&pg>, fecha 1/6/11.

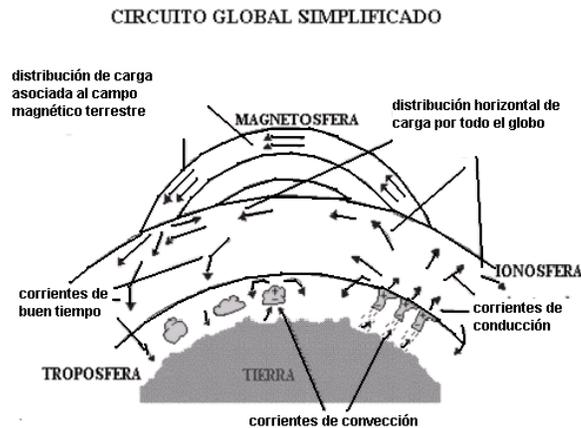
Este hecho es particularmente intenso a partir de los 80 kilómetros, en ella los gases están ionizados al haber perdido los electrones más periféricos que quedan libres circulando entre iones positivos, negativos y moléculas neutras. Sus características comienzan a ser parecidas a las de un conductor metálico. Se puede considerar la Ionósfera como un conductor, casi perfecto, donde en su interior, debido a la gran conductividad, el campo eléctrico es nulo y sus superficies externas son equipotenciales.

### **1.2.3. Aálisis del modelo de circuito eléctrico global terrestre**

El modelo eléctrico que generalmente se asocia a la atmósfera es el de un condensador esférico. Su cara interna sería la superficie terrestre, cargada negativamente y la externa la ionósfera cargada con signo opuesto. El campo eléctrico (  $E$  ) que se manifiesta, disminuye con la altura por lo que es mayor en las cercanías de la superficie terrestre y nulo en la ionósfera, esto debido a que el aire no es un dieléctrico perfecto (por lo que el  $E$  sería constante) al poseer cargas debido a procesos de ionización; la corriente eléctrica generada entre las dos placas del condensador atmosférico se denomina de varias formas: corriente de buen tiempo, corriente de retorno ó corriente de conducción aire-tierra.

Esta corriente es independiente de la altitud y produciría la descarga del condensador eléctrico en aproximadamente una hora. Este hecho no se produce en la realidad por lo que debe existir algún mecanismo que se encargue de mantener la diferencia de potencial entre las dos placas y el campo eléctrico de buen tiempo asociado. El equivalente eléctrico sería una pila que mantenga esta diferencia de potencial y cierre el circuito.

Figura 2. **Circuito global simplificado**



Fuente: <http://books.google.com/books?id=0MvCfacWoLcC&pg>, fecha 1/6/11.

La mayor cantidad de teorías mencionan que son las tormentas las principales responsables del mantenimiento y cierre de este circuito global. Las tormentas son extremadamente complejas y no existe un modelo generalmente aceptado que pueda ser utilizado para calcular la corriente liberada por ellas en el circuito eléctrico global. En la figura 2 se supone una distribución bipolar en la nube, con un núcleo de cargas positivas en la cima y otro de negativas en la base.

Este modelo es el más simple pero a la vez el más utilizado a la hora de explicar el circuito eléctrico global. Entre la superficie de la tierra y la nube se produciría un ascenso de cargas positivas o un descenso de negativas, por encima de la nube las tormentas aportarían cargas positivas que fluyen hacia la ionósfera en forma de una corriente de conducción.

El rápido incremento de la conductividad eléctrica con la altura confina la corriente en una columna vertical que fluye desde la tormenta hasta la ionósfera. Parte de estas corrientes ascendentes circulan influenciadas por el

campo magnético terrestre, este campo y la ionósfera redistribuyen la carga horizontalmente por todo el globo

#### **1.2.4. Teorías sobre la separación de cargas**

Es un hecho comprobado que los movimientos verticales asociados a la escala sinóptica, normalmente, no van acompañados de descargas o fenómenos eléctricos de importancia.

Son las fuertes corrientes ascendentes y descendentes, que tienen lugar en los núcleos convectivos las que, de alguna manera, producen la formación y separación de cargas lo suficientemente intensas como para producir campos y diferencias de potencial capaces de generar fenómenos eléctricos significativos.

Se hace mención que aun no se han abandonado por completo las teorías inductivas basadas en la influencia del campo eléctrico de buen tiempo, pero los modelos o hipótesis que se manejan actualmente son las asociadas al papel de la precipitación y de la convección.

##### **1.2.4.1. Teoría de la precipitación**

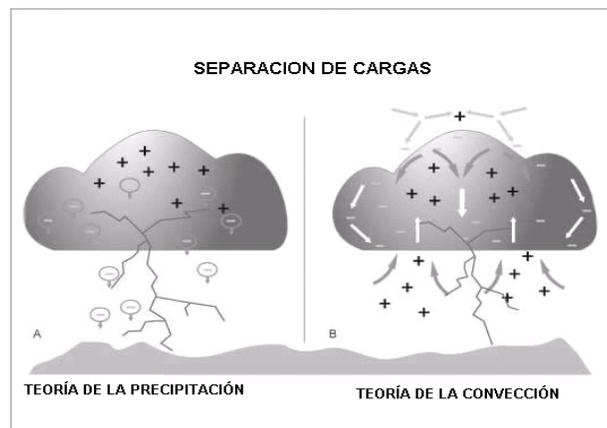
Como se muestra en la figura (3A), una nube es capaz de producir gotas de agua lo suficientemente grandes para que no puedan ser mantenidas por las corrientes ascendentes, por efecto de la gravedad las gotas de agua caen interaccionando con las partículas (sólidas y/o líquidas) de menor tamaño que aún siguen ascendiendo.

Las colisiones producen una separación de cargas (parecida a la separación que ocurre por frotamiento) las gotas mayores quedan cargadas negativamente y las pequeñas positivamente. Las corrientes aéreas y la gravedad tienden a separarlas del lugar donde se generaron. Otros autores mencionan que la colisión puede ser o no del tipo selectivo, al estar polarizadas las partículas mayores.

#### 1.2.4.2. Teoría de la convección

Como se muestra en la figura (3B) las etapas de electrificación por convección no es necesaria la presencia de la precipitación, basta que existan fuertes corrientes ascendentes que puedan arrancar las cargas positivas que se han acumulado en ciertas zonas cercanas a la superficie terrestre (debajo de la nube). Estas corrientes las transportan a niveles más altos por la rama ascendente, que se encuentra en el interior de la nube, mientras que en niveles superiores los rayos cósmicos ionizan a las moléculas del aire.

Figura 3. Separación de las cargas



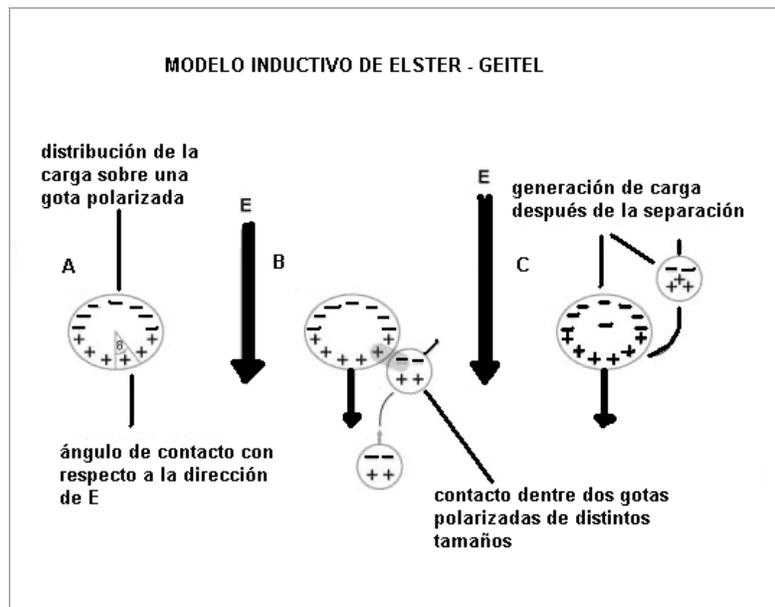
Fuente:<http://www.google.com/search?tmb=bks&tbo=1&hl=es&q=teorias+de+la+conveccion+>, fecha 2/6/11

Las cargas negativas generadas son atraídas por las positivas de la nube formando una especie de capa pantalla que son transportadas por las corrientes descendentes de la periferia hacia abajo y se forma una especie de dipolo positivo.

### 1.2.4.3. Modelo inductivo de *Elster – Geitel*

Este modelo inductivo considera que las partículas grandes polarizadas, que descienden chocan con otras menores. Tras el impacto, la partícula pequeña queda cargada positivamente y las grandes negativamente.

Figura 4. Modelo Inductivo de *Elster – Geitel*



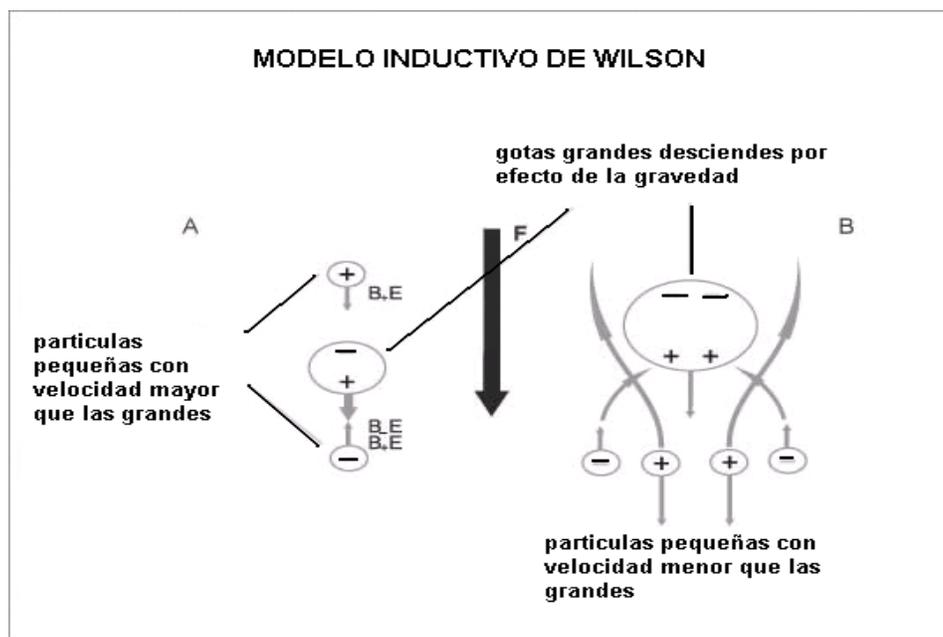
Fuente: <http://www.google.com/search?tbm=bks&tbo=1&hl=es&q=teorias+de+la+conveccion+>, fecha: 2/6/11.

La cantidad de carga que se puede transferir en una colisión entre dos gotas que están polarizadas depende de: el ángulo de contacto con respecto a la dirección del campo E, el tiempo de contacto, el tiempo de relajación de la carga (para la redistribución de la carga), la carga neta de las gotas y la magnitud de la polarización de cada una de las gotas.

#### 1.2.4.4. Modelo inductivo de *Wilson*

La captura que se da es de origen selectiva, ya que las gotas nubosas más grandes descienden por efecto de la gravedad dentro de la nube.

Figura 5. **Modelo Inductivo de *Wilson***



Fuente: <http://www.google.com/search?tbm=bks&tbo=1&hl=es&q=teorias+de+la+conveccion+>, fecha: 2/6/11.

En el caso de que las gotas cargadas más pequeñas se muevan lentamente, solamente las cargadas de forma negativa serán interceptadas por las que descienden como se muestra en la figura, mientras que si se desplazan rápidamente serán capturadas por igual tanto las positivas (+) como las negativas (-) por las gotas más grandes. El modelo describe una nube con estructura bipolar positiva y las partículas más pesadas caerían a niveles inferiores (-) y las más pequeñas irían a los superiores (+).

#### **1.2.5. Teorías sobre la separación de cargas**

En una nube convectiva los mecanismos de generación y separación de cargas tienden a aumentar la energía eléctrica del sistema. Cuando el campo eléctrico o el potencial superan un valor crítico, se produce el rayo o descarga eléctrica que tiende a reducir tal energía, con una nueva redistribución de las cargas eléctricas: en la nube, en el suelo y en la atmósfera. Durante un corto período de tiempo la energía electrostática acumulada es liberada en forma de energía electromagnética (relámpago visible más ondas de radio), energía acústica (trueno) y energía calorífica. El efecto global de las corrientes puestas en juego es el del transporte de cargas negativas hacia el suelo y positiva a niveles altos de la atmósfera.

La acumulación local de cargas produce dos tipos de descargas: las NN (dentro de la nube o entre Nube y Nube) y las NT (entre la Nube y Tierra). Normalmente existe una proporción de 5 a 1 a favor de las NN frente a las NT, ya que los procesos de carga son producidos dentro de la nube y la disminución de la presión con la altura favorece la aparición de los NN. Podemos subdividir los del tipo NT en positivos (descargas NT (+)) o negativos (descargas NT (-)), según sea el origen de la descarga y los centros que lo generen. Lo que sí se puede afirmar es que la mayoría se suelen generar en la región principal de

cargas negativas y son del tipo NT (-). En general, se le llama RAYO a las descargas eléctricas que se producen en la atmósfera de tipo NN ó NT.

### 1.2.5.1. Rayo tipo negativo nube - tierra

Los rayos que se generan desde la nube a tierra, tipo NT comienza en la gran mayoría de los casos, entre la región principal de carga negativa y la superficie terrestre (cargada positivamente por inducción). La chispa tiende a seguir un camino, que se va creando por sucesivos impulsos, desde la nube a tierra. Es la llamada guía escalonada (*Step Leader*) que con arranques y paradas sucesivas va acercándose a tierra.

Figura 6. Generación de un rayo a tierra



Fuente: <http://books.google.com/books?id=0MvCfacWoLcC&pg>, fecha: 2/6/11.

El proceso es invisible a nuestros ojos (no transporta gran cantidad de carga y no es brillante). Suele ramificarse mucho, pero la mayoría de ellas no llegan al suelo. El resultado final es la existencia de un camino ionizado de mínima resistencia. Cerca de la superficie terrestre se va generando, poco a poco y sobre ciertos puntos llamados de descarga, una acumulación de cargas positivas (descarga de conexión) que son las primeras en conectar con la guía escalonada descendente, llegando a cerrar el circuito nube-tierra.

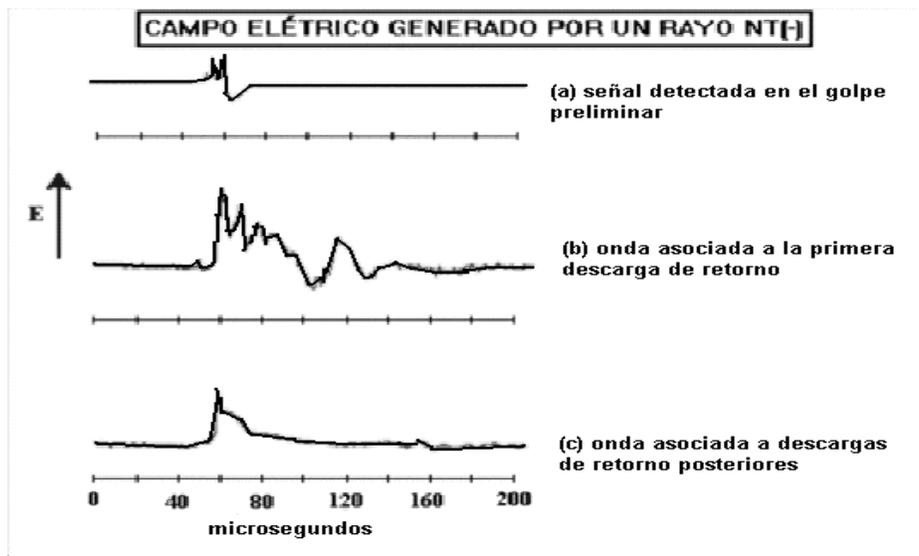
Se produce en este momento la primera descarga de retorno (*Return Stroke*) que se desplaza desde la tierra a la nube transportando gran cantidad de carga en el canal y en un tiempo muy pequeño, en la mayoría de los casos, cuando la primera descarga de retorno ha desaparecido, baja otra guía, pero esta vez sin pausa. Es la llamada guía rápida (*Dart Leader*) que baja de una sola vez de forma no pulsante. A su llegada al suelo aparece una segunda descarga de retorno y así sucesivamente hasta unas 5 ó 10 veces por término medio (se han llegado a detectar hasta 42 descargas de retorno por un mismo camino). Para el ojo humano todo sucede tan rápido que lo que se observa es un solo destello.

#### **1.2.5.2. Campo eléctrico generado por un rayo Nt (-)**

En la figura 7 se aprecian tres ejemplos de perfiles eléctricos asociados a tres descargas típicas de tipo NT (-) registrados a 50 kilómetros del sensor. El inciso (7a) muestra la señal detectada por el golpe preliminar en la formación la guía escalonada; el (7b) muestra la forma de onda asociada a la primera descarga de retorno y los pequeños pulsos que la preceden fueron producidos por diversos pasos de la guía escalonada justo antes de la conexión entre ésta y la descarga de conexión.

La primera descarga de retorno es precisamente la que emplean la mayoría de los sistemas comerciales de detección de rayos, utilizando su señal característica para discriminarla de otras posibles descargas no deseadas, y el (7c) es la señal de una descarga de retorno posterior.

Figura 7. **Campo eléctrico generado por un rayo**



Fuente: <http://books.google.com/books?id=0MvCfacWoLcC&pg>, fecha: 3/6/11.

### 1.5.2.3. Descargas positivas

El tipo de descargas producidas desde centros de cargas positivas en la nube, son capaces de engendrar rayos de polaridad diferente a los NT - clásicos. Son las descargas positivas de nube a tierra (*Positiva Cloud to Ground Lightning*) NT (+). La variación del campo eléctrico estaría invertida con respecto al de las negativas.

Figura 8. **Descargas positivas en una nube convectiva**



Fuente: <http://books.google.com/books?id=0MvCfacWoLcC&pg>, fecha: 3/611.

### 1.3. Probabilidad de descargas electroatmosféricas y pararrayos

Existen variables asociadas a la probabilidad de descargas atmosféricas. En el desarrollo de una tormenta eléctrica la intensidad del campo varía con la sequedad y humedad del aire, como también de la suciedad y limpieza del mismo, y como consecuencia varían los métodos de desviar favorablemente estas descargas electroatmosféricas. Sin embargo, la intensidad del campo eléctrico varía en sentido inverso, debilitándose cuando el aire es más sucio y la temperatura baja, y aun menor cuando el aire es limpio y con temperatura alta.

Para establecer la probabilidad de descargas en un territorio se hace necesario tener datos históricos de eventos, y para ello tener estaciones meteorológicas, y luego de realizar varios cálculos y análisis estadísticos, para poder definir el nivel cerámico de cada estación, y con ello conocer cada área,

o lugar, para poder establecer las líneas isoceraunicas para el trazo de mapas climatológicos que nos indiquen las tendencias analizadas.

### **1.3.1. Pararrayos, estructura, funcionamiento y sus efectos las descargas electroatmosféricas**

El pararrayos es un instrumento cuyo objetivo es atraer un rayo ionizando el aire para excitar, llamar y conducir la descarga hacia tierra, de tal modo que no cause daños a las personas, equipos o construcciones. Este instrumento fue inventado en 1753 por *Benjamín Franklin*. Al paso de la chispa eléctrica se facilita, porque la tierra que se halla debajo de la nube, tiene carga contraria durante una tormenta.

Este proceso se denomina inducción electrostática. Las instalaciones de pararrayos consisten en un mástil metálico (acero inoxidable, aluminio, cobre o acero), con un cabezal captado (pararrayos). El cabezal tiene muchas formas en función de su primer funcionamiento: puede ser en punta, multipuntas, semiesférico o esférico y debe sobresalir por encima de las partes más altas de los pórticos de las Subestaciones Eléctricas o edificios. El cabezal está unido a una toma de tierra eléctrica, por medio un cable de cobre conductor. La toma de tierra se construye mediante picas de metal que hacen las funciones de electrodos en referencia al terreno o mediante placas de metal conductoras también enterradas.

En principio, un pararrayos protege una zona teórica de forma cónica con el vértice en el cabezal; el radio de la zona de protección depende del ángulo de apertura de cono y a su vez éste depende de cada tipo de protección. Las instalaciones de pararrayos se regulan en cada país por guías de recomendación o normas.

Las señales de alta frecuencia producidas por los rayos no seguirán nunca una vuelta muy cerrada del conductor de bajada, porque cada doblez incrementa la reactancia inductiva. De ahí, que todos los cables de conexión a tierra de pararrayos deben tener curvas generosas en lugar de esquinas cerradas. Por ello, se recomiendan curvas con radio de unos 20 centímetros, y conductores múltiples conectados en paralelo a tierra.

#### **1.4. Nivel isocerámico**

Este tema describe una forma práctica de como determinar la actividad electroatmosférica o la incidencia de rayos en nuestro país. Dicho estudio tiene alta importancia para el diseño y construcción de protecciones de nuevas subestaciones eléctricas, líneas de transmisión eléctrica, edificios, etc. ya que es un aporte para determinar el tipo de protección a utilizar. Este término es utilizado por los meteorólogos, para referirse a la actividad eléctrica en la atmósfera (rayos y truenos).

##### **1.4.1 Densidad de rayos eléctricos a tierra (DRT)**

Es el número de rayos a tierra (descargas eléctricas) por unidad de área (kilómetros cuadrados) y por unidad de tiempo (año). Visto desde otro ángulo podemos decir que es la probabilidad que tiene un punto del terreno de ser alcanzado por una descarga electroatmosférica; además, es un parámetro complementario del nivel cerámico que permite cuantificar la incidencia de rayos en una zona. La densidad de rayos se da en función del número de días al año en que se escuchan truenos.

Dicha densidad de rayos se obtiene evaluando el valor cerámico de una zona específica, por medio de relaciones matemáticas empíricas para determinar la misma; una de ellas ha sido evaluada por el Comité de Coordinación de Aislamiento (CCA), del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés), la cual es la siguiente:

$$N_g = a*(T_c)^b \quad (1)$$

Donde:

- $N_g$  es la densidad de rayos eléctricos o número de rayos/km<sup>2</sup>/año
- $T_c$  corresponde al nivel cerámico de una zona específica
- $a$  y  $b$  son constantes ( $a$  toma valores de 0,01 a 0,04 y  $b$  toma valores de 1,20 a 1,40)

Con propósitos de aplicación, el comité de coordinación de aislamiento del IEEE, ha definido la siguiente relación matemática para hallar la densidad de las descargas a tierra:

$$N_g = 0,04 * (T_c)^{1.25} \quad (\text{No. De Rayos/km}^2/\text{año}) \quad (2)$$

#### **1.4.2. Incidencia de rayos en función de la latitud**

La relación de la incidencia de rayos en función de la latitud, considera que en una tormenta atmosférica, existe mayor cantidad de descargas entre nubes, que de nube a tierra. Esta relación es mayor en las regiones próximas al Ecuador y es expresada en un modelo matemático por la siguiente expresión:

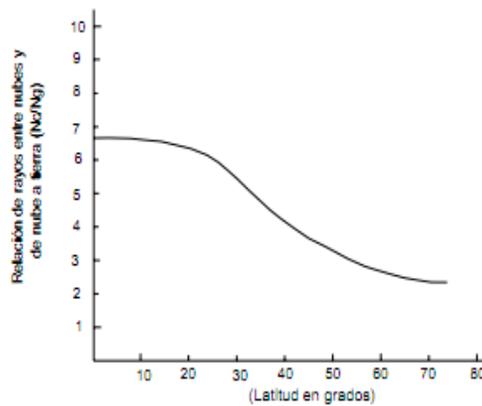
$$N_c/N_g = 4.16 + 2.16*\cos^3 \lambda \quad (3)$$

Donde:

- $N_c/N_g$  es la relación de número de rayos en función de la latitud
- $N_c$  es la cantidad de rayos entre nubes
- $N_g$  es la cantidad de rayos a tierra
- $\lambda$  es igual a la latitud

Estas relaciones matemáticas y su variación en su comportamiento son representadas gráficamente en la figura 9.

Figura 9. **Curva de rayos en función de la latitud**



Fuente:<http://books.google.com/books?id=o-OuYBUHXawC&pg>, fecha: 3/6/11.

### 1.4.3. Nivel cerámico por cada estación sinóptica

Con la aplicación de técnicas estadísticas, se obtienen los resultados que permiten asignarle a cada región del país, un valor real de número de días de tormentas eléctricas por año (o nivel cerámico), respecto a cada estación que fue objeto de estudio, como se muestran en la tabla I de estaciones sinópticas.

Tabla I. **Valores ceráunico de red de estaciones sinópticas Meteorológica**

| No. | Departamento   | Nombre de la Estación | Valor Ceráunico |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------|
| 1   | Alta Verapaz   | Cobán                 | 53              |
| 2   | Chiquimula     | Esquipulas            | 68              |
| 3   | Escuintla      | Puerto San José       | 119             |
| 4   | Guatemala      | Aeropuerto            | 69              |
| 5   | Huehuetenango  | Huehuetenango         | 64              |
| 6   | Izabal         | Puerto Barrios        | 117             |
| 7   | Jutiapa        | Montúfar              | 60              |
| 8   | Petén          | Flores                | 107             |
| 9   | Quetzaltenango | Labor Ovalle          | 66              |
| 10  | Retalhuleu     | Retalhuleu            | 158             |
| 11  | Zacapa         | La Fragua             | 64              |

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Guatemala: INSIVUMEH, 2003. 20 p.

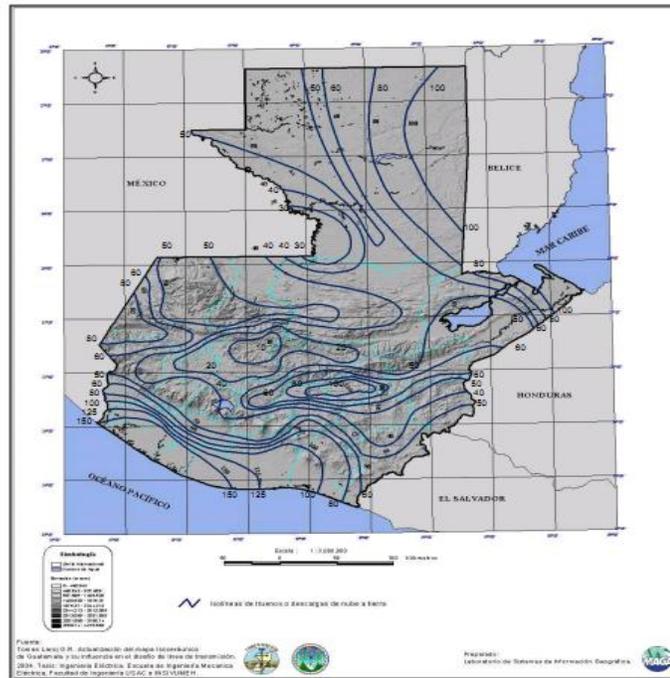
#### **1.4.4. Líneas isoceráunicas (isolíneas)**

Las líneas isoceráunicas son líneas que unen puntos en la superficie terrestre con igual número de días por año de actividad electroatmosféricas o truenos. Estas líneas son llamadas también isolíneas y tienen la característica de que no precisan la intensidad, duración, voltaje y otras descripciones de una descarga atmosférica, aunque se ha comprobado que constituyen una eficiente referencia sobre la probabilidad de caída de rayos.

### 1.4.5. Mapa isoceráunico de la República de Guatemala

Es la representación gráfica de la frecuencia de caída de rayos, en zonas específicas de observaciones meteorológicas, que se muestra en la tabla I.

Figura 10. Mapa de niveles isoceráunicos en la República de Guatemala



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Guatemala: INSIVUMEH, 2003. 20 p.

Estas representaciones se visualizan en la figura 10, por isótopos ceráunicos. El mapa confirma que las regiones tropicales son las que presentan mayor actividad atmosférica. Se encuentra la mayor frecuencia de caída de rayos en el sur occidente, con un valor de 150 días promedios año de actividad atmosférica.

## **1.5. Efecto general de una descarga en subestaciones eléctricas**

Durante las condiciones típicas de descarga en una subestación eléctrica se presentan varios efectos secundarios que acompañan a un relámpago o descarga electroatmosféricas como, los pulsos electromagnéticos (EMP), pulsos electrostáticos, corrientes transitorias de tierra y carga electrostática. Los pulsos electromagnéticos son el resultado de los campos electromagnéticos transitorios que se forman por el flujo de corriente, a través del canal de descarga del rayo. La relación de crecimiento de estos pulsos de corriente varían arriba de 510 kA por microsegundo; un promedio práctico, es de 100 kA por microsegundo.

Los pulsos electrostáticos tienen lugar en cualquier conductor suspendido sobre la superficie de la tierra, ya que está inmerso dentro de un campo electrostático y será cargado con un potencial en relación a su altura (tantas veces la altura por la intensidad del campo), sobre la superficie de la tierra. Cualquier equipo conectado a esa línea, proveerá el camino hacia la tierra. A menos que ese camino esté protegido adecuadamente, será destruido durante el proceso de la descarga a tierra para neutralizarse. Este fenómeno es conocido como transitorio atmosférico inducido. La elevación y caída de voltaje electrostático, también está relacionado con los pulsos electrostáticos (ESP).

Esto induce un voltaje en relación con la carga, a este voltaje inducido se le llama corriente transitoria de tierra y aparece en alambres conductores, tuberías y otras formas de conductores.

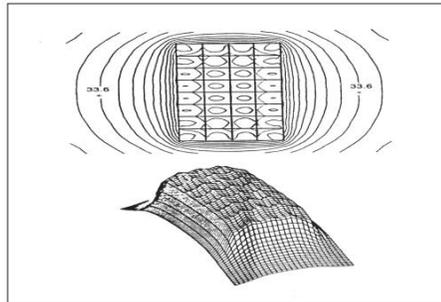
Aunque el proceso de descarga es muy rápido (20 microsegundos) y la relación de crecimiento al pico es tan pequeña como 50 nanosegundos, el voltaje inducido será muy alto. La célula de tormenta induce la carga estática en

cualquier estructura inmersa en la tormenta. Debido a que en la subestación eléctrica las estructuras son metálicas y conductoras, se cargarán eléctricamente, si no están bien aterrizadas, resultando una diferencia de potencial entre la estructura y la tierra física, por lo que la corriente buscará la forma de llegar al potencial de tierra.

### 1.5.1. Efecto de falla a tierra en una subestación eléctrica

Cuando tiene lugar una falla a tierra en una subestación eléctrica, se produce una gran circulación de corrientes hacia el suelo ó tierra, esto generará gradientes de potencial dentro y en los alrededores de la subestación.

Figura 11. **Contorno equipotencial de una rejilla**



Fuente: MARTÍNEZ DE VELASCO, José. *Coordinación de aislamiento en redes*. España: MacGraw-Hill, 2008. 604 p.

La figura 11 muestra este efecto para una subestación con una rejilla a tierra rectangular sencilla en un suelo homogéneo.

A no ser que se tomen las precauciones apropiadas en el diseño, el efecto del gradiente de potencial máximo a lo largo de la superficie terrestre puede ser

de magnitud suficiente, durante las condiciones de falla a tierra para poner en peligro a una persona o equipos instalados en el área.

### **1.5.2. Efecto de la resistencia a tierra de la subestación eléctrica**

En la mayoría de los casos, es suficiente derivar la corriente máxima de rejilla IG, despreciando la resistencia del sistema, la resistencia del aterrizaje de la subestación y la resistencia a la hora de la falla. El valor del error que se ingresa comúnmente es pequeño y está siempre a favor de la seguridad.

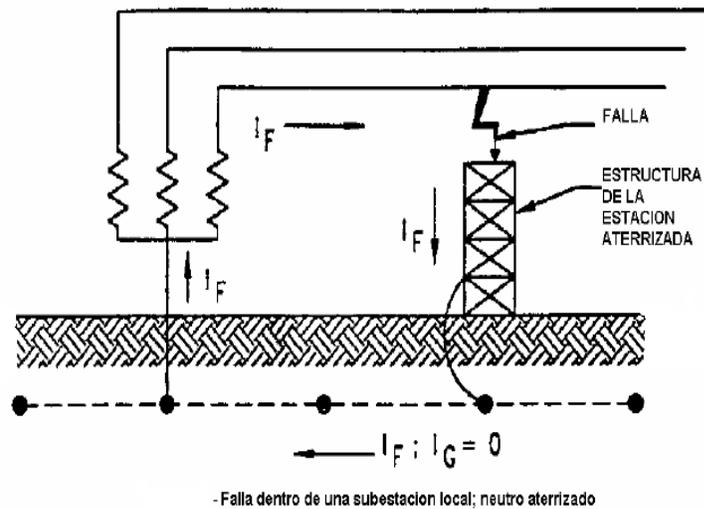
Sin embargo, se pueden dar casos extraños donde la resistencia del aterrizaje de la subestación es tan grande, en relación a la reactancia del sistema, que vale la pena tener la resistencia en cuenta e incluirla dentro de la ecuación, las cuales son más exactas.

Esto representa un problema debido a que el sistema a tierra de la subestación aun no se ha diseñado y no se conoce su resistencia. Sin embargo, la resistencia se puede estimar utilizando las fórmulas y cálculos simplificados. Aunque si este valor es demasiado alto se puede aplicar el método de pozos de baja resistividad interconectados que reduzcan la misma.

### **1.5.3. El efecto de la resistencia de falla**

Si la falla significa una ruptura del aislamiento dentro del lugar de la subestación eléctrica, la única suposición segura es que la resistencia de la falla se asuma cero como se muestra en la figura 12.

Figura 12. **Falla dentro de una subestación local, con neutro aterrizado**



Fuente: MARTÍNEZ DE VELASCO, José. *Coordinación de aislamiento en redes*. España: MacGraw-Hill, 2008. 604 p.

En el caso de una falla que se de fuera del área de la subestación, en una línea conectada al bus de la subestación, es permisible, si se puede asignar un valor estimado (mínimo) de la resistencia de falla,  $R_f$ , para utilizarlo en los cálculos de la corriente de falla a tierra.

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

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

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

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

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

Los cables enterrados con sus forros o armaduras en contacto efectivo con la Tierra, y tuberías metálicas enterradas unidas al sistema de aterrizaje de la subestación y ampliándose más allá de su perímetro tendrá un efecto similar al que tiene el cable de guarda y conductor neutro.

Las tuberías, armaduras, tuberías metálicas, al encontrarse unidas al sistemas de aterrizaje de la subestación, y ampliándose más allá del perímetro ayudan a dirigir parte de la corriente de falla a tierra lejos de la subestación, por lo que se reducirá el aumento de potencial de la rejilla durante la falla y también se reducirán los gradientes del lugar en la subestación.

### 1.5.6. El efecto de la asimetría

En el diseño de una rejilla de aterrizaje se debe considerar la corriente asimétrica. Un factor de decremento, Df, se derivará para tomar en cuenta el efecto de la compensación de CD (dc offset). En general, la corriente asimétrica de falla incluye los subtransientes, transientes y componentes de estado estable de CA y la componente de la compensación de CD. Estos factores decaen exponencialmente, teniendo cada uno un porcentaje diferente de atenuación. Sin embargo, para aplicaciones comunes, se asume que el componente de CA no decae con el tiempo, sino permanece en su valor inicial. Así, como una función periódica del tiempo, t, la corriente asimétrica de falla se expresa de la siguiente forma:

$$i_f(t) = \sqrt{2} (E) (Y_{ac}) [\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-t/T_a} (\sin(\alpha - \theta))] \quad (4)$$

Donde:

$i_f(t)$  = Es el valor de la corriente asimétrica de falla, en amperios, en cualquier instante t, donde t esta en segundos

E = Es el voltaje rms de la pre falla en voltios, línea a neutro

$\omega$  = Es la frecuencia del sistema, en radianes / segundos

$\alpha$  = Es el ángulo del voltaje de la corriente de iniciación, en radianes

$\theta$  = Es el ángulo de fase del circuito, en radianes

$Y_{ac}$  = Es la admitancia del sistema equivalente de CA, en mhos

$T_a$  = Es el valor de la constante de tiempo de la compensación de CD en segundos [ $T_a = X / (\omega R)$ , 60hz;  $T_a = X / (120 \square R)$ ] (5)

Para permitir las condiciones más severas, es necesario asumir que la compensación máxima de CD posible se presenta en el momento de una descarga accidental. La compensación máxima ocurre cuando  $(\alpha-\theta) = -\pi/2$

$$i_r = \sqrt{eE}(Y_{ac}) \left[ e^{-\frac{t}{T}} - \cos(\omega t) \right] \quad (6)$$

Un factor de decremento de 10 se puede utilizar para duraciones de fallas de 30 ciclos o más.

### **1.5.7. Efecto de cambios futuros**

Incrementar la capacidad del sistema agregando nuevas conexiones a la rejilla provocará aumento de la corriente máxima de falla que se desea IF, nuevas conexiones pueden aumentar o disminuir la corriente máxima de rejilla IG.

Un caso en el cual la corriente de rejilla puede disminuir con las nuevas conexiones es cuando se añaden nuevas líneas de transmisión con cables de aterrizaje, neutros o ambos. Si el incremento del sistema se toma en cuenta y se ignora la división de corriente, el resultado será una rejilla sobre diseñada. Un estimado de las condiciones futuras del sistema se obtiene al incluir todas las adiciones del sistema que se han pronosticado.

Se debe tener precaución cuando cambios futuros involucren cambios del diseño, como la desconexión de los cables de guarda que llegan a las subestaciones. Tales cambios pueden tener un efecto en las corrientes de falla a tierra y pueden resultar en un sistema de aterrizaje inadecuado.

## **1.6. Tipos de fallas que pueden ocurrir en una subestación eléctrica**

Los tipos de falla y sobretensiones son muy variadas, en las redes eléctricas las sobretensiones tienen dos causas principales, las cuales pueden producirse por agentes externos, o ya sea por el mismo sistema.

### **1.6.1. Sobretensiones externas**

Las sobretensiones externas son todas aquellas producidas por agentes externos al sistema, como son las descargas electro atmosféricas. Las fallas por descargas electro atmosféricas en líneas de transmisión llegan a registrar porcentajes muy elevados, más allá del 70% en comparación de los eventos dados en una subestación eléctrica.

### **1.6.2. Sobretensiones internas**

Las sobretensiones internas son provocadas por el propio sistema. Se subdividen a su vez en sobretensiones por maniobra y temporales.

Las sobretensiones por maniobra son debidas a las operaciones de apertura y cierre de los interruptores que, como en todo circuito, dan lugar a regímenes transitorios que pueden ir acompañados de sobretensiones y/o sobreintensidades.

Las sobretensiones temporales son oscilaciones sinusoidales cuyo origen puede ser diverso. En general se estudian considerando la red en régimen permanente, aunque en el arranque de las mismas hay que contar con la

existencia de regímenes transitorios con la correspondiente distorsión de la forma de onda.

### **1.6.3. Sobretensiones por desconexión brusca de cargas**

La desconexión de cargas produce un aumento de las tensiones de los nodos de la red como consecuencia de la disminución de las caídas de tensión en las impedancias en serie de las líneas, sobre todo en los instantes posteriores a la desconexión cuando aún no han tenido efecto los reguladores de tensión y de velocidad de los generadores. Las sobretensiones temporales debidas a esta causa son sobretensiones de fase-tierra.

### **1.6.4. Fallas a tierra en una subestación eléctrica**

Los tipos de fallas que pueden ocurrir en una subestación son: aterrizaje del neutro local, aterrizaje del neutro en un lugar remoto, aterrizaje del sistema en la subestación local y en otros puntos del sistema.

En las fallas a tierra en una subestación no es necesario considerar múltiples fallas simultáneas, aunque puedan resultar en corrientes a tierra muy altas, si la probabilidad que ocurre es despreciable. Pero se recomienda, por razones prácticas, que la investigación se limite a fallas de línea a tierra y de línea a línea a tierra.

Las fallas de fase a tierra son uno de los motivos más frecuentes de aparición de sobretensiones temporales. Son sobretensiones que aparecen como consecuencia de la elevación de la tensión de las fases sanas al producirse un cortocircuito de fase-tierra. El valor de la sobre tensión depende de la forma de conectar a tierra el neutro de las estrellas de los devanados de

los transformadores y los generadores, si deseamos calcular la corriente de falla de secuencia para una falla fase-fase-tierra, debemos de utilizar la relación matemática siguiente:

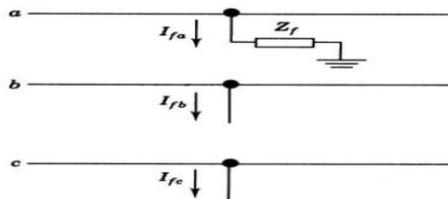
$$\frac{E^*(R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1)[R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)] + (R_2 + jX_2)^*(R_0 + 3R_f + jX_0)} \quad (7)$$

Donde:

- $I_0$  es el valor rms simétrico de la corriente de falla de secuencia cero(A)
- E es el valor del voltaje de fase-neutro (V)
- $R_f$  es el valor de resistencia estimada de la falla ( $\Omega$ ) se asume  $R_f=0$
- $R_1$  es la resistencia equivalente del sistema ( $\Omega$ ), de secuencia positiva
- $R_2$  es la resistencia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia negativa
- $R_0$  es la resistencia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia cero
- $X_1$  es la reactancia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia positiva
- $X_2$  es la reactancia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia negativa
- $X_0$  es la reactancia equivalente del sistema ( $\Omega$ ) de secuencia cero

Los valores  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_0$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_0$  se calculan observando el sistema desde el punto de falla. Para la falla de fase a tierra en la figura 13 se muestra, en un circuito simplificado con el neutro aislado, la tensión de las fases sanas, respecto de tierra, alcanza un valor igual a la tensión entre fases.

Figura 13. **Fallas por corto circuito a tierra en un sistema de potencia**



Fuente: MARTÍNEZ DE VELASCO, José. *Coordinación de aislamiento en redes*. España: MacGraw-Hill, 2008. 604 p.

En el caso de una falla simple de línea a tierra, la corriente de secuencia cero de la de falla se describe matemáticamente a continuación con las referencias de la ecuación anterior.

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

### **1.6.5. Los peores tipos de fallas y su ubicación**

El peor tipo de falla en un sistema de aterrizaje se puede definir como el único resultado de alta secuencia cero o el flujo de la corriente de falla hacia el planeta. La peor ubicación de la falla también se puede dar en el lado de alto voltaje o en el lado de bajo voltaje y en cualquiera de los casos puede ser también dentro de la subestación o exterior sobre una línea, a cierta distancia de la subestación. Una falla se clasifica como dentro de la subestación si se relaciona con una estructura metálica que esta eléctricamente conectada a la rejilla de aterrizaje de la subestación a través de una impedancia insignificante.

## **2. MÉTODOS DE PUESTAS A TIERRA Y SUELOS**

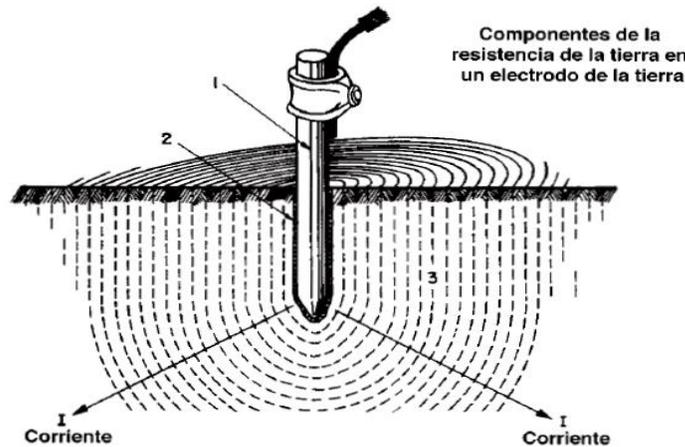
### **2.1. ¿Qué es una puesta a tierra?**

Es el conjunto formado por electrodos y líneas de tierra de una instalación eléctrica. La función es forzar o drenar al terreno las intensidades de corriente que se puedan originar por corto circuito, por inducción o por descarga atmosférica. Una puesta a tierra es un elemento o conjunto de elementos conductivos que se instalan bajo el suelo brindando una conexión eficiente entre el elemento y la tierra.

#### **2.1.1. Componentes de la resistencia de un electrodo a tierra**

La resistencia a la corriente a través de un electrodo de tierra realmente tiene tres componentes. La resistencia del electrodo y las conexiones a él como las varillas, tubos, masas de metal, estructuras y otros dispositivos. El segundo componente es la resistencia de contacto del electrodo a tierra, por lo que el electrodo debe estar libre de pintura o grasa y la tierra debe de estar firmemente compactada. El último componente es la resistencia de la tierra circundante a un electrodo enterrado en la tierra.

Figura 14. **Componentes de la resistencia de la tierra en un electrodo**



Componentes de la resistencia de tierra en un electrodo de tierra.

Fuente: MARTÍNEZ, Juan José; Toledano, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Thomson Paraninfo, 2001. 296 p.

La capa de tierra más cercana al electrodo tiene naturalmente el área de superficie más pequeña y por lo tanto ofrece la mayor resistencia, la siguiente capa de tierra es más grande en área y ofrece menor resistencia y así sucesivamente hasta alcanzar una distancia del electrodo donde al incluir capas no aumente significativamente la resistencia de la tierra que rodea al electrodo. La resistencia de la tierra circundante será la más grande de los tres componentes que forman la resistencia de una conexión a tierra. La resistividad de la tierra depende del material del suelo, el contenido de humedad, y la temperatura. Este valor normalmente no es constante ni es un valor predecible, el cual varía generalmente desde 10 hasta 10 000  $\Omega$ -m.

## **2.2. Beneficios de las tierras físicas**

El beneficio de las tierras físicas es que deben brindar tranquilidad, seguridad y confianza ante cualquier descarga eléctrica o condición de falla que se presente en cualquier instalación, ya que no tendría consecuencias lamentables tanto para el personal y los equipos debido a que su diseño debe basarse en una forma de aterrizaje seguro. Los sistemas de aterrizamiento proveen los medios para conducir corrientes eléctricas bajo condiciones normales y de falla hacia la tierra sin afectar severamente la continuidad del servicio.

## **2.3. Métodos de puestas a tierra**

### **2.3.1. Método Norteamericano**

En Norteamérica, los equipos y estructuras son clasificados según su necesidad de protección contra descargas atmosféricas, cuya referencia se basa en la norma ANSI/NFPA 78-1989, y se subdivide en cinco tipos de estructura: las estructuras de primera clase requieren de poca o ninguna protección, el requisito es que verdaderamente estén conectados a tierra, entre las cuales están las estructuras metálicas, tanques de agua, silos y estructuras similares, excepto tanques u otras estructuras que contengan materiales inflamables. La segunda clase la conforman edificios con cubierta conductora y estructura no conductora, tal como edificios con cubierta metálica, este tipo requiere de conductores para conectar la cubierta a electrodos en la tierra.

La tercera clase, conformada por edificios con estructura metálica y cubierta no conductora, requiere de terminales aéreas conectadas a la estructura y fuera de la cubierta para actuar como terminales de pararrayos. La

cuarta clase la forman estructuras no metálicas, que requieren una protección, como los edificios de madera, piedra, ladrillo u otros materiales no conductores, sin elementos de refuerzo metálicos; éstas deben tener una gran protección contra rayos, con terminales aéreas, cables de bajada y electrodos de aterrizado.

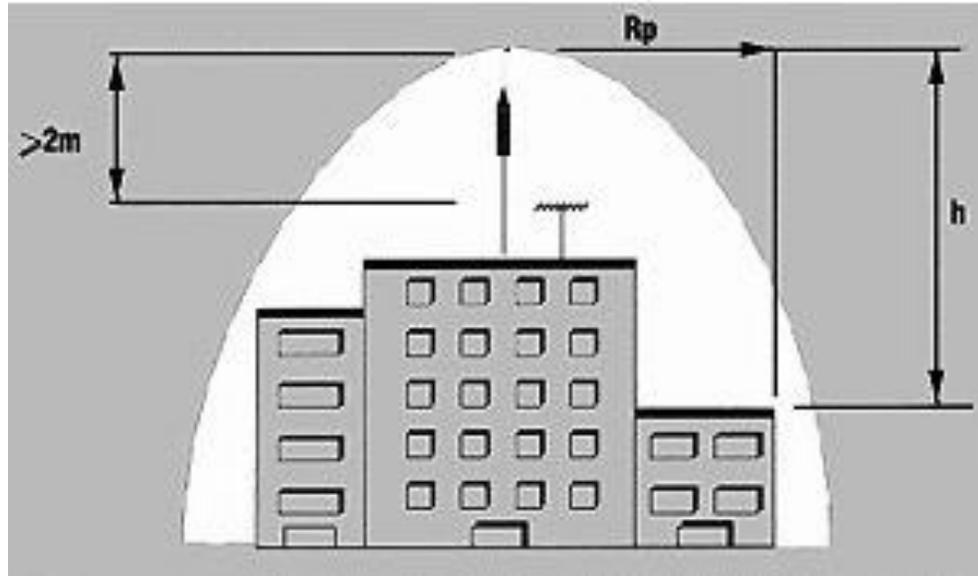
La quinta clase son aquellas edificaciones o cosas cuya pérdida puede ser de consecuencias, y que normalmente recibe un tratamiento de pararrayos completo, incluyendo terminales aéreas, cables de bajada y electrodos de aterrizado, entre éstas se encuentran los edificios de gran valor estético, histórico o intrínseco, edificios conteniendo combustibles o materiales explosivos, estructuras conteniendo sustancias que pueden ser peligrosas si se derraman como consecuencia de una descarga, tanques o conjuntos de tanques, plantas de energía y estaciones de bombeo, líneas de transmisión y subestaciones eléctricas.

### **2.3.2. Método de puntas de inicio**

El estándar NFC 17-102 es aplicable para protección contra rayos, usando puntas iniciadoras en estructuras de menos de 60m de alto y de áreas abiertas, e incluye la protección contra las consecuencias eléctricas debida al flujo de corriente del rayo a través del sistema de protección.

Las puntas iniciadoras son las que inician la descarga hacia arriba unos cuantos microsegundos ( $\Delta t$ ) antes de la descarga principal. El efecto se traduce en una zona de protección de forma parabólica alrededor de la punta, de radio  $R_p$  en un plano horizontal.

Figura 15. Área de protección utilizando el método de puntas



Fuente: MARTÍNEZ, Juan José; Toledano, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Thomson Paraninfo, 2001. 296 p.

De acuerdo con la peligrosidad de una descarga sobre la estructura a proteger, el estándar prevé tres tipos de protección, que están definidos en base a la distancia D. Cuando se requiere un nivel de protección I la distancia será de 20 metros. El nivel II se puede utilizar cuando la distancia será mayor de 40 metros y el último nivel de protección III cuando sea de 60 metros o más. Donde D es el radio de la esfera rodante del modelo electrogeométrico, y h es la altura de la punta de emisión temprana relativa al plano horizontal que pasa por el elemento a proteger. La tabla II muestra los radios (D) de protección, y contempla 3 tipos de puntas iniciadoras (25, 40 y 60  $\mu$ s) y, los valores de altura (h), en metros, sobre la estructura a proteger, donde de 2 a 4 metros son fijos, los demás se calculan mediante la fórmula descrita.

$$R_p = \sqrt{h * (2 * D - h) + 10^6 * \Delta t * (2 * D + 10^6 * \Delta t)} \quad \text{Metros} \quad (9)$$

Tabla II. Radios de protección según la norma NF C17-102

| Radius of protection of the Pulsar units following NF C17-102  |                  |           |           |                   |           |           |                    |           |           |
|--|------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|
| NB   | Level I<br>D=20m |           |           | Level II<br>D=45m |           |           | Level III<br>D=60m |           |           |
| <b>PULSAR</b>  | <b>25</b>        | <b>40</b> | <b>60</b> | <b>25</b>         | <b>40</b> | <b>60</b> | <b>25</b>          | <b>40</b> | <b>60</b> |
| $\Delta T$ ( $\mu s$ )   | 25               | 40        | 60        | 25                | 40        | 60        | 25                 | 40        | 60        |
| <b>Rp(m)</b>   |                  |           |           |                   |           |           |                    |           |           |
| <b>h(m)</b>  |                  |           |           |                   |           |           |                    |           |           |
| 2  | 17               | 24        | 32        | 23                | 30        | 40        | 26                 | 33        | 44        |
| 3  | 25               | 35        | 48        | 34                | 45        | 59        | 39                 | 50        | 65        |
| 4  | 34               | 46        | 64        | 46                | 60        | 78        | 52                 | 57        | 87        |
| 5  | 42               | 58        | 79        | 57                | 75        | 97        | 65                 | 84        | 107       |
| 6  | 43               | 58        | 79        | 58                | 76        | 97        | 66                 | 84        | 107       |
| 8  | 43               | 59        | 79        | 59                | 77        | 98        | 67                 | 85        | 108       |
| 10   | 44               | 59        | 79        | 61                | 77        | 99        | 69                 | 87        | 109       |
| LP: level of protection calculated according to the Appendix B of the standard NF C17-102.<br>$\Delta T$ : initiation advance measured during efficiency tests according Appendix C of standard NF C17-102 |                  |           |           |                   |           |           |                    |           |           |

Fuente: IEEE Std 80-2000 *Guide for Safety in AC Substation Grounding*.

Considerando que **h** no puede ser mayor que la **D** obtenida del tipo de protección. Así como se muestra en la tabla II, se puede utilizar para determinar los radios de protección según la norma.

### 2.3.3. Métodos de protección para subestaciones eléctricas

Las subestaciones de potencia son protegidas por puntas pararrayos colocadas sobre las estructuras, y por los hilos de guarda de las líneas que rematan en la subestación. Los hilos de guarda están conectados directamente a la malla de tierra de la subestación.

En el caso de las estructuras metálicas tipo rejilla, la mismas estructuras forman una jaula de Faraday de protección.

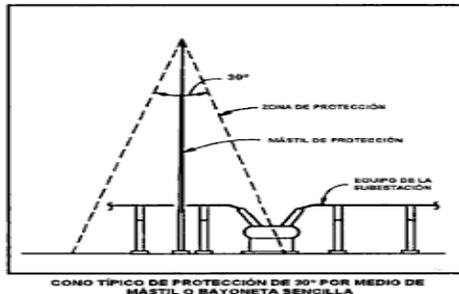
Las subestaciones de distribución por lo general no son protegidas contra una descarga atmosférica directa, porque se ha comprobado que los rayos caen mayormente sobre las líneas. Las subestaciones eléctricas tipo exterior están blindadas contra descargas directas por medio de cables de guarda, bayonetas o mástiles. Para diseñar este blindaje, se puede usar básicamente dos métodos. El método de ángulos fijos, y el método que utiliza el promedio del modelo electrogeométrico.

#### **2.3.3.1. Método de los ángulos fijos**

Es el método más común de análisis del blindaje, suele constar de bayonetas y los cables de guarda que proyectan una zona de protección a los equipos que se encuentra debajo de ellos, en la forma de un cono. Benjamin Franklin estableció que el ángulo para el cono debería ser de aproximadamente 60 grados; el valor de este ángulo ha ido decreciendo a través de los años, a llegar en muchos casos, sin cálculo previo, a un valor aceptado de 30 grados.

A este método también se le conoce como cono de protección. Este método ha presentado objeciones por tratarse de un cálculo determinativo que no toma en consideración la naturaleza aleatoria de las descargas atmosféricas, y esto hace que en ocasiones falle al no tomar en cuenta que la corriente del rayo varía en magnitud y en el ángulo de incidencia.

Figura 16. **Cono de protección**



Fuente: IEEE Std 80-2000 *Guide for Safety in AC Substation Grounding*.

### 2.3.3.2. **Método promedio del modelo electrogeométrico**

Para las subestaciones con tensiones mayores o iguales a 230 kV, el cálculo del blindaje por el método de los ángulos fijos no resulta adecuado, por lo que se optó por un método usado para el diseño del blindaje en las líneas de transmisión, que se le conoce como el modelo electrogeométrico, que se desarrolló en los 60's y que ha tenido a lo largo del tiempo algunas variantes en su aspecto conceptual, publicándose en 1971 por el *Edison Electric Institute* de Estados Unidos. Dicho modelo menciona que la distancia de impacto de un rayo (es decir, la distancia sobre la cual desciende el canal principal del rayo para tocar un objeto) es proporcional a la densidad de carga del canal principal de descarga; sin embargo, la corriente de retorno es proporcional a la densidad de carga precedente al canal principal.

La versión utilizada para subestaciones eléctricas se le conoce como el método de la esfera rodante. La técnica usada para analizar la acción de las descargas en objetos a tierra es el modelo electrogeométrico desarrollado originalmente por *Golde R.H.* Y, derivado de ese modelo, desde 1970 se emplea el método de la esfera giratoria.

Para calcular la zona o distancia de protección de los pararrayos, el equipo dentro de la zona de protección debe ser conectado a la misma red de tierras para que no exista una diferencia de potencial entre puntos en el sistema. Sin embargo, aparatos conectados a líneas eléctricas que salen del área de mismo potencial pueden dañarse de no tener las protecciones necesarias. El método de la esfera rodante toma en cuenta los valores del nivel básico de aislamiento NBA del equipo a proteger contra descargas, para un valor dado de la corriente del rayo, la relación entre la corriente del rayo y el NBA del equipo está dado por la ecuación.

$$= 2 \text{ NBA } Z_0 \quad (10)$$

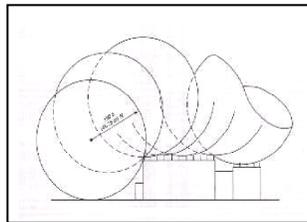
Considerando que:

$Z_0$  = Impedancia característica de la línea en  $\Omega$

$I_s$  = Corriente del rayo en kA

NBA = Nivel básico de aislamiento al impulso en kV

Figura 17. **Método de la esfera rodante**



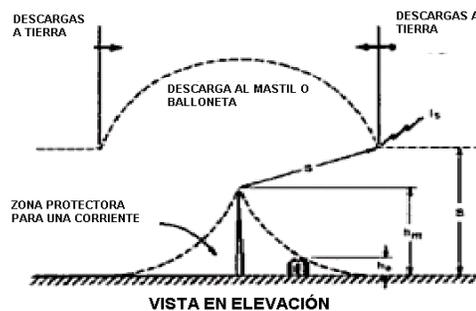
Fuente: MARTÍNEZ, Juan José; Toledano, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Thomson Paraninfo, 2001. 296 p.

La distancia de impacto (S) y la corriente del rayo ( $I_s$ ) están relacionadas donde S es la distancia de impacto en metros de la ecuación siguiente.

$$S = 8 (I_s)^{0,65} \quad (11)$$

La distancia de impacto define una esfera de radio ( $S$ ) que toca el mástil y tiene una distancia ( $S$ ) sobre el nivel del suelo, como se muestra en las figuras 17 y 18. El arco de radio ( $S$ ) define una zona de protección para un rayo que tiene una magnitud  $I_s$ . La zona debajo del arco está protegida contra la corriente del rayo  $I_s$ , las descargas de magnitud  $I_s$  que caen fuera del arco (a la derecha o a la izquierda la figura 18 inciden sobre la tierra.

Figura 18. **Blindaje por mástil de protección para corriente de rayo**



Fuente: IEEE Std 80-2000 *Guide for Safety in AC Substation Grounding*.

## 2.4. Sistemas y finalidad de puestas a tierra

La función del sistema de puesta a tierra es doble, ya que debe proporcionar un camino definido de regreso a la fuente de energía y con impedancia suficientemente baja, vía los conductores de tierra, de tal modo que ante el evento de una falla a tierra de un conductor activo, fluya por una ruta predeterminada una corriente suficiente, que permita operar al dispositivo de protección del circuito. La segunda función es limitar a un valor seguro la elevación de potencial en todas las estructuras metálicas a las cuales tienen normalmente acceso personas y animales, bajo condiciones normales y anormales del circuito.

### **2.4.1. Estándares de protección para sistemas a tierra**

Tanto en Europa como en Norteamérica, se ha debatido mucho sobre los métodos de protección, tanto así que en Europa permanecen los dos estándares de protección, el llamado *Franklin/Faraday*, que es el tradicional, y el de puntas de inicio. En EUA, el estándar aprobado por la asociación contra el fuego (NFPA) es el *Franklin/Faraday* y, se conoce como NFPA-780. El otro, no fue aceptado como parte del estándar, ya que se considera de efectividad igual que una punta del tipo *Franklin*.

Existen una variedad de normas que regulan el diseño de los sistemas de tierras como, por ejemplo: Normas Internacionales como la IEEE-80, 81, 141, 142, 550; aprobadas conjuntamente por el Instituto Nacional Americano de Normalización (ANSI) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), ANSI 78-1 989 y el estándar NFC 17-102, así como otros estándares aplicados en países cercanos, como La Norma Oficial Mexicana (NOM-022, 250, 280). Estas disponen el uso correcto e invariable del sistema de tierra física en toda instalación eléctrica, las normas están basadas bajo razones de seguridad humana, de los equipos y seguridad de operación de los sistemas.

### **2.4.2. Sistemas de tierra para equipos de comunicaciones**

Utilizada para drenar corrientes parásitas y transitorias. Consiste de 3 varillas *copperweld* conectadas en DELTA con una distancia entre varillas de largo del electrodo a ser enterrado o como medida estándar de 2,5 a 3 metros, separadas de las paredes de edificios a una distancia igual a la de la separación entre varillas, y a una distancia de 15 metros con respecto a cualquier otro sistema de tierras para evitar inducciones.

### **2.4.3. Sistema de tierra grupo electrógeno**

Su función es drenar corrientes parásitas y transitorias de las líneas eléctricas que alimentan los equipos, se puede utilizar una varilla *copperweld* siempre y cuando las mediciones tomadas en el terreno tengan como máximo un valor de 5  $\Omega$ , y un valor entre neutro y tierra del circuito eléctrico de 0,2 volts, en caso contrario se instalará un sistema delta como antes mencionado.

### **2.4.4. Sistema de tierra para la limpieza del neutro**

Se utiliza para drenar corrientes parásitas y transitorias, en la acometida de energía eléctrica proveniente de la red pública o subestación de donde se alimentan los equipos de comunicaciones y cómputo.

### **2.4.5. Sistemas de tierras estáticas**

Se utilizan para drenar a tierra las corrientes parásitas y transitorias, provocadas por la inducción en los edificios por efecto del viento, ruido de maquinaria y equipo eléctrico.

### **2.4.6. Sistema de protección de puesta a tierra *Franklin***

*Benjamín Franklin* fue el primero en darse cuenta que la altura era un factor importante en el diseño de protecciones contra rayos. El rango de atracción de un pararrayos es el espacio protegido por tal dispositivo, define el lugar en que la construcción no suele ser afectada por una descarga directa.

El sistema más sencillo y más antiguo de pararrayos, es el que consiste en terminales aéreas de cobre, bronce o aluminio anodizado terminadas en punta, llamadas puntas *Franklin*, colocadas sobre las estructuras a proteger de

los rayos. Este sistema se aplica en iglesias, casas de campo, graneros y otras estructuras ordinarias.

Figura 19. **Sistema *Franklin* de protección con pararrayos**

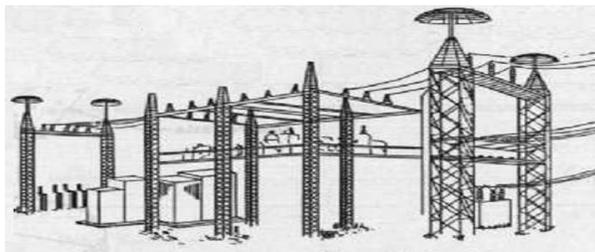


Fuente: MARTÍNEZ, Juan José; Toledano, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Thomson Paraninfo, 2001. 296 p.

#### 2.4.7. Sistema tipo jaula de *Faraday*

Este sistema es el más utilizado para estructuras grandes como subestaciones y edificios, contempla una modificación al sistema *Franklin* de pararrayos, al añadir a las terminales aéreas conductores que crucen sobre la estructura a proteger como una caja de *Faraday* limitada sobre y a los lados de la construcción, y todo ese conjunto resultante es conectado a cables múltiples de bajada, que a su vez se conectan al sistema de tierras perimetral del edificio.

Figura 20. **Sistema de protección de *Faraday* con paraguas**



Fuente: MARTÍNEZ, Juan José; Toledano, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Thomson Paraninfo, 2001. 296 p.

Los edificios modernos con estructura de acero y con varillas embebidas en concreto se acercan al concepto de la jaula de *Faraday*, y el riesgo de que un rayo que penetre en un edificio protegido de esta manera es extremadamente pequeño. Aunque se debe notar que los rieles de los elevadores no deben ser usados como el conductor de bajada de los pararrayos, la NOM-001-SEDE-1 999 permite que se unan al sistema de pararrayos (620-37). Para hacer más efectiva la protección de este sistema, en una subestación eléctrica se deben usar puntas del tipo *Franklin* del tipo paraguas (patentadas) como las de la figura 20.

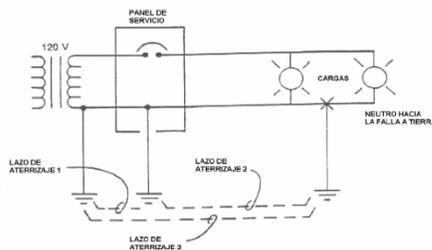
## **2.5. Propiedades electromagnéticas de los sistemas de tierras**

En los sistemas de aterrizaje de edificaciones que contengan dispositivos de estado sólido, no es raro tener diferencias de voltajes medibles entre punto y punto, esto se debe al flujo de corriente, ya sea de 60 Hz o transitorios de alta frecuencia que se le conoce como interferencia electromagnética.

Esto ocurre cuando la conexión a la tierra del sistema de potencia en el sitio remoto podría conectar la tierra remota con algunos pocos voltios de diferencia con la tierra del computador principal. Esto podría inyectar dentro del sistema, la diferencia de potencial entre las dos conexiones a tierra, interfiriendo a los equipos sensibles como computadores y equipo electrónico. El resultado sería múltiples trayectorias a tierra y el conductor neutro conectado intencional o no-intencionalmente al sistema de tierra en muchos puntos, la corriente de retorno por el neutro podría fluir sin control sobre el sistema de tierra.

En cada uno de los puntos donde el neutro se conecta a tierra y que existen trayectorias en paralelo, la corriente se dividirá por la Ley de *Ohm*, de acuerdo al inverso de la impedancia de circuito.

Figura 21. **Trayectorias de corriente en varios neutros a tierra.**



Fuente: DE LA VEGA ORTEGA, Miguel. *Problemas de ingeniería de puestas a tierra*. México: Limusa Noriega, 2002. 418 p.

Por este flujo de corriente sin control sobre el sistema de aterrizaje, el sistema de potencia se conoció como tierra sucia o ruidosa.

La expresión tierra del sistema se refiere a un cable o alambre aislado, separado y dedicado que tiene aislamiento color verde, que está conectado a tierra y se instala para computadoras y equipos que cuentan con microprocesadores. Este conductor de conexión a tierra también es un conductor adicional para la seguridad.

El propósito de este sistema a tierra es proporcionar un sistema limpio, libre de ruidos (interferencia electromagnética), de referencia cero de tierra para las fuentes de alimentación de CD. Ya que los sistemas de tierras son de efecto bidireccional respecto a la corriente, para este tipo de situación es acostumbrado instalar dispositivos unidireccionales como filtros del tipo RLC Filtro que evita la inducción de corriente que viene de suelo, lo que hace al sistema unidireccional.

## **2.6. Tipos geofísicos de suelos**

La tierra está formada por diferentes elementos, con capas muy heterogéneas, huecos, ríos subterráneos en algunos casos; su estado es afectado frecuentemente por las condiciones climatológicas como la lluvia, las heladas, la variación de la temperatura, etc.

Por lo anterior, la resistividad del terreno puede ser muy diferente de un lugar a otro y puede afectarse según la época del año en función de los factores como:

- La composición del terreno
- La concentración de las sales solubles. (electrolito)
- La estratigrafía. (diferentes estratos por capas no homogéneas)
- La granulometría. (tamaño y porosidad de los granos)
- El estado higrométrico. (grado de humedad)
- La temperatura. (°c)
- La compacidad. (compactación)

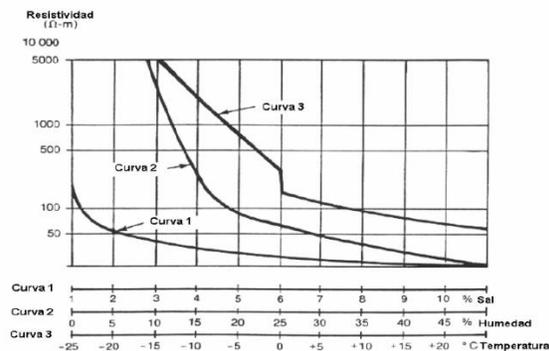
### **2.6.1. Composición del terreno**

La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una resistividad de 40-500  $\Omega$ -m, por lo que un varilla ó electrodo enterrado a 3 metros tendrá una resistencia a tierra de 15 a 200  $\Omega$  respectivamente. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5 000  $\Omega$ -m o más alta, y tratar de conseguir una resistencia a tierra de unos 100  $\Omega$  o menos con un solo electrodo es virtualmente imposible.

### 2.6.2. Sales solubles en el suelo

La composición y la cantidad presente de sales solubles, acidas ó alcalinas en el suelo pueden afectar considerablemente su resistividad. En la curva 1 de la figura 22 se ilustra una característica de la resistividad de un suelo que contiene un 30 por ciento de humedad por peso al utilizar la sal (cloruro de sodio NaCl) como mecanismo de disminución de la resistividad de los suelos, se puede observar que la caída más importante tiene lugar a partir del valor de 2 por ciento de sal, 5 por ciento de humedad y menos 20 grados celsiusos.

Figura 22. Trayectorias de corriente en varios neutros a tierra



Fuente: DE LA VEGA ORTEGA, Miguel. *Problemas de ingeniería de puestas a tierra*. México: Limusa Noriega, 2002. 418 p.

### 2.6.3. Estratigrafía del suelo

El terreno obviamente no es uniforme en sus capas tanto horizontal como verticalmente. En los 3 metros de longitud de una varilla electrodo típica, al menos se encuentran dos capas diferentes de suelos.

#### **2.6.4. Granulometría del suelo**

Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón, la resistividad de la grava es superior a la de la arena y de que ésta sea mayor que la de la arcilla.

#### **2.6.5. Higrometría del suelo**

El estado higrométrico del suelo se refiere al contenido y cantidad de agua, ya que el grado de humedad influye en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático, ya que dicho nivel es distinto.

#### **2.6.6. Temperatura del suelo**

El efecto de la temperatura en la resistividad del suelo es casi despreciable para temperaturas por encima del punto de congelamiento.

El agua que contiene el suelo comienza a congelarse a los 0° C y la resistividad aumenta rápidamente, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra. La curva 3 de la figura 22 ilustra la variación característica para un suelo de tierra arenosa que contenga 15,2 por ciento de humedad por peso.

### **2.6.7. Compactación del suelo**

La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles. Existen una gran variedad de tipos de suelo, pero si deseamos agruparlos en un conjunto más general se podrían mencionar los suelos orgánicos, húmedos, secos y rocosos, los cuales presentan distintos valores de oposición a la disipación de corrientes.

## **2.7. Conceptos generales de la resistividad**

La resistividad es la resistencia eléctrica (oposición al paso de la corriente eléctrica) de un material, se designa por la letra griega rho minúscula ( $\rho$ ) y se mide en ohmios por metro ( $\Omega\cdot m$ ). Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor, generalmente la resistividad de los metales aumenta con la temperatura, mientras que la resistividad de los semiconductores disminuye ante el aumento de la temperatura.

### **2.7.1. Importancia de medir la resistividad del suelo**

Las estimaciones que se basan en la clasificación de los suelos proporcionan una aproximación general de la resistividad. Por lo tanto, es imprescindible hacer pruebas de resistividad. Estas se deben hacer en diferentes lugares dentro del sitio. Raramente se encuentran suelos con resistividad uniforme y a una profundidad considerable dentro de la zona de una

subestación. Normalmente, se encuentran diferentes capas, cada una con diferente resistividad. A menudo suelen ocurrir cambios laterales, pero en comparación con los verticales, los cambios suelen ser aún más graduales. Se pueden hacer pruebas de resistividad en el suelo para determinar si existe alguna variación importante de resistividad con la profundidad.

Cuando las variaciones son grandes se deben tomar aun más lecturas, especialmente si las lecturas son tan altas que indican problemas de seguridad. Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, a menudo es deseable hacer pruebas a diferentes distancias para obtener un estimado de la resistividad de las capas más profundas. Esto es posible ya que a medida se incrementa la distancia de las pruebas, las corrientes de prueba penetran a áreas más distantes, en direcciones verticales y horizontales, sin importar cuánto se desvíe la trayectoria de la corriente debido a la variación de las condiciones del suelo.

## **2.8. Resistividad de suelos**

El factor más importante de la resistencia a tierra es la resistividad del suelo mismo, por ello es requisito conocerla para calcular y diseñar la puesta a tierra de sistemas. La resistividad es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad; es conocida, además, como la resistencia específica del terreno.

En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina Resistividad Aparente. Los parámetros de resistividad y resistencia, tienen significados

diferentes. De igual manera se puede definir la conductividad como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica para atravesarlo.

La resistencia eléctrica viene determinada por la resistividad del suelo y su geometría. Al considerar el suelo como un conductor rectilíneo y homogéneo de sección S y longitud L, su resistencia eléctrica y resistividad son:

$$R = \rho \frac{RS}{L} \qquad R = \rho \frac{L}{S} \qquad (12)$$

### 2.8.1. Clasificación de resistividad promedio de suelos

Existe un gran número de tablas que muestran los rangos de resistividad para varios tipos de suelos a nivel general podemos segmentar los tipos de suelos en orgánico húmedo, húmedo, seco y rocoso.

Tabla III. Rangos generales de resistividad del suelo

| Tipo de tierra        | Resistividad promedio (Ω.m) |
|-----------------------|-----------------------------|
| Suelo orgánico húmedo | 10                          |
| Suelo húmedo          | 10 <sup>2</sup>             |
| Suelo seco            | 10 <sup>3</sup>             |
| Roca                  | 10 <sup>4</sup>             |

Fuente: DE LA VEGA ORTEGA, Miguel. *Problemas de ingeniería de puestas a tierra*. México: Limusa Noriega, 2002. 418 p.

La mayoría de los terrenos no son homogéneos, están formados por diversos estratos normalmente horizontales y paralelos a la superficie del suelo, por lo se presenta la tabla IV más detallada con los tipos de terrenos.

Tabla IV. Rangos de resistividad del suelo

| Tipo de Terreno            | Resistividad $\rho$ [ $\Omega$ m] |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Terrenos vegetales húmedos | 10 – 50                           |
| Arcillas, gredas, limos    | 20 – 60                           |
| Arenas arcillosas          | 80 – 120                          |
| Fangos, Turbas             | 150 – 300                         |
| Arenas                     | 250 – 500                         |
| Suelos pedregosos          | 300 – 400                         |
| Rocas                      | 1.000 -10.0000                    |
| Concreto húmedo            | 100 – 240                         |
| Concreto seco              | 10.000 – 50.000                   |

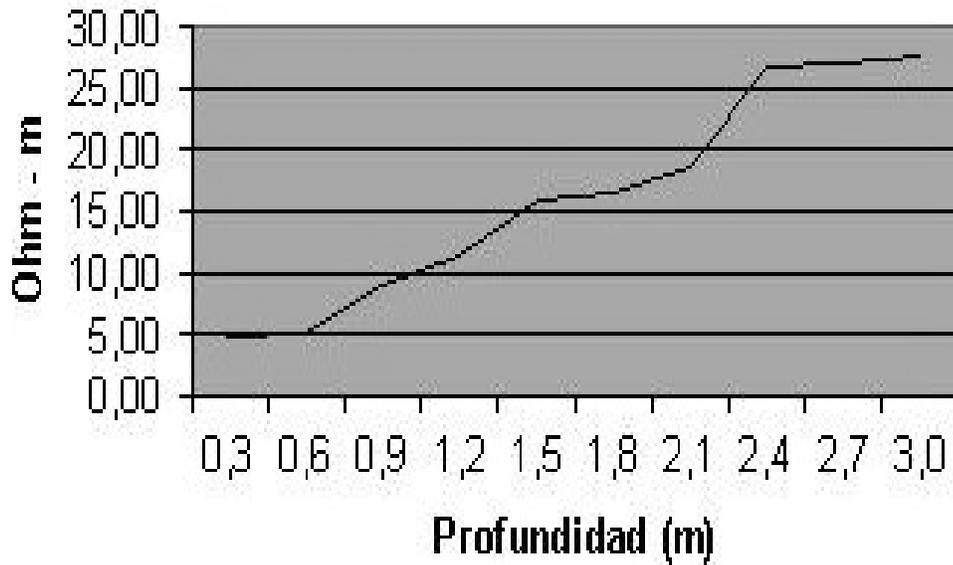
Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

### 2.8.2. Perfiles de resistividad

Para obtener el perfil de resistividad en un punto dado, se utiliza el método de *Wenner* con espaciamientos entre electrodos de prueba cada vez mayores. Por lo general, para cada espaciamiento se toman dos lecturas de resistividad en direcciones perpendiculares entre sí.

La gráfica resultante de trazar el promedio de las mediciones de resistividad (R) contra distancia entre electrodos (a) se denomina perfil de resistividad aparente del terreno, en la figura 23 se muestra el gráfico de perfil superficial arcillosa y húmeda con capa inferior rocosa y cuyo perfil es ascendente.

Figura 23. **Grafico del perfil de resistividad**



Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

### **2.8.3. Resistencia total de un sistema de tierra**

Un sistema de puestas a tierra (SPT), está conformado por las uniones ó sumas de los valores resistivos de los elementos que la conforman, entre los cuales mencionamos:

- La resistencia total del conductor o los conductores
- La resistencia de contacto entre el conductor y electrodo
- La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el terreno
- La resistencia del terreno en el que esté enterrado el electrodo

## **2.9. Influencia de la humedad**

La conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica. Por esta razón, en la mayoría de los suelos aumenta abruptamente siempre que el contenido de humedad sea menor del 15% del peso del suelo. La cantidad de humedad depende del tamaño, solidez y la variabilidad de los tamaños del grano.

Puede tenerse el caso de que en temporada seca, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos. Tal como nos muestra la curva 2 de la figura 22, una vez el contenido de humedad exceda el 22 % la resistividad se verá un poco afectada según el IEEE Std. 142-1 991, que se puede tomar como base para el diseño.

## **2.10. Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica**

### **2.10.1. Aumento del número de electrodos en paralelo**

Al colocar varios electrodos en paralelo es una manera muy efectiva de bajar la resistencia. Pero los electrodos enterrados no deben ser colocados muy cerca uno de otro, porque cada electrodo afecta la impedancia del circuito, por los efectos mutuos. Por eso se recomienda que la separación entre puestas a tierra deba ser por lo menos el doble del electrodo.

### 2.10.2. Aumento del diámetro del electrodo

La resistencia de un electrodo de sección circular se reduce al incrementarse su diámetro; sin embargo, tiene un límite en el que ya no es recomendable aumentarlo debido a que el valor de la resistencia del terreno permanece prácticamente constante. Al omitir esta recomendación se estará haciendo mal uso de este método, obteniendo como resultado la misma reducción de resistencia con un sobre costo a este tipo de diseño.

Para un electrodo de 5/8 pulgadas (1,6 centímetros) de diámetro y 8 pulgadas (250 cm) de largo, si se quisiera incrementar su conductancia, se puede añadir helicoidales de cable 1/0 AWG, cuyo diámetro de espiras tendrá un máximo diámetro de 18 centímetros, y la separación máxima entre éstas sea de 20 centímetros, lográndose una reducción hasta de un 30 por ciento promedio del valor de la resistencia tomada al inicio. Es decir, el diámetro del electrodo creció de 1,6 centímetros (5/8 pulgada) a 18 centímetros, lo que equivaldría a utilizar un electrodo de 7 pulgadas de diámetro, el cual no es de uso comercial.

Este método lo podemos utilizar tomando como base la relación matemática siguiente y comprobada al realizar mediciones sobre un mismo terreno aplicando los métodos de medición de resistencia, dicha modificación oscilará en una reducción del 25 al 35 por ciento de la resistencia del electrodo a tierra.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L_n \left( \frac{4L}{d} \right) \quad (13)$$

### **2.10.3. Aumento de la longitud de penetración del electrodo**

El método de aumentar la longitud de penetración de los electrodos a instalar en el terreno se logrará disminuir la resistividad del terreno, ya que es posible alcanzar capas más profundas, en el que se puede obtener una resistividad muy baja si el terreno presentara un mayor porcentaje de humedad; por el contrario, es posible que exista una resistividad muy alta si el terreno fuera rocoso y pedregoso en las capas superficiales a donde llegue la profundidad de enterramiento.

### **2.10.4. Tratamiento químico del terreno**

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistividad del terreno, sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos, ya que, aunque se utilizarán en terrenos rocosos o de alta resistividad, no se lograría llegar a valor deseado de resistencia. En la actualidad existen varios productos químicos para la reducción de resistividad del terreno los cuales se mencionan en el capítulo 4.

## **2.11. Redes de tierras**

Las redes de tierras son el conjunto de conductores, electrodos, accesorios y otros elementos metálicos enterrados que, interconectados entre sí, tienen por objeto drenar a tierra las corrientes de rayo y las generadas por las cargas eléctricas estáticas.

Dicho sistema es una malla metálica con múltiples electrodos y conductores enterrados, es usado cuando están involucradas tensiones y

corrientes eléctricas muy altas, con el fin de minimizar los riesgos al personal en función de la tensión eléctrica de paso y de contacto y corrientes de falla.

Normalmente una malla consta de una red de conductores enterrados a una profundidad que usualmente varía de 0,30 metros a 1 metros, colocados paralela y perpendicularmente con un espaciado adecuado a la resistividad del terreno y preferentemente formando retículas cuadradas. El cable que forma el perímetro exterior de la malla debe ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentran los equipos eléctricos de la subestación o planta generadora. Con ello, se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y terminales cercanas.

En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente con soldadura exotérmica entre sí y en los puntos donde se conectan los equipos que pudieran presentar falla o en las esquinas de la malla, los conductores deben conectarse a electrodos de varilla o tubo que son de 2,4 metros u 8 pies de longitud mínima, clavados verticalmente. El arreglo de varillas enterradas y cantidad dependerá del valor óhmico de la resistencia del terreno ya que existen arreglos perimetrales, arreglos parciales y totales en cada intersección de la cuadrícula según sea el caso.

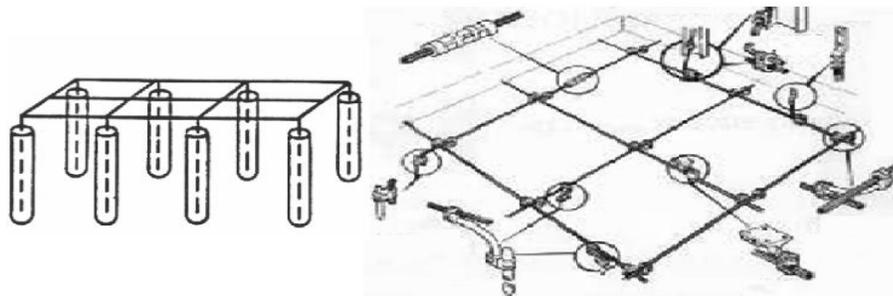
Los cables que forman la malla deben colocarse preferentemente a lo largo de las hileras de estructuras o equipo para facilitar la conexión a los mismos, ya que es una práctica común de ingeniería aterrizar a dos cables diferentes todos los equipos.

Los cables empleados en las mallas de tierra son de acero, acero inoxidable, acero galvanizado y cobre. Para evitar la corrosión galvánica en

terrenos de baja resistividad, algunas compañías eléctricas, desde el diseño, utilizan en sus mallas de tierras cable de cobre estañado para bajar el potencial electronegativo entre los diferentes metales.

El cobre aún es el material más utilizado porque tiene buena conductividad, es resistente a la corrosión y tiene un punto elevado de fusión, y dentro de los cables de cobre, se prefiere en el orden por su baja resistencia: temple suave, temple semiduro, temple duro. El voltaje de malla tiene un efecto insignificante para los conductores que se encuentran entre 2/0 AWG ( $67 \text{ mm}^2$ ) y 500 kcmil ( $253 \text{ mm}^2$ ), pero cuando se considera el robo del cobre como el factor importante, compañías eléctricas y de telecomunicaciones han cambiado al cable de acero tipo *Copperweld*.

Figura 24. **Rejilla con electrodos embebidos verticalmente y uniones**



Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

Los procedimientos de diseño para una malla de protección, están dirigidos para lograr la protección de los voltajes peligrosos de toque y de paso dentro de una subestación. El cálculo de la malla requerida para subestaciones de potencia cumpliendo con el voltaje de paso y contacto se basa en la norma IEEE Std. 80, en ella se encuentra el cálculo del calibre mínimo del conductor de la malla para resistir las corrientes de falla.

Es importante notar que en Europa se emplea el estándar alemán DIN 57 141, que da resultados equivalentes de calibres mínimos. Los conectores empleados en la malla del sistema de tierras de una subestación deben ser de tipo de compresión o soldables para evitar falsos contactos a la conexión entre la malla. El Código Eléctrico Nacional estadounidense, conocido por sus siglas en inglés *National Electric Cod* (NEC), en su sección 250-84 establece que para instalaciones de baja tensión a un solo electrodo con resistencia a tierra mayor que 25 ohms, debe aumentarse un electrodo adicional.

La recomendación de esta sección es que las tierras con un solo electrodo se prueben cuando se instalen, y en forma periódica posterior. El estándar IEEE Std 81-1983 provee el método para determinar las resistividades equivalentes, para la mayoría de subestaciones de transmisión la resistencia eléctrica total del sistema de tierra debe conservarse en un valor (incluyendo todos los elementos que forman el sistema) y otras más grandes, la resistencia de tierra es de  $1\Omega$  o menos, y en subestaciones de distribución el valor aceptado esta dentro de  $1\Omega$  hasta  $5\Omega$ .

Es importante mencionar que se pueden utilizar pozos con varillas colocadas a gran profundidad si el área disponible es limitada o el tipo de terreno posee alta resistividad.



### **3. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE SUELOS Y RESISTIVIDAD**

La medición es el punto de partida de los sistemas de tierras, por lo que los perfiles de la resistividad del suelo determinarán el valor de la resistencia a tierra y la profundidad del sistema de puesta a tierra.

#### **3.1. Tipos y modelos de medidores de resistividad**

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un terrómetro (llamado en otros países: telurómetro). Los aparatos de mayor uso, de acuerdo a su principio de operación, pueden ser de 2 tipos: del tipo de compensación de equilibrio en cero y el de lectura directa.

Los terrómetros deben inyectar una corriente de frecuencia que no sea de 60 Hz para evitar se midan voltajes y corrientes que no se deban al aparato sino a ruidos eléctricos. Por ejemplo si, se está cerca de una subestación o de una línea en servicio, y se van a realizar mediciones de resistividad y resistencia de tierra, con un aparato de 60 Hz, dichos sistemas van a inducir corrientes por el suelo debido a los campos electromagnéticos de 60 Hz y darán una lectura errónea.

De igual manera sucede cuando los electrodos de prueba están mal conectados o tienen falsos contactos, darán señales falsas de corriente y voltaje. Si hay corrientes distintas a las que envió el aparato, éste leerá otras señales de voltaje y corriente que no son las adecuadas. También estos

aparatos de repente tienen oscilaciones en sus lecturas y no es posible leerlas. Un aparato inteligente, lleva conductores blindados, coaxiales, tiene sistemas de filtraje, de análisis y mide lo que halla, pero esa información la analiza, la filtra y luego la deduce.

Por ejemplo, para hacer una medición manda una señal de 100 Hz y mide; luego manda otra señal de 150 Hz y vuelve a medir y puede seguir enviando otras altas frecuencias hasta que los valores van siendo similares, forma una estadística y obtiene un promedio. Los terrómetros son analógicos o digitales y deben contener 4 carretes de cable calibre 14 AWG normalmente. También traen 4 electrodos de material con la dureza suficiente para ser hincados en la tierra. Son de una longitud aproximada de 60 centímetros y un diámetro de 16 milímetros.

Además de lo anterior se hace necesario contar con una cinta no metálica de 50 metros aproximadamente. Los terrómetros tienen cuatro terminales, 2 de corriente (C1, C2) y 2 de potencial (P1, P2) y, generalmente, están numerados en el aparato C1 P1 P2 C2. Los terrómetros deben estar certificados y probados en el campo con una resistencia antes de realizar las mediciones. Como la medición obtenida por un terrómetro es puntual, se deben hacer mediciones en un sentido y en otro a 90 grados del primero, y en el sentido de las diagonales.

En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común de una tabla con lecturas, el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.



La descripción de las pruebas incluidas que se pueden realizar con el equipo marca *Megger* son: medición de resistencia de dos terminales, medición de resistencia de tres terminales, medición de resistencia de tres terminales con conexión nula, medición de resistencia de tres terminales sin conexión nula, medición de resistencia de tres terminales mediante ART, medición de resistencia sin estacas con dos abrazaderas, medición de resistividad de cuatro terminales.

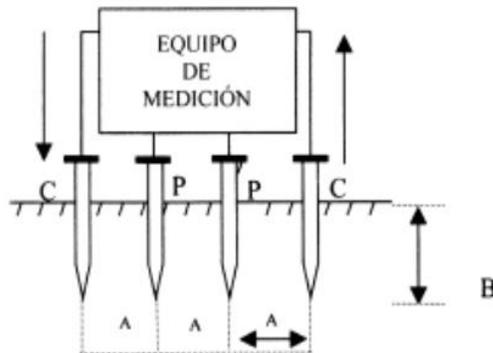
### **3.3. Medición de la resistividad del terreno**

Actualmente existen métodos para la medición de resistividad del suelo en base a los valores de resistencia que provean los telurómetros o terrómetros. Los métodos utilizados para la medición de resistividad del terreno, son el método de cuatro puntas o de *Frank Wenner*, y método *Schlumberger* o electrodos espaciados no igualmente.

#### **3.3.1. Método Wenner (4 puntos) de resistividad del terreno**

Un gran número de técnicas de medición se describen con detalle en el Estándar 81-1983 del IEEE. Para efectuar la medición de resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, siendo el método más usual el de *Frank–Wenner*, llamado de cuatro electrodos. Consiste básicamente en 4 electrodos enterrados dentro del suelo a lo largo de una línea recta, a igual distancia  $A$  de separación, enterrada a una profundidad  $B$ . La tensión entre los dos electrodos interiores de potencial es medida y dividida entre la corriente que fluye a través de los otros dos electrodos externos para dar un valor de resistencia mutua  $R$  en  $\Omega$ .

Figura 26. **Método de *Wenner* para la medición de la resistividad**



Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

Donde las variables (A) describe la separación entre varillas adyacentes en m. (B) es profundidad de los electrodos en m. (C) son los electrodos de corriente. Y (P) son los electrodos de potencial. Si la relación A/B es menor a 20, entonces se utilizará la siguiente fórmula para calcular la resistividad del terreno.

$$\rho = \frac{4\pi R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (14)$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad aparente del suelo, en  $\Omega$ -m

A = Separación entre electrodos adyacentes, en metros o centímetros

B = Profundidad de los electrodos, en metros o centímetros

R = Resistencia medida, en  $\Omega$

Si A y B se miden en cm o en m y la resistencia R en  $\Omega$  la resistividad estará dada en  $\Omega$ -cm o en  $\Omega$ -m respectivamente. Si la longitud B es mucho

menor que la longitud A, es decir cuando la relación A/B sea mayor o igual a 20, puede suponerse B = 0 y la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR \quad (15)$$

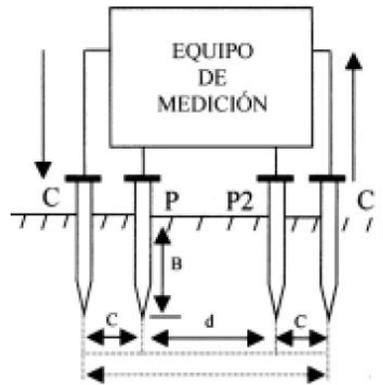
Con estas fórmulas se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistividad aparente. Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamiento indicándonos en donde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

### **3.3.2. Método *Schlumberger* o electrodos espaciados no igualmente**

Una desventaja del método de *Wenner* es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los 2 electrodos interiores cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes.

Para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede utilizarse el arreglo mostrado en la figura 27. En este método los cuatro electrodos se ubican sobre una línea recta y la distancia de los electrodos detectores de potencia P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub> que permanecen fijos, es mucho menor que los electrodos inyectores de corriente C y C, que son los que se trasladan.

Figura 27. **Electrodos no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger- Palmer**



Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pequeños espaciamientos entre los electrodos, considerando que la mayor parte de la corriente que penetra depende del espaciamiento entre los electrodos. Así se asume que la resistividad medida para un espaciamiento entre electrodos A representa la resistividad aparente del suelo a una profundidad B. La información de las mediciones de resistividad puede incluir datos de temperatura e información sobre las condiciones de humedad del suelo en el tiempo en que se realizó la medición.

Todos los datos válidos sobre los conductores enterrados que ya se conocen o se suponen para el estudio del área, deberán anotarse en el plano de red de Tierra. Los conductores desnudos enterrados que se encuentren en contacto con el suelo pueden invalidar lecturas realizadas por el método descrito si están bastante juntos de manera que alteren la trayectoria del flujo de la corriente. Por esta razón, las mediciones de resistividad del suelo son de menor valor en un área en donde una rejilla de conductores ya ha sido

instalada, excepto, tal vez, para mediciones poco profundas dentro o cerca del centro de una gran rejilla para tierra rectangular.

En tales casos una lectura poco aproximada deberá ser tomada a corta distancia fuera de la rejilla para tierra, con los electrodos de prueba en tal posición que minimicen el efecto de la rejilla para tierra sobre las trayectorias del flujo. Sin embargo, no es necesario hacer dichas consideraciones dentro de la rejilla para tierra, tales anotaciones pueden ser utilizadas por medio de una aproximación, especialmente si hay una razón para creer que el suelo en la totalidad del área es razonablemente homogéneo.

Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido. La fórmula empleada en este caso se puede determinar fácilmente.

Si la profundidad de los electrodos es pequeña, comparada con la separación  $d$  y  $c$ , entonces la resistividad aparente puede calcularse como la siguiente Ecuación.

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (16)$$

Además con valores grandes de  $d/L$ , ( $L$  = longitud del terreno a ser medido) las variaciones de los valores medidos debidas a irregularidades en la superficie, se reducen dando mediciones más exactas.

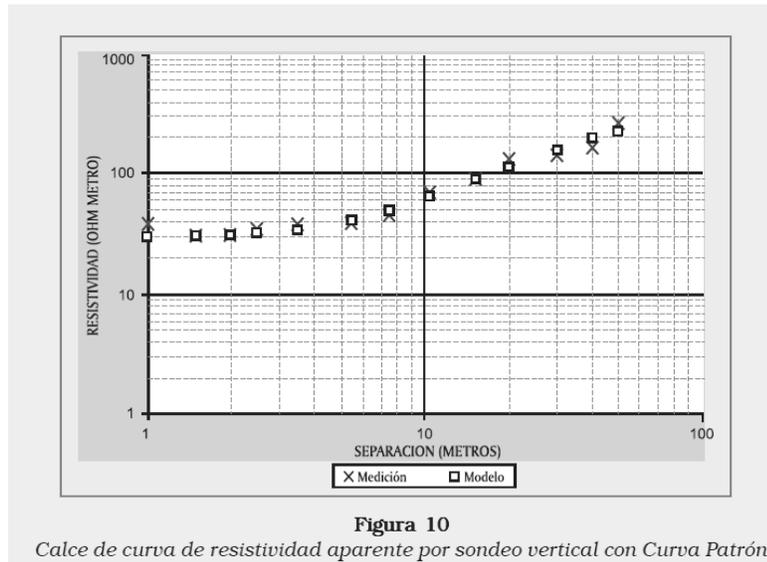
### 3.3.3. Interpretación de la curva de resistividad aparente

En general, las curvas de resistividad aparente se aproximan en forma asintótica a los valores de resistividad de la primera y última capa. El número de capas o estratos a que puede asimilarse el terreno se determina por el número de puntos de inflexión que posee la curva de resistividad aparente, aumentando en uno. La curva de sondeo eléctrico con una configuración electródica determinada, para un modelo geoelectrico definido, es una función analítica conocida y existen numerosas curvas teóricas de resistividad llamadas Curvas Patrón, que contemplan, combinaciones de capas de diferentes resistividades y espesores.

Si se considera el problema inverso, y dada una curva de sondeo eléctrico vertical obtenida mediante medidas de campo, deducir y conocer la estructura geoelectrica que la ha producido, no tiene solución única. En la práctica, suponiendo que a cada curva de campo le corresponde una única estructura, se compara la curva de campo con las curvas patrón de resistividad aparente. Si se obtiene un calce perfecto entre la curva de terreno y una curva patrón, se supone que la estructura del terreno es idéntica a la teórica. Las curvas se construyen en papel bilogarítmico y están normalizadas con el objeto de independizarse de las unidades y magnitudes de la medición, interesando sólo la forma de ella. De estas curvas patrón las de mayor uso son las de Orellana y *Mooney*.

También es posible representar computacionalmente estas curvas y efectuar el ajuste por pantalla, ingresando la curva de terreno, o bien proceder a un ajuste automático de los datos de terreno por algún método de adaptación de curvas.

Figura 28. **Curva de resistividad aparente por sondeo vertical con curva patrón**



Fuente: MARTÍNEZ, Juan José; Toledo, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Thomson Paraninfo, 2001. 296 p.

### 3.3.4. Resistividad equivalente del terreno

Los procedimientos simplificados de análisis y diseño de puestas a tierra, están basados en la suposición de terreno homogéneo. Para su aplicación, se debe reducir el modelo de terreno estratificado general, a un modelo práctico de terreno homogéneo equivalente, caracterizado por un sólo parámetro, la resistividad equivalente  $\rho_e$ .

El método de uso tradicional, propuesto por *Burgsdorf-Yakobs*, para reducir la  $n$  capas desde la superficie de un modelo de terreno estratificado, a un terreno homogéneo equivalente caracterizado por una única resistividad, emplea los siguientes parámetros y expresiones:

- $\rho_i$  : resistividad del estrato «i», supuesto uniforme, en Ohm- metro
- $h_i$  : profundidad desde la superficie al término del estrato i, en metro
- $S$  : área que cubre el perímetro del electrodo de tierra, en metros cuadrados
- $b$ : máxima profundidad de conductor enterrado, medida desde la superficie, en metros; incluye la profundidad de enterramiento de la malla y de las barras verticales si es el caso. Para  $i = 1, 2, \dots, n$

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (17)$$

$$r_0^2 = r^2 - b^2 \quad (18)$$

$$q_0^2 = 2r(r+b) \quad (19)$$

$$u_i^2 = q_0^2 + r_0^2 + h_i^2 \quad (20)$$

$$v_i^2 = 0.5 \left( u_i^2 - \sqrt{u_i^4 - 4 q_0^2 r_0^2} \right) \quad (21)$$

$$F_i = \sqrt{1 - v_i^2 / r_0^2} \quad (22)$$

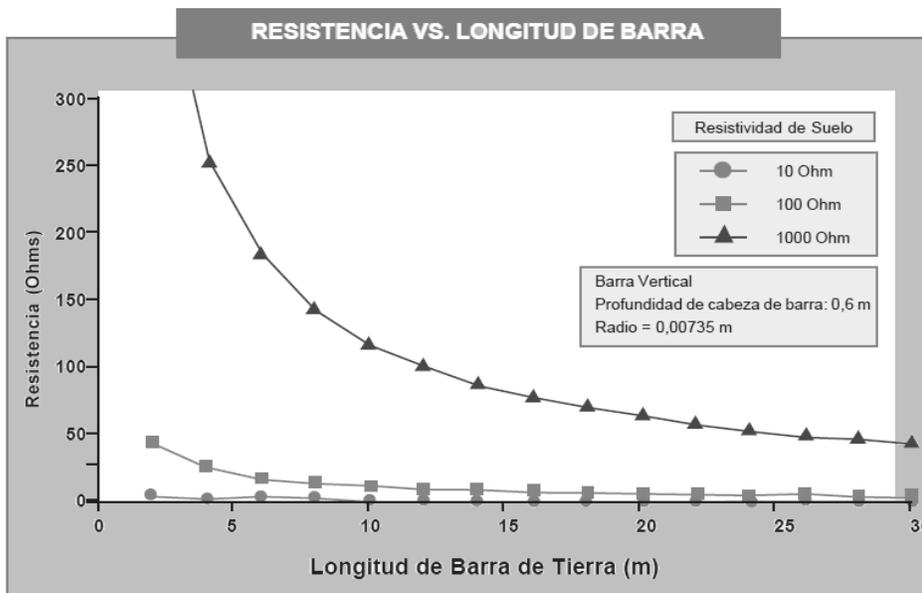
$$\rho_{eq}(1 \rightarrow n) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_i - F_{i-1} / \rho_i} \quad (23)$$

La programación de las ecuaciones anteriores es fácil y directa y constituye un método rápido para evaluar el modelo equivalente con calculadoras manuales. Debe observarse que la resistividad equivalente de un terreno determinado es dependiente de las dimensiones y ubicación del electrodo y se modifica si cambia su área o profundidad.

### 3.3.5. Incremento de profundidad de enterramiento vertical

La Figura 29 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando la longitud de la barra enterrada. Se observa que el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la barra aumenta.

Figura 29. Resistencia vs. longitud de barra



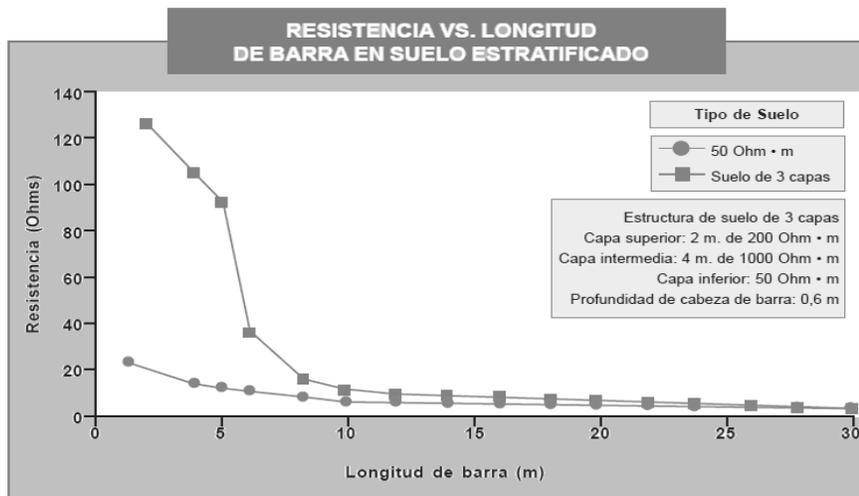
Resistencia vs. Longitud de barra

Fuente: MARTÍNEZ, Juan José; Toledo, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Thomson Paraninfo, 2001. 296 p.

El decrecimiento en resistencia obtenido con una barra larga puede ser considerable en condiciones de suelo no uniforme. En la figura siguiente, las capas superiores son de resistividad relativamente alta hasta una profundidad

de seis metros. La resistencia de la barra es alta hasta que su longitud supera estas capas, debido a la alta resistividad del suelo que la rodea.

Figura 30. Resistencia vs. longitud



Resistencia vs. Longitud de barra en suelo estratificado

Fuente: MARTÍNEZ, Juan José; Toledo, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Thomson Paraninfo, 2001. 296 p.

Las barras verticales otorgan un grado de estabilidad a la impedancia del sistema de puesta a tierra. La impedancia será menos influenciada por variaciones estacionales en el contenido de humedad y temperatura del suelo.

### 3.3.6. Efecto de profundidad de enterramiento

Este efecto proporciona sólo una reducción marginal en la impedancia, pero a un costo relativamente alto, de modo que normalmente no se considera. Debe recordarse, sin embargo, que mientras mayor sea la profundidad de enterramiento, menores son los gradientes de voltaje en la superficie del suelo.

### **3.3.7. Efecto de proximidad de electrodos**

Si dos electrodos de tierra se instalan juntos, entonces sus zonas de influencia se traslapan y no se logra el máximo beneficio posible. En realidad, si dos barras o electrodos horizontales están muy próximos, la impedancia a tierra combinada de ambos puede ser virtualmente la misma que de uno solo, lo cual significa que el segundo es redundante. El espaciamiento, la ubicación y las características del terreno son los factores dominantes en esto.

### **3.3.8. Medición de resistencia método de la caída de potencial**

Este método tiene muchas variaciones y se aplica a todos los tipos de mediciones de resistencia de aterrizaje. Básicamente, las mediciones de la resistencia de aterrizaje consisten en medir la resistencia del sistema de aterrizaje con respecto al electrodo de tierra remoto. El electrodo remoto está teóricamente a una distancia infinita desde el sistema de aterrizaje donde la densidad de corriente de la tierra se aproxima a cero.

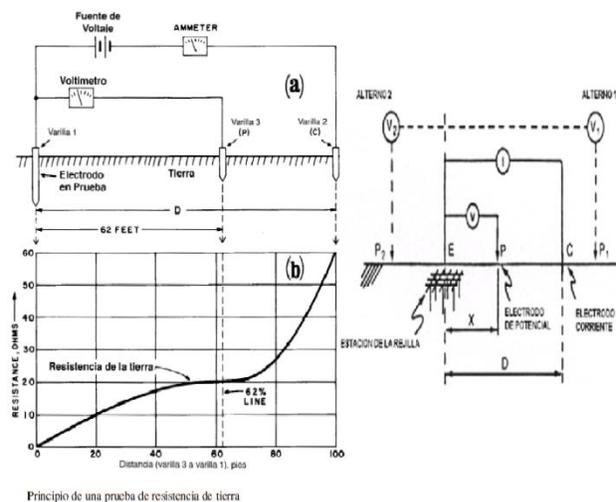
Mientras el método de la caída de potencial se utiliza universalmente, este presenta muchas dificultades y fuentes de error cuando se utiliza para medir la resistencia de grandes sistemas de aterrizaje. Estas dificultades ocurren primeramente debido al tamaño y a la configuración del sistema de aterrizaje y la heterogeneidad del suelo.

Si la distancia  $D$  de la figura 31, es lo suficientemente grande con respecto al sistema de aterrizaje, la parte central de la curva de la caída de potencial tiende a estar cerca de la parte horizontal, pero puede parecer que es así debido a la falta de sensibilidad de los instrumentos que se utilizan.

Esto se acepta comúnmente, aunque no siempre correctamente, que la sección cercana a la horizontal de la curva de la resistencia  $R_g$ . Para sistemas de aterrizaje más grandes, mayores distancias  $D$  no son prácticas o si son posibles se tiene como resultado que la sección cercana a la horizontal de la curva no existirá. En este caso, no se obtendrán mediciones correctas a menos que se tenga una buena idea de la posición exacta de  $P$ .

Para medir la resistencia, la fuente de corriente se conecta entre la malla de aterrizaje de la subestación  $E$  y un electrodo de corriente que se encuentra a una distancia de varios cientos de metros de la subestación. El circuito de medición de potencial se conecta entonces entre la malla de la subestación  $E$  y un electrodo potencial  $P$ , con mediciones que se hacen en varias localizaciones del electrodo afuera de la subestación.

Figura 31. **Medición de resistencia método de la caída de potencial**



Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

Este electrodo de potencial se puede mover hacia el electrodo de corriente en aumentos iguales de distancia, comenzando cerca de la subestación y las lecturas de las resistencias obtenidas en las diferentes localizaciones se pueden trazar contra las distancias de la subestación.

El gráfico que resulta se debe parecer a la curva de desempeño esperado que resulta de la medición entre el electrodo de prueba simbolizado con la letra E, el electrodo de potencial simbolizado con la letra P y el electrodo de corriente simbolizado con la letra C, como se muestra en la figura 31, desde E hasta P, el voltaje por amperio de la corriente de prueba aumenta pero el gradiente de voltaje disminuye alcanzando un mínimo en P.

Si continuamos hacia C, el efecto de la corriente que converge en las investigaciones de la pruebas de corriente llega a ser aparente y se observa un incremento del gradiente de voltaje tal como se aproxima la prueba de corriente.

El lento incremento, en la parte de forma casi horizontal de la gráfica de la figura 31b, representa una zona ó área donde la interacción de los electrodos que se examinaron aporta un valor representativo de la resistencia del terreno, el cual se puede afinar hallando el valor de menos variación ó utilizando interpolación.

Cuando los electrodos se colocan a una distancia finita desde el sistema de aterrizaje y la prueba de potencial, se maneja en un lugar específico, entonces se obtiene una medida precisa de la resistencia. Desafortunadamente, el lugar exacto del electrodo de potencial se define muy bien solo para algunos casos ideales tal como un hemisferio o electrodos muy pequeños enterrados en un suelo uniforme o en un suelo de dos capas.

En la práctica, sin embargo, los sistemas de aterrizaje consisten de un arreglo complejo de varillas de tierra verticales y conductores horizontales, que se entierran comúnmente en suelos no uniformes. Para rejillas de aterrizaje grandes los espacios que se requieren pueden no ser prácticos o incluso posibles, especialmente donde la línea de transmisión arriba de los cables de aterrizaje y los neutros que se conectan al aterrizaje de la subestación efectivamente ampliará el área de influencia. Consecuentemente, la parte plana de la curva no se obtendrá y se deben utilizar otros métodos de interpretación.

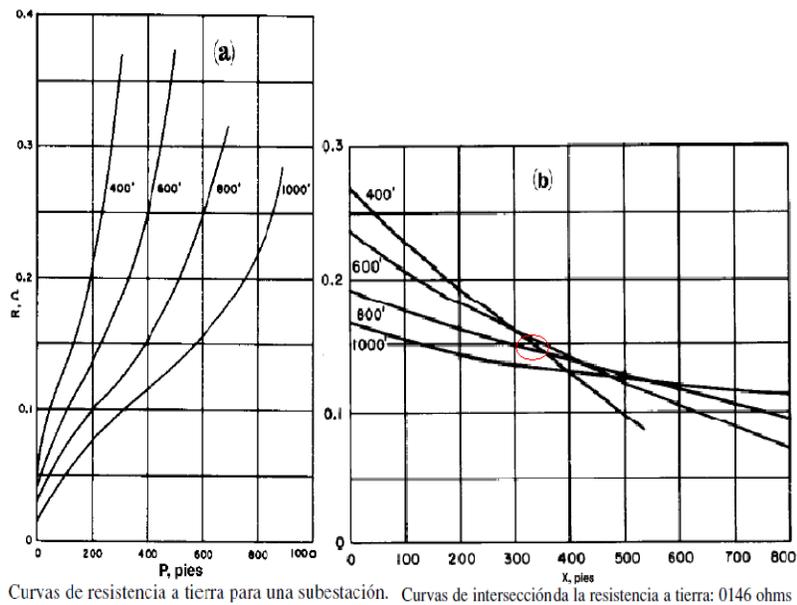
Cuando el suelo no es uniforme y la separación no es muy grande comparado con las dimensiones del sistema de aterrizaje, el 61,8 por ciento, que corresponde a la llamada porción plana de la curva, puede que no se aplique más. Además, cuando el punto P está en el mismo lugar que C (P1) hay un lugar en particular que nos da la resistencia actual. La ventaja del método de la caída de potencial es que los electrodos de potencial y corriente tendrán sustancialmente una resistencia muy alta que el sistema de aterrizaje que se está evaluando sin afectar significativamente la precisión de las mediciones.

### **3.3.9. Prueba en una subestación grande**

Las pruebas que normalmente se realizan para una subestación eléctrica grande son de carácter similar aunque no iguales para áreas menores. Se puede considerar a una subestación grande que cubra un área aproximada de 300 pies x 250 pies. El sistema de tierra consiste de varias placas de tierra y varillas unidas por cables de cobre. Para realizar la prueba, asegurarse que la línea de prueba sale de un punto en el frente aproximadamente a la mitad a lo largo de un lado y el electrodo de corriente se colocó a distancias de 400, 600, 800 y 1 000 pies del punto de arranque.

Las curvas de resistencia a tierra resultantes se muestran en la figura 32a y las curvas de intersección figura 32b; están graficadas y, al realizar análisis comparativo de curvas, el valor final de resistencia es de 0,146  $\Omega$ , el cual es razonable esperar que este valor sea correcto dentro de un porcentaje pequeño. Según análisis gráfico la variación máxima aceptada en dicho valor será del  $\pm 10\%$ , ya que de ser así el valor de resistividad variará considerablemente, se sugiere utilizar análisis gráfico y de datos obtenidos en campo, para determinar con mayor exactitud dicho valor de resistencia.

Figura 32. **Curvas de resistencia (a) e intersección (b) de la resistencia a tierra para una subestación**



Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

### **3.3.10. Medición de la resistencia de sistemas de electrodos de tierra grandes método de pendiente**

Se ha mostrado que la resistencia de tierra verdadera de un sistema de electrodos se obtiene cuando la sonda de potencial temporal P se coloca a una distancia del centro eléctrico del sistema igual al 61,8 por ciento de la distancia del centro eléctrico a la sonda de corriente temporal. Este principio se utiliza en la técnica llamada curvas de intersección explicada en el apéndice I. Resulta aparente que el método es de naturaleza compleja y requiere ciertos cálculos de prueba y error.

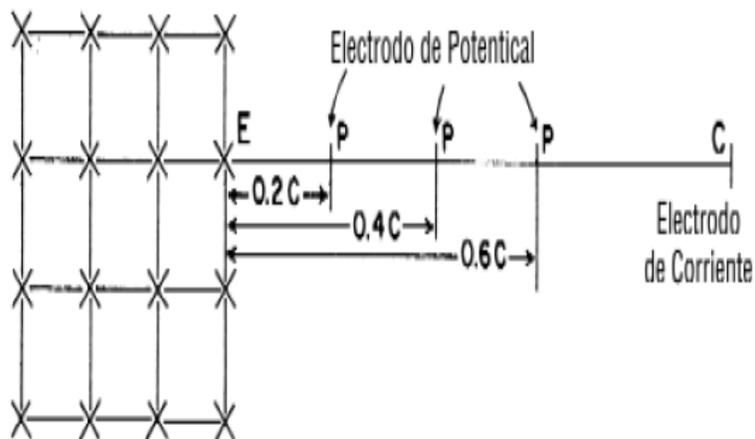
Aquí se describe otra técnica. Es más fácil de utilizar y ha probado dar resultados satisfactorios, tanto en casos teóricos como prácticos, y cuando el terreno no es homogéneo. Se llama método de pendiente.

Para el propósito de aplicar esta técnica en la práctica, el siguiente es un procedimiento simplificado paso por paso. Seleccione una varilla E conveniente a la que se pueda conectar el probador de tierra. E es una de tantas varillas paralelas que forman el sistema complejo de tierra. Esta medición se resume en 7 pasos los cuales son:

- Insertar la sonda de corriente a una distancia C desde E (la distancia C es normalmente de 2 a 3 veces la dimensión máxima del sistema)
- Insertar sondas de potencial a distancias iguales a 0,2 C, 0,4 C y 0,6 C
- Medir la resistencia a tierra utilizando cada sonda de potencial a la vez. Dejar que esos valores de resistencia sean R1, R2, y R3 respectivamente

- Calcular el valor de  $(R_3 - R_2) / (R_2 - R_1)$ , a este valor se le llama  $m$  y representa el cambio de pendiente de la curva resistencia/distancia
- Recurrir a la tabla V siguiente y encontrar los valores correspondientes de  $PT/C$  para  $\mu$
- Puesto que  $C$  ya se conoce, calcular  $PT$  e insertar una sonda de potencial a esta distancia de  $E$ . Medir la resistencia a tierra que debe ser la resistencia verdadera
- Repetir el proceso completo para un valor más grande de  $C$ . Si la resistencia verdadera decrece apreciablemente cuando  $C$  aumenta, es necesario aumentar  $C$  todavía más

Figura 33. **Localización de la sonda de potencial para utilizar el método de pendiente**



Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

Tabla V. Valores de  $P_T/C$  para varios valores de  $\mu$

| $\mu$ | $P_T/C$ | $\mu$ | $P_T/C$ | $\mu$ | $P_T/C$ |
|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 0.40  | 0.643   | 0.80  | 0.580   | 1.20  | 0.494   |
| 0.41  | 0.642   | 0.81  | 0.579   | 1.21  | 0.491   |
| 0.42  | 0.640   | 0.82  | 0.577   | 1.22  | 0.488   |
| 0.43  | 0.639   | 0.83  | 0.575   | 1.23  | 0.486   |
| 0.44  | 0.637   | 0.84  | 0.573   | 1.24  | 0.483   |
| 0.45  | 0.636   | 0.85  | 0.571   | 1.25  | 0.480   |
| 0.46  | 0.635   | 0.86  | 0.569   | 1.26  | 0.477   |
| 0.47  | 0.633   | 0.87  | 0.567   | 1.27  | 0.474   |
| 0.48  | 0.632   | 0.88  | 0.566   | 1.28  | 0.471   |
| 0.49  | 0.630   | 0.89  | 0.564   | 1.29  | 0.468   |
| 0.50  | 0.629   | 0.90  | 0.562   | 1.30  | 0.465   |
| 0.51  | 0.627   | 0.91  | 0.560   | 1.31  | 0.462   |
| 0.52  | 0.626   | 0.92  | 0.558   | 1.32  | 0.458   |
| 0.53  | 0.624   | 0.93  | 0.556   | 1.33  | 0.455   |
| 0.54  | 0.623   | 0.94  | 0.554   | 1.34  | 0.452   |
| 0.55  | 0.621   | 0.95  | 0.552   | 1.35  | 0.448   |
| 0.56  | 0.620   | 0.96  | 0.550   | 1.36  | 0.445   |
| 0.57  | 0.618   | 0.97  | 0.548   | 1.37  | 0.441   |
| 0.58  | 0.617   | 0.98  | 0.546   | 1.38  | 0.438   |
| 0.59  | 0.615   | 0.99  | 0.544   | 1.39  | 0.434   |
| 0.60  | 0.614   | 1.00  | 0.542   | 1.40  | 0.431   |
| 0.61  | 0.612   | 1.01  | 0.539   | 1.41  | 0.427   |
| 0.62  | 0.610   | 1.02  | 0.537   | 1.42  | 0.423   |
| 0.63  | 0.609   | 1.03  | 0.535   | 1.43  | 0.418   |
| 0.64  | 0.607   | 1.04  | 0.533   | 1.44  | 0.414   |
| 0.65  | 0.606   | 1.05  | 0.531   | 1.45  | 0.410   |
| 0.66  | 0.604   | 1.06  | 0.528   | 1.46  | 0.406   |
| 0.67  | 0.602   | 1.07  | 0.526   | 1.47  | 0.401   |
| 0.68  | 0.601   | 1.08  | 0.524   | 1.48  | 0.397   |
| 0.69  | 0.599   | 1.09  | 0.522   | 1.49  | 0.393   |
| 0.70  | 0.597   | 1.10  | 0.519   | 1.50  | 0.389   |
| 0.71  | 0.596   | 1.11  | 0.517   | 1.51  | 0.384   |
| 0.72  | 0.594   | 1.12  | 0.514   | 1.52  | 0.379   |
| 0.73  | 0.592   | 1.13  | 0.512   | 1.53  | 0.374   |
| 0.74  | 0.591   | 1.14  | 0.509   | 1.54  | 0.369   |
| 0.75  | 0.589   | 1.15  | 0.507   | 1.55  | 0.364   |
| 0.76  | 0.587   | 1.16  | 0.504   | 1.56  | 0.358   |
| 0.77  | 0.585   | 1.17  | 0.502   | 1.57  | 0.352   |
| 0.78  | 0.584   | 1.18  | 0.499   | 1.58  | 0.347   |
| 0.79  | 0.582   | 1.19  | 0.497   | 1.59  | 0.341   |

Fuente: OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

### **3.3.11. Verificaciones periódicas de los sistemas de aterrizaje que se instalan**

Algunos servicios re-verifican periódicamente la resistencia a tierra de la subestación después de terminar la construcción. También se aconseja revisar el sistema de aterrizaje de vez en cuando por posibles cambios en las condiciones del sistema que pueden afectar el valor máximo de la corriente a tierra, así como extensiones a la misma subestación que puede afectar la corriente máxima, la resistencia a tierra de la subestación o las diferencias de potencial local.

## **4. POZOS A TIERRAS DE MATERIAL DE BAJA RESISTIVIDAD Y ANÁLISIS QUÍMICO-ELÉCTRICO**

La mejora de terrenos a través del agregado de productos químicos es una técnica aceptable y varios son los objetivos que se buscan con este procedimiento.

### **4.1. Método del cambio del terreno por otro de menor resistividad**

El Código Eléctrico Nacional estadounidense, conocido por sus siglas en inglés *National Electric Cod* (NEC), en su sección 3 de métodos de puestas a tierra, regla 036B indica que se pueden emplear tratamientos químicos o suelos artificiales para disminuir la resistencia de puesta a tierra, los cuales deben ser aceptados y certificados por una entidad especializada, imparcial y competente, asegurándose que dichos tratamientos no atenten contra el medio ambiente.

Los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad, por terreno rico en sales naturales. Cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, etc., son terrenos de muy alta resistividad y pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno está conformado por componentes de alta y baja resistividad, de modo que se supriman las partes de alta resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad. Uno de estos procedimientos es el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.

El cambio total o parcial del terreno deberá ser lo suficiente para que el electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de 0 metros a 0,50 metros en todo su contorno, así como en su fondo.

La resistencia crítica de un electrodo se encuentra en un radio contorno que va de 0 a 0,50 metros, por lo que se tendrá sumo cuidado con las dimensiones de los pozos para los electrodos proyectados. El porcentaje de reducción en estos casos es difícil de deducir, debido a los factores que intervienen, como son la resistividad del terreno natural, resistividad del terreno de reemplazo total ó parcial, adherencia por la compactación y la limpieza del electrodo. Para lugares de alta resistividad, donde se cambie el terreno de los pozos en forma total, el porcentaje puede estar entre 50 a 70 por ciento de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de media resistividad, donde se cambie el terreno de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción de resistividad estará entre un rango de 20 a 40 por ciento de la resistencia eléctrica resultante y cuando se cambie totalmente la reducción estará entre 40 a 60 por ciento.

La saturación en este caso se dará si se cambia mayor volumen de tierra que la indicada, los resultados serán casi los mismos y el costo será mucho mayor, lo cual no se justifica. Para elegir el tratamiento químico de un SPT se deben considerar factores como: el alto porcentaje de reducción inicial, facilidad de la aplicación del método, tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos del SPT), facilidad en su reactivación y estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años).

Las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener características como: Higroscopicidad, no ser corrosivas, químicamente estable en el suelo, inocuo para la naturaleza, alta capacidad de gelificación, alta conductividad eléctrica, no ser tóxico.

#### **4.2. Formación químico electrolítico del terreno**

Derramando una mezcla de sustancias químicas y de tierra tamizada en el volumen alrededor del electrodo se obtendrá una reducción inmediata y significativa en su resistencia de puesta a tierra.

Sin embargo, si los elementos químicos usados se eligen debido a que son solubles, continuarán diluyéndose progresivamente por agua de lluvia u otra causa y la resistividad del suelo entonces aumentará, hasta eventualmente retornar a su valor original. Materiales que no debieran ser usados como relleno son arena, ceniza, y otros materiales ácidos y/o corrosivos. El material de relleno debe de ser de un tamaño de partícula relativamente pequeño y, si fuera posible, que ayude a retener la humedad.

El suelo debería de tener un pH entre 6,0 (ácido) y 10,0 (alcalino). La arcilla dura no es un material de relleno conveniente ya que si es fuertemente compactada, puede llegar a ser casi impermeable al agua y podría permanecer seca.

Ninguna sal en estado seco es conductiva. Para que los electrolitos de las sales conduzcan corriente, se deben convertir en soluciones verdaderas o en seudo soluciones, por ejemplo: el cloruro de sodio en agua forma una solución verdadera, lo mismo que el azúcar, el mismo cloruro de sodio disuelto en benceno formará una seudo solución o dispersión coloidal. La solución, Cloruro de sodio + carbón vegetal es conductiva.

### **4.3. Tipos de tratamiento químico del terreno**

Existen diversos tipos de tratamiento químico para reducir la resistencia de un SPT, entre los más usuales se encuentra el Cloruro de sodio + carbón vegetal, bentonita, *thor-gel*, terra- líquido, progas, ion-forte, quibacsol, san-earth (cemento conductivo).

#### **4.3.1. Bentonita**

Las bentonitas constituyen un grupo de sustancias minerales arcillosas que no tienen composición mineralógica definida y deben su nombre al hecho de haberse descubierto el primer yacimiento cerca de *Fort Benton*, en los estratos cretáceos de *Wyoming* en 1 848. Aun cuando las distintas variedades de bentonitas difieren mucho entre sí, en lo que respecta a sus propiedades respectivas, es posible clasificarlas en dos grandes grupos la bentonita sódica y la bentonita cálcica.

La bentonita sódica tiene la característica que el ion sodio es permutable y cuya característica más importante es una marcada tumefacción o hinchamiento que puede alcanzar en algunas variedades hasta 15 veces su volumen y 5 veces su peso. Por otro lado, la bentonita cálcica es la que el ion calcio es permutable, tiene menor capacidad para absorber agua y por consiguiente solo se hinchan en la misma proporción que las demás arcillas.

Las bentonitas molidas retienen las moléculas del agua, pero la pierden con mayor velocidad con la que la absorben debido a la sinéresis provocada por un exiguo aumento en la temperatura ambiente, al perder el agua pierden conductividad y restan toda compactación lo que deriva en la pérdida de contacto entre el electrodo y el medio, elevándose la resistencia del pozo

ostensiblemente, una vez que la bentonita se ha armado, su capacidad de absorber nuevamente agua es casi nula.

#### **4.3.2. Compuesto *THOR-GEL***

Es un compuesto químico complejo que se forma cuando se mezclan en el terreno las soluciones acuosas de sus 2 componentes. El compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal, y es especial para el tratamiento químico electrolítico de las puestas a tierra, este componente viene usándose mayormente por sus buenos resultados, debido a que posee sales concentradas de metales que neutralizan la corrosión de las sales incorporadas, así como aditivos para regular el Ph y acidez de los suelos.

Cuando se utiliza este compuesto, la mezcla va formando una capa de material de baja resistividad, que facilita el movimiento de iones dentro de la malla a tierra, de modo que la aplicación del compuesto se puede utilizar de forma horizontal y vertical, en uno u en otro sentido; convirtiéndose en un excelente conductor eléctrico. Este compuesto posee la ventaja de que al unirse en el terreno se forma un compuesto gelatinoso que le permite mantener una estabilidad, química y eléctrica, por aproximadamente 4 años.

Adicionalmente, presenta una gran atracción por el agua, de modo que puede aprisionarla manteniendo un equilibrio con el agua superficial que la rodea; esto lo convierte en una especie de reservorio acuífero. Rellena los espacios intersticiales dentro del pozo, constituyendo una excelente conexión eléctrica entre el terreno (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente.

El método de aplicación consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un Gel, mejoren la conductibilidad de la tierra, y retengan la humedad en el pozo, por un período prolongado. De esta manera se garantiza una efectiva reducción de la resistencia eléctrica y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima. La aplicación del *THOR-GEL* es de 1 a 3 dosis por metro cúbico, según sea la resistividad natural del terreno y la resistencia final deseada, ver la Tabla VI.

Tabla VI. **Dosis de *THOR-GEL* a ser aplicada para distintos tipos de terreno**

| <b>Naturaleza del terreno</b>                   | <b>Resistividad (Ohm - m)</b> | <b>Dosis THOR-GEL por m<sup>3</sup></b> |
|---|-------------------------------|---|
| Terrenos cultivables y fértiles                 | 50                            | 1                                       |
| Terraplenes compactos y húmedos                 | 50                            | 1                                       |
| Terrenos cultivables poco fértiles              | 500                           | de 1 a 2                                |
| suelos pedregoso desnudos arena seca, permeable | 3000                          | 2                                       |
| suelos rocosos fraccionados                     | 6000                          | de 2 a 3                                |
| Suelos rocosos compactos                        | 14000                         | 3                                       |

Fuente: BOWLES, Joseph. *Propiedades geofísicas de los suelos*. Bogota: McGraw-Hill, 1982. 490 p.

#### **4.3.3. Compuesto TERRAL-LÍQUIDO**

Este es un activador que aumenta la conductividad del terreno en el que están instalados los electrodos de toma de tierra, consiguiendo con ello bruscos descansos de la resistencia de tierra. Sus características importantes son:

facilidad en el uso, no peligroso ni contaminante, no tiene caducidad, su peso bruto 25 kilogramos (apilable aplicable a un electrodo), no requiere ninguna condición especial de almacenamiento. Su aplicación a perforaciones como pozos se realiza al proceder alternando los 25 kilogramos de TERRAL-LÍQUIDO cada 50 kilogramos de material de relleno sólido o en papilla, (por ejemplo: bentonita, carbón en polvo, grafito, tierra de labor o la propia tierra extraída de perforación sin pérdidas) y así sucesivamente.

En la zona más superficial siempre añadir (le toque o no) 25 kilogramos de terral-líquido, rellenar y compactar cuidadosamente sin dejar huecos en la perforación; si el sistema de aterrizaje es de varios electrodos tener en cuenta que deben de estar espaciados entre cada uno de 7 a 9 metros ya que a esta distancia se maximiza el rendimiento efectivo de los tratamientos, y a menores distancias los tratamientos serían en si mismo igualmente efectivos pero al unirlos al circuito se vería descensos inferiores a lo esperado.

Hay 3 situaciones especiales que hay que controlar, una es la presencia de cuevas y/o grandes oquedades, presencia de corrientes de agua, presencia de roca totalmente compactada, ya que estas condiciones pueden afectar la efectividad de la aplicación y el funcionamiento de terral-líquido. Para mayor perdurabilidad de los tratamientos, añadir 2 contenedores de terral-líquido en cada electrodo en vez de uno que se usa habitualmente.

#### **4.3.4. Compuesto PROGAS**

El activador PROGAS está desarrollado para resolver los inconvenientes de resistencia de las tomas de tierra, cuando además se tiene un entorno corrosivo, o las características de las instalaciones y estructuras adjuntas a las tomas de tierra requieran una protección especial frente a la corrosión

(gasolineras, instalaciones de gas, petróleo, etc.). Este tratamiento consigue resolver las dos dificultades; así, por una parte, se obtiene una fuerte disminución de la resistencia de tierra y, además, actúa como potente anticorrosivo. Hasta tal punto es efectivo como anticorrosivo que evita incluso la corrosión galvánica.

Se puede utilizar como apoyo para evitar el deterioro en el electrodo o partes metálicas del SPT, combinado con otro de mejor resultado para el tratamiento o relleno de pozos.

#### **4.3.5. Compuesto *ION – FORTE***

Este producto está diseñado para instalaciones con un único electrodo y para activación de electrodos profundos (pozos), su capacidad de descenso de la resistencia de tierra, es superior al de terral-líquido su perdurabilidad es plurianual. *Ion-forte* actuará insertándose en el terreno que hay en contacto con los electrodos y generando estructuras intensamente higroscópicas. Estas estructuras son capaces de retener la humedad y aportar altas concentraciones iónicas, que dan grandes incrementos de conductividad.

Sus especiales propiedades higroscópicas le confieren una capacidad de retención de agua que es superior a la de los geles, y esto conlleva a que se minimice el problema recurrente de la variación por estacionalidad de las resistencias de tierra. Puede aplicarse en cualquier tipo de temas de tierra, independiente del uso al que se destine, (alta, media, y baja tensión, informática, antenas, pararrayos, etc.). Su aplicación más idónea es para instalaciones con una sola pica y para activación de pozos. También es aplicable a instalaciones con múltiples electrodos siguiendo las recomendaciones que se detallan en las instrucciones de uso.

Para aplicación en pozos se realiza una combinación de 25 litros de ion-forte y 40 litros de material de relleno como bentonita carbón o tierra tratada o la misma tierra de perforación, si se utiliza bentonita la mezcla debe de ser una papilla conformada por cada 1 kilogramo de bentonita sódica se debe agregar 8 litros de agua y aumentar la cantidad de agua si así lo necesitase la calidad de bentonita adquirida. Las dimensiones acostumbradas de para estos pozos son de 20 metros de profundidad y 20 centímetros de diámetro, aunque estas medidas pueden variar para distinta aplicación, pero se deberán realizar los cálculos de los litros necesarios tomando como base el pozo en mención.

#### **4.3.6. Compuesto QUIBACSOL**

Es un compuesto mejorador de la conductividad del terreno. El aumento de conductividad es particularmente notable en terrenos de mayor resistividad como los formados por masas de gran porosidad y pobreza de sales. Incluso terrenos formados por rocas compactas e impermeables, pueden ser mejorados debido a que normalmente existen grietas por las que pueden penetrar el producto.

Optimiza el número de perforaciones realizadas para obtener el valor de resistencia de paso a tierra buscado. Se puede utilizar en viviendas, maquinaria e instrumentación electrónica, estaciones de transformación como subestaciones eléctricas, ordenadores, antenas, pararrayos, edificios. Quibacsol mejora los resultados obtenidos en puestas a tierra de nueva ejecución y en el mantenimiento de puestas a tierra ya instaladas.

El uso de este químico en todo tipo de puestas a tierra reduce las diferencias de valores obtenido debidos a cambios climáticos propios de cada estación.

Cuando se utiliza quibacsol en una instalación de puesta a tierra de electrodo de pica se debe introducir químico diluido en agua a través de un tubo de humidificación expresamente ubicado para esta función; o bien directamente en la perforación efectuada para la introducción de la pica. La proporción recomendada para la disolución en agua del quibacsol es de 10,1 litros de agua por cada 1,0 kilogramos de químico.

#### **4.3.7. Compuesto *SAN-EARTH* (cemento conductivo)**

Es un polvo fino empacado en bolsas de 25 kilogramos que provee una solución a largo plazo ambientalmente segura para obtener bajas resistencias de puestas a tierra. Los electrodos son instalados rociando el polvo seco por encima y alrededor de un conductor en una zanja que lo circunda y lo endurece hasta formar parte del electrodo de tierra.

Este producto fue desarrollado en los años 70 para ayudar a reducir la resistencia de los SPT, tanto de líneas de transmisión de energía eléctrica en áreas montañosas con suelos rocosos. Pruebas independientes han mostrado que san-earth es ambientalmente seguro y se ha probado que electrodos de cobre cubiertos con este material duran diez veces más tiempo que electrodos de cobre desnudos sin tratamiento.

#### **4.4. Características químicas y eléctricas de los tratamientos**

La caracterización química y eléctrica de los tratamientos obedece a los elementos químicos básicos o estructuras que conforman su constitución, por lo que se debe de analizar cada característica del elemento químico que lo forma. Por ejemplo, el thor-gel conocido con su hoja de seguridad como un gel

de hexacianoferrato de cobre, insoluble en agua que permite el libre tránsito de electrones por su enrejado tridimensional y que se adhiere muy bien a los electrodos de cobre en las puestas a tierra.

La fórmula química y su caracterización es  $C_6FeN_6Cu_2$ ; la composición y fórmula de sus componentes son sulfato de cobre ( $CuO_4S$ ), carbonato de sodio ( $CNa_2O_3$ ), hexacianoferrato de sodio ( $C_6FeN_6Na_4$ ) cuya composición final queda como hexacianoferrato de cobre ( $C_6FeN_6Cu_2$ ), su pH se encuentra en el rango de 9 a 10 y es insoluble en agua, y su densidad se encuentra entre 1,00 a 1,4 g/mL.

La bentonita es otro tratamiento, que su resistividad es el resultado principalmente de su proceso electrolítico entre:  $H_2O$  (agua),  $Na_2O$  (soda),  $K_2O$  (potasio),  $CaO$  (lima),  $MgO$  (magnesia) y otras sales, formando un electrolito fuerte con un rango de pH entre 8 a 10. Este electrolito se unirá gradualmente, como parte de la arcilla misma. Provista con una cantidad suficiente de agua este, este incrementa hasta 13 veces su volumen seco y se adherirá a cualquier superficie de contacto. Debido a su naturaleza higroscópica, este actúa como un agente de secado que atrae cualquier humedad disponible del ambiente que lo rodea.

#### **4.5. Componentes químicos equivalentes a los tratamientos**

Existen una serie de componentes químicos equivalentes a los tratamientos para mejorar la resistividad del terreno aunque su uso no está normado ni regulado, ya que pueden causar daño al ambiente. Varios métodos han sido usados históricamente, comenzando por el agregado de sales simples, tales como sulfato de magnesio, sulfato de cobre, el cloruro de sodio, cloruro de

calcio, grafito, carbón, incrementan la conductividad del suelo. Las autoridades encargadas no permiten estos métodos porque se da una lixiviación (tratamiento del suelo con una sustancia compleja, para separar sus partes solubles de las insolubles) en los alrededores. Arcillas naturales que contiene el mineral montmorilianita, el cual se formó por la acción volcánica hace muchos años.

#### **4.5.1. El cloruro de sodio**

El cloruro de sodio forma una solución muy conductiva que se precipita fácilmente junto con el agua por efecto de la percolación, capilaridad y evapotranspiración; la solución salina tiene una elevada actividad corrosiva con el electrodo, reduciendo ostensiblemente su tiempo de vida útil. La actividad corrosiva se acentúa si el electrodo es de hierro cobreado (*copperweld*). El cloruro de sodio disuelto en agua no corroe al cobre por ser un metal noble. Es importante mencionar que la presencia de una corriente eléctrica, convertirá al sistema de cobre en una solución de cloruro de sodio, creando una especie de celda electrolítica con desprendimiento de cloro y formación de hidróxido de sodio; si se diera este caso podemos enfatizar que iniciará la corrosión del cobre.

#### **4.5.2. Carbón vegetal**

El objetivo de la aplicación del carbón vegetal molido (cisco de carbonería) es aprovechar la capacidad de este para absorber la humedad del medio, (puesto que el carbón vegetal seco es aislante), y retener junto a esta algunos de los electrolitos del cloruro de sodio que se percolan constantemente.

### **4.5.3. Polvo de grafito**

El grafito está formado exclusivamente por átomos de carbono que presentan hibridación con tres enlaces covalentes en el mismo plano y un orbital  $\pi$  perpendicular a ese plano que queda libre (estos orbitales  $\pi$  son fundamentales para definir el comportamiento eléctrico del grafito). El grafito se comporta como un excelente conductor.

Hay que resaltar que para que el grafito en polvo ejerza efectivamente sus propiedades conductoras este debe añadirse solo, sin mezclas con otros elementos no metálicos y, además, compactarlo lo mejor posible. El grafito es un no metal y no sufre procesos corrosivos, es más estable que el diamante a diferentes tipos de presión atmosférica y temperatura.

### **4.6. Estabilidad y durabilidad de los tratamientos**

La estabilidad y durabilidad de los tratamientos depende de cada producto y sus componentes así como el tipo de terreno donde será utilizado, así como el grado de precipitación que exista en la zona en forma general.

Cada tratamiento contiene sus tablas de durabilidad y forma de uso, la mayoría de los tratamientos, según su conformación, está preparado para durar de 3 a 5 años. Según sean las condiciones, la estabilidad que ofrecen al paso del tiempo es excelente ya que no cambian abruptamente puesto que los tratamientos no se degradan sino que se van absorbiendo por las capas de los suelos resistivos y pierden su concentración los pozos, por lo que se aconseja que se deben monitorear estos sistemas por lo menos 2 veces al año llevando

registros estadísticos desde su instalación hasta que el valor resistivo sea el límite para poder realizar su cambio y mantenimiento.

Uno de los tratamientos más duraderos que se utiliza mas para proteger los cables de cobre a la corrosión es el cemento conductivo, ya que su estabilidad y durabilidad es de 20 años y sobrepasa a los químicos pero sus propiedades para reducir la resistividad del terreno son limitadas al compararlas con los químicos.

#### **4.7. Procedimiento para la creación de un pozo a tierra**

La técnica de creación de varios pozos de baja resistividad e interconexión de los mismos en una subestación eléctrica es para formar un nivel de protección segura y confiable durante cierto tiempo, y que viene a funcionar como un terreno con distintas capas con buena humedad; por ende conductivo y de baja resistividad.

Esta técnica es muy nueva y la inversión de dicho sistema se recomienda utilizarla cuando existen la unión de los factores siguientes: nivel cerámico alto, alta resistividad del terreno, humedad del terreno relativamente baja, terreno con alto grado de acidez, terreno con consistencia rocosa. Ya que, como se ha mencionado anteriormente, estas condiciones producen que los sistemas de tierras se vean afectados y por lo cual los equipos y el personal se encuentren desprotegidos.

Uno de los cuidados que hay que tener en cuenta es que todo el sistema esté físicamente conectado; esto para mantener un sistema balanceado o equipotencial.

El propósito del tratamiento químico de las puestas a tierra es el de asegurar en todo momento, una baja resistencia al paso de cualquier corriente de falla, sin corroer los electrodos y demás elementos del sistema. Los aspectos generales que se deben considerar en la creación de un pozo a tierra utilizando como base el compuesto químico llamado *THOR-GEL* son:

- La perforación de agujeros simétricos
- La adecuada mezcla de sus dos componentes
- Utilizar tierra tamizada
- Realizar la compactación adecuada
- Proporcionarle el tiempo necesario según especificación al componente para su activación
- Realizar las mediciones respectivas

El compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal, forma una malla tridimensional de iones positivos y negativos, cuyos espacios vacíos pueden ser atravesados por ciertas moléculas, pero no por otras. Esto lo convierte en una membrana semipermeable, que facilita el movimiento de ciertos iones dentro de la malla, de modo que pueden cruzarlo en uno u otro sentido; esto lo convierte en un conductor eléctrico.

Tiene una gran atracción por el agua, de modo que puede aprisionarla manteniendo un equilibrio con el agua superficial que lo rodea. Esto lo convierte en una especie de reservorio acuífero. Rellena los espacios intersticiales dentro del pozo, constituyendo una excelente conexión eléctrica entre el terreno de cultivo (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente.

La aplicación del thor-gel es de 1 a 3 dosis por metro cúbico según sea la resistividad natural del terreno y la resistencia final deseada. Un estudio de la

resistividad del terreno asegura un resultado óptimo de reducción de resistencia.

Tabla VII. **Dosis *thor-gel* por metro cubico**

| Naturaleza del terreno                               | Resistividad (Ohm – m) | Dosis <i>THOR-GEL</i> por m <sup>3</sup> |
|--|------------------------|--|
| Terrenos cultivables y fértiles                      | 50                     | 1  |
| Terraplenes compactos y húmedos                      | 50                     | 1  |
| Terrenos cultivables poco fértiles terraplenes fofos | 500                    | de 1 a 2                                 |
| suelos pedregosos desnudos arena seca, permeable     | 3000                   | 2  |
| suelos rocosos fraccionados                          | 6000                   | de 2 a 3                                 |
| Suelos rocosos compactos                             | 14000                  | 3  |

Fuente: <http://epim2005.fing.edu.uy/trabajos/p22.pdf>, fecha: 6/6/11.

#### 4.7.1. Instalación de pozo a tierra vertical

El primer paso para la instalación de nuevos pozos a tierra es excavar un pozo de profundidad acorde a la capa de menor resistividad normalmente es de 1 metro o 0,6 metros de diámetro por 3 metros de profundidad. La profundidad debe ser mayor a la longitud del electrodo a usar. El procedimiento es desechar todo material de alta resistividad, tales como: piedras, hormigón, arena, cascajo, etc. Para rellenar el pozo se utilizará tierra de cultivo tamizada en malla de ½ pulgada mezclada con bentonita u otro tratamiento a utilizar, llenando los primeros 0,30 metros y compactando con un pisón.

Figura 34. **Instalación pozo vertical**



Fuente: <http://epim2005.fing.edu.uy/trabajos/p22.pdf>, fecha: 6/6/11

Luego se instala la varilla de cobre o electrodo. Como adicional o mejora a este sistema se puede acoplar una helicoidal, que puede ser con cable desnudo de diámetro mínimo de 50 milímetros cuadrados, dependiendo del uso o la aplicación del pozo si es para una subestación se deberá mantener el conductor de la red de o varillas enterradas. Posteriormente se deberá de llenar los siguientes 0,20 metros y se vuelve a compactar y se vuelve a repetir la operación hasta completar aproximadamente 1 metro cúbico de profundidad.

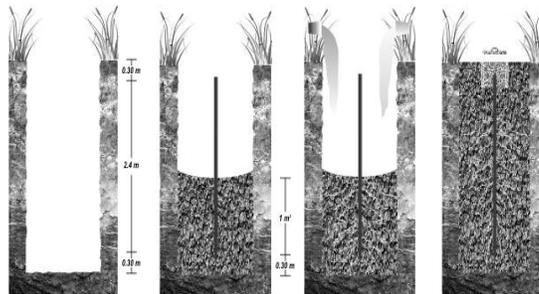
Existe una diversidad de compuestos para el tratamiento de terrenos con alta resistividad, así como varias formas de mezclado y mecanismos de relleno. Uno de los métodos más usados en la aplicación de torres telefónicas mediante un tubo P.V.C. Para insertarlo y darle forma y evitar que se derrumben las paredes del pozo a realizar antes de ser relleno. El diámetro del pozo puede estar entre los valores de 0,1 metro a 1 metro de diámetro según sea el

terreno y la aplicación a ser utilizada. Luego realizando el procedimiento adecuado de relleno del pozo y, finalmente, cuando ya este compactado, se deberá extraer el tubo P.V.C. Enterrado.

Este procedimiento es relativamente difícil de realizar ya que es probable que se dañe o quiebre el tubo P.V.C. Y esto provocaría que este pozo estaría limitado a su función de disipación de la corriente de falla, ya que su área de conductividad alrededor del electrodo sería muy pequeña y estaría aislada de terreno circundante.

Una variante de este método se basa en realizarle una serie de agujeros al tubo para que, al relleno, este extienda ramificaciones de material conductor y así brindarle al pozo puntos de contacto con el terreno circundante aunque se dañe o quiebre el P.V.C. Un nuevo mecanismo es utilizar tubos de material conductor con recubrimiento de zinc para evitar la oxidación del tubo, debido a que este quedará enterrado, aunque sabemos que con el pasar del tiempo este tubo se degradará y oxidará. Esto no afecta a la resistividad del terreno, ya que la oxidación contribuye a la conductividad del terreno.

Figura 35. **Pozo vertical**



Fuente: <http://epim2005.fing.edu.uy/trabajos/p22.pdf>, fecha: 6/611.

Seguidamente, al tener definido el método a utilizar se aplica 1 dosis x 1 metro cúbico de químico o tratamiento que en cada caso el volumen a rellenar es distinto ya que contienen activos y elementos que reaccionan de distinta manera, por lo que se toma como base el *THOR-GEL* disolviendo el contenido de las 2 bolsas (crema y azul) por separado en unos 20 litros de agua y se vierte en el pozo, hasta su total absorción, repitiéndose la aplicación hasta culminar el pozo.

Para todos los tratamientos se necesitará cajas de registro con tapadera mínimo de 40 x 40 centímetros, varilla de cobre puro o convencional de 5/8 pulgada x 8 pie, cable desnudo calibre 1/0 como mínimo, 3 metro cúbico de tierra de cultivo totalmente tamizada en malla de ½ pie, aditivo de 02 a 03 dosis de *thorgel*, *tierragel*, *protegel*, *laborgel*, o similar, un balde plástico de 20 litros de capacidad, un compactador o pisón de 40 kilo gramos (para compactar la tierra dentro del pozo).

Una de las fases más importante de este procedimiento es disolver el contenido de la bolsa con contenido cremoso de este material en al menos 20 litros de agua y luego se vierte en la concavidad del pozo o zanja y se deberá esperar su total absorción. Luego se disuelve el contenido de la bolsa azul también como en la anterior al menos en 20 litros de agua y se procede de la misma forma, repitiendo este procedimiento hasta finalizar el pozo.

Se deberá instalar una caja de registro de concreto de medidas adecuadas para poder realizar inspecciones periódicas y que se utilizará para realizar las mediciones respectivas que nos indicarán el estado del pozo, y así llevar un registro de su degradación; con esto se podrá programar su mantenimiento. Una de las recomendaciones a seguir es realizar el

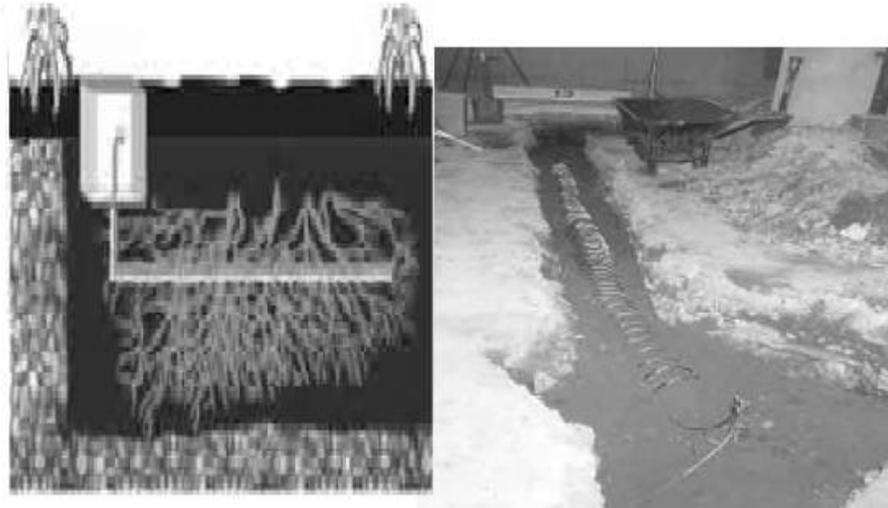
procedimiento descrito para la mezcla y la forma de verter el tratamiento, que se describe en sus hojas de especificaciones de cada fabricante.

#### **4.7.2. Sistemas de puestas a tierra o pozos horizontales**

Para las puestas a tierra horizontales es indispensable que los electrodos de platina, plancha o conductores enterrados, estén colocados dentro de zanjas o fosas rellenas con tierra de cultivo en un área perimetral al electrodo o conductor de no menos de 0,30 metros de radio y la dosificación será de 1 a 3 por metro cúbico. La aplicación por disolución es la que ofrece mejores resultados en la reducción de la resistencia; sin embargo, existen condiciones en las que no es posible utilizar este método, existiendo 3 alternativas de tratamiento:

- Se puede hacer una mezcla en seco de los componentes con la tierra de chacra antes de introducirla al pozo.
- Se puede espolvorear proporcionalmente los dos componentes sobre una porción de tierra de chacra ya compactada dentro del pozo; en ambos casos se emplearan de 1 a 3 dosis por metro cúbico de tierra de chacra.
- Se puede hacer una mezcla de las soluciones de los 2 componentes y aplicarlos directamente sobre los electrodos como platinas, planchas y/o conductores desnudos.
- El proceso de percolación puede demorar varias horas por cada solución aplicada, por lo que dependiendo de las dimensiones de cada pozo, este tratamiento puede demandar más de un día.

Figura 36. **Pozo horizontal**



Fuente: <http://epim2005.fing.edu.uy/trabajos/p22.pdf>, fecha: 7/6/11.

Cuando se finalice el pozo se logrará que a la tierra abonada se le produzcan venas de rocío que son las que llevan la concentración de material de tratamiento y mejorarán el terreno circundante del electrodo horizontal. Con este tipo de método se pueden realizar mantenimientos a dichos pozos ya que el suelo de relleno será más absorbente y tendrá propiedades de retener y absorber la humedad circundante y, al realizar un relleno, este buscará las venas utilizándolas como guías.

Las configuraciones para la aplicación de pozos de baja resistividad dependerá de la instalación a proteger y varían desde mono pozos para torres hasta enmallados con electrodos en la periferia y vértices de la cuadrícula de la malla; esto dependerá de la resistividad del terreno e inversión que se desea realizar.

Figura 37. **Configuraciones que se pueden armar**



Fuente: <http://epim2005.fing.edu.uy/trabajos/p22.pdf>, fecha: 7/6/11.

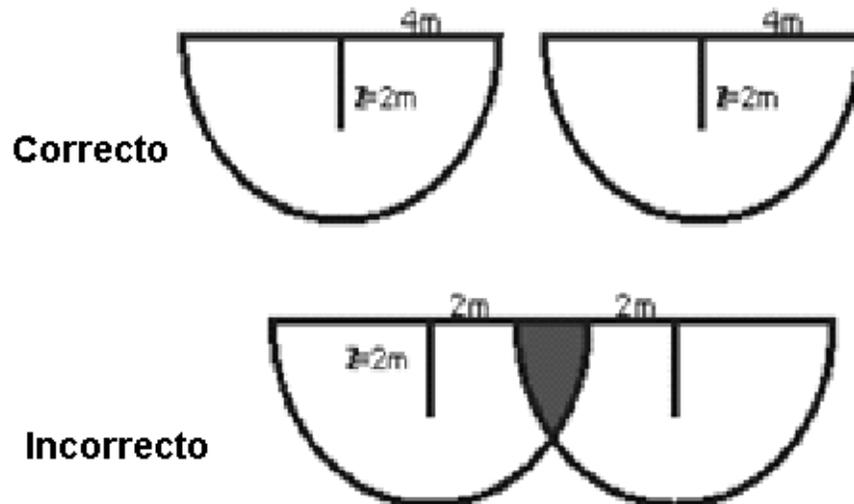
En Guatemala, la gran mayoría de terrenos cuenta con una resistividad aceptable, en pocos lugares la resistividad del terreno es alta y será necesario crear pozos de baja resistividad, siendo estos lugares terrenos rocosos, terrenos que contengan material de relleno de alta resistividad y montañas rocosas. La distancia mínima de separación entre cada pozo de materiales de baja resistividad para reducir la red de tierras será de 7 a 9 metros del pozo a interconectar más cercano. El arreglo podrá ser variado, el cual cambia desde las formas mostradas en la figura 37 hasta un arreglo de creación de pozos de forma perimetral a la malla cuadriculada que existirá.

Una de las recomendaciones a tomar en cuenta es no realizar más pozos de los necesarios, ya que si se redunda en demasiados pozos estos serán de efecto similar. Una técnica para cuantificar los pozos es la misma que se utiliza para cuantificar las varillas o electrodos a ser necesarios en una malla, tomando en consideración que para obtener una resistividad equivalente adecuada y un sistema de tierras equipotencial es necesario realizar un arreglo perimetral interconectado al área de la subestación eléctrica a proteger.

### 4.7.3. Influencia recíproca entre pozos de electrodo

Se utiliza el mismo concepto de la influencia entre electrodos o varillas ya que este efecto impide la reducción de la resistencia, por lo que se debe mantener un distanciamiento mínimo equivalente a 4 veces la longitud de los electrodos, para todos los terrenos.

Figura 38. Influencia entre pozos de electrodos



Fuente: <http://epim2005.fing.edu.uy/trabajos/p22.pdf>, fecha: 7/6/11.

Al finalizar se tendrá un sistema de tierras confiable, medible y con condiciones para mantenimiento, del cual se podrán llevar registros de degradaciones del tratamiento y poder cambiarlo cada cierto tiempo. La aplicación de este método es una manera confiable de proteger a equipos altamente costosos y a los seres humanos, por lo que la inversión es justificable para la continuidad de operación ya sea esta una subestación eléctrica, elevadoras, de maniobra, paso o reductora.

#### **4.7.4. Descripción general del procedimiento y pasos a seguir para el sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica**

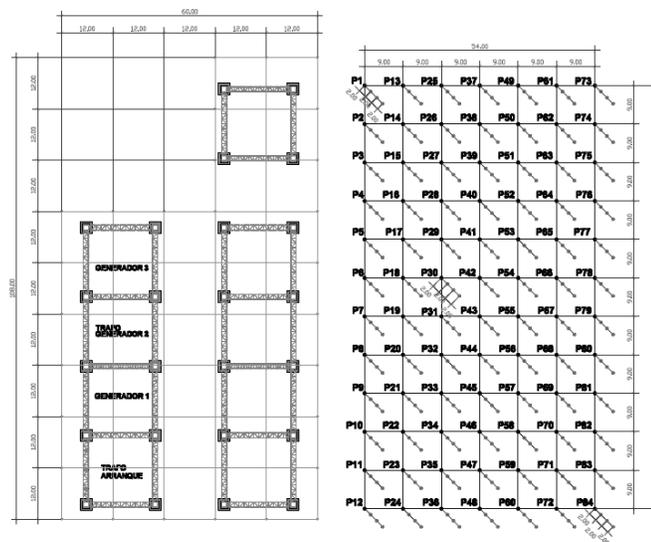
Paso 1: uno de los pasos más importantes es escoger el área donde estará ubicada la subestación eléctrica. Debe cumplir con ciertos requerimientos técnicos, como son: la resistividad y el tipo del terreno, depende de este tipo de sistema a tierra a utilizar. El método de una malla de tierra de una capa, el método de dos capas de malla que es el más tradicional y utiliza la malla horizontal y vertical que se ilustra en la figura 24 de este documento. También se puede hacer uso del método propuesto que es la creación de pozos de baja resistividad en forma perimetral al área de la subestación eléctrica, como lo muestra la figura 39.

Paso 2: ya que se ha tomado la decisión en donde será ubicada la subestación, se deberá elaborar un plano donde se identifiquen las dimensiones (largo y ancho) del área de la subestación, así como realizar una cuadrícula uniforme que tenga medidas como máximo el 10 por ciento de sus dimensiones. En el del presente estudio, la cuadrícula será de 9 x 9 metros, ya que las dimensiones del área de la subestación eléctrica de 230 kV a analizar son de 108 x 60 metros como se muestra en la figura 39.

Paso 3: El paso siguiente, después de obtener la cuadrícula, es realizar dichos trazos en el campo o área física de la subestación, así como identificar cada vértice de la cuadrícula, para proceder a realizar mediciones de resistencia del terreno utilizando el equipo adecuado el cual se da a conocer en la sección 3.2.

Se deberá utilizar el método *Wenner* o *Schlumberger* descritos en el capítulo 3 sección 3.3.1 y 3.3.2 de este documento, por lo que la cuadrícula y distribución de puntos de muestreo del terreno como se describe en la figura 39.

Figura 39. **Distribución de la cuadrícula de 9 metros x 9 metros para realizar las mediciones de campo de resistencia del terreno, donde se ubicará una subestación 230kv**



Fuente: Plano desarrollado con consideraciones hipotéticas con fines de ejemplo, elaborado por el autor del documento.

Paso 4: El paso siguiente es calcular la resistividad equivalente, resistividad promedio o en su caso la media de los valores obtenidos de resistencia para toda el área donde estará ubicada la subestación eléctrica. Esto se realiza utilizando el valor de resistencia que nos arroje el equipo y calculando la resistividad del terreno, en base a la formula 14 o 15 según sea el caso.

$$\rho = \frac{4\pi R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

P = Si los valores de resistividad obtenidos están entre 400 a 600  $\Omega$  -m

A = Si la separación entre los electrodos que se tomó es de 2 metros

B = Si la profundidad de los electrodos, es de 0,11 metros

A / B = Si tiene un valor de 18,18 y es menor a 20

R = Será la resistencia en cada punto y debería estar entre los valores 87 $\Omega$  a 41 $\Omega$  utilizando la ecuación 14 o la 15 como se muestra en el detalle de la tabla VIII todos los cálculos para cada valor de resistencia

Los cálculos realizados se han realizado en un documento de Excel por la facilidad de operar una cantidad de valores grandes ya que son 75 valores. Dichos resultados se muestran en la tabla VIII con su detalle de la fórmula utilizada.

Si la longitud B es mucho menor que la longitud A, es decir cuando la relación A/B sea mayor o igual a 20, puede suponerse B = 0 y la ecuación 15 se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR \quad \text{Ecuación 15}$$

Si se sustituyen los valores anteriores en la ecuación 15 se obtendrán valores promedio de 54 $\Omega$  con un máximo de 87 $\Omega$  y un mínimo de 20  $\Omega$ , por lo que se demuestra que el terreno no es adecuado, por lo que si se realizan varios muestreos a distintas distancias es equivalente a profundizar en cada capa del terreno y a medida que se realiza esto la resistencia disminuye y con ello también la resistividad del terreno. Mediante cálculos se podrá observar este efecto y se puede evaluar al analizar en la tabla VIII la distribución de datos con valores de resistencia de los muestreos realizados en el terreno de la subestación.

Con estos valores se calcula la resistividad promedio ó valor medio estadístico del terreno de todos los valores obtenidos al realizar estas mediciones, pudiendo utilizar fórmulas estadísticas para medidas de tendencia central como la media, media armónica o media acotada. En este caso se presenta la tabla VIII con los cálculos para el promedio y media armónica, y se presentan los resultados para las ecuaciones del terreno la 14 y 15 de este documento, con el objetivo de evaluar la discrepancia entre las dos ecuaciones y se puede notar que es un 0,52 por ciento de los valores que arroja cada ecuación, por lo que en este caso se toman los datos obtenidos de la ecuación

14.Tabla VIII **Distribución de valores obtenidos por la medición de resistencia y cálculo de resistividad para el terreno de la subestación eléctrica 230kv**

| TABLA DE DISTRIBUCION DE DATOS Y CALCULOS PARA DISTINTAS FORMULAS PARA EVALUAR LAS CURVAS Y DESVIACIONES A SER AJUSTADAS POR MEDIO DE TRATAMIENTOS QUIMICOS QUE REDUZCAN EL 60% DE LOS VALORES DE RESITENCIA Y RESISTIVIDAD DEL TERRENO DONDE SE INSTALARA UNA SUBSTACION ELECTRICA 230KV |          |   |                  |   |           |  |                                |                              |  |  |   |  |  |                  |          |   |  |            |
|---|----------|---|------------------|---|-----------|--|--------------------------------|------------------------------|--|--|---|--|--|------------------|----------|---|--|------------|
| A =   | 2        | DISTANCIAS DEFINIDAS PARA EL USO DE LAS 2                         |                  | VALORES OBTENIDOS AL REALIZAR 75 MUESTREOS DE 3m X  |           | FORMULA UTILIZADA CUANDO A/B ES MENOR A 20 FORMULA 1                                   |                                |                              |  | A/B MAYOR A 20 FORMULA 2                                 | COMPARATIVO                             | OBJETIVO CURVA PATRON  | MUESTREO DE MEDICION DE RESITENCIA Y RESISTIVIDAD UTILIZANDO EL METODO WENNER  |                  |          |   |  |            |
| B=  | 0.11     | DIANCIAS DEFINIDAS PARA REALIZAR LA MEDICION CON EL METODO WENNER |                  | MEDICION DE RESISTENCIA                             | RELACION  | $\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}}$ |                                |                              |  | $\rho = 2\pi AR$   | ± DESVIACION EN LA RESISTIVIDAD ± PUNTO | CORRECCION DE CURVA X MEDIO DEL TRATAMIENTO QUIMICO QUE MEJORA 450Ω-m ó 60% EN | MUESTRAM 2 CON DISTANCIAS DE A = 3m, B = 0.10m. PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO Y DIAGNOSTICO DE LA RESISTENCIA Y RESITIVIDAD DEL TERRENO EN A CAPAS CON MAYOR PROFUNDIDA |                  |          |   |  |            |
| 4 π =   | 12.6     |   |                  |   |           |  |                                |                              |  |  |   |  |  |                  |          |   |  |            |
| 2 π =   | 6.28     |   |                  |   |           |  |                                |                              |  |  |   |  |  |                  |          |   |  |            |
| PUNTO   | A/B < 20 | DISTANCIA (A) m.  | DISTANCIA (B) m. | MEDICION EN CAMPO DE # R # A = 2m, Y B = 0.10m. (Ω) | AR (mts.) | $4\pi AR$  | $\frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}}$ | $\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}$ | RESISTIVIDAD X PUNTO ECUACION 14 (A=2m & B=0.10m) (Ωmts) | RESISTIVIDAD X PUNTO ECUACION 15 (A=2m & B=0.10m) (Ωmts) | % DESV. FORM 1 Vrs. FORM 2              | CURVA ESPERADA A 60% DE LA ρ PROM. (A=2m & B=0.10m) (Ωmts)                     | DISTANCIA (A) m.   | DISTANCIA (B) m. | A/B > 20 | MEDICION EN CAMPO DE # R # A = 3m, Y B = 0.10m. (Ω) | RESISTIVIDAD X PUNTO ECUACION 15 (A=3m & B=0.10m) (Ωmts) |            |
| 1   | 18.2     | 2   | 0.11             | 19.81   | 39.61     | 497.76   | 1.9880                         | 0.9385                       | 250.19   | 248.88   | 0.52%                                   | 62.5   | 3  | 0.10             | 30       | 18.2  | 243.5  |            |
| 2   | 18.2     | 2   | 0.11             | 24.01   | 48.03     | 603.51   | 1.9880                         | 0.9385                       | 303.34   | 301.75   | 0.52%                                   | 74.6   | 3  | 0.10             | 30       | 22.1  | 416.4  |            |
| 3   | 18.2     | 2   | 0.11             | 24.95   | 49.90     | 626.95   | 1.9880                         | 0.9385                       | 315.13   | 313.48   | 0.52%                                   | 77.5   | 3  | 0.10             | 30       | 22.9  | 432.6  |            |
| 4   | 18.2     | 2   | 0.11             | 25.46   | 50.92     | 639.67   | 1.9880                         | 0.9385                       | 321.62   | 319.94   | 0.52%                                   | 79.0   | 3  | 0.10             | 30       | 23.4  | 441.5  |            |
| *   | *        | *   | *                | *   | *         | *  | *                              | *                            | *  | *  | *                                       | *  | *  | *                | *        | *   | *  | *          |
| *   | *        | *   | *                | *   | *         | *  | *                              | *                            | *  | *  | *                                       | *  | *  | *                | *        | *   | *  | *          |
| *   | *        | *   | *                | *   | *         | *  | *                              | *                            | *  | *  | *                                       | *  | *  | *                | *        | *   | *  | *          |
| 65  | 18.2     | 2   | 0.11             | 66.43   | 132.85    | 1669.50  | 1.9880                         | 0.9385                       | 839.15   | 834.75   | 0.52%                                   | 208.6  | 3  | 0.10             | 30       | 36.5  | 688.7  |            |
| 66  | 18.2     | 2   | 0.11             | 66.70   | 133.39    | 1676.25  | 1.9880                         | 0.9385                       | 842.54   | 838.12   | 0.52%                                   | 209.3  | 3  | 0.10             | 30       | 36.7  | 691.5  |            |
| 67  | 18.2     | 2   | 0.11             | 66.95   | 133.90    | 1682.63  | 1.9880                         | 0.9385                       | 845.78   | 841.35   | 0.52%                                   | 210.1  | 3  | 0.10             | 30       | 36.8  | 694.1  |            |
| 68  | 18.2     | 2   | 0.11             | 67.85   | 135.70    | 1705.26  | 1.9880                         | 0.9385                       | 857.12   | 852.63   | 0.52%                                   | 212.8  | 3  | 0.10             | 30       | 37.3  | 703.4  |            |
| 69  | 18.2     | 2   | 0.11             | 67.80   | 135.59    | 1703.89  | 1.9880                         | 0.9385                       | 856.44   | 851.95   | 0.52%                                   | 212.6  | 3  | 0.10             | 30       | 37.3  | 702.9  |            |
| 70  | 18.2     | 2   | 0.11             | 68.72   | 137.44    | 1727.07  | 1.9880                         | 0.9385                       | 868.08   | 863.53   | 0.52%                                   | 215.8  | 3  | 0.10             | 30       | 37.8  | 712.4  |            |
| 71  | 18.2     | 2   | 0.11             | 69.07   | 138.13    | 1735.80  | 1.9880                         | 0.9385                       | 872.47   | 867.90   | 0.52%                                   | 216.9  | 3  | 0.10             | 30       | 38.0  | 716.0  |            |
| 72  | 18.2     | 2   | 0.11             | 69.72   | 139.44    | 1752.20  | 1.9880                         | 0.9385                       | 880.71   | 875.10   | 0.52%                                   | 218.8  | 3  | 0.10             | 30       | 38.3  | 722.8  |            |
| 73  | 18.2     | 2   | 0.11             | 78.45   | 156.90    | 1971.72  | 1.9880                         | 0.9385                       | 931.06   | 925.86   | 0.52%                                   | 246.3  | 3  | 0.10             | 30       | 43.1  | 813.3  |            |
| 74  | 18.2     | 2   | 0.11             | 87.18   | 174.37    | 2191.20  | 1.9880                         | 0.9385                       | 1101.37  | 1095.60  | 0.52%                                   | 273.8  | 3  | 0.10             | 30       | 48.0  | 903.9  |            |
| 75  | 18.2     | 2   | 0.11             | 83.23   | 166.47    | 2091.86  | 1.9880                         | 0.9385                       | 1051.44  | 1045.93  | 0.52%                                   | 261.0  | 3  | 0.10             | 30       | 45.8  | 862.9  |            |
| <b>VALOR DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA PROMEDIO</b>   |          |   |                  |   |           |  |                                |                              |  | <b>679</b>   | <b>675</b>                              | <b>0</b>   | <b>168</b>   | <b>3</b>         | <b>0</b> | <b>30</b>   | <b>34</b>  | <b>647</b> |
| <b>VALOR DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA MEDIA POR METODO ESTADISTICO</b>   |          |   |                  |   |           |  |                                |                              |  | <b>623</b>   | <b>620</b>                              | <b>0</b>   | <b>154</b>   | <b>3</b>         | <b>0</b> | <b>30</b>   | <b>34</b>  | <b>632</b> |

Fuente: Muestreo de Valores medidos por medio de un teluometro marca *Megeer* utilizando el método *Wenner* con 75 puntos.

Paso 5: luego de obtener los resultados se deberá realizar una comparación en base a la tabla 4 descrita en este documento, para ubicar que tipo de terreno es en el que se va a trabajar y así determinar el tipo de sistemas de tierra a utilizar. En este caso, el tipo de suelo está entre el rango de pedregoso y rocoso, como se puede identificar en la tabla IV, ya que la resistividad promedio obtenida es de 679  $\Omega$  -m.

Tabla IX. Rangos de resistividad del suelo

| Tipo de Terreno   | Resistividad $\rho$ [ $\Omega$ m] |
|-------------------|-----------------------------------|
| Suelos pedregosos | 300 – 400                         |
| Rocas             | 1.000 -10.0000                    |

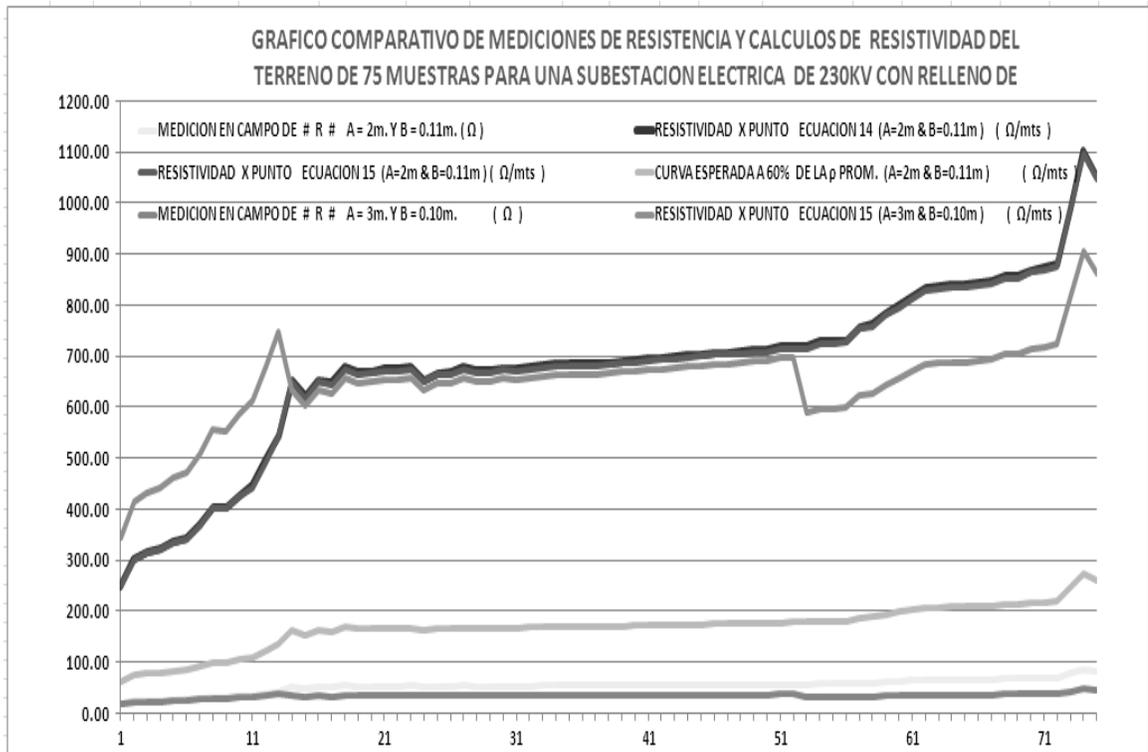
Fuente: Ospina, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquía, 2007. 187 p.

Por lo que se define que en este tipo de terreno se debe utilizar el sistema de pozos de baja resistividad, el cual pueda brindar valores óptimos para el sistema de puesta a tierra. Estos valores deberán ser menores o iguales a 200  $\Omega$ -m. Esto significa disminuir la resistividad equivalente del terreno en un valor de 450  $\Omega$  -m o un 60 por ciento de las resistividades obtenidas.

Paso 6: en este paso se define la profundidad, diámetro y área de influencia del pozo a utilizar para disminuir la resistividad equivalente del terreno. Estos datos se obtienen analizando y graficando las distintas mediciones realizadas a diferentes profundidades y distancias comparándolas con las curvas patrón y perfiles de resistividad descritas en la sección 2.8.2, 3.3.3 a la 3.3.8 de este documento. Con ello se define a qué profundidad, diámetro y a qué distancia estará un electrodo del otro para obtener una adecuada resistividad del terreno y área de influencia.

En este caso se muestra un ejemplo de las gráficas obtenidas al realizar el muestreo de 75 puntos. También se muestra la curva esperada para la reducción de resistencia y con ello la resistividad del terreno por cada punto al cambiar parte del terreno por tratamientos de materiales de baja resistividad.

Figura 40. **Gráfico Comparativo entre curvas real y curva esperada suavizada a la curva patrón**



Fuente: Datos obtenidos de mediciones realizadas en 75 puntos de muestreo de un terreno con relleno, elaboradas por el autor del documento.

Como se sabe que a medida que se profundiza más en el suelo nos acercamos al manto acuífero, el cual ayuda a las condiciones adecuadas y disminución de resistividad. En el presente caso, la profundidad adecuada es a 3 metros y un diámetro de 0,5 metros, porque a esta profundidad es donde el

terreno presenta una resistividad, como la curva de color verde, que es adecuada para dicha instalación. El diámetro es perfecto debido a que si se realiza un pozo de estas dimensiones es como que si tuviera un electrodo conductivo de diámetro y profundidad de 0,5 metro y 3 metro respectivamente, lo cual económicamente sería funcional pero demasiado costoso.

Paso 7: en esta etapa se debe definir qué tipo de tratamiento se utilizará, por lo que el material de baja resistividad a utilizar deberá tener las cualidades siguientes: alta conductividad, arcillosos, capaces de retener la humedad, aportar altas concentraciones iónicas, ser un no metal para evitar procesos corrosivos a la varilla de cobre a enterrar, tener una estabilidad y durabilidad adecuada para evitar mantenimientos continuos, como se describe en el capítulo 4 y sus secciones 4.1 a la 4.6 de este documento.

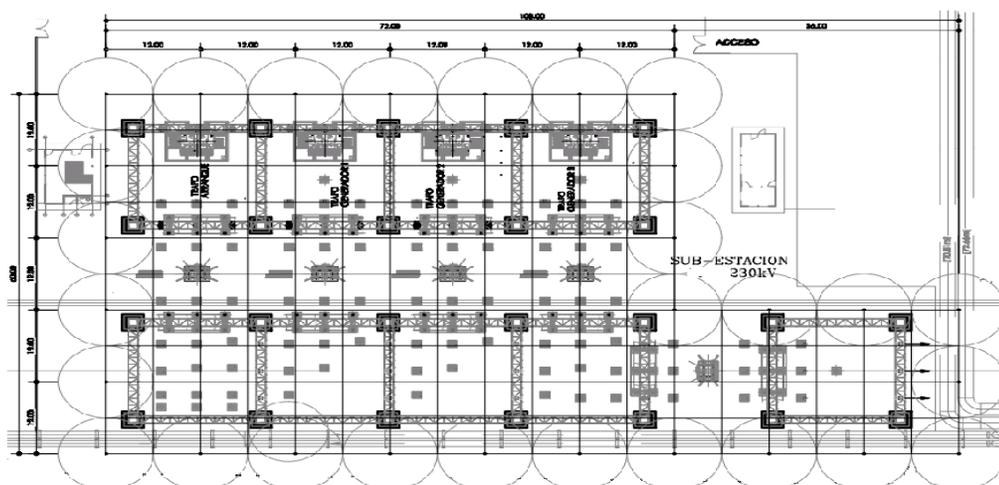
Por ejemplo: si se escoge el producto *Thor-gel* lo que se debe de hacer es revisar su ficha técnica donde viene descrito su poder de conductividad, tiempo de durabilidad, forma de aplicación, tipo de mantenimiento, y cuidados a tomar en consideración para su aplicación y buen funcionamiento. En este caso específico este producto puede reducir hasta 450  $\Omega$ -m., o un 60 por ciento la resistividad del terreno, y su durabilidad es de 3 a 5 años. Se disuelven las 2 bolsas mezclándolas con 20 ó 30 litros de agua y esperando su absorción.

En el presente caso se podrá tomar como base el Quibacsol, *Thor-gel* ó carbón pulverizado para la creación de los pozos. Como se describe en el procedimiento de creación de pozos con *Thor-gel*, Quibacsol y polvo de grafito, que se describe al finalizar esta sección 4.7.5, donde se ejemplifica la creación de un pozo de materiales de baja resistividad, con sus pasos a seguir.

Paso 8: en esta etapa se debe definir el arreglo geométrico, configuraciones de interconexión y área de influencia de los pozos a construir en el sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica, por lo que se toma como base el método tradicional de sistema de mallas de dos capas vertical y horizontal para subestaciones eléctricas, realizando e interconectando los pozos en el perímetro de la subestación. Con esto se evita enterrar una gran cantidad de electrodos verticales en cada intersección de la cuadrícula de la malla horizontal, optimizando así el costo de dicho sistema.

En la figura 41 se muestra una vista de planta de una subestación eléctrica de 230kV a escala 1:300, en la cual se puede observar su sistema de puesta a tierra con el área de influencia de cada pozo a la periferia de toda la subestación. Ello con el objetivo de proteger y lograr una superficie equipotencial e interconectada en toda la subestación eléctrica.

Figura 41. **Vista de planta subestación 230 kV, escala 1/300, sistema de tierra con aplicación de pozos y sus áreas de influencia (círculos)**



Fuente: Plano desarrollado con consideraciones hipotéticas con fines de ejemplo, del Ingenio Magdalena IMSA.

Las configuraciones que se pueden armar se describen en la figura 37, así como el área de influencia se define en la sección 4.7.3, la cual se basa en el mismo principio de la distancia entre dos electrodos de cobre y se muestra en la figura 38. Utilizando el criterio de pozos, esta información tiene como base la norma del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE-80, en los apartados 81, 141, 142 y 550.

Para este caso se resume su aplicación de esta manera: los pozos a construir tendrán un radio de influencia de 6 metros. Su profundidad y diámetro será de 3 y 0,5 metros, respectivamente. Se instalarán en todo el perímetro del área de la subestación con una distancia entre pozos de dos veces su radio de influencia, en este caso 12 metros, uno del otro, y se interconectarán por medio de la malla horizontal que utilizará cable de cobre desnudo calibre 4/0 AWG, la cual se unirá con soldadura exotérmica con cada varilla de cobre enterrada al centro de cada pozo, como se muestra en la figura 41.

#### **4.7.5. Ejemplificación de la creación de un pozo de materiales de baja resistividad**

Aplicado a una subestación eléctrica de 230 kV, utilizando como base el compuesto que podrá variar entre quibacsol, terral-líquido, bentonita, carbón, protegel, cemento conductivo etc.

Para realizar este ejemplo se asumen ciertos valores que se tomarán como base para ejemplificar el método, los cuales se deberán obtener por mediciones realizadas en campo.

## Consideraciones Generales

- Asumiendo que la subestación eléctrica será instalada en un terreno de relleno pedregoso ó con mucha presencia de roca y material de alta resistividad, cuyo valor de resistividad del terreno se encuentra entre el intervalo de 400 a 600  $\Omega$  -m dentro del área de la subestación.
- Considerando que el área geográfica donde se instalará la subestación eléctrica cuenta con un nivel ceráunico de 100, el cual indica que existe un porcentaje alto de probabilidad de descarga y de formación de tormentas en esa área.
- Considerando que la altura sobre el nivel del mar donde será instalada la subestación, es de 300 metros sobre el nivel del mar, y el manto acuífero en época de invierno se encuentra a 3 metros de profundidad, y en época de verano se encuentra a 5 metros.
- Considerando que al realizar un análisis del tipo y conformación de las capas del terreno donde será ubicada la subestación eléctrica, da como resultado un terreno multiforme y con porosidades e incrustaciones de material no conductivo (rocas de gran tamaño, relleno de arena y mezcla de arenas arcillosas). En conclusión se determina un terreno de baja conductividad en época seca y con una resistividad promedio del suelo de 300  $\Omega$  en época de invierno, debido a la filtración de agua por lluvia y elevación del manto acuífero.

- Considerando que es alto el costo de la excavación para la extracción de materiales de alta resistividad y reemplazo por suelo de mejor conductividad ó tierra orgánica tamizada, ya que se deberá reemplazar todo el volumen donde se encontrará la subestación eléctrica. Se deberá reemplazar un volumen adecuado para la buena disipación de corrientes de falla, que corresponde como mínimo a 1,5 metros de profundidad, por el área cuadrada de la subestación.
- Considerando que es necesario mantener una buena compactación del terreno donde se instalará la subestación eléctrica, se toma como decisión la aplicación del método de creación de pozos de material de baja resistividad, interconectado de forma perimetral a la subestación eléctrica para mantener un sistema equipotencial que sea efectivo y medible.

Procedimiento de creación de pozos con *THOR-GEL*, Quibacsol ó Polvo de Grafito

- Este método utiliza el mismo fundamento que el utilizado en varillas de cobre, con la variación de que la distancia de disipación y de influencia entre cada pozo será el doble de profundidad del pozo, teniendo cuidado que la distancia entre los centros de los dos pozos ubicados consecutivamente debe ser cuatro veces la profundidad de los pozos.

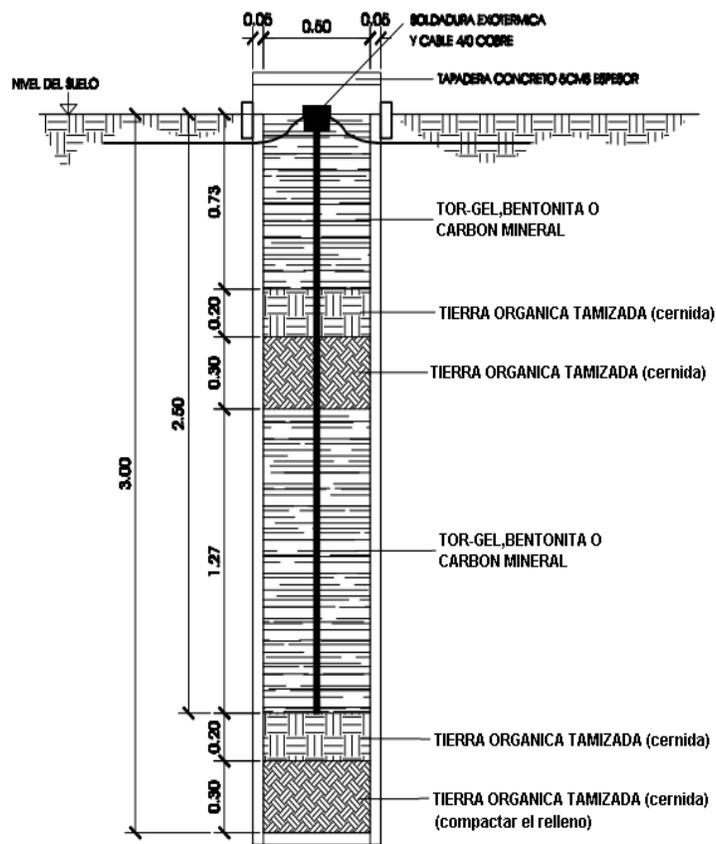
- Para determinar la cantidad de pozos a instalar en el área de la subestación, se deberá realizar un plano de planta del área completa de la subestación eléctrica, tomando como base el área de influencia de cada pozo y realizando circunferencias con el objetivo de que los pozos no interfieran unos con los otros. Si el pozo mide 3 metros de profundidad con un diámetro de 0,5 metros, el área de influencia y disipación de corriente de falla de este pozo será de un radio de 6 metros.
- Al realizar el plano de planta de la influencia de cada pozo, se obtendrá la cantidad de pozos a instalar.
- Para cada pozo a instalar se necesitará realizar una perforación con diámetro de 0,5 metros máximo y profundidad de 3 metros.
- Un tubo P.V.C. O hierro galvanizado, que su diámetro se encuentre entre 30 a 40 cm.
- De 2 a 3 bolsas de cemento conductivo, de 0,20 a 0,30 metros cúbicos de tierra orgánica tamizada, o bentonita.
- De 2 a 3 sacos ó cubetas del compuesto que puede ser QUICBASOL, TERRAL-LÍQUIDO, bentonita, carbón, PROTEGEL, etc.
- 30 litros aproximados de agua, que dependerá de las especificaciones del fabricante del compuesto.
- Un pisón para compactar el terreno relleno.
- Dos soldaduras exotérmicas para cable de cobre 4/0 AWG desnudo y varillas de cobre 5/8 pulgadas.
- Cable de cobre de 4/0 AWG desnudo.

### Pasos a seguir para la creación de pozos:

- Perforación de un agujero de 0,5 metros de diámetro y 3 metros de profundidad.
- Se insertará un tubo de menor diámetro ya sea de P.V.C. O hierro galvanizado cuya dimensión podrá ser entre 0,30 a 0,40 metros.
- Se deberá rellenar el anillo exterior formado entre el tubo y la orilla del agujero perforado con cemento conductor, utilizando las especificaciones del fabricante, (esto creará una capa protectora que funcionará como un recubrimiento al material de alta conductividad, lo que evitará el rápido lavado y degradación en época de invierno.
- Se rellenará de 5 a 10 centímetros con cemento conductor el fondo del pozo, para crear una especie de tapón para evitar la filtración del material primario de alta conductividad cuando el nivel del manto acuífero suba.
- Posteriormente a un secado intermedio del cemento conductor, se procederá a rellenar el pozo con tierra orgánica tamizada, la cual puede contener carbón pulverizado ó bentonita, con un relleno de 0,3 metros seguidamente se deberá compactar dicho relleno. Luego se rellenará los siguientes 0,20 metros y se vuelve a compactar; se repite la operación hasta completar 1 metro cúbico de profundidad.

- En este paso se deberá aplicar 1 dosis por cada 1 metro cúbico de *THOR-GEL* a cada pozo, disolviendo el contenido de las 2 bolsas (color crema y azul) por separado en 20 litros de agua y se vierte en el pozo, hasta su total absorción, (para mayor información ver hoja de especificaciones del fabricante).
- Se procederá a realizar el procedimiento de los pasos 5 y 6 repetitivamente hasta lograr el relleno completo del pozo con materiales de baja resistividad, como se muestra en la figura 42.

Figura 42. Detalle de un pozo de baja resistividad



Fuente: Dibujo elaborado por IMSA en formato Autocad.

- Se procederá a extraer el tubo PVC instalado al inicio para liberarlo y evitar un efecto capacitivo cuando disipe la corriente de falla de ese pozo.
- Se procederá a instalar una caja de registro de medidas adecuadas, como mínimo de 15 centímetros de diámetro, para poder realizar las mediciones de la red de tierra.
- Se realizará una compactación del material de relleno y se hará una medición por cada pozo utilizando el método de *Wenner*.
- Cada pozo deberá estar interconectado uno con el otro, por medio de una zanja de profundidad mínima de 0,6 metros y un ancho mínimo de 0,10 metros y rellena con tierra orgánica tamizada o bentonita, logrando formar un perímetro interconectado alrededor del área de la subestación, unido con cable de cobre desnudo calibre 4/0 AWG y con soldadura exotérmica en cada paso de la varilla, y de cada pozo a instalar.
- Se realizarán mediciones del sistema de pozos interconectados, malla de cobre interconectada, para evaluar el mejoramiento y tener un punto de partida de referencia; el valor de resistencia esperado será menor a 5  $\Omega$ .
- Se recomienda realizar 2 mediciones al año para el monitoreo del sistema y red de puestas a tierra. Se debe tomar en consideración que según el fabricante de cada compuesto, el grado de degradación de los materiales oscilará entre 3 a 5 años para el cambio de dicho material.

## CONCLUSIONES

1. Un sistema de puestas a tierra confiable y seguro para una subestación eléctrica se diseña contando con la información de la resistencia, resistividad, el tipo de suelo o terreno, humedad, contenidos de sales, nivel cerámico de la región, así como el tipo de subestación a instalar.
2. Para cualquier tipo de suelo estratificado, el método de caída de potencial es la más recomendable por su sencillez, buena resolución y mínimo error.
3. Para verificar la medida de la resistencia de la puesta a tierra se debe realizar otra medida con diferentes distancias para los circuitos de corriente y voltaje, donde la mayor resistencia obtenida será reconocida y aceptada como referencial, a menos que se haga una tercera medida que dé un mayor valor promedio.
4. Las condiciones ambientales con forme el transcurrir del tiempo provocan daño al sistema de puesta a tierra, al monitorear este sistema dos veces al año se verificará el valor de resistencia requerido para la subestación eléctrica.
5. Las condiciones ambientales modifican el valor de la resistencia de la puesta a tierra, y varía según la estación del año en que se mida.
6. La profundidad a la que se entierran los electrodos de prueba para medir la puesta a tierra, no afectan el resultado de la medición.

7. Los electrodos de puesta a tierra para la medición tienen que contar con buen contacto con el suelo y de ser necesario humedecer la zona.
8. La resistencia que ofrece la red de tierras de una subestación eléctrica se puede disminuir utilizando técnicas en la aplicación de pozos de tierras con mezclas naturales o químicas según el estudio de tipo de suelo, su resistividad y el grado de humedad.
9. Los pozos de baja resistividad aplicados a subestaciones eléctricas garantizan que independientemente de las condiciones del suelo se cuenta con un sistema de puesta a tierra confiable para las personas y equipos.
10. Los pozos de baja resistividad aplicados a subestaciones eléctricas se diseñan para poderlos monitorear al menos 2 veces por año y guardar los registros para su mantenimiento.

## RECOMENDACIONES

1. La aplicación de pozos de material de baja resistividad puede ser una opción para reducir la resistencia de tierras en una subestación eléctrica, por lo que si se considera utilizar este método se recomienda un análisis previo de suelos, humedad y condiciones de resistividad de la zona a tratar por personal debidamente capacitado y con conocimiento del tema, para garantizar la buena aplicación del método a escoger e implementar en la subestación.
2. Para que una subestación eléctrica se encuentre bien protegida de descargas atmosféricas y fallas similares que puedan dañar parcial o totalmente los equipos y personal de dicha instalación, se recomienda contar con dos componentes fundamentales, que son indisolubles uno del otro: el primero son los equipos protectores como pararrayos, filtros, supresores.  
  
El segundo componente fundamental, es contar con un sistema dispensor o Sistema de Puesta a Tierra, entendiéndose este como el pozo infinito donde ingresan corrientes de falla o transitorios y no tienen retorno porque van a una masa neutra y son realmente dispersados.
3. El interesado en el tema debe profundizar y analizar cada compuesto natural o químico, las ventajas y desventajas de los mismos y si son aplicables a los requerimientos que su localidad e instalaciones necesitan, para poder tomar la mejor decisión

4. Se hace notar que es aconsejable evaluar los tipos de métodos tanto en eficacia como a nivel de costos de instalación, asesoría, y operación de dichos métodos, y así reducir gastos innecesarios, pero siempre anteponiendo la seguridad de los equipos y personal involucrados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALLAN, Morris. *Principios de medición e instrumentos*. España: Pearson Educación, 2002. 220 p.
2. BOWLES, Joseph. *Propiedades geofísicas de los suelos*. Bogotá: McGraw-Hill, 1982. 490 p.
3. DE LA VEGA ORTEGA, Miguel. *Problemas de ingeniería de puestas a tierra*. México: Limusa Noriega, 2002. 418 p.
4. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Atlas climatológico, niveles de humedad y niveles isoceraunicos*. Guatemala: INSIVUMEH, 2003. 20 p.
5. MARTÍNEZ, Juan José; Toledo, José Carlos. *Puestas a tierra en edificios e instalaciones eléctricas*. España: Paraninfo, 2001. 296 p.
6. MARTÍN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. México: McGraw-Hill, 1992. 510 p.
7. F. WENNER, *Método para medir la resistividad del terreno*. Report No.258, Bulletin of Bureau of Standards, Vol. 12, No. 3, 1915.
8. LAGREGA, Michael P. *Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*. México: McGraw Hill, 1998. 1316 p.

9. Norma Oficial Mexicana NOM-022-STOS-1999. *Electricidad estática en los centros de trabajo*. México: Diario Oficial, 1999. 114 p.
10. OSPINA, Germán, et al. *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra ante las fallas eléctricas*. Colombia: Universidad de Antioquia, 2007. 187 p.
11. *Principios de puesta a tierra y consideraciones prácticas fundamentales de corrientes de tierra*. R. Rudenberg AIEE (IEEE), Elect. Eng, 1946. 255 p.
12. MARTÍNEZ DE VELASCO, José. *Coordinación de aislamiento en redes*. España: McGraw-Hill, 2008. 604 p.
13. TOWNE, H. M. *Tierras de pararrayos*, General electric review, partes I, II, III, Vol. 35, 173, 215, 280, marzo, abril, mayo de 1982.

## **ANEXOS**



Mapa sobre niveles de humedad relativa promedio anual



Fuente: Instituto Nacional de sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

## Niveles isoceraunicos de días con relámpagos locales promedio anual



: Instituto Nacional de sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

La familia de instrumentos DET tiene las siguientes características:

| Característica                                       | DET3TA | DET3TD | DET3TC | DET4TD2 | DET4TR2 | DET4TC2 | DET4TCR2 |
|--|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|
| Comprobación automática de la estaca C               |        | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Comprobación automática de la estaca P               |        | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Comprobación manual de la estaca P                   | ■      |        |        |         |         |         |          |
| Comprobación automática del ruido                    |        | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Comprobación manual del ruido                        | ■      |        |        |         |         |         |          |
| Rechazo del ruido (40 V pico a pico)                 | ■      | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Prueba variable de la frecuencia                     |        |        |        |         |         | ■       | ■        |
| Prueba bifilar                                       | ■      | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Prueba trifilar                                      | ■      | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Prueba tetrafilares                                  |        |        |        | ■       | ■       | ■       | ■        |
| 2 kΩ rango   | ■      | ■      | ■      |         |         |         |          |
| 20 kΩ rango  |        |        |        | ■       | ■       |         |          |
| 200 kΩ rango   |        |        |        |         |         | ■       | ■        |
| Prueba de desconexión (ART)                          |        |        | ■      |         |         | ■       | ■        |
| Medición sin estacas                                 |        |        |        |         |         | ■       | ■        |
| Voltímetro (medición del voltaje del ruido de fondo) | ■      | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Medidor de corriente                                 |        |        | ■      |         |         | ■       | ■        |
| Visor LCD  |        | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Visor con iluminación de fondo                       |        |        |        |         |         | ■       | ■        |
| Medidor de núcleo móvil                              | ■      |        |        |         |         |         |          |
| Calificación IP54                                    | ■      | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| EN61010-1 100V CAT IV                                | ■      | ■      | ■      | ■       | ■       | ■       | ■        |
| Cargador de batería incorporado                      |        |        |        |         | ■       |         | ■        |

Fuente: Manual de usuario DET4T2Series\_DS\_USen\_V02.

Valores ceráunicos de red de estaciones sinópticas meteorológica

| No. | Departamento   | Nombre de la estación | Valor Ceráunico |
|-----|----------------|-----------------------|-----------------|
| 1   | Alta Verapaz   | Cobán                 | 53              |
| 2   | Chiquimula     | Esquipulas            | 68              |
| 3   | Escuintla      | Puerto San José       | 119             |
| 4   | Guatemala      | Aeropuerto            | 69              |
| 5   | Huehuetenango  | Huehuetenango         | 64              |
| 6   | Izabal         | Puerto Barrios        | 117             |
| 7   | Jutiapa        | Montúfar              | 60              |
| 8   | Petén          | Flores                | 107             |
| 9   | Quetzaltenango | Labor Ovalle          | 66              |
| 10  | Retalhuleu     | Retalhuleu            | 158             |
| 11  | Zacapa         | La Fragua             | 64              |

Fuente: Instituto Nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología.

Valores típicos de Factor de decremento.

| Duración de la falla, $t_f$ |                | Factor de decremento, $D_f$ |          |          |          |
|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------|----------|----------|
| Segundos                    | Ciclos a 60 Hz | X/R = 10                    | X/R = 20 | X/R = 30 | X/R = 40 |
| 0.0083                      | 0.5            | 1.576                       | 1.648    | 1.675    | 1.688    |
| 0.05                        | 3              | 1.232                       | 1.378    | 1.462    | 1.515    |
| 0.1                         | 6              | 1.125                       | 1.232    | 1.316    | 1.378    |
| 0.2                         | 12             | 1.064                       | 1.125    | 1.181    | 1.232    |
| 0.3                         | 18             | 1.043                       | 1.085    | 1.125    | 1.163    |
| 0.4                         | 24             | 1.033                       | 1.064    | 1.095    | 1.125    |
| 0.5                         | 30             | 1.026                       | 1.052    | 1.077    | 1.101    |
| 0.75                        | 45             | 1.018                       | 1.035    | 1.052    | 1.068    |
| 1                           | 60             | 1.013                       | 1.026    | 1.039    | 1.052    |

Fuente: IEEE Std 80-2000 *Guide for Safety in AC Substation Grounding*.