



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**

**Previa a la obtención del título de:**

**INGENIERO ELÉCTRICO**

**Mención: Sistemas de Potencia**

**Tema:**

**“DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA ESTACIÓN  
REPETIDORA EL ALISAL PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES  
DE MOVISTAR”**

***AUTORES:***

**EMERSON DUCHE ZABALA**

**WILLY MIÑÁN MANRIQUE**

***DIRECTOR DE TESIS***

**ING. CARLOS CHAVEZ**

**Guayaquil, Diciembre 2013**

## **TRIBUNAL DEL CONSEJO DE CARRERA**

---

Presidente del Tribunal

---

Director de Tesis

---

Vocal del Tribunal

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Emerson Duche Zabala y Willy Iván Miñán Manrique declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Autores

(f) \_\_\_\_\_  
Emerson Duche Zabala

(f) \_\_\_\_\_  
Willy Miñán Manrique

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios por llenarnos de bendiciones y permitirnos llegar al momento en que terminamos una etapa importante en nuestras vidas, ya que sin su apoyo no habríamos conseguido este logro.

También a nuestros padres y familiares más cercanos, que han hecho posible esto, gracias a su apoyo nos hemos mantenido firmes en nuestro propósito de estudiar a pesar de todos los inconvenientes que se han presentado, dándonos siempre ejemplo de esfuerzo, amor, dedicación y sacrificio.

También queremos agradecer a las personas que contribuyeron para la realización de este proyecto, ya que su aporte fue nuestra mejor guía para culminar con éxito este trabajo. Al Ing. Carlos Chávez por su valioso aporte y por la entrega desinteresada de su tiempo y conocimientos, quien además de ser nuestro guía ha sido un amigo, y al Ing. Andrés Mañay quién supo asesorarnos cuidadosamente en la selección de un tema de gran interés para el desarrollo del país.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mis padres, abuelitos a mi hermano y a mi familia, que han sido pilar fundamental para el desarrollo de mis estudios, que con su amor y apoyo me han dado la fortaleza para no decaer y seguir luchando hasta el final.

Willy Miñán Manrique

## **DEDICATORIA**

Este trabajo es dedicado a mis padres, quienes siempre creyeron en mí y me exhortaron a seguir adelante a pesar de cualquier adversidad, brindándome su amor incondicional durante todos los días de mi vida. A mi esposa quien con su paciencia, amor y buenos consejos supo ayudarme hasta el final de esta nueva etapa.

Emerson Duche Zabala

## INDICE GENERAL

RESUMEN.....	16
CAPITULO I.....	17
1. Introducción.....	17
1.1. Justificación.....	18
1.2. Objetivo general.....	18
1.2.1. Objetivos específicos.....	18
1.3. Alcance.....	19
1.4. Importancia.....	19
1.5. Hipótesis.....	20
CAPITULO II.....	21
2. Marco teórico.....	21
2.1. Criterios fundamentales acerca de la resistividad eléctrica.....	21
2.1.1. Elementos conductores.....	22
2.1.2. Elementos aislantes.....	23
2.1.3. Elementos semiconductores.....	23
2.1.4. Resistividad eléctrica.....	24
2.1.5. Resistencia a tierra.....	25
2.2. La resistividad del terreno.....	25
2.2.1. Factores que afectan la resistividad del terreno.....	27
2.2.1.1. Naturaleza del terreno.....	27
2.2.1.2. Estratigrafía.....	29
2.2.1.3. Temperatura.....	30
2.2.1.4. Humedad.....	31
2.2.1.5. Salinidad.....	32
2.2.1.6. Variaciones estacionales.....	33
2.2.1.7. Factores de naturaleza eléctrica.....	34
2.2.1.8. Compactación.....	35
2.2.2. Medición de la resistividad del terreno.....	35
2.2.2.1. Método de Wenner.....	36
2.2.2.2. Método de Schlumberger.....	38
2.2.3. Comportamiento eléctrico del suelo.....	39
2.3. Puesta a tierra de los sistemas eléctricos.....	40

2.3.1. ¿Qué sistemas deben conectarse a tierra? .....	40
2.3.2. Razones para conectar a tierra circuitos y sistemas de alimentación. ....	40
2.3.3. Clasificación de un sistema completo de tierra. ....	41
2.3.3.1. Tierra física. ....	41
2.3.3.2. Tierra del circuito. ....	42
2.3.3.4. Tierra del equipo. ....	42
2.3.3.4. Tierra de protección contra rayos. ....	43
2.3.3.5. Conductor neutro conectado a tierra. ....	43
2.3.3.6. Tierra aislada. ....	44
2.3.3.7. Tierra de referencia de señal. ....	45
2.3.4. ¿Qué es una conexión efectiva a tierra?.....	46
2.3.5. Protección contra descargas atmosféricas o rayos. ....	47
2.3.5.1. Características de las descargas atmosféricas. ....	48
2.3.5.2. Sistema de protección contra descargas atmosféricas. ....	51
2.3.5.3. Sistema de puesta a tierra en pararrayos. ....	52
2.3.6. Impedancia a tierra.....	53
2.3.6.1. Suelo arenoso o pedregoso. ....	53
2.3.6.2. Suelo rocoso. ....	54
2.3.7. Efecto de la corriente eléctrica en el cuerpo humano. ....	54
2.3.7.1. Voltaje de paso. ....	55
2.3.7.2. Voltaje de toque. ....	56
2.3.7.3. Rangos tolerables de corriente. ....	57
2.4. Evaluación de la resistencia de la puesta a tierra ( $R_g$ ). ....	58
2.4.1. Requerimientos usuales. ....	58
2.4.2. Cálculos simplificados. ....	59
2.4.3. Ecuaciones de Schwarz para suelo homogéneo. ....	60
2.4.4. Ecuaciones de Schwarz para terreno de dos capas. ....	61
2.5. Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica. ....	62
2.5.1. Aumento del número de electrodos en paralelo. ....	63
2.5.2. Aumento del diámetro del electrodo. ....	63
2.5.3. Aumento de la longitud de penetración del electrodo. ....	63
2.5.4. Tratamiento químico electrolítico del terreno de los pozos. ....	64
2.5.5. Cambio del Terreno. ....	65

CAPITULO III .....	67
3. Sistema de puesta a tierra y protección para sistemas de telecomunicaciones..	67
3.1. Puesta a tierra de sitios de telecomunicaciones.....	67
3.1.1. Subsistema exterior de tierra.....	68
3.1.2. Subsistema de tierra interior.....	68
3.2. Conceptos asociados a las instalaciones de tierra de sistemas de telecomunicaciones. ....	69
3.2.1. Barra externa de tierra.....	69
3.2.2. Campo de tierra de la oficina central.....	70
3.2.3. Barra principal de tierra.....	70
3.2.4. Proceso de soldadura exotermica.....	73
3.3. Normativas para el diseño del sistema de puesta a tierra de la compañía movistar.....	744
3.3.1. Sistemas de tierra exterior.....	744
3.3.1.1. Pararrayo.....	744
3.3.1.2. Soporte de pararrayos.....	755
3.3.1.3. Bajante de pararrayos.....	755
3.3.1.4. Procedimiento de Aterrizamiento de torre.....	766
3.3.1.5. Electrodo de puesta a tierra.....	766
3.3.1.6. Barras Equipotencializadoras.....	766
3.3.1.7. Bajantes de barras.....	788
3.3.1.8. Soportes y escalerillas.....	788
3.3.1.9. Tablero T-GSM.....	788
3.3.2. Aterrizamiento de los equipos de RF, antenas y líneas de transmisión..	799
3.3.3. Aterrizamiento en interiores.....	80
3.3.3.1. Anillo de aterrizamiento.....	80
3.3.3.2. Barra de aterrizamiento.....	811
3.3.3.3. Aterrizamiento de los racks.....	822
3.3.3.4. Aterrizamiento de equipos (Ubicados en racks).....	833
3.4. Puesta a tierra de equipos de fuerza.....	844
3.4.1. Transformador de distribución.....	844
3.4.2. Generador y tableros.....	844
3.4.3. Tablero de medidores.....	855

CAPÍTULO IV .....	866
4. Diseño de la Malla Puesta a Tierra de la Estación Repetidora el Alisal .....	866
4.1. Medición de la Resistividad del Terreno con el Fluke 1625 Kit por el Método de Wenner en la estación El Alisal.....	866
4.1.1. Método de Wenner (Aplicación del Proyecto) .....	877
4.1.2. Método de Wenner (Procedimiento de Medición). .....	899
4.2. Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra .....	920
4.2.1. Método de Caída de Potencial.....	922
4.3. Cálculo Teórico de la Resistividad por el Modelo de Suelo a Dos Capas ....	934
4.4. Cálculo Teórico de la Corriente de Cortocircuito (Icc).....	988
4.5. Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra.....	100
4.6. Diseño de la Malla de Puesta a Tierra.....	109
CONCLUSIONES .....	1122
RECOMENDACIONES .....	1133
BIBLIOGRAFÍA .....	1144
ANEXOS .....	1167

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Imagen del átomo de un material conductor	22
<b>Figura 2.2</b> Conductores, semiconductores y aislantes	23
<b>Figura 2.3</b> Gráfico esquemático para determinar la resistividad eléctrica de un material	25
<b>Figura 2.4</b> Resistividad de un cubo de terreno de 1m de lado.	26
<b>Figura 2.5</b> Variación de la resistividad en función de la estratigrafía del terreno.	29
<b>Figura 2.6</b> Variación de la Resistividad en Función de la Humedad.	31
<b>Figura 2.7</b> Variación de la Resistividad en Función al Contenido de Sales.	33
<b>Figura 2.8</b> Variación de la resistividad en función de las variaciones estacionales.	34
<b>Figura 2.9</b> Ilustración método de Wenner.	37
<b>Figura 2.10</b> Configuración de Wenner.	37
<b>Figura 2.11</b> Configuración de Schlumberger.	39
<b>Figura 2.12</b> Tierra Física.	42
<b>Figura 2.13</b> Tierra de protección contra rayos.	43
<b>Figura 2.14</b> Conductor conectado a tierra.	44
<b>Figura 2.15</b> Tierra aislada.	45
<b>Figura 2.16</b> Tierra de referencia de señal.	46
<b>Figura 2.17</b> Sistema efectivamente conectado a tierra.	47
<b>Figura 2.18</b> Distribución de las intensidades de caídas del rayo.	49
<b>Figura 2.19</b> Curva representativa de una descarga atmosférica 8/20 $\mu$ s	50
<b>Figura 2.20</b> Mapa Isoceraúnico del Continente Americano que muestra el número de rayos sobre el continente a lo largo del año	50
<b>Figura 2.21</b> Voltaje de paso cerca de una estructura conectada a la tierra	56
<b>Figura 2.22</b> Voltaje de Toque Cerca de una Estructura Conectada a la tierra	56
<b>Figura 2.23</b> Efectos de circulación de corriente en el cuerpo humano	57
<b>Figura 3.1.</b> Anillos de Tierra, Exterior e Interior	68
<b>Figura 3.2.</b> Barra Exterior de Tierra (MGB) Unida al Anillo Exterior de Tierra	69
<b>Figura 3.3.</b> Barra Principal de Tierra (MGB)	71

<b>Figura 3.4.</b> Sistema de Puesta a Tierra de un Sitio de Telecomunicaciones	71
<b>Figura 3.5.</b> Sistema de Barra Maestra MGB	72
<b>Figura 3.6.</b> Tipos de uniones con soldadura exotérmica	76
<b>Figura 3.7.</b> Barra Equipotencializadora	77
<b>Figura 3.8.</b> Puntos de conexiones de Aterrizamiento para las líneas de transmisión.	79
<b>Figura 3.9.</b> Anillo de Aterrizamiento Interno.	81
<b>Figura 3.10</b> Barra de aterrizamiento (MGB) internos	82
<b>Figura 3.11.</b> Anillo de Tierra para los Equipos.	83
<b>Figura 4.1.</b> Medidor de Resistencia de Tierra	87
<b>Figura 4.2.</b> Configuración de Wenner	88
<b>Figura 4.3.</b> Medición de la Resistividad del Terreno	90
<b>Figura 4.4.</b> Variación de Posición en los Electrodo	91
<b>Figura 4.5.</b> Método de Caída de Potencial	93

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Resistividad según la naturaleza del terreno.	28
<b>Tabla 2.2</b> Valores medios de la resistividad.	28
<b>Tabla 2.3</b> Efecto de la temperatura en la resistividad del suelo.	30
<b>Tabla 2.4</b> Resistividad de los materiales.	32
<b>Tabla 2.5</b> Efecto de la humedad en la resistividad del suelo	32
<b>Tabla 2.6</b> Valores máximos de resistencia de puesta a tierra	59
<b>Tabla 2.7</b> Aplicación del THOR-GEL según la resistividad del terreno.	65
<b>Tabla 2.8</b> Valores Promedios de Resistividad	66
<b>Tabla 4.1</b> Relación entre distancia, resistencia y resistividad	92
<b>Tabla 4.2</b> Principales Características del Transformador	99

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 4.1.</b> Curva de $\rho$ vs $a$ para Aplicación del Método de Sunde	95
<b>Gráfica 4.2.</b> Curva de $\rho$ promedio vs $a$ para Aplicación del Método de Sunde	96
<b>Gráfica 4.3.</b> Curvas de Sunde	96

## ÍNDICE DE DISEÑOS EN 3D

<b>Diseño en 3D 4.1.</b> Modelo de Suelo a Dos Capas (Estación El Alisal)	98
<b>Diseño en 3D 4.2.</b> Diseño de la Malla Puesta a Tierra (Estación El Alisal)	109
<b>Diseño en 3D 4.3.</b> Diseño de la Malla Puesta a Tierra (Estación El Alisal)	110
<b>Diseño en 3D 4.4.</b> Diseño de la Malla Puesta a Tierra (Estación El Alisal)	110
<b>Diseño en 3D 4.4.</b> Diseño de la Malla Puesta a Tierra (Estación El Alisal)	111

## **RESUMEN**

Este trabajo ha sido elaborado en la estación repetidora para señales de telecomunicaciones El Alisal, ubicada en la provincia del Azuay en un periodo de siete meses comprendido entre los años 2012–2013, para la ejecución de los estudios tuvimos el apoyo de la compañía proyectos MYRCO quienes facilitaron el sitio y los equipos para realizar las mediciones correspondientes. Debido a la necesidad de llevar señal telefónica a los sectores aledaños al sitio de ejecución de la obra, se implementó esta estación repetidora que se conecta a la red celular local, ayudando a mejorar la calidad de vida de los habitantes del sector permitiéndoles comunicarse con mayor facilidad desde un teléfono celular. Para este estudio se utilizaron varios equipos de precisión; un medidor de resistividad del terreno, un medidor de resistencia a tierra y un multímetro digital, además de los respectivos procedimientos establecidos por las normas eléctricas vigentes para garantizar un funcionamiento eficiente de la infraestructura a largo plazo.

En el capítulo 1 se realiza una introducción del presente proyecto, detallando objetivos, alcance, justificación, hipótesis y la importancia del mismo.

En el capítulo 2 se detallan los conceptos generales y la teoría a fin de conocer los Sistemas de Puesta a Tierra, analizarlos y tener la certeza de cómo se comportan, para salvaguardar la integridad de las personas y los equipos involucrados.

En el capítulo 3 esta el requerimiento general de la estación, los complementos del sistema de puesta a tierra y protecciones especializadas para sistemas de telecomunicaciones.

En el capítulo 4 se desarrolla el diseño y los cálculos del Sistema Puesta a Tierra de la estación repetidora El Alisal.

## CAPITULO I

### 1. Introducción.

En toda instalación eléctrica es esencial resguardar la seguridad de las personas que harán uso de ella, así como proteger la infraestructura, equipos y bienes en general. Para tal efecto se necesita dotarla de mecanismos de protección adecuados, ya sea que se trate de instalaciones para alimentar aparatos eléctricos, fijos, móviles o con estructuras susceptibles de deterioro, eléctricamente hablando, es fundamental la protección contra las fallas de aislamiento que originan tensiones por contacto indirecto.

La tensión por contacto indirecto se origina en una estructura metálica, cuando un conductor energizado y sin aislamiento, establece contacto con la misma energizándola. Para minimizar los efectos de dicho contacto indirecto, la instalación debe contar con un sistema de protección; el método más efectivo y de mayor seguridad es el sistema de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra tienen como objetivo primordial limitar la tensión que; con respecto a tierra, pueden presentar en un momento dado, los componentes metálicos. De esta manera, se establece como circuito de protección paralelo a la instalación eléctrica que sirve para resguardar a las personas que puedan estar en contacto con estos elementos, además evita diferencias de potencial peligrosas y al mismo tiempo permite el paso hacia tierra de corrientes de falla o de descargas atmosféricas.

De un criterio adecuado y un estudio previo correctamente realizado al momento de decidir la dimensión, el mecanismo y los componentes de un sistema de puesta a tierra, depende la efectividad de este, al momento de cumplir su objetivo, que al final de todo es proteger la vida de las personas y salvaguardar los equipos utilizados.

## **1.1. Justificación.**

Considerando al sector de la nueva estación como centro de crecimiento industrial en años venideros, TELEFONICA MOVISTAR ha previsto construir una torre de estructura metálica de 30m de altura (aproximadamente), destinada a la transmisión de señales telefónicas en la ciudad de Cuenca-Provincia del Azuay.

Por esto, es importante conocer las características del terreno previo a la instalación de su respectiva puesta a tierra, ello debido al inminente crecimiento de nuevas estaciones de comunicaciones, donde es importante presentar un manual de procedimientos para el diseño e implementación del sistema de puesta a tierra que facilite su construcción.

## **1.2. Objetivo general.**

Diseñar el sistema de puesta a tierra para la estación repetidora “El Alisal” para sistemas de telecomunicaciones de Telefónica Movistar.

### **1.2.1. Objetivos específicos.**

- Determinar la resistividad del terreno que alberga la estación con el respectivo equipo de medición siendo este: Medidor de resistividad del terreno marca Fluke 1625 KIT.
- Determinar la resistencia de tierra de la estación con el equipo de medición Tester KIT Marca EXTECH Modelo 382152.
- Elaborar el diseño del sistema de puesta a tierra de la estación repetidora “El Alisal”.
- Dimensionar y verificar que el sistema de puesta a tierra a ofrecer, cumpla con la seguridad de protección tanto del personal técnico como de los equipos electrónicos ( $R \leq 5 \Omega$ ), siguiendo lineamientos con normativas aplicadas a dicho propósito y cumpliendo con los requerimientos del cliente.

- Aplicar los conocimientos y fórmulas para el desarrollo de un diseño óptimo de puesta a tierra para torres y equipos de telecomunicaciones.

### **1.3. Alcance.**

El presente proyecto permitirá entregar la información necesaria del suelo propiamente dicho, en este caso su resistividad y resistencia, para realizar la planificación eléctrica del sitio en el futuro, facilitando el proceso de diseño de puesta a tierra tanto para la empresa de distribución, como para el contratista.

De esta manera el proyecto eléctrico tiene como propósito fundamental estudiar la resistividad del terreno, tanto de forma teórica como práctica; es decir, analizar la importancia que tiene dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia (S.E.P) en lo que se refiere a puestas a tierra.

### **1.4. Importancia.**

Es de suma importancia entender el comportamiento de la electricidad y cuáles son sus implicaciones, puesto que hoy en día, es un hecho que todas las personas se vean involucradas de cualquier modo con la electricidad, sea en sus casas como en el trabajo. De ahí surge la importancia que tienen las protecciones tanto para los seres humanos como para los equipos eléctricos.

Este trabajo está orientado solo a una parte muy importante de las protecciones de electricidad como son las protecciones de puesta a tierra.

Por la importancia de los sistemas de puesta a tierra, es necesario conocer la mayor cantidad de factores que provocan la variación de la resistencia del sistema, algunos de estos factores pueden ser: compactación del terreno, estratigrafía, condiciones climatológicas, características físicas del electrodo de conexión a tierra, entre otros.

Debido a lo antes mencionado, surge la necesidad de crear mejores sistemas de puesta a tierra y mejorar la tecnología de los instrumentos que miden las características del terreno en donde se va a instalar un sistema de puesta a tierra.

Es primordial contar con equipos o instrumentación de alta precisión para poder entender el comportamiento del terreno, por eso este documento hace una mención previa de los equipos y de la importancia de un sistema de puesta a tierra, así como algunos de los métodos más utilizados para llevar a cabo mediciones de resistencia de un terreno.

Otro tema importante mencionado son las características de los tipos de electrodos que existen para la conexión a tierra, así como las configuraciones de electrodos más utilizadas para la instalación de un sistema de puesta a tierra.

### **1.5. Hipótesis.**

Por medio del diseño e implementación de un adecuado sistema de puesta a tierra en la estación repetidora “El Alisal”, se protegerá principalmente la seguridad de las personas que aquí trabajan así como también los equipos eléctricos, electrónicos y de telecomunicación que aquí se encuentran.

## CAPITULO II

### 2. Marco teórico.

#### 2.1. Criterios fundamentales acerca de la resistividad eléctrica.

Por definición general la resistividad determina la capacidad física que tienen los elementos o materiales para oponerse al paso de la corriente eléctrica, este es un valor que se mantiene constante, depende de la naturaleza del elemento y únicamente sufrirá cambios al variar su temperatura.

Debido a esto la resistividad es propiedad de los materiales que se clasifican en conductores, semiconductores o aislantes; de esta manera si un elemento es considerado “conductor ideal” tendrá una resistividad nula o igual a cero, y un “aislante ideal”, una resistividad que va hacia el infinito. Es muy importante recalcar que la resistividad es proporcionalmente inversa a la conductividad eléctrica, la cual constituye otra propiedad de la materia.

Los valores de resistividad más bajos son propios de los metales y sus aleaciones, que son buenos conductores, mientras que las resistividades de los aisladores superan a los mencionados en un factor de  $10^{22}$ .

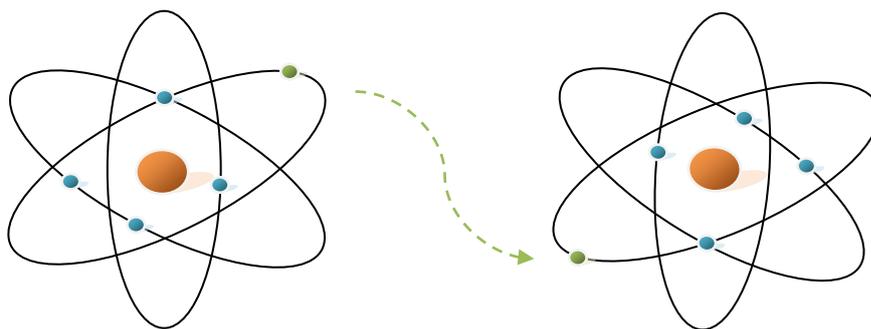
Por medio de los aislantes es posible poner límites al flujo de corriente eléctrica así como crear caminos bien definidos utilizando buenos conductores eléctricos, mientras que no es posible controlar el calor generado a un grado comparable. Por otro lado, es claro que el grupo de los metales son mejores conductores térmicos; su resistividad así como su conductividad tanto térmica como eléctrica es producto de los electrones libres que; molecularmente hablando, poseen en su última órbita. Contrario a los semiconductores, que forman un grupo que está entre los metales y los aislantes, cuya principal importancia se debe al modo en que estos se ven afectados por los cambios de temperatura y por pequeñas cantidades de impurezas.

### 2.1.1. Elementos conductores.

Desde el punto de vista del átomo se consideran mejores conductores los materiales que poseen electrones libres en su última órbita. A estos electrones se les conoce como electrones de valencia y son los que posibilitan el flujo de corriente eléctrica.

Los metales que son buenos conductores poseen un gran número de electrones libres en su última órbita y son capaces de moverse con soltura, particularmente la plata, el cobre, el oro y el aluminio son excelentes conductores de la electricidad. El cobre es el metal más utilizado, ya que aparte de ser excelente conductor, no es muy costoso y se transforma fácilmente en alambre o en finas capas, haciéndolo accesible para una gran diversidad de usos, desde el cableado eléctrico domiciliario hasta equipo eléctrico muy sofisticado.

El aluminio aunque solo tiene un 60% de la capacidad de conducción del cobre, también se usa, sobre todo en aplicaciones en las que el peso ligero es importante como en líneas de transmisión elevadas. La plata y el oro son demasiado costosos para su uso general; sin embargo, el oro, debido a que se oxida menos que otros materiales, se emplea en dispositivos especializados, por ejemplo; en conectores eléctricos críticos en equipo electrónico, ya que hace una conexión mas confiable que otros materiales.



**Fig. 2.1** Imagen del átomo de un material conductor.

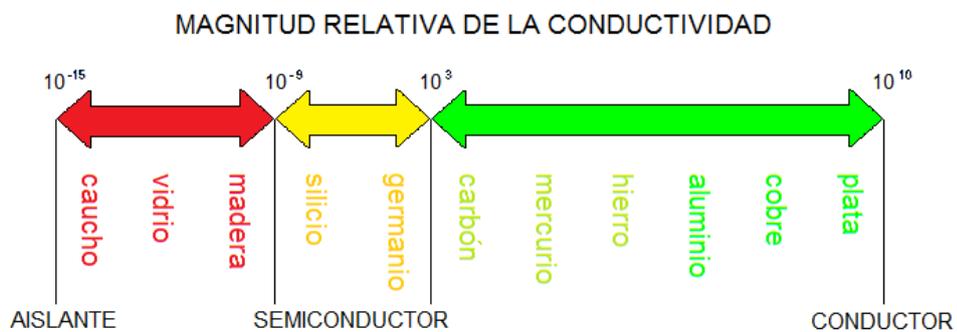
Fuente: Los Autores.

### 2.1.2. Elementos aislantes.

Los materiales que no conducen electricidad, como el vidrio, porcelana, plástico, hule, y otros, son llamados aislantes. El recubrimiento de los cables es un aislante que se utiliza para evitar que estos produzcan choques eléctricos, los aislantes no conducen porque su capa de valencia (o capa más externa) está llena, y por lo tanto sus electrones se encuentran estrechamente ligados (no posee electrones libres); sin embargo, cuando se aplica un voltaje suficientemente elevado, la fuerza es tan grande que los electrones son arrancados de sus átomos, causando que el aislante se rompa y que haya conducción. En el aire se puede ver este fenómeno como un arco o chispazo y en los sólidos es usual que el aislante resulte quemado.

### 2.1.3. Elementos semiconductores.

Los elementos semiconductores poseen propiedades eléctricas únicas, estos pueden comportarse como conductores o aislantes dependiendo de la temperatura a la que están sometidos y de ciertas impurezas atómicas que se pueden agregar en concentraciones variables a su composición. El silicio y el germanio (además de otros pocos materiales) tienen capas de valencia medio llenas y por lo tanto no son ni buenos conductores ni buenos aislantes lo que los hacen atractivos e importantes para la industria electrónica. El material más importante es el silicio, que se utiliza para fabricar transistores, diodos, circuitos integrados y otros dispositivos electrónicos. Los semiconductores han hecho posible las computadoras personales, los sistemas de DVD, los teléfonos celulares, las calculadoras y otros aparatos electrónicos.



**Fig. 2.2** Conductores, semiconductores y aislantes.

Fuente: Los Autores.

#### 2.1.4. Resistividad eléctrica.

La resistividad de un elemento ( $\rho$ ) es una medida de la dificultad que encuentra la corriente eléctrica al atravesarlo. La resistencia eléctrica ( $R$ ) que muestra un conductor homogéneo se determina por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del mismo. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección “ $s$ ” y longitud “ $l$ ”, la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

Ecuación 2.1

Partiendo de la ecuación 2.1 podemos despejar la resistividad quedando como nueva ecuación:

$$\rho = \frac{Rs}{l}$$

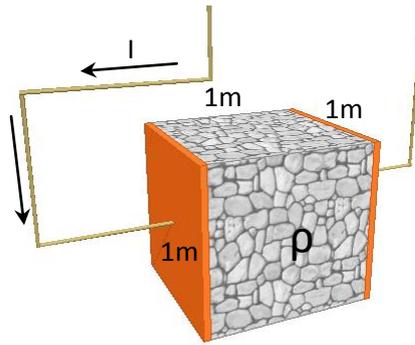
Ecuación 2.2

La unidad de resistividad según el sistema internacional es el ohmio por metro ( $\Omega \cdot m$ ), de igual forma se puede definir a la conductividad ( $\sigma$ ) como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar un elemento, que expresado numéricamente es el inverso de la resistividad; se expresa en siemens metro ( $s \cdot m$ ).

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Ecuación 2.3

El gráfico mostrado a continuación, ilustra un esquema para determinar la resistividad eléctrica de una muestra de material cuyas dimensiones son 1m de lado por 1m de profundidad.



**Fig. 2.3** Gráfico esquemático para determinar la resistividad eléctrica de un material.

Fuente: Los Autores.

La resistividad es de las magnitudes físicas con mayor variación según el tipo de material y desde luego para los suelos. Su valor depende de varios factores como: salinidad, humedad, temperatura, estratigrafía, presión, variaciones estacionales, etc.

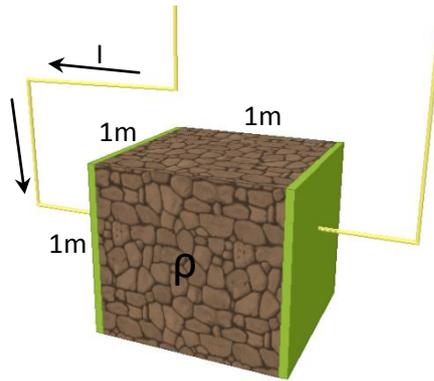
#### **2.1.5. Resistencia a tierra.**

La resistencia a tierra se define como la resistencia que ofrece un sistema de puesta a tierra ante el paso de la corriente eléctrica. Dicho valor de resistencia va a depender de la resistividad del terreno, de las características físicas del electrodo a tierra, que son: diámetro, área o longitud, y también de la longitud y el área de los conductores.

El valor de resistencia a tierra es la resistencia óhmica entre un conductor puesto a tierra y un punto a potencial cero.

#### **2.2. La resistividad del terreno.**

El elemento más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo, sino la resistividad del terreno, por ello es fundamental conocerlo para realizar los cálculos pertinentes y diseñar el sistema de puesta a tierra. La resistividad del terreno es la resistencia que muestra al paso de la corriente, un cubo de terreno de 1 metro de arista. Se expresa en  $\Omega \cdot m$  y se representa con la letra  $\rho$ .



**Fig. 2.4** Resistividad de un cubo de terreno de 1m de lado.  
Fuente: Los Autores.

Donde:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \rho = \frac{RS}{l} \quad \rho = \frac{(\Omega \cdot m^2)}{m} = \Omega \cdot m$$

Ecuación 2.1; Ecuación 2.2

Para un cubo de 1m de lado:

$$R(\Omega) = \rho \frac{l}{S} \quad R(\Omega) = \rho \frac{1m}{1m \cdot 1m} \quad R(\Omega) = \frac{\rho}{1m}$$

Ecuación 2.1

Despejando ρ; ρ = R (Ω·m)

Longitud en (m)

Resistividad en (Ω·m)

Sección en (m<sup>2</sup>)

Resistencia en (Ω)

La resistividad de un terreno determinado va a depender de su origen, cantidad de humedad, temperatura, salinidad y estratigrafía, siendo esta última característica la cantidad de capas de distinta composición que tenga el terreno a analizarse, también se ve afectada la resistividad por las variaciones estacionales.

Otro factor que incide en la resistividad de un terreno es la compactación, ya que al aumentar el tamaño de las partículas que lo forman; la resistividad es mayor y

viceversa. Por esta razón, un suelo compuesto por gravilla posee mayor resistividad que uno arenoso y este último mayor resistividad que uno arcilloso. De aquí podemos concluir que la resistividad de un terreno disminuye a medida que la compactación del mismo aumenta.

A causa de la no uniformidad de las distintas capas, cuando se quiere determinar la resistividad en un terreno por medio de un método de medida, lo que se obtiene es la resistividad promedio de las capas comprendidas entre la superficie y una cierta profundidad, a lo que se denomina resistividad aparente ( $\rho_a$ ).

### **2.2.1. Factores que afectan la resistividad del terreno.**

La resistividad de un terreno viene determinada por varios factores que pueden modificarla, los más significativos son:

- Naturaleza del terreno.
- Estratigrafía.
- Temperatura.
- Humedad.
- Variaciones estacionales.
- Salinidad.
- Compactación.
- Factores de naturaleza eléctrica.

#### **2.2.1.1. Naturaleza del terreno.**

Al hablar de la naturaleza del terreno se deben tomar en cuenta una serie de factores que inciden directamente sobre el suelo en donde se vaya a implementar cualquier sistema de aterrizamiento o protección a tierra y debido a que los distintos tipos de terrenos pueden ser muy variados dependiendo de su naturaleza, estos se dividen en tres grandes grupos; terrenos buenos, regulares o malos conductores, es muy importante considerar; en primera instancia para la elaboración de un adecuado sistema de puesta a tierra, la naturaleza del terreno.

La tabla 2.1 presentada a continuación muestra los valores de resistividad para diferentes terrenos según su naturaleza.

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>RESISTIVIDAD EN (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
Terrenos pantanosos.	De algunas unidades a 30
Limo.	20 a 100
Humus.	10 a 150
Turba húmeda.	5 a 100
Arcilla plástica.	50
Margas y arcillas compactas.	100 a 200
Margas del jurásico.	30 a 40
Arena arcillosa.	50 a 500
Arena silíceo.	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped.	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo.	1500 a 3000
Calizas blandas.	100 a 300
Calizas compactas.	1000 a 5000
Calizas agrietadas.	500 a 1000
Pizarras.	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo.	800
Granitos y gres procedente de alteración.	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados.	100 a 600

**Tabla 2.1** Resistividad según la naturaleza del terreno.

Fuente: MARTINEZ R. Juan, “Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas”

Para cálculos aproximados de la resistencia de tierra pueden utilizarse los valores medios recogidos en la siguiente tabla.

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>VALOR MEDIO DE RESISTIVIDAD EN (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos.	50
Terraplenes cultivables poco fértiles, terraplenes.	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables.	3000

**Tabla 2.2** Valores medios de la resistividad.

Fuente: MARTINEZ R. Juan, “Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas”

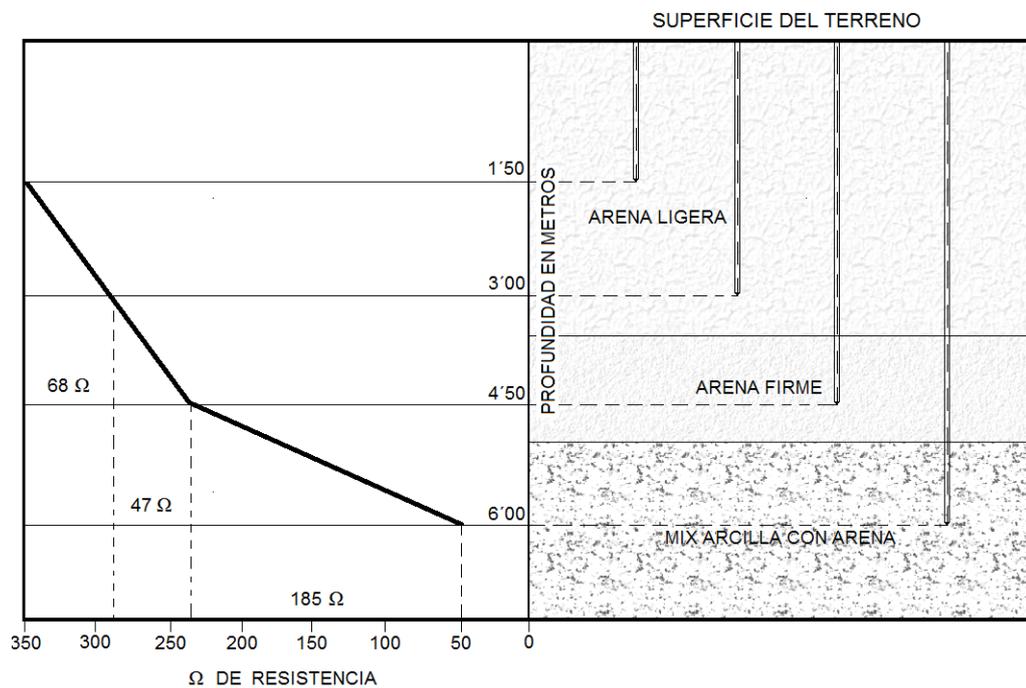
Observamos que a medida que el terreno es más compacto y antiguo, la resistividad aumenta.

### 2.2.1.2. Estratigrafía.

El término hace referencia a que el suelo no presenta uniformidad, sino que tiene diferentes capas cuya composición no es igual, por lo cual su resistividad varía con cada una de ellas.

Generalmente las capas más profundas tienen menor resistencia media por ser más ricas en humedad y contenido de minerales o se puede decir que están más cerca del nivel freático.

La siguiente grafica deja clara la inseguridad de conocer la resistividad en profundidad si no se hace una medición previamente, lo que implica costo y tiempo.



**Fig. 2.5** Variación de la resistividad en función de la estratigrafía del terreno.  
Fuente: MARTINEZ R. Juan, "Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas"

Si las instalaciones y el terreno lo permiten, se aconseja instalar electrodos en profundidad. Si el terreno es malo, si los electrodos a instalar son numerosos o si lo accidentado del terreno no lo permite, se colocarán en paralelo sabiendo el riesgo que esta decisión supone.

### 2.2.1.3. Temperatura.

La resistividad de un terreno no cambia significativamente hasta alcanzar el punto de congelamiento; solo entonces la resistividad se incrementa vertiginosamente aparentando que no hay contacto con la tierra, la razón de ello es que no hay descomposición de sales. En la tabla 2.3 se indica como cambia la resistividad en función de la temperatura para un suelo arcilloso - arenoso.

También se debe recalcar, que hay lugares donde la resistividad del terreno puede bajar y subir a medida que incrementa la profundidad, o sea, un comportamiento de suelo estratificado.

TEMPERATURA °C	RESISTIVIDAD ( $\Omega \cdot m$ )
20	72
10	99
0 (agua)	138
0 (hielo)	300
-5	790
-10	3300

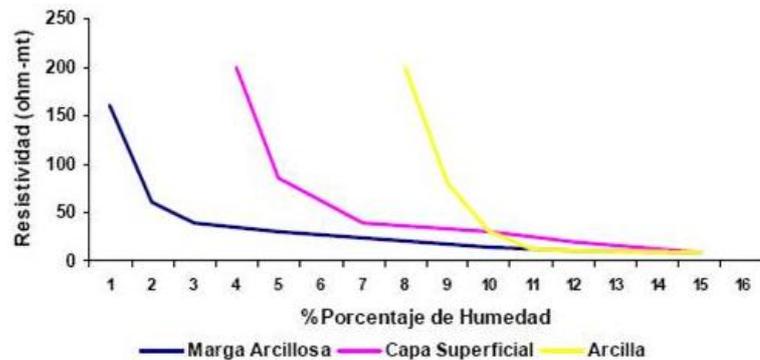
**Tabla 2.3** Efecto de la temperatura en la resistividad del suelo.

Fuente: GONZALEZ LONGATT. Francisco, “*Sistemas de puesta a tierra: Una introducción a la seguridad*”

En ese caso se puede afirmar, que en países tropicales la resistividad es menor a medida que la profundidad aumenta, porque el contenido de humedad y nivel freático es mayor, siempre teniendo en cuenta las excepciones anteriores.

#### 2.2.1.4. Humedad.

Debido a que la conducción de corriente es mayormente electrolítica, la humedad facilita la disociación de las sales en iones positivos y negativos; al haber más humedad hay mayor conductividad y por lo tanto menor resistividad.



**Fig. 2.6** Variación de la resistividad en función de la humedad.

Fuente: GONZALEZ LONGATT. Francisco, “Sistemas de puesta a tierra: Una introducción a la seguridad”

Se puede decir que hay una variación considerable de la resistividad del terreno medida en temporada lluviosa y la medida en temporada de sequía. En muchas ocasiones, una manera de reducir la resistencia de puesta a tierra es humedeciendo el terreno a lo largo del tiempo, logrando así valores bajos de resistividad.

Hay algunas instalaciones que tiene prevista una tubería de agua, la que utilizan para mantener una concentración de humedad en todas las épocas y durante años; manteniendo valores bajos de resistividad.

MATERIALES	RESISTIVIDAD EN ( $\Omega \cdot m$ )
Sal gema.	$10^{13}$
Cuarzo.	$10^9$
Arenisca, guijarros de río, piedra triturada.	$10^9$
Rocas compactas, cemento, esquistos.	$10^6$
Carbón.	$10^5 - 10^6$
Rocas madres, basaltos, cascajos.	$10^4$
Granitos antiguos.	$10^4$
Terrenos rocosos, calizos (jurásico) secos.	$3 \times 10^3$
Yeso seco.	$10^3$

Concreto normal (seco).	10 - 50x10 <sup>3</sup>
Arena fina y guijarros (secos).	10 <sup>4</sup>
Arena arcillosa, grava y arena gruesa húmeda.	5x10 <sup>2</sup>
Suelos calcáreos y rocas aluvionarias.	3 a 4x10 <sup>2</sup>
Tierra arenosa con humedad.	2x10 <sup>2</sup>
Barro arenoso.	1,5x10 <sup>2</sup>
Concreto normal en suelo.	1 - 2,4x10 <sup>2</sup>
Margas turbas.	10 <sup>2</sup>
Arcillas (secas).	30
Arcillas ferrosas, piritosas.	10
Agua de mar.	1
Soluciones salinas.	0,1 - 0,001
Minerales conductores.	0,01
Grafitos.	0,0001

**Tabla 2.4** Resistividad de los materiales.

Fuente: GONZALEZ LONGATT. Francisco, “*Sistemas de puesta a tierra: Una introducción a la seguridad*”

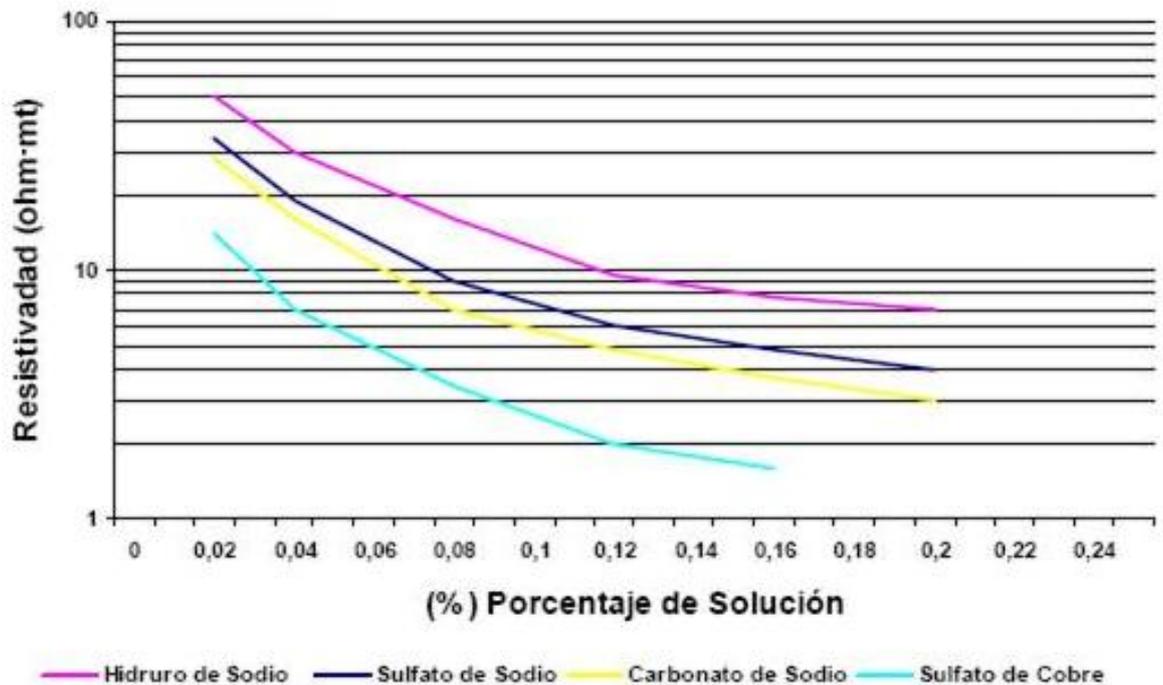
CONTENIDO DE HUMEDAD (% POR PESO)	RESISTIVIDAD EN ( $\Omega \cdot m$ )	
	CAPA VEGETAL	ARCILLA ARENOSA
0	10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup>
2,5	2500	1500
5	1650	430
10	530	185
15	190	105
20	120	63
30	64	42

**Tabla 2.5** Efecto de la humedad en la resistividad del suelo

Fuente: GONZALEZ LONGATT. Francisco, “*Sistemas de puesta a tierra: Una introducción a la seguridad*”

#### 2.2.1.5. Salinidad.

Como es conocido, la cantidad de agua presente en el suelo es un factor determinante en la resistividad del terreno y la resistividad del agua se encuentra determinada por la cantidad de sales minerales disueltas en ella. La grafica de la figura 2.7 enseña, como pequeñas cantidades de sales disueltas pueden reducir considerablemente la resistividad del terreno.



**Fig. 2.7** Variación de la resistividad en función al contenido de sales.  
Fuente: GONZALEZ LONGATT. Francisco, “*Sistemas de puesta a tierra: Una introducción a la seguridad*”

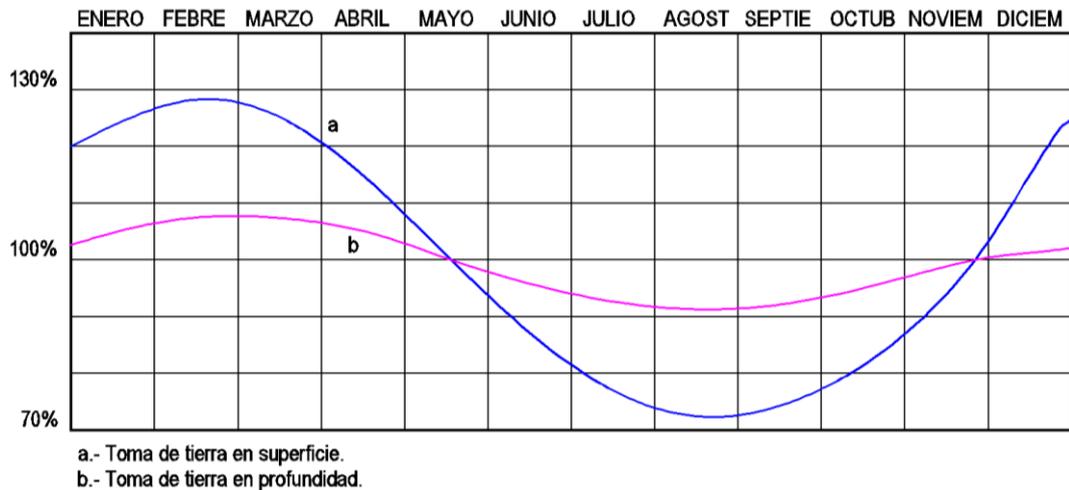
#### 2.2.1.6. Variaciones estacionales.

En temporada de invierno el nivel freático (nivel de agua subterránea) se aproxima a la superficie del terreno debido al incremento de las precipitaciones, presentando éste una resistividad menor que en la temporada de sequía, en el que el nivel freático se aleja en profundidad de la superficie.

Durante todo el año se presentan variaciones estacionales que influyen más sobre el electrodo cuanto más próximo a la superficie del terreno se encuentre este.

Para poder mantener el valor de resistividad dentro de un rango aceptable a lo largo de todo el año, es conveniente enterrar a mayor profundidad los electrodos en el terreno y proteger (en lo posible) el área de terreno de las inclemencias del tiempo.

En la figura 2.8 se observa que en verano la resistividad es mayor que en invierno, y que los electrodos enterrados a más profundidad tienen una variación estacional inferior a la de los electrodos enterrados superficialmente.



**Fig. 2.8** Variación de la resistividad en función de las variaciones estacionales.  
Fuente: MARTINEZ R. Juan, “Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas”

A medida que enterremos más los electrodos o los coloquemos debajo de las cimentaciones del edificio, tendremos más garantías de mantener estable el valor de la resistividad.

### 2.2.1.7. Factores de naturaleza eléctrica.

Hay varios factores de naturaleza eléctrica que pueden modificar la resistividad de un terreno. Los más significativos son el gradiente de potencial y la magnitud de la corriente de defecto a tierra.

El primero, afecta al terreno cuando el gradiente de tensión alcanza un valor crítico, de algunos KV/cm. Lo que puede originar la formación de pequeñas áreas eléctricas en el suelo que hacen que el electrodo se comporte como si fuera de mayor tamaño.

El segundo, la magnitud de la corriente de defecto a tierra, puede también modificar el comportamiento del electrodo de tierra si su valor es muy elevado, bien por

provocar gradientes excesivos, o bien por dar lugar a calentamientos alrededor de los conductores enterrados que provoquen la evaporación del agua.

Otro fenómeno que hay que tener muy en cuenta es el deterioro más o menos significativo, de los electrodos o del conjunto de la puesta a tierra, en el caso de un cortocircuito franco o la caída de un rayo que se canalice a través de la puesta a tierra del edificio.

En estos casos es reglamentaria la comprobación de la red de tierra de la instalación ya que puede llegar a deteriorarse o a fundirse si la intensidad es muy elevada (cientos o miles de amperios).

#### **2.2.1.8. Compactación.**

La resistividad del terreno disminuye al incrementar la compactación del mismo. Por esta razón, se procurará siempre colocar los electrodos o picas en los terrenos más compactados posibles.

Siempre que se instalen electrodos de pica, placa y de conductor enterrado la vibración de la máquina de penetración dejara una separación entre la pica y el terreno por lo que habrá que compactar para que se produzca un buen contacto entre la pica y el terreno.

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

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia.

Es importante que la resistividad pueda verificarse en forma tan precisa como sea posible, ya que el valor de resistencia a tierra del electrodo es directamente proporcional a la resistividad del suelo.

Si se usa un valor incorrecto de resistividad del terreno en la etapa de diseño, la medida de impedancia del sistema de tierra puede resultar significativamente diferente de lo planeado. Este puede, a su vez, tener serias consecuencias financieras. La resistividad del terreno puede medirse por diversos métodos:

- Por medio de mediciones geo eléctricas realizadas en la superficie del terreno Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), sondeos magneto telúricos (Método Wenner, Método Schlumberger), etc. Esta medición estudia un volumen grande de suelo en su estado natural.
- Por mediciones efectuadas en el interior de sondeos mecánicos. El suelo se estudia en su estado natural, con mejor detalle pero más local (menos volumen de suelo).
- Por laboratorio en muestras extraídas en afloramientos, sondeos mecánicos, etc. Abarca un volumen pequeño de suelo el cual es alterado y puede no ser representativo.

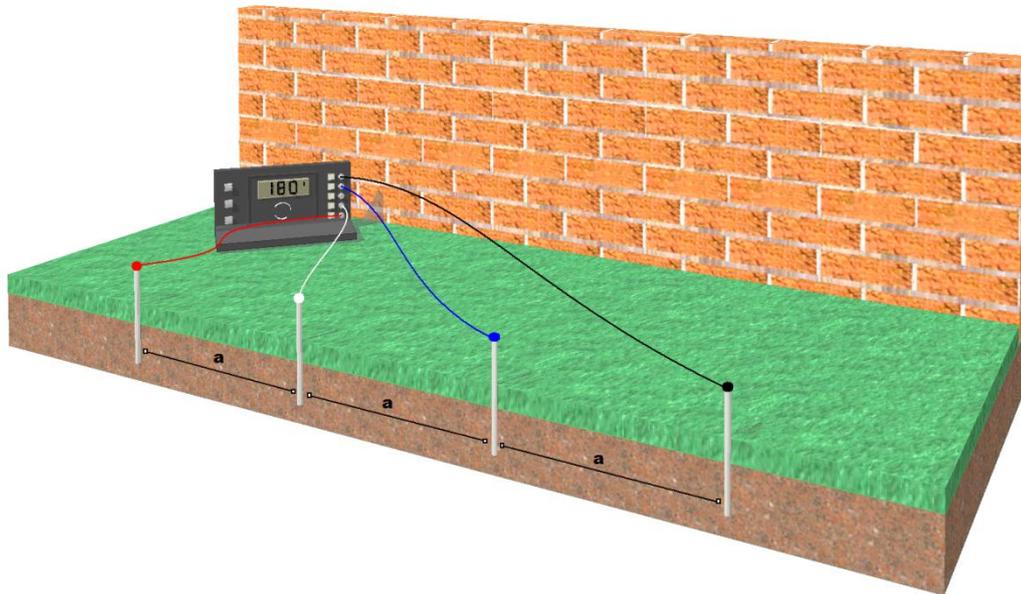
#### **2.2.2.1. Método de Wenner.**

En 1915, el Dr. Frank Wenner del *U.S. Bureau of Standards* desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre. Con objeto de medir la resistividad del terreno se hace necesario enterrar los 4 electrodos en el suelo.

Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración la cual no debe exceder la relación “ $a/20$ ” y es generalmente limitada a 0,3 metros, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

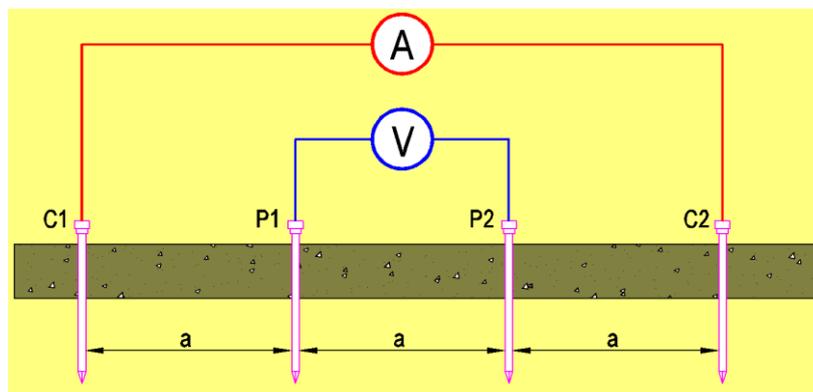
El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados

en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón  $V/I$  es conocida como la resistencia aparente, la resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.



**Fig. 2.9** Ilustración método de Wenner.

Fuente: Los Autores.



**Fig. 2.10** Configuración de Wenner.

Fuente: Los Autores.

En la figura se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

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

Ecuación 2.4

Si la distancia enterrada (B) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A). O sea  $A > 20B$ , la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

$$\rho = 2\pi aR$$

Ecuación 2.5

Donde:

$\rho$ : Resistividad aparente del terreno en ohmios·m.

$a$ : Espaciamiento en metros de electrodos de prueba.

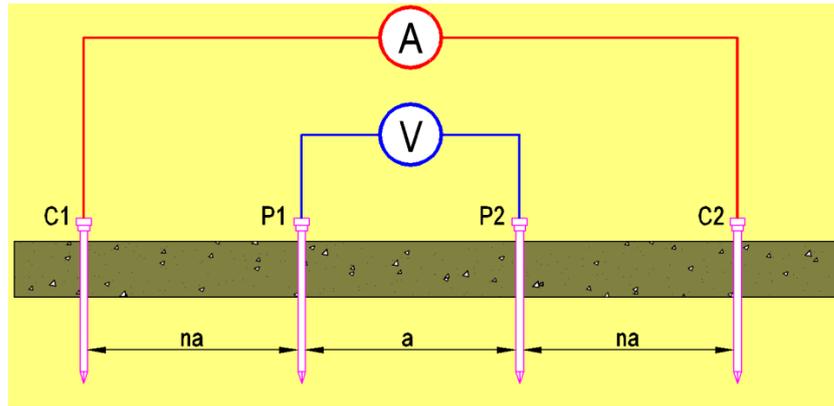
$R$ : Resistencia aparente del terreno.

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

#### **2.2.2.2. Método de Schlumberger.**

El método de Schlumberger es una alteración del método de Wenner, ya que también emplea los mismos 4 electrodos, pero en este método la distancia entre electrodos centrales o de potencial ( $a$ ) es siempre constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos ( $na$ ) de la separación base de los electrodos internos ( $a$ ).

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la figura siguiente.



**Fig. 2.11** Configuración de Schlumberger.  
Fuente: Los Autores.

Con este método la resistividad está dada por:

$$\rho = 2\pi R(n + 1)na$$

Ecuación 2.6

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método de Wenner y cuando los aparatos de medición son poco inteligentes. Solamente se recomienda hacer mediciones a 90 grados para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas.

### 2.2.3. Comportamiento eléctrico del suelo.

Generalmente la tierra representa un mal conductor eléctrico por su gran contenido de óxido de silicio y óxido de aluminio que son elementos altamente resistivos, pero gracias al extenso volumen disponible, se puede lograr a través de ella los niveles conductivos necesarios para su utilización como auxiliar.

La conductividad representa un fenómeno principalmente electroquímico o electrolítico, por lo tanto, depende de la cantidad de agua presente, del nivel de humedad existente y de la existencia de sales minerales que mejoran notablemente la conductividad de los mismos.

### **2.3. Puesta a tierra de los sistemas eléctricos.**

El propósito de aterrizar los sistemas eléctricos es limitar cualquier corriente elevada que pueda resultar de descargas atmosféricas, fenómenos de inducción o de contactos no intencionales con cables de alto voltajes.

Este propósito se logra uniendo físicamente un conductor eléctrico apropiado a la tierra, suelo o terreno, de manera que se cree un camino seguro por donde se descarguen estas corrientes de falla del sistema, precautelando la integridad de las personas y equipos eléctricos.

#### **2.3.1. ¿Qué sistemas deben conectarse a tierra?**

- Sistemas eléctricos de potencia.
- Estructuras metálicas y equipos eléctricos.
- Sistemas de protección atmosférica.
- Sistemas que manejen señales de telecomunicaciones o electrónicas.

#### **2.3.2. Razones para conectar a tierra circuitos y sistemas de alimentación.**

De todas las razones existentes las primordiales son las siguientes:

- Protección a personas.
- Protección del equipo.

El propósito de mantener los equipos y carcasas metálicas de un sistema eléctrico a un mismo plano equipotencial, no es un hecho simple, el conductor conectado a tierra (de un sistema aterrizado) establece una trayectoria de baja impedancia para la corriente de falla y de esta manera permite el funcionamiento o la activación de un interruptor automático de seguridad o de un interruptor de circuito, para despejar la falla. Las razones por las cuales se deben conectar a tierra materiales conductores que albergan conductores eléctricos o equipos, son:

1. Limitar el voltaje ocasionado por descargas atmosféricas, sobrevoltajes transitorios y contactos accidentales con alto voltaje.
2. Facilitar la protección de los dispositivos de protección contra sobrecargas y los interruptores del circuito.
3. Estabilizar el voltaje durante operaciones normales.

Como se menciona, la importancia de realizar una conexión a tierra es principalmente la seguridad, debido a que una corriente no deseada o sobre voltaje podría causar accidentes, pérdida total de equipos o reparaciones costosas.

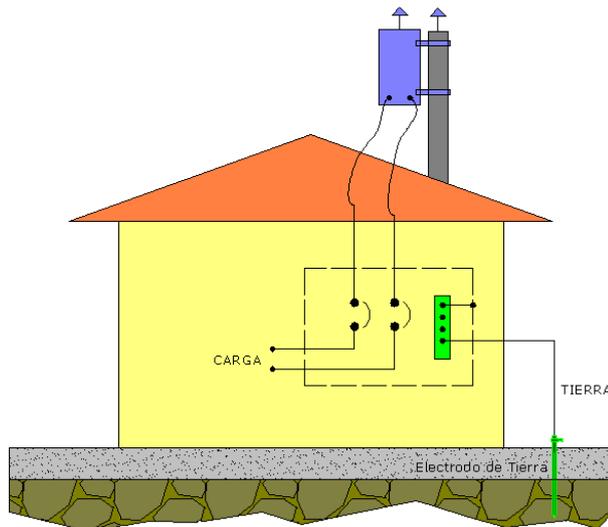
Otra razón por la que debe instalarse un sistema de puesta a tierra eficiente en edificaciones o instalaciones industriales, es para evitar que descargas atmosféricas caigan en sitios peligrosos que puedan ocasionar accidentes o dañar los equipos, esto se logra mediante la instalación de un sistema de pararrayos.

### **2.3.3. Clasificación de un sistema completo de tierra.**

Un sistema completo de tierra en una instalación eléctrica consta de tres componentes principales: 1) La tierra física, 2) tierra del circuito y 3) tierra del equipo.

#### **2.3.3.1. Tierra física.**

Conocida también como sistema de electrodos de tierra, es la conexión física entre un sistema eléctrico y un sistema de electrodos de tierra. El sistema electrodo de tierra o tierra física generalmente consiste en una varilla, pica, tubería, placa u otro electrodo apropiado, el cual debe tener contacto directo con el terreno. Para entenderlo mejor es un sistema que se instala bajo tierra pero que se encuentra relacionado directamente con las partes eléctricas existentes por encima del terreno.



**Fig. 2.12** Tierra Física.

Fuente: MOLINA AGUILAR. Juan, *“Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistemas de Puesta a Tierra”*.

### 2.3.3.2. Tierra del circuito.

Se denomina así al conductor de tierra que está conectado entre el equipo y la tierra física, el cual tiene como función transportar la corriente de falla cedida por el conductor de tierra del equipo en caso de que se genere un cortocircuito o falla a tierra. Este conductor debe estar en la capacidad de transportar las corrientes de falla de todos los equipos que comprenden el circuito.

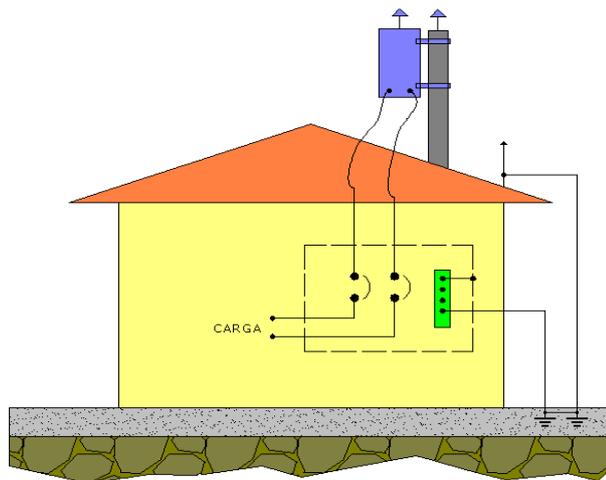
### 2.3.3.4. Tierra del equipo.

Se conoce también como cable de tierra de seguridad y está destinado a la protección de las personas y los equipos en caso de fallas o cortocircuitos. Este interconecta todas las partes metálicas de los equipos, que normalmente no conducen ninguna corriente y así permite mantenerlos en un plano equipotencial o referencia cero. En algunos países como es el caso de España, se utiliza otra terminología para referirse a la tierra del equipo, allá lo denominan “masa” para diferenciarlo de la tierra física.

#### 2.3.3.4. Tierra de protección contra rayos.

Entiéndase como “rayos” a las descargas eléctricas producidas en la atmosfera producto de la ruptura del dieléctrico del aire, para estos fenómenos atmosféricos se considera un sistema de protección separado que debe conectarse al sistema de tierra de la edificación. Este tipo protecciones de tierra lo gobierna el código de protección contra rayos, NFPA-780 publicado por la Asociación Nacional de Protección contra Incendios, la cual es la autora del NEC.

La función específica de este sistema es drenar la gran cantidad de energía que produce una descarga atmosférica a tierra manteniendo en un rango de valores seguros los voltajes de toque y de paso que se generan, por medio de una varilla pararrayos, un conductor bajante y un electrodo de tierra independiente que al final termina uniéndose a la tierra física de la edificación.

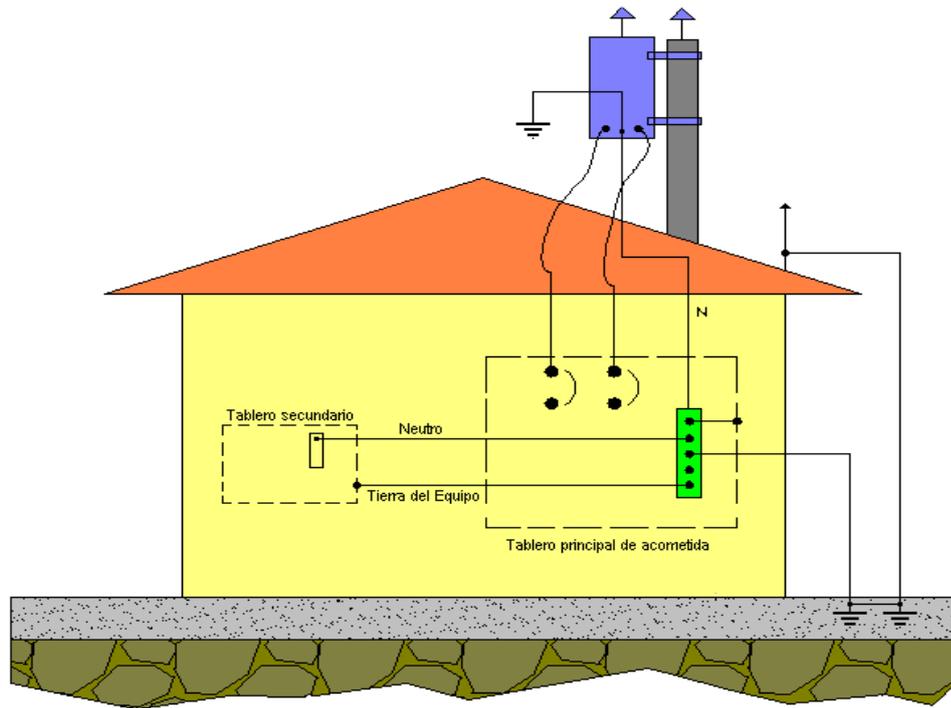


**Fig. 2.13** Tierra de protección contra rayos.

Fuente: MOLINA AGUILAR. Juan, *“Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistemas de Puesta a Tierra”*.

#### 2.3.3.5. Conductor neutro conectado a tierra.

Llamado conductor neutro de acuerdo con la definición del NEC, tiene la función de transportar la corriente de retorno del conductor de fase para un sistema monofásico y el retorno de las corrientes de fase que no se cancelaron, para un sistema trifásico, también se utiliza en sistemas monofásicos de fase dividida o sistemas monofásicos de tres hilos con el mismo propósito.

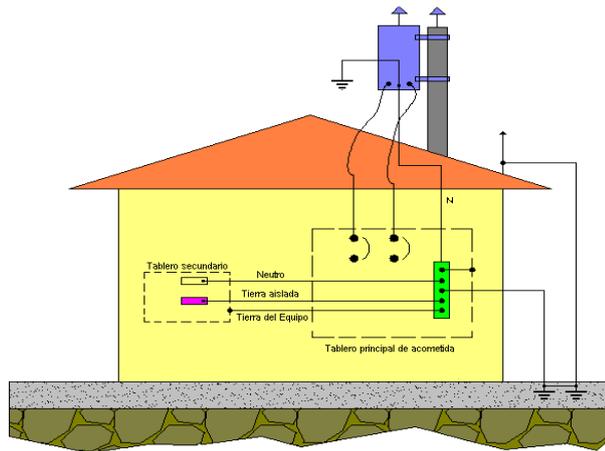


**Fig. 2.14** Conductor conectado a tierra.

Fuente: MOLINA AGUILAR. Juan, *“Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistemas de Puesta a Tierra”*.

### 2.3.3.6. Tierra aislada.

Este sistema aislado brinda una tierra libre de ruido eléctrico, utilizado frecuentemente para equipos electrónicos muy sensibles, se usa especialmente en salas de cómputo, equipos sofisticados de telecomunicaciones y salas de supervisión y control de señales; también se lo denomina tierra dedicada y no es utilizado comúnmente. La aplicación de este sistema de tierra aislada ha causado complicaciones y problemas en la implantación de sistemas de tierra porque el tratamiento dado, es aplicarlo como un sistema de tierra separado de la tierra del edificio.



**Fig. 2.15** Tierra aislada.

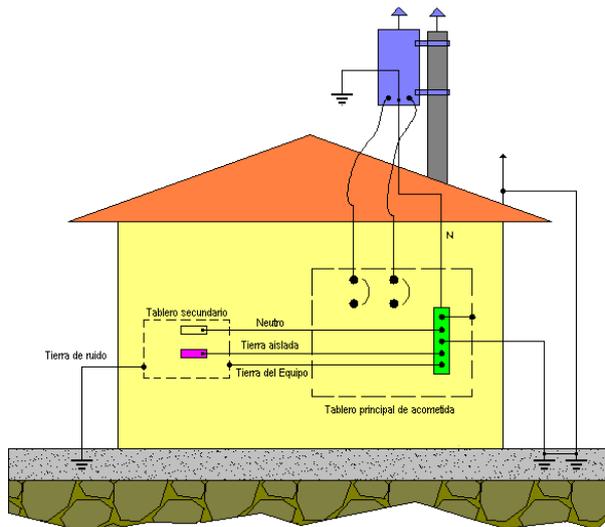
Fuente: MOLINA AGUILAR. Juan, *“Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistemas de Puesta a Tierra”*.

### 2.3.3.7. Tierra de referencia de señal.

Se denomina así al sistema de referencia cero para todos los equipos de señal digital. El objeto de esta referencia es brindar una tierra sin contaminación, separada de la tierra del equipo, esta tierra es conocida con varios nombres: tierra de señal, tierra de ruido o tierra electrónica.

Por norma la conexión del conductor neutro a tierra debe ser sólo en el tablero principal de distribución o en el secundario de un sistema derivado separadamente.

La sección 250-24 del NEC establece que: “Cuando un sistema de alimentación de corriente alterna opera a voltajes menores de 1000 voltios y se conecta a un punto, el conductor conectado a tierra debe ser extendido a cada dispositivo de desconexión del servicio y deberá conectarse a cada una de las cubiertas de los dispositivos de desconexión”.



**Fig. 2.16** Tierra de referencia de señal.

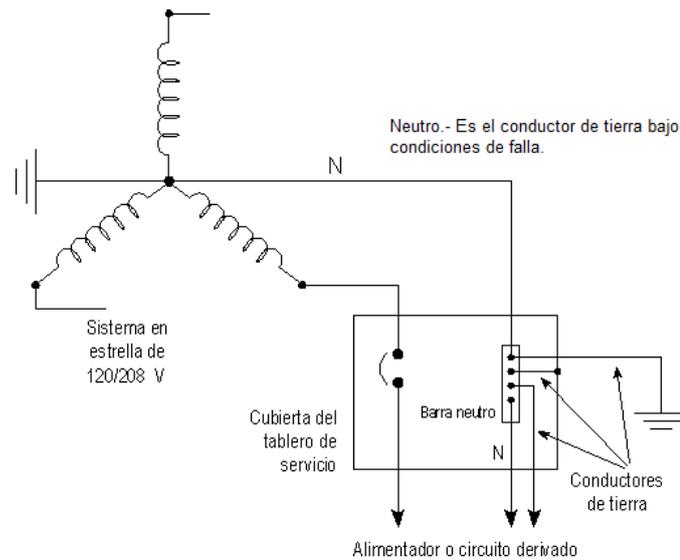
Fuente: MOLINA AGUILAR. Juan, *“Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistemas de Puesta a Tierra”*.

#### 2.3.4. ¿Qué es una conexión efectiva a tierra?

Es la condición en la cual existe un camino conductivo de impedancia suficientemente baja para todas y cada una de las circunstancias del sistema. Para la instalación de una efectiva trayectoria a tierra es necesario disponer de tres elementos fundamentales:

- Los circuitos.
- El equipo.
- Las cubiertas conductoras de los equipos.

Es considerada conexión efectiva a tierra cuando se logra integrar como un sistema eléctrico a los componentes del circuito que se muestran en la siguiente figura:



**Fig. 2.17** Sistema efectivamente conectado a tierra.

Fuente: MOLINA AGUILAR. Juan, *“Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistemas de Puesta a Tierra”*.

La trayectoria debe ser:

- Conectada a tierra intencionalmente.
- Permanente.
- Continua.
- Segura: Considerando que el diámetro de los conductores debe ser el apropiado para que pueda conducir sin riesgos cualquier corriente de falla.
- De baja impedancia.

Se necesita que la impedancia se mantenga a un valor bajo debido a los siguientes aspectos:

- La necesidad de limitar el voltaje a tierra.
- Facilitar la operación de los dispositivos de protección.
- Servir de vía de drenaje a las corrientes parasitas, de fuga, entre otros., las cuales producen ruido eléctrico.

### 2.3.5. Protección contra descargas atmosféricas o rayos.

Las sobretensiones se originan por descargas atmosféricas y electrostáticas (ESD), conmutaciones de cargas en la red, contacto entre conductores de alta tensión e impulsos nucleares electromagnéticos; siendo esta una forma particular de EMI (interferencias electromagnéticas).

Las medidas de protección contra los efectos de los rayos generalmente son costosas, por ello la importancia de un sistema de protección contra descargas atmosféricas, que vaya acorde al daño que estas puedan causar.

Esto debido al incremento en la cantidad de datos producidos por sistemas electrónicos que son procesados y transmitidos en un ambiente de interferencias y sobretensiones.

El objetivo principal de una protección contra rayos es blindar a la edificación, sus ocupantes y los equipos que allí se encuentran, de los efectos adversos asociados a la descarga del mismo.

La decisión de instalar un sistema de protección contra descargas atmosféricas, depende de factores como la probabilidad de caída de rayos en el sector además de la gravedad y las consecuencias para con las personas y equipos.

Para realizar una correcta protección debemos proveer nuestra estructura de dos sistemas de protección: una protección externa contra impactos directos de rayo (pararrayos, jaula de Faraday), y otra protección interna contra sobretensiones provocadas por la caída del rayo en cualquier parte del tendido de cables (limitadores de tensión).

Ambos sistemas tienen que estar apoyados por un buen sistema de puesta a tierra, para la evacuación de la corriente generada por el rayo, así como una adecuada equipotencialidad entre todos los sistemas de tierra, tanto de los sistemas de protección como de los circuitos eléctricos y de telecomunicaciones del área a proteger.

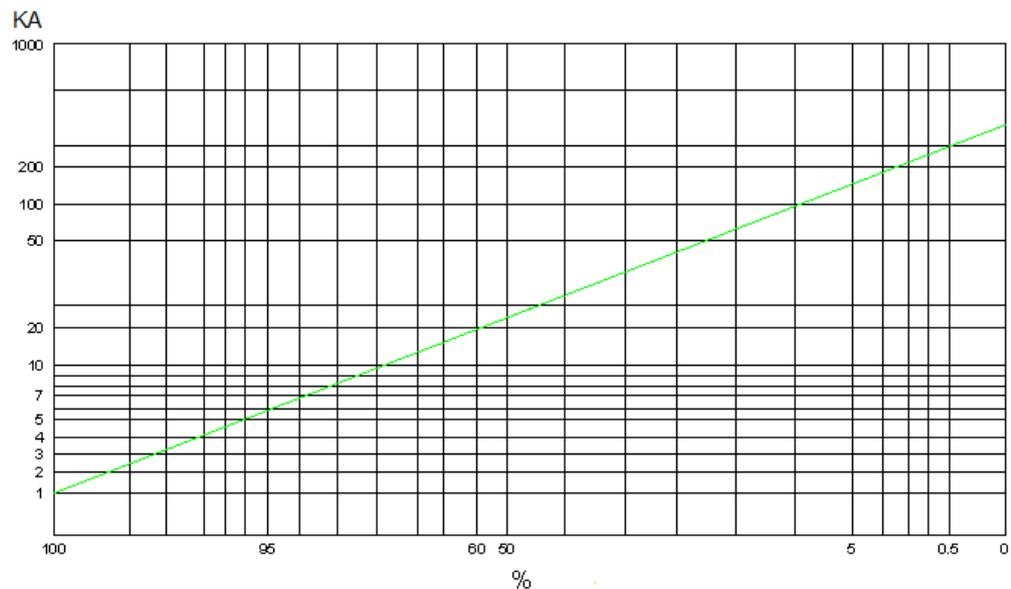
#### **2.3.5.1. Características de las descargas atmosféricas.**

Alrededor del planeta tierra se forman cerca de 2000 tormentas eléctricas simultáneamente, la intensidad media mundial de la descarga de un rayo se estima en 20KA, aunque es normal que los rayos puedan alcanzar corrientes hasta de 200KA

(con frecuencia alcanzan los 500KA) con una energía media dispersada por la tubería de descarga de  $10^5$  J/m.

Proteger una instalación contra la caída directa de un rayo no sería posible ni beneficioso, aunque si es posible la proteger las instalaciones contra los efectos del 95% de las descargas atmosféricas y contra sus efectos secundarios que se constituyen en voltajes mayores de 5KV y corrientes de unos 6KA.

La ilustración muestra las intensidades de campo a diferentes distancias del punto de caída, adicionalmente se observa que el 95% de los rayos no sobrepasa los 6KA, mientras que sólo un 5% sobrepasa los 100KA.

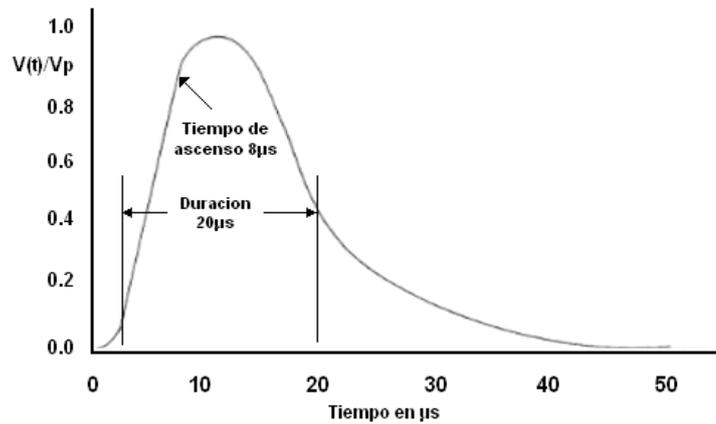


**Fig. 2.18** Distribución de las intensidades de caídas del rayo.  
Fuente: DIAZ. Pablo, “*Soluciones Prácticas para Sistemas Eléctricos de Distribución*”, Editorial Mc Graw Will 2001.

La figura mostrada a continuación ilustra las características de la curva 8/20  $\mu$ s de corriente.

El tiempo de elevación lo norma la IEEE, Std 4-1998 que determina como:

$$1.67(t_{90} - t_{30})$$

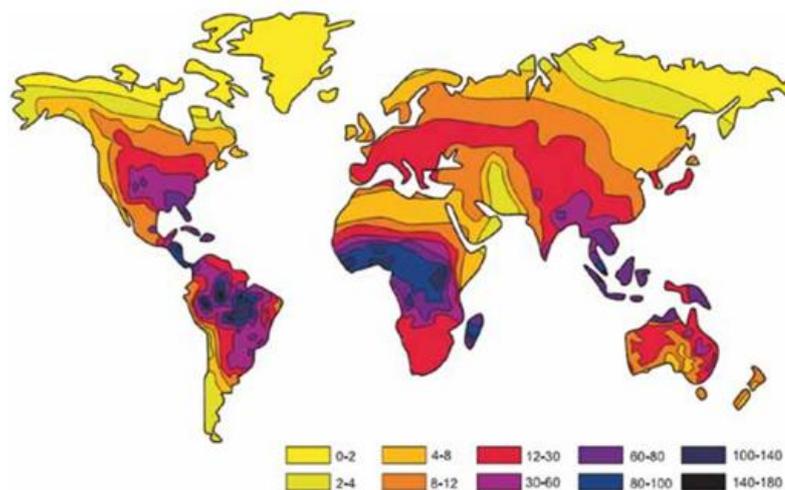


**Fig. 2.19** Curva representativa de una descarga atmosférica 8/20  $\mu s$ .  
 Fuente: DIAZ. Pablo, "Soluciones Prácticas para Sistemas Eléctricos de Distribución", Editorial Mc Graw Will 2001.

En donde:

$t_{90}$  y  $t_{30}$  = Al tiempo de elevación entre el 30% y 90% de la amplitud de la onda.

La duración se determina como el tiempo entre el origen virtual y el 50% del tiempo de descenso. El origen virtual es el punto donde una línea recta entre el 30% y el 90% del frente de la onda intercepta la línea de voltaje cero. En este caso, 8  $\mu s$  es el tiempo de elevación y 20  $\mu s$  es el tiempo de descenso hasta el 50% de la cola de la onda. El mapa isoceraúnico en la siguiente figura proporciona información sobre las posibilidades de que sucedan rayos en el mundo.



**Fig. 2.20** Mapa Isoceraúnico del Continente Americano que muestra el número de rayos sobre el continente a lo largo del año.

Fuente: [http://aplicacionestecnologicas.generadordeprecios.info/aplic\\_tec\\_pdc/contenido88.html](http://aplicacionestecnologicas.generadordeprecios.info/aplic_tec_pdc/contenido88.html).

Varias organizaciones mundiales registran a diario la ocurrencia de rayos en áreas geográficas específicas y en todo el planeta. Los datos alcanzados indican que el salto del arco de un rayo destructivo puede tener un nivel de 30000 A, a un voltaje de 30 millones de voltios. Los sobrevoltajes transitorios inducidos por rayos en el sistema de alimentación pueden causar el mal funcionamiento del equipo o insertar datos errados.

Durante la descarga de un rayo en lo más cerca posible de una instalación pueden producirse daños aunque el equipo se encuentre apagado. Cuando éste se desconecta de la fuente de energía, pueden producirse daños por medio de la antena o las conexiones en las líneas de datos.

Con el propósito de garantizar el funcionamiento confiable del equipo electrónico, las computadoras, los equipos médicos computarizados, los enlaces de computadoras (LAN), los sistemas de voz/datos y otros dispositivos electrónicos sensibles, se deberá proporcionar protección efectiva contra rayos, principalmente en áreas de alto índice de descarga.

El mapa isoceraúnico mostrada en la figura 2.20 proporciona información sobre las probabilidades de que se produzcan rayos en el mundo.

Un buen sistema de protección contra descargas atmosféricas debe drenar la energía del rayo a tierra para impedir que circule por los conductores y a través del equipo electrónico sensible. En el caso de un sitio de telecomunicaciones, la torre y los equipos ubicados en ella, deben estar correctamente protegidos de acuerdo con las normas del Código.

#### **2.3.5.2. Sistema de protección contra descargas atmosféricas.**

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

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

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

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

Cuando la energía de un rayo viaja a través de una trayectoria de gran impedancia, el daño causado puede ser grave por el calor y las fuerzas mecánicas que se crean como la tierra no tiene una resistividad uniforme en todos los puntos, dentro de un mismo predio puede existir un potencial entre dos placas de metal enterradas. Por eso, en un sistema de electrodos múltiples conectados entre sí, a manera de malla, existe la probabilidad de que exista una diferencia de potencial entre algunos de sus puntos aterrizados.

#### **2.3.5.3. Sistema de puesta a tierra en pararrayos.**

El sistema de puesta a tierra es usado para dispersar y disipar la corriente de rayo que viene por las bajantes reduciendo al mismo tiempo el peligro de tener tensiones de paso y de contacto peligrosas. La forma de la puesta a tierra y sus dimensiones son un criterio importante en su diseño. En términos generales para el sistema de protección externo se debe buscar un bajo valor de resistencia de puesta a tierra (si es posible menores a  $10 \Omega$  a baja frecuencia).

Para los sistemas de puesta a tierra de la protección contra rayos es recomendable que éstos estén integrados con todos los demás sistemas de puesta a tierra

(comunicaciones, potencia) por medio de uniones que garanticen la equipotencialidad en todas las condiciones de operación.

### **2.3.6. Impedancia a tierra.**

El código eléctrico determina como máxima impedancia a tierra un valor de 25 ohmios. Para las industrias de computadoras, a los equipos computarizados y a la de telecomunicaciones se les obliga excederse los requerimientos del Código Eléctrico. Incluso a algunos fabricantes de equipos eléctricos se les obliga un valor de 5 ohmios o menor. En el caso de sitios con alta ocurrencia de rayos se sugiere una resistencia del sistema de puesta a tierra de 1 ohmio o menor.

La resistencia del suelo varía en diferentes zonas de acuerdo con su composición. En sitios donde la tierra es de arcilla húmeda o arenosa, es fundamental tomar las medidas necesarias para determinar una baja resistencia a tierra.

#### **2.3.6.1. Suelo arenoso o pedregoso.**

Terrenos con alta resistividad, la retención de humedad de estos terrenos también es una dificultad a analizar. En un suelo arenoso o pedregoso, se deben enterrar dos o más varillas de tierra, en un espacio entre varillas no menor de 3 m.

Estas varillas encajan verticalmente a una profundidad mínima de 3 m, deben ser de cobre, de acero revestido de cobre, o de acero inoxidable, de 2.4 m de longitud y 5.8 cm de diámetro. Este sistema de electrodo de tierra provee baja resistencia para la protección estructural y del sistema eléctrico.

Si al hacer la medición de resistencia de suelo no se obtiene el valor deseado, se deben añadir más varillas hasta que se logre el valor deseado. En suelos de mayor resistencia será necesario utilizar otros esquemas de electrodos de tierra, tales como anillo de tierra, o radiales en caso de suelo rocoso.

### **2.3.6.2. Suelo rocoso.**

Terrenos con alta resistividad, tenemos dos variantes generales: Terreno de roca sólida y Terreno de Roca suelta. En áreas donde la roca se encuentra cerca de la superficie del suelo es necesario excavar y extender conductores en forma de radiales desde el edificio. Estas zanjas no deben ser menores de 3.7 m de longitud y de 30 cm a 60 cm de profundidad. En suelos pedregoso y arenoso esta zanja no debe ser menor de 7.5 m de longitud y 60 cm de profundidad.

Si estos métodos no son prácticos y la roca es la superficie del suelo, se permite extender el cable sobre la roca pero éste debe unirse a una placa de cobre, de 0.8 mm de espesor mínimo y con un área de superficie de 0.18 m<sup>2</sup>. Los electrodos encajados en concreto sólo deben utilizarse en nuevas construcciones.

Este electrodo debe ubicarse cerca de los cimientos del edificio y estar encajado 50.8 mm de concreto. Asimismo, debe tener las siguientes características:

- Ser de cobre desnudo.
- Debe tener una longitud mínima de 6.1 m.
- Puede estar constituido de una o más barras de refuerzo con una longitud mínima de 6.1 m y 12.7 mm de diámetro unidas conjuntamente por medio de soldadura o una sobre otra para formar 20 diámetros uniéndolas con alambre.

### **2.3.7. Efecto de la corriente eléctrica en el cuerpo humano.**

El objetivo de un sistema de conexión a tierra es facilitar un camino de baja impedancia de contacto eléctrico entre el neutro de un sistema eléctrico y el suelo.

Idealmente, el potencial eléctrico del neutro en un sistema trifásico deberá ser el mismo que el del suelo. En este caso las personas y los animales están en circunstancias seguras al realizar contacto con estructuras metálicas conectadas a tierra. Desafortunadamente, la impedancia del sistema de conexión a tierra siempre es un número finito. De esta manera el potencial de estructuras conectadas a tierra

pueden ser diferentes que el potencial de otros puntos dispuestos sobre la superficie del suelo durante condiciones de funcionamiento anormales.

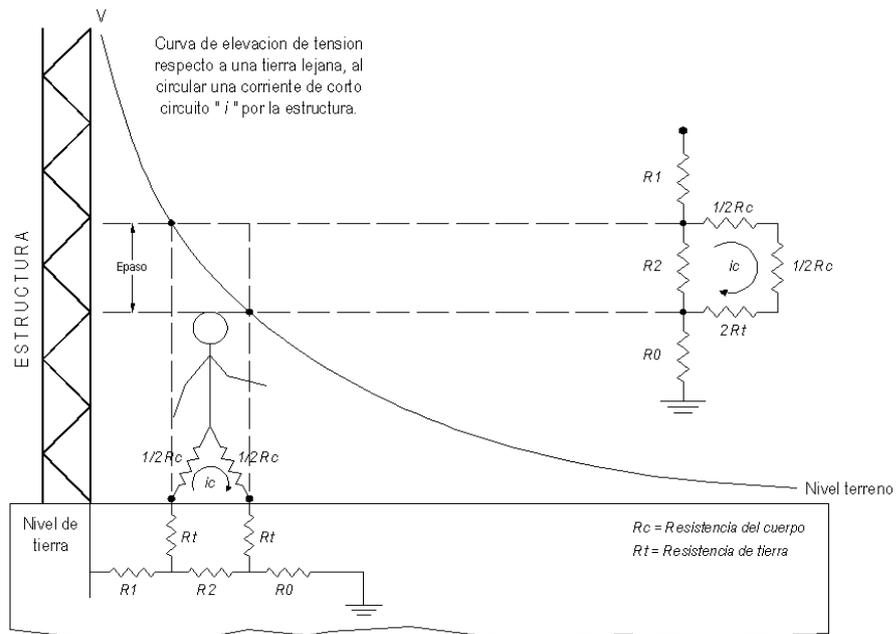
Las condiciones de funcionamiento anormal incluyen operación desbalanceada del sistema o fallas a tierra.

Dependiendo del nivel de la diferencia de potencial entre los puntos sobre el suelo y las estructuras conectadas a tierra pueden generarse condiciones de riesgo para las personas. Estas condiciones pueden resultar en dos posibilidades distintas:

- Una persona en contacto con una estructura conectada a tierra la cual está a un potencial diferente del punto sobre el suelo en el cual se encuentra la persona. En este caso el individuo está expuesto al voltaje el cual será generado por la corriente que circulara a través de su cuerpo. El voltaje al cual la persona bajo estas condiciones está expuesto es denominado **VOLTAJE DE TOQUE**.
- Una persona caminando sobre el suelo de una instalación en la cual existen potenciales distintos experimenta un voltaje entre sus pies. En este caso el voltaje al cual la persona está expuesta se denomina **VOLTAJE DE PASO**.

#### **2.3.7.1. Voltaje de paso.**

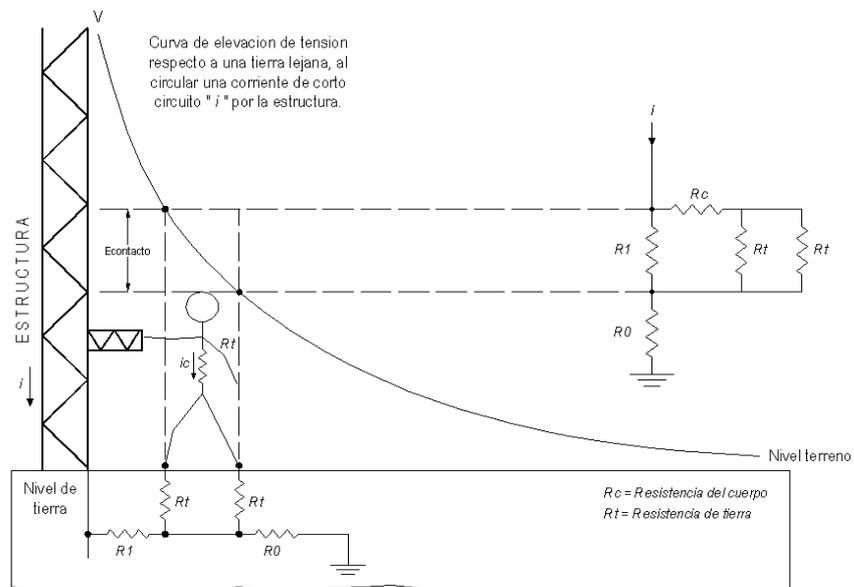
Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona caminando en la superficie de la subestación en sus alrededores al momento de ocurrir una falla, esta diferencia de potencial se toma entre 2 puntos separados a una distancia de 1 metro.



**Fig. 2.21** Voltaje de paso cerca de una estructura conectada a tierra  
Fuente: IEEE STD 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding".

### 2.3.7.2. Voltaje de toque.

Es la máxima diferencia de potencial que puede experimentar una persona en contacto con un equipo aterrado, en el momento de ocurrir una falla. La distancia máxima para tocar un equipo supone que es máximo alcance horizontal, la cual se asume a 1 metro.



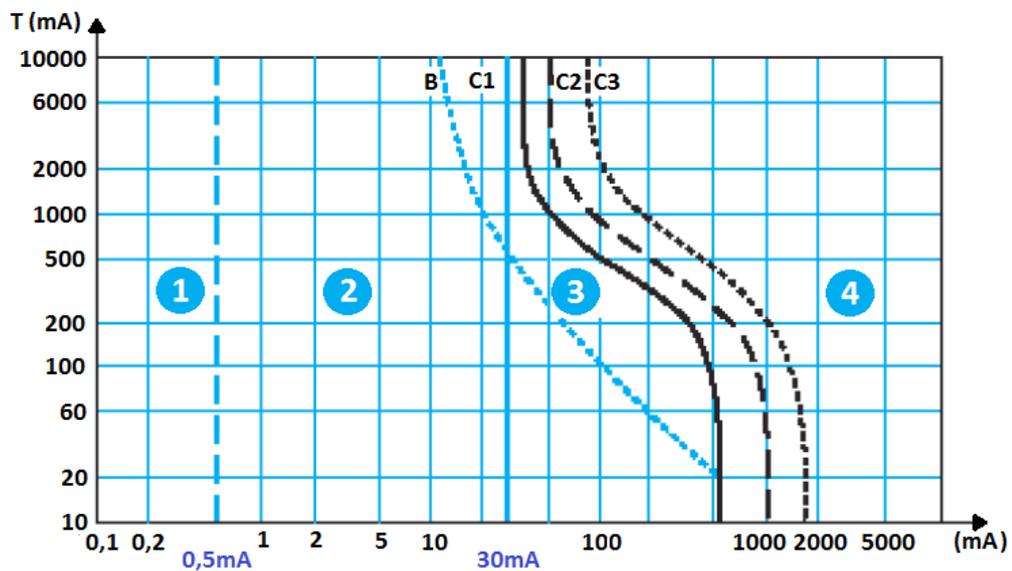
**Fig. 2.22** Voltaje de Toque Cerca de una Estructura Conectada a Tierra  
Fuente: IEEE STD 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Grounding".

### 2.3.7.3. Rangos tolerables de corriente.

Los efectos de una corriente eléctrica circulando por las partes vitales del cuerpo humano dependen de la duración, magnitud y frecuencia de esta corriente.

Los efectos más peligrosos de una exposición a una descarga eléctrica es la condición del corazón conocida como fibrilación ventricular, lo cual resulta en una anomalía de funcionamiento del órgano trasladada a una inmediata paralización de la circulación de la sangre.

El cuerpo también puede sufrir otros efectos fisiológicos menos severos tales como contracciones musculares, quemaduras externas e internas, entre otras. La severidad de los efectos fisiológicos depende de la duración de la descarga eléctrica, pero también depende de las características del cuerpo humano y del ambiente, por ejemplo: la humedad.



**Fig. 2.23** Efectos de circulación de corriente en el cuerpo humano.

Fuente: MOLINA AGUILAR. Juan, *“Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistemas de Puesta a Tierra”*.

La figura muestra que el riesgo de la persona a sufrir contracciones musculares o fibrilación ventricular se va incrementando en forma proporcional al tiempo de exposición a la corriente eléctrica.

Zona 1: (0,5mA) Percepción sin problemas. Corresponde a una circulación de corriente por el cuerpo con una duración ilimitada.

Zona 2: No existen efectos fisiológicos dañinos o peligrosos para valores de corriente por debajo de la línea punteada B.

Zona 3: Zona entre línea B y curva C1

Generalmente no existe daño orgánico pero los efectos de contracciones musculares y otras sensaciones son significativas y pueden llegar a ser incómodas.

Curva C1-Zona de 30 mA: Límite de quiebre. Es posible mantener de forma indefinida la circulación de una corriente de 30 mA de magnitud de corriente con riesgos bajos de anomalías cardíacas o que ocurra fibrilación ventricular.

Zona 4 (A la derecha de la curva C1): Existen efectos fisiológicos, tales como contracciones musculares severas, anomalías cardíacas y quemaduras severas.

La probabilidad de fibrilación ventricular se distribuye como:

- Aproximadamente 5% entre curvas C1 y C2.
- Menor del 50% entre curvas C2 y C3.
- Mayor del 50% por encima de la curva C3.

#### **2.4. Evaluación de la resistencia de la puesta a tierra ( $R_g$ ).**

Un buen sistema de puesta a tierra proporciona una resistencia baja a una tierra remota, con el fin de minimizar la elevación del potencial de tierra GPR, dada por:

$$GPR = I_g \times R_g$$

##### **2.4.1. Requerimientos usuales.**

La principal función de las puestas a tierra es garantizar la seguridad de las personas. Esta es una consideración muy importante durante el diseño y obliga a que se fije una

resistencia objetivo. Por lo tanto, los valores recomendados en la Tabla 2.9 surgen de la experiencia, sin que necesariamente obedezcan a una norma específica.

UTILIZADA PARA	Valor máximo de resistencia de puesta a tierra $\Omega$
Estructuras de líneas de transmisión	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión $V \geq 115KV$	1
Subestaciones de media tensión de uso exterior en poste	10
Subestaciones de media tensión de uso interior	10
Protección contra rayos	4
Neutro de acometida en baja tensión	25
Descargas electrostáticas	25
Equipos electrónicos sensibles	5

**Tabla 2.6.** Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

Fuente: RAMÍREZ. José y CANO. Eduardo, “*Criterios de diseño de sistema de puesta a tierra usando IEEE-80 y evaluado con MEF, Universidad Nacional de Colombia, Colombia-Manizales, Marzo 2010*”.

#### 2.4.2. Cálculos simplificados.

La resistencia de una malla de puesta a tierra fue formulada por Sverak como:

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

Donde:

$I_T$  → Longitud total de conductores enterrados en m.

$\rho$  → Resistividad del Terreno en  $\Omega$ -m.

$A$  → Área ocupada por la malla de tierra en  $m^2$ .

$H$  → Profundidad de la malla en m.

Para mallas sin varillas de tierra, esta fórmula ha sido probada y da resultados que son prácticamente idénticos a los obtenidos con la fórmula de Schwarz.

### 2.4.3. Ecuaciones de Schwarz para suelo homogéneo.

Schwarz desarrolló el siguiente conjunto de ecuaciones para determinar la resistencia de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo que consta de una malla horizontal con electrodos verticales (varillas). Schwarz empleó la siguiente ecuación para cambiar la resistencia de la malla, varillas y la resistencia mutua, para calcular la resistencia de puesta a tierra  $R_g$ :

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

Donde:

$R_1$  → Resistencia de tierra de los conductores de la malla en  $\Omega$ .

$R_2$  → Resistencia de tierra de todas las varillas de tierra en  $\Omega$ .

$R_m$  → Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla  $R_1$  y el grupo de varillas de tierra  $R_2$ , en  $\Omega$ .

La resistencia de tierra de la malla está dada por la siguiente ecuación:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{\sqrt{d_c h}} \right) - \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68$$

Donde:

$\rho$  → Resistividad del Terreno en  $\Omega$ -m.

$L_c$  → Longitud total de todos los conductores de la malla en m.

$h$  → Profundidad de los conductores de la malla en m.

$d_c$  → Diámetro del conductor de la malla en m.

$A$  → Área cubierta por los conductores de la malla de tierra en  $m^2$ .

$L_x, L_y$  → Largo, ancho de la malla en m.

La resistencia de las varillas de tierra está dada por la siguiente ecuación:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[ \ln \left( \frac{8L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right]$$

Donde:

$n \rightarrow$  Número de varillas de tierra.

$L_r \rightarrow$  Longitud de cada varilla en m.

$h \rightarrow$  Profundidad de los conductores de la malla en m.

$d_c \rightarrow$  Diámetro de la varilla en m.

La resistencia de tierra mutua entre la malla y las varillas está dada por la siguiente ecuación:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

La resistencia combinada de  $R_1$  y  $R_2$  será menor que la resistencia a tierra, analizando ambos componentes por sí solos; pero será más alta que la de la combinación en paralelo ( $R_m < R_1, R_m < R_2, R_g > R_m$ ).

#### 2.4.4. Ecuaciones de Schwarz para terreno de dos capas.

En la práctica, es deseable enterrar varillas de tierra profundas para alcanzar suelos de menor resistividad. En las ecuaciones que continúan, las expresiones para  $R_1, R_2$  y  $R_m$  se han modificado, para tener en cuenta esta situación.

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{\sqrt{d_c h}} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n_r L_r} \left[ \ln \left( \frac{8L_r}{d_2} \right) - 1 + \frac{2K_2 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right]$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$\rho_a = \frac{L_r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2(H - h) + \rho_1(L_r + h - H)}$$

Donde:

$\rho_1$  → Resistividad de la capa superior en  $\Omega$ -m.

$\rho_2$  → Resistividad de la capa profunda en  $\Omega$ -m.

H → Espesor de la capa superior

h → Profundidad de la malla en m.

$L_r$  → Longitud de las varillas (c/u).

$\rho_a$  → Resistividad aparente en  $\Omega$ -m.

Si  $\rho_2 \leq 0.2 \rho_1$  y  $H \geq 0.1 L_x$ , las anteriores ecuaciones son razonablemente exactas para la mayor parte de los cálculos prácticos.

## 2.5. Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica.

Existen diferentes métodos para obtener la reducción de la resistencia eléctrica, aunque todos ellos presentan un punto de saturación que es conveniente conocer para evitar diseños antieconómicos.

Los métodos más usados para la reducción de la resistencia eléctrica son los siguientes:

- El aumento del número de electrodos en paralelo
- El aumento del diámetro del electrodo
- El aumento de la longitud de penetración del electrodo
- Tratamiento químico electrolítico del terreno de los pozos
- El cambio del terreno existente por otro de menor resistividad

### **2.5.1. 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 tal motivo, se recomienda que la separación entre puestas a tierra debe ser por lo menos el doble del electrodo.

### **2.5.2. 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.

Para un electrodo de 5/8" (1.6 cm) de diámetro, se quisiera incrementar su conductancia, se puede añadir helicoidales de cable 1/0 AWG, cuyo diámetro de espiras tendrá un diámetro de 18 cm, y la separación entre éstas sea de 20 cm, lográndose una reducción del 30% de la resistencia; es decir, el diámetro del electrodo aumenta de 1.6 cm (5/8") a 18 cm, lo que equivaldría a utilizar un electrodo de 7".

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

Aumentando la longitud de penetración del electrodo en el terreno 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 o al contrario una resistividad muy alta si el terreno fuera rocoso y pedregoso, que las presentadas en las capas superficiales.

#### **2.5.4. Tratamiento químico electrolítico del terreno de los pozos.**

El tratamiento químico del terreno surge como un medio de mejorar y disminuir la resistividad del terreno, sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos. Existen diversos tipos de tratamiento químico para reducir la resistencia de un pozo a tierra:

- Las sales puras (cloruro de sodio) no actúan como un buen electrolítico en estado seco, por lo que se le incorpora carbón vegetal con la finalidad de que este sirviera como absorbente de las sales disueltas y de la humedad.
- Las bentonitas molidas son sustancias minerales arcillosas que retienen las moléculas del agua, pero la pierden con mayor velocidad que con la que la absorben, debido al aumento de la temperatura ambiente. Al perder el agua, pierden conductividad y restan toda compactación, lo que deriva en la pérdida de contacto entre electrodo y el medio, elevándose la resistencia del pozo visiblemente. Una vez que la bentonita se ha armado, su capacidad de absorber nuevamente agua, es casi nula.
- El 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, como también aditivos para regular el PH y acidez de los suelos.

Este compuesto posee otra ventaja que al unirse en el terreno se forma un compuesto gelatinoso que le permite mantener una estabilidad, química y eléctrica por aproximadamente 4 años. El método de aplicación consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un gel, mejoren la conductividad de la tierra, y retengan la humedad en el pozo, por un periodo 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  $m^3$  según sea la resistividad natural del terreno y la resistencia final deseada, como se indica en la siguiente tabla.

Naturaleza del terreno	Resistividad (Ohm-m)	Dosis THOR-GEL por $m^3$
Terrenos cultivables y fértiles	50	1
Terraplenes compactos y húmedos	50	1
Terrenos cultivables poco fértiles	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

**Tabla 2.7.** Aplicación del THOR-GEL según la resistividad del terreno.

Fuente: QQESHUAYLLO. Wilbert, “*Diseño y Ejecución de una Puesta a Tierra de Baja Resistencia*” UNMSM.

### 2.5.5. Cambio del Terreno.

Los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad, por terreno fructífero en sales naturales, cuando estos son pedregosos, rocosos, calizas, granito, etc., que son terrenos con una resistividad muy alta y pueden ser cambiados parcialmente cuando el terreno está compuesto por elementos de alta y baja resistividad: de tal manera que se eliminen las partes de alta resistividad y sean remplazados por otros de baja resistividad.

El cambio total del terreno deberá ser lo suficiente para que el electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de 0 a 0.5 m en todo su contorno así también como en su profundidad.

El porcentaje de reducción de la resistencia en estos casos es difícil de deducir, debido a los componentes que intervienen, como son resistividad del terreno natural, resistividad del terreno de remplazo total o parcial, adherencia por la compactación y

limpieza del electrodo, pero daremos una idea porcentual más o menos en función al tipo de terreno y al cambio total o parcial.

Para lugares de alta resistividad donde se cambie el terreno de los pozos de revisión en forma general, el porcentaje puede estar entre el 50% a 70% de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de media resistividad donde se realice el cambio de terreno de los pozos en forma parcial o total, el porcentaje de reducción puede estar de la siguiente manera:

- Cambio parcial de 20% a 40% de reducción de la resistencia eléctrica resultante.
- Cambio total de 40% a 60% de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de baja resistividad donde se cambiará el terreno de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción puede estar entre el 20% a 40% de la resistividad natural el terreno.

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>VALOR MEDIO DE RESISTIVIDAD</b>
Terrenos cultivables, fértiles, terraplenes compactos y húmedos	100
Terrenos cultivables poco fértiles terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arena seca permeables	3000
Suelos rocosos fraccionados	6000
Suelos rocosos compactos	14000

**Tabla 2.8.** Valores Promedios de Resistividad

Fuente: QQUESHUAYLLO. Wilbert, *“Diseño y Ejecución de una Puesta a Tierra de Baja Resistencia”* UNMSM.

## CAPITULO III

### **3. Sistema de puesta a tierra y protección para sistemas de telecomunicaciones.**

#### **3.1. Puesta a tierra de sitios de telecomunicaciones.**

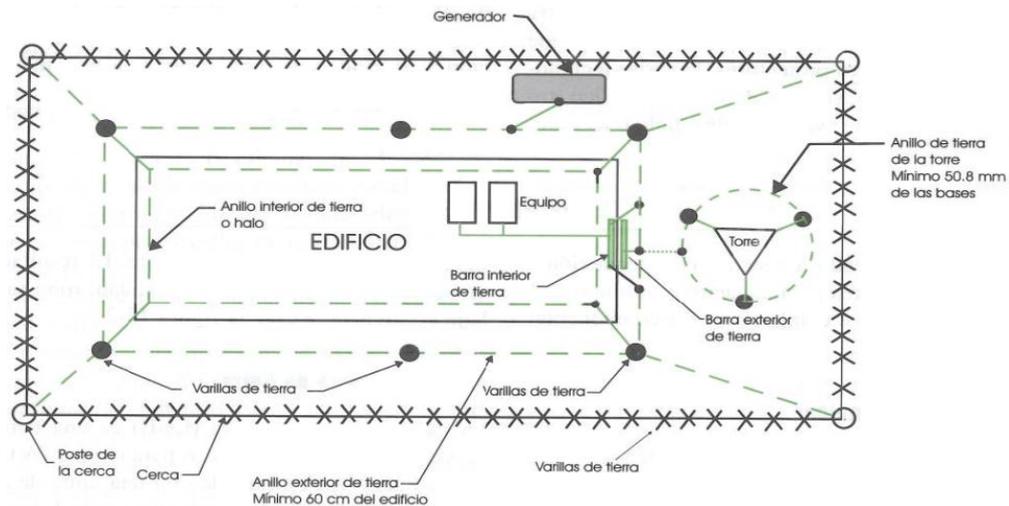
En un sitio de telecomunicaciones el método aconsejable para efectuar una puesta a tierra efectiva en un sitio de telecomunicaciones es la utilización del concepto "Punto único de Conexión a Tierra".

El método punto único de conexión a tierra se consigue conectando todos los elementos de tierra en un punto común, el cual se conoce como "Barra Principal de Tierra".

Todos los sitios de telecomunicaciones y el equipo electrónico siempre están relacionados con la tierra por medio del acoplamiento capacitivo, contactos accidentales o conexiones intencionales. Por tal motivo, la conexión a tierra debe estudiarse como un sistema total, con varios subsistemas que forman el sistema de puesta a tierra del sitio.

El sistema a tierra de un sitio de telecomunicaciones consta de varios subsistemas que se identifican como:

- Subsistema Exterior de Tierra
- Subsistema de Tierra Interior



**Fig. 3.1** Anillos de Tierra, Exterior e Interior.

Fuente: DIAZ. Pablo, *"Soluciones Prácticas para Sistemas Eléctricos de Distribución"*, Editorial Mc Graw Will 2001.

### 3.1.1. Subsistema exterior de tierra.

En sitios con antenas de radio, el objetivo de la conexión a tierra es proveer una trayectoria con la impedancia más baja posible, desde las antenas y la torre, a tierra. Generalmente, la tierra de la torre consiste en un anillo de alambre que está enterrado alrededor de la base. La tierra externa del edificio consiste comúnmente en un alambre enterrado en el área del edificio.

Para garantizar bajos valores de resistencia de puesta a tierra, ambos anillos el de la antena y el del edificio se interconectan y se mejoran aumentando electrodos de tierra de tipo vertical. Todos los blindajes de las líneas de transmisión de RF y equipos de entrada se conectan a tierra como se indica en la figura 3.1.

### 3.1.2. Subsistema de tierra interior.

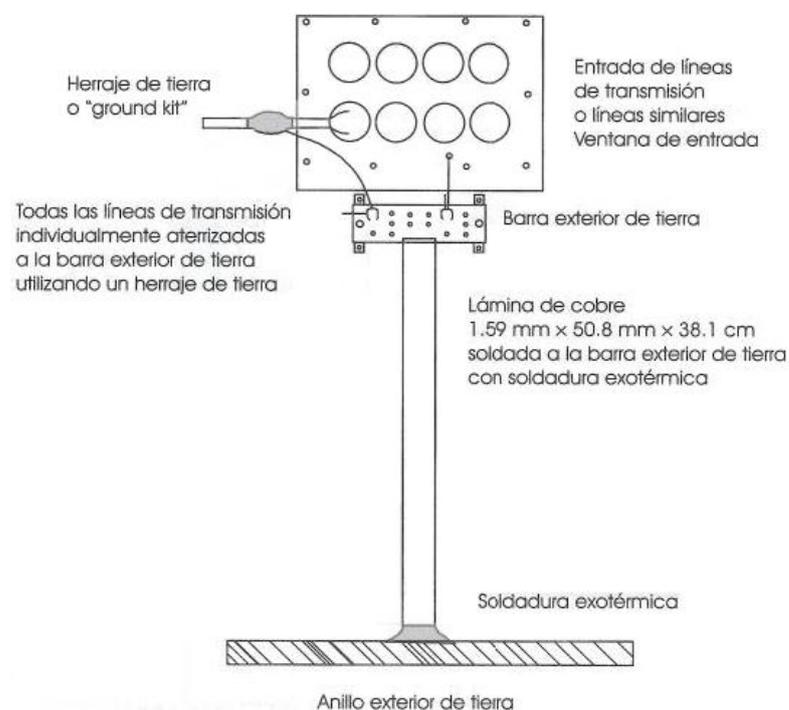
Es indispensable que el sistema interno tenga una trayectoria de baja impedancia a tierra y que consiga una mínima diferencia de potencial entre las estructuras conductoras del sitio, mientras elimina o minimiza cualquier flujo de sobrecorriente a través del equipo.

Las conexiones internas se efectúan a una barra de cobre sobre aisladores, llamada barra principal de tierra (MGB), que brinda un punto de baja resistencia para todas las tierras internas.

### 3.2. Conceptos asociados a las instalaciones de tierra de sistemas de telecomunicaciones.

#### 3.2.1. Barra externa de tierra.

La barra externa de tierra (EGB) es una barra de cobre, con perforaciones taladrados para ajustar los terminales. Puede estar equipada con una cinta de cobre de 5.8 cm de longitud (2 pulgadas) y de 1.3 mm de espesor, que puede servir como conexión a esta barra, la cual provee un punto de baja resistencia para aterrizar las terminales de los accesorios de conexión a tierra de las líneas de transmisión en el punto de entrada en el cuarto de equipos. Esta barra por lo general se instala directamente debajo de la ventana de entrada de la guía de onda en la parte exterior del cuarto de equipos como se indica en la figura 3.2.



**Fig. 3.2** Barra Exterior de Tierra (MGB) Unida al Anillo Exterior de Tierra  
 Fuente: DIAZ. Pablo, "Soluciones Prácticas para Sistemas Eléctricos de Distribución", Editorial Mc Graw Will 2001.

### **3.2.2. Campo de tierra de la oficina central.**

El campo de tierra de la oficina central puede ser cualquier electrodo de tierra como por ejemplo: Varillas de tierra enterradas, un anillo de tierra o la combinación de electrodos conectados entre sí para formar el sistema electrodo de tierra del sitio.

La resistencia a tierra de este campo debe ser igual o menor de 5 ohmios. Sin embargo, la industria recomienda una resistencia máxima a tierra de 1 ohmio. Todas las conexiones que se realizan bajo tierra y que están asociadas con el campo de tierra deben soldarse con métodos exotérmicos. El conductor que se extiende desde el campo de tierra hasta la barra principal de tierra debe ser continuo. Las torres de radio y los sistemas de protección contra rayos, ya sea el sistema de atracción/disipación, deben conectarse a tierra a campos de tierra separados y dedicados y conectados conjuntamente al sistema de tierra de la estructura.

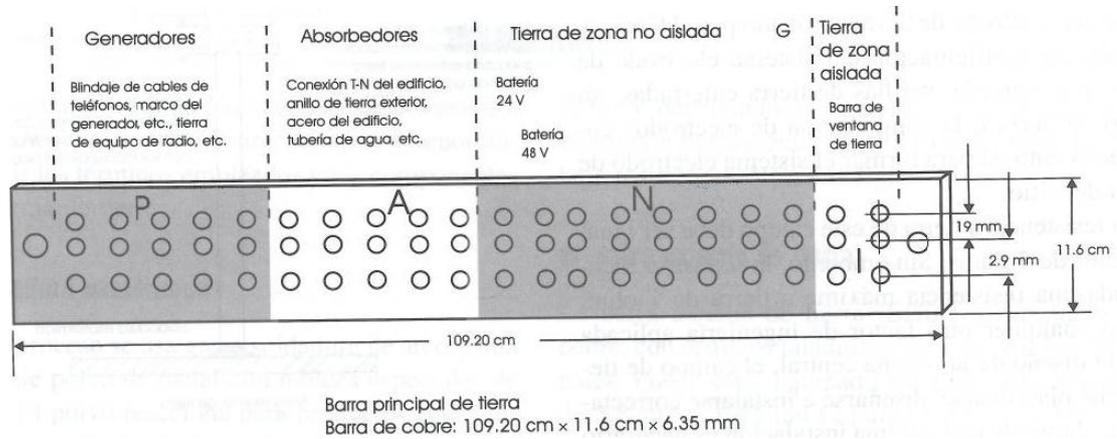
### **3.2.3. Barra principal de tierra.**

La barra principal de tierra (MGB) es el centro de estudio del sistema de tierra de la oficina central. Es el punto de conexión común para los dispositivos de protección contra sobrevoltajes transitorios (P) y los absorbedores de carga (A), lo mismo que para las tierras de los equipos de ambas áreas, las no aisladas (N) y las aisladas (I).

La barra MGB es de cobre y está aislada de su soporte y se ubica fuera del área IGZ (zona de tierra aislada), sus dimensiones mínimas son 475 mm (18 pulgadas) de largo por 78 mm (3 pulgadas) de ancho y 6.35 mm (1/4 de pulgada) de espesor. Esta barra normalmente se instala en la pared del sitio, donde pueda proveer la trayectoria o ruta más directa del conductor de campo de tierra de la oficina central.

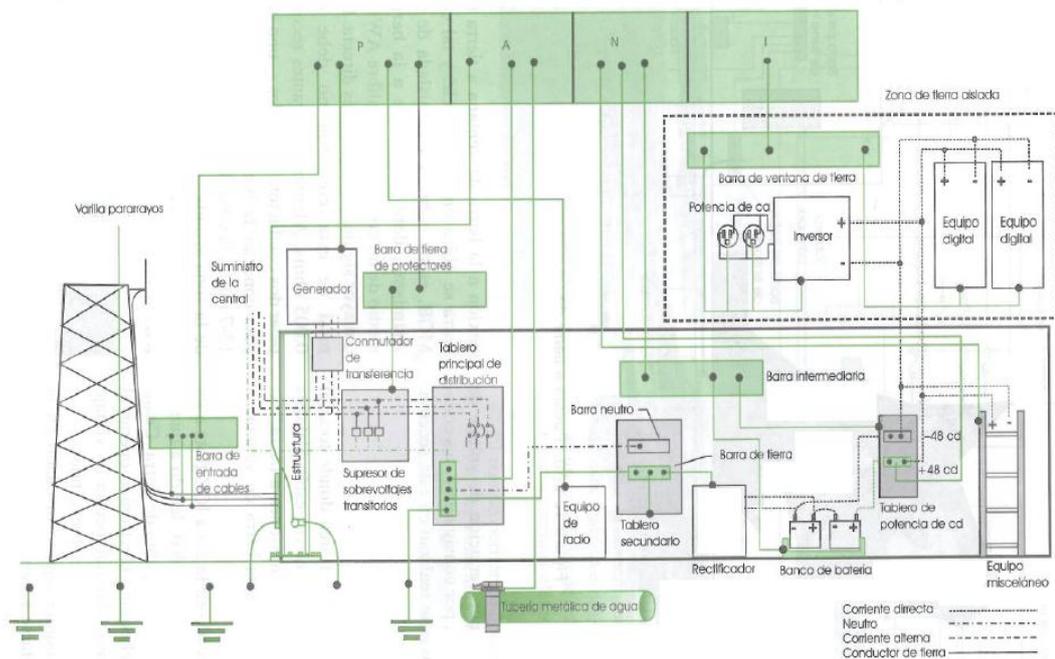
La configuración de la unión a la barra MGB que indica la figura 3.3 proporciona la concentración y disipación de altas sobrecorrientes que se producen fuera del alambrado de la planta, equipo de radio, etc., por medio de las secciones (P) y (A) de la barra.

Ésta mantiene el mismo potencial de voltaje a través de sus secciones (N) y (I). La secuencia de la conexión es muy esencial para la efectividad de la protección total y no debe modificarse.



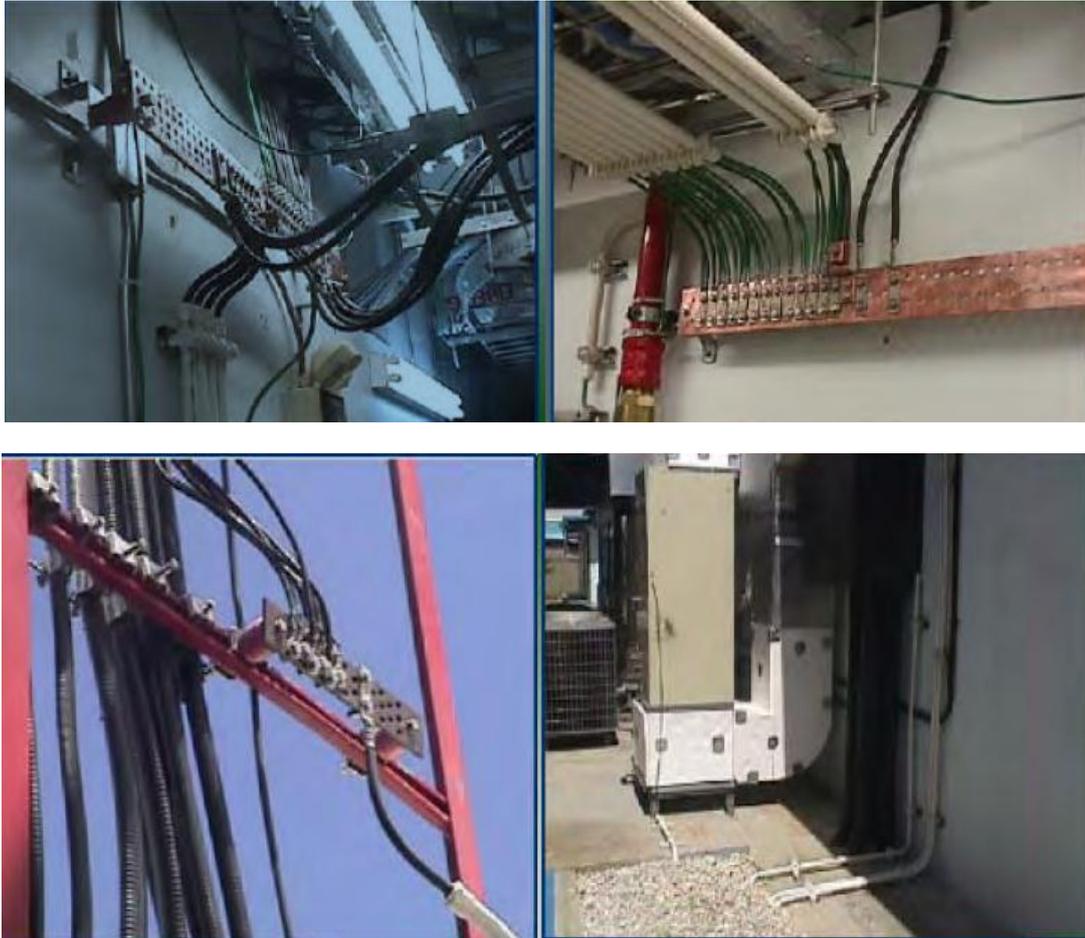
**Fig. 3.3** Barra principal de tierra (MGB)

Fuente: DIAZ. Pablo, "Soluciones Prácticas para Sistemas Eléctricos de Distribución", Editorial Mc Graw Will 2001.



**Fig. 3.4** Sistema de Puesta a Tierra de un Sitio de Telecomunicaciones.

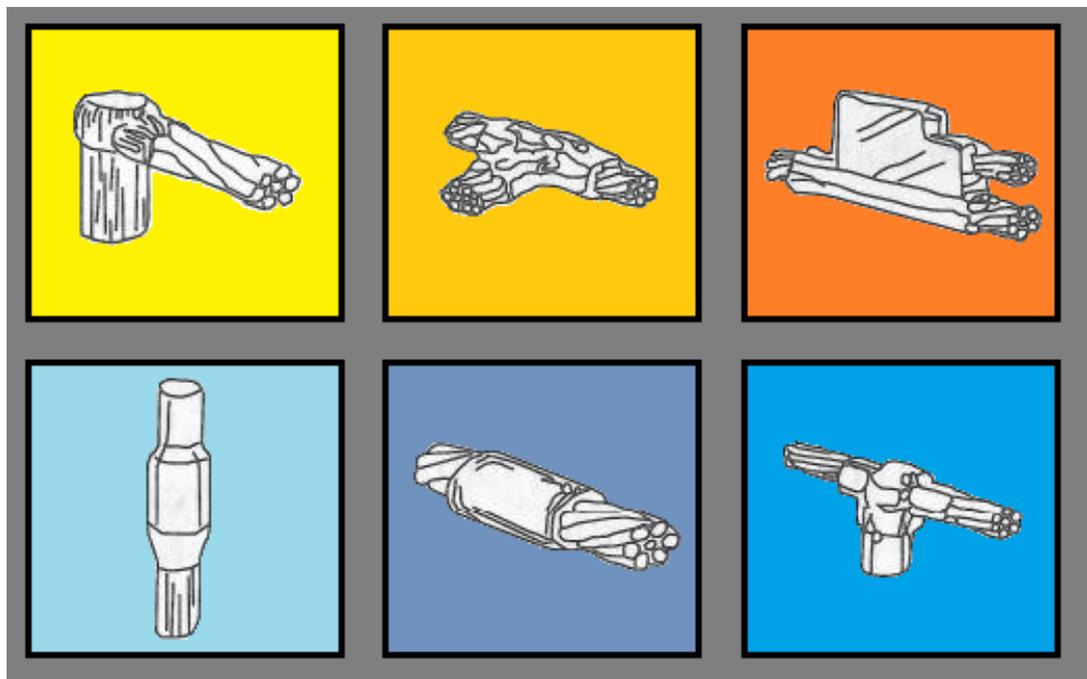
Fuente: DIAZ. Pablo, "Soluciones Prácticas para Sistemas Eléctricos de Distribución", Editorial Mc Graw Will 2001.



**Fig. 3.5** Barra Maestra MGB  
Fuente: MOLINA, Juvencio. “Curso SPT (Sistema de Puesta a Tierra)”

### 3.2.4. Proceso de Soldadura Exotérmica.

El proceso de soldadura consiste en unir molecularmente dos conductores metálicos por medio de una reacción química, esta unión maximiza las propiedades eléctricas, mecánicas y relativas a la corrosión comparada con cualquier unión mecánica. Se utiliza una combinación de pólvora especial granulada con moldes de grafito altamente resistentes a la temperatura, ya que durante el proceso de soldadura la temperatura se eleva hasta los 1300°C. El polvo reacciona para producir cobre fundido, el cual fluye alrededor de los metales soldándolos y derritiéndolos. El resultado es una unión permanente, de alta calidad, robusta y de baja resistencia. Este proceso para unir conductores es el más utilizado para la implementación de mallas de puesta a tierra, por todas las ventajas descritas anteriormente. Ver figura 3.6.



**Fig. 3.6** Tipos de uniones con soldadura exotérmica.

Fuente: Pablo Díaz, "Soluciones Prácticas para Sistemas Eléctricos de Distribución", Editorial Mc Graw Will 2001.

### **3.3. Normativas para el diseño del sistema de puesta a tierra de la compañía movistar.**

A continuación se presenta como se realiza un sistema de puesta a tierra con sus normas por la compañía movistar.

#### **3.3.1. Sistemas de tierra exterior.**

La siguiente información es una guía técnica para la instalación de los diferentes elementos que hacen parte del sistema exterior de puesta a tierra, aplicado a las necesidades de una estación típica en suelo, de TEM.

Los elementos del sistema exterior de puesta a tierra constan de:

- Pararrayos.
- Soporte de Pararrayos.
- Bajante de Pararrayos.
- Procedimiento de aterrizamiento de torre.
- Electrodo de aterrizamiento.
- Barras equipotenciadoras.
- Bajantes de Barras.
- Soportes y escalerillas.

##### **3.3.1.1. Pararrayo.**

El pararrayo debe ser tipo Franklin pentapuntal, consiste en una varilla central de acero inoxidable que cumpla con la norma IEC 61024-1 / 2.1.1, de 15 mm de diámetro y 100 cm de longitud, sobre esta varilla central y a los 20 cm desde la punta, se asegurará firmemente mediante un método mecánico/térmico, un terminal captador múltiple, consistente en una base y 4 puntas de 115 mm de longitud cada una y abiertas equi-radialmente  $50^{\circ}$  con respecto a la vertical. El otro extremo de la varilla se roscará una longitud de 6 cm con rosca fina de 1/2".

### **3.3.1.2. Soporte de pararrayos.**

El pararrayo debe ir sostenido en un mástil o tubo de acero galvanizado de 2" de diámetro y 6 metros de longitud, mediante dos alternativas: 1) instalando el mástil con uno o dos soportes tipo L, ubicados a 20 mm del extremo superior del tubo, donde se roscará y afirmará el pararrayos, o 2) instalando el mástil o tubo con un soporte interior donde se pueda roscar el pararrayos para asegurarlo. El espesor del tubo galvanizado será el suficiente, para que garantice la solidez de la estructura y pueda soportar vientos de hasta 130 km/h, y el esfuerzo térmico y mecánico resultantes de una descarga eléctrica directa sobre el mismo.

Adicionalmente, el soporte del pararrayos se afirmará a la estructura en tres secciones, con herrajes galvanizados, y debe sobresalir de la estructura de la torre al menos 3 metros.

### **3.3.1.3. Bajante de pararrayos.**

Para la bajante o conductor de puesta a tierra del pararrayos, se utilizará conductor desnudo de acero triple galvanizado de alta calidad, con una sección mínima de 70  $mm^2$ , de tal manera que visualmente se determine que el conductor no es de cobre y de igual manera para que en contacto con la torre, se tenga un elemento adicional para la disipación de las descargas atmosféricas.

El cable se fijará al pararrayos mediante 2 sistemas: primero, suelda exotérmica varilla-cable, manteniendo los dos elementos en paralelo, segundo aproximadamente 15 cms debajo de la soldadura exotérmica se fijará el cable a la varilla mediante una mordaza de acero galvanizado o de acero cobrizado.

La bajante del pararrayos se unirá en su tramo final, directamente a un electrodo de aterrizamiento, mediante suelda exotérmica adecuada al calibre tanto del cable, como de la varilla.

#### **3.3.1.4. Procedimiento de Aterrizamiento de torre.**

Los tres o cuatro vértices bases de la torre se aterrizarán desde una altura aproximada de 60 cms, con conductor de acero triple galvanizado de  $70 \text{ mm}^2$  de sección mínima directamente al cable de la malla principal de tierra, con soldadura exotérmica.

Pero el cable de aterrizamiento del vértice opuesto al de la bajante del pararrayo, debe conectarse a un electrodo de aterrizamiento tipo varilla y tener una caja de inspección. Este electrodo se integrará a la malla principal.

Del lado de la torre, el cable de aterrizamiento debe ir soldado con soldadura exotérmica, para lo cual se puede pre-soldar a la torre unos chicotes de acero, uno en cada pata, el cual posterior al proceso de soldadura, deberá ser pintado con pintura anticorrosiva.

Para el caso de monopolo (Base Tubular), se debe aterrizar la base de la estructura desde dos puntos diametralmente opuestos.

#### **3.3.1.5. Electrodo de puesta a tierra.**

Se utilizarán varillas tipo copperweld de una longitud mínima de 1,8 m por 15 mm de diámetro. Pero para el caso de terrenos que presenten capas superficiales intermedias tipo arcilloso o arenoso, de preferencia se utilizarán varillas de 2,4 m de longitud.

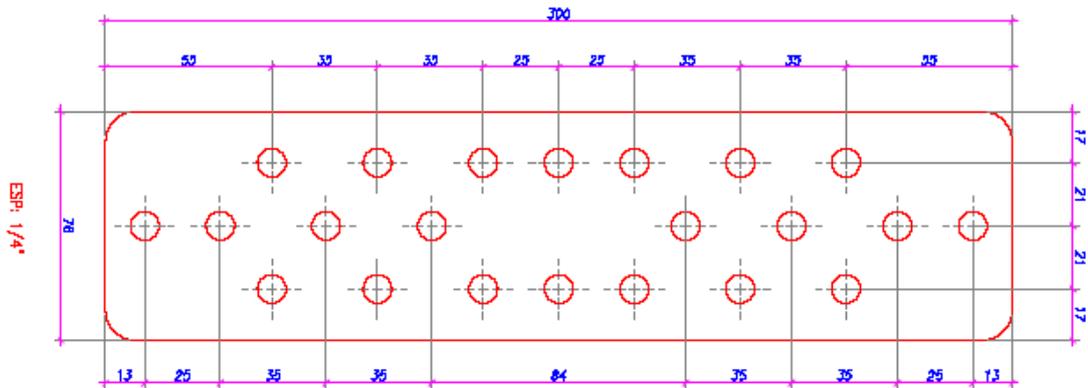
Las varillas de tipo copperweld deben tener un recubrimiento mínimo de 0,254 mm de cobre electrolítico, electro depositado sobre el núcleo de acero al carbono SAE-1010/1020 trefilado según norma UL-467. (Varillas Doble Camada).

#### **3.3.1.6. Barras Equipotencializadoras.**

Con la finalidad de equipotenciar la conexión de los elementos activos o pasivos montados en la torre, hacia la malla de puesta a tierra, se deben instalar barras exteriores de acero inoxidable AISI 304 de alta calidad, con las siguientes

dimensiones: 30 cm de largo por 7,5 cm de ancho y 1/4" de espesor. Cada barra debe tener 20 agujeros de 10 mm de diámetro + 0.2 mm para puntos de conexión.

La imagen siguiente muestra el modelo descrito de la barra:



**Fig. 3.7** Barra equipotenciadora.  
Fuente: Los Autores.

Las barras exteriores se instalarán sobre la estructura de la torre, pero aislada de ésta mediante conectores de aislamiento de al menos 5cm de alto y en una ubicación tal que el cableado desde los kits de aterrizaje de los alimentadores, antenas o equipos ODU, que se conectarán a la barra, no se cruce con escalerillas o soportes portacable, ni líneas de vida, ni escalerillas para hombre, ni quitamiedos.

La primera barra se instalará entre 1,5 y 2 m por debajo del filo inferior del soporte de antena celular, y para el caso que la primera antena sea de microonda, la barra se instalará 1 m por debajo del mástil de la antena. La segunda barra se instalará entre 2 y 3 metros debajo del nivel de las antenas de Microonda, y posteriores barras se instalarán aproximadamente cada 20 metros hacia abajo. La última barra se instalará a una altura de 2 m por encima del nivel de la escalerilla horizontal portacables que ingresa a los racks de equipos.

Para el caso de monopolos (bases tubulares), se instalarán 2 barras superiores (para antenas celulares) diametralmente opuestas con las características y alturas indicadas en el párrafo anterior, y una barra de 30 cms debajo de cada orificio de ingreso de cables hacia el interior del monopolo (base tubular).

### **3.3.1.7. Bajantes de barras.**

Las barras se interconectarán entre sí (de barra a barra) mediante conductor de acero triple galvanizado de alta calidad, de  $70 \text{ mm}^2$  de sección transversal mínima con chaqueta aislante, con terminales de doble ojo y pernos galvanizados especiales para intemperie, pero la última barra se debe conectar directamente a un electrodo de aterrizamiento hacia la malla principal de la estación, mediante conductor de acero triple galvanizado de  $70 \text{ mm}^2$  de sección transversal mínima con chaqueta aislante.

La conexión se hará mediante suelda exotérmica adecuada al calibre tanto del cable, como de la varilla. Este electrodo de aterrizamiento de barras debe tener un pozo de revisión y deberá integrarse al sistema anular de tierra de la torre.

### **3.3.1.8. Soportes y escalerillas.**

Los elementos como soportes y escalerillas anexos a la torre, deberán aterrizarse a través de una conexión con cable de cobre con aislamiento color verde #6 AWG entre un punto del elemento y la barra exterior más cercana. La unión entre el cable y el elemento se debe realizar mediante unión perno galvanizado – terminal de doble ojo.

Los puentes entre tramos de escalerillas, con cable #6 AWG color verde y terminales doble ojo de acero galvanizado.

### **3.3.1.9. Tablero T-GSM.**

La barra de tierras del tablero T-GSM se conecta directamente a la malla principal en el electrodo que recibe la acometida a tierra de la barra de equipos, y donde hay un pozo de revisión, con cable color verde #4 AWG, en tubería metálica flexible (funda sellada BX) de 1/2" de diámetro y soldadura exotérmica.

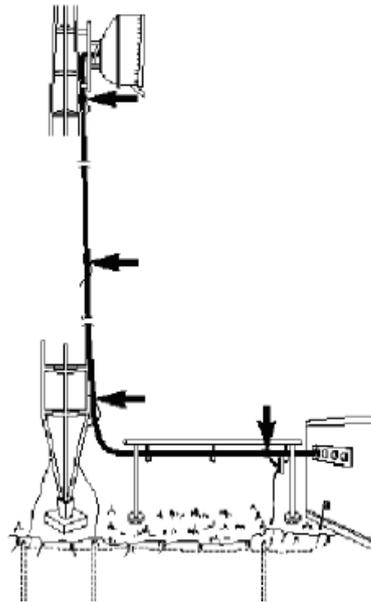
El conjunto TVSS del T-GSM se conecta directamente a la barra de tierras del T-GSM con cable #4 AWG color verde.

### 3.3.2. Aterrizamiento de los equipos de RF, antenas y líneas de transmisión.

Todos los equipos colocados en una torre o soporte deben estar correctamente conectados al sistema de puesta a tierra, esta conexión debe realizarse a la barra de tierra que se encuentre más cerca por debajo del equipo.

No están permitidas las conexiones al sistema de puesta a tierra que tengan recorridos verticales ascendentes. En caso que las barras no existieran en la instalación, las mismas deberían ser colocadas y conectadas al sistema de aterrizamiento.

La conexión debe hacerse utilizando un conductor resistente a la intemperie (THW o THHW), de calibre # 6 AWG y chaqueta color verde usando terminales de doble ojo para la conexión en la barra. Las líneas de transmisión deberán estar aterrizadas con sus correspondientes kits de aterrizamiento y conectadas en todas las barras de tierra que existan durante su recorrido.



**Fig. 3.8** Puntos de conexiones de aterrizamiento para las líneas de transmisión.  
Fuente: “Sistema de Puesta a Tierra para los Sistemas de Telecomunicaciones”

### **3.3.3. Aterrizamiento en interiores.**

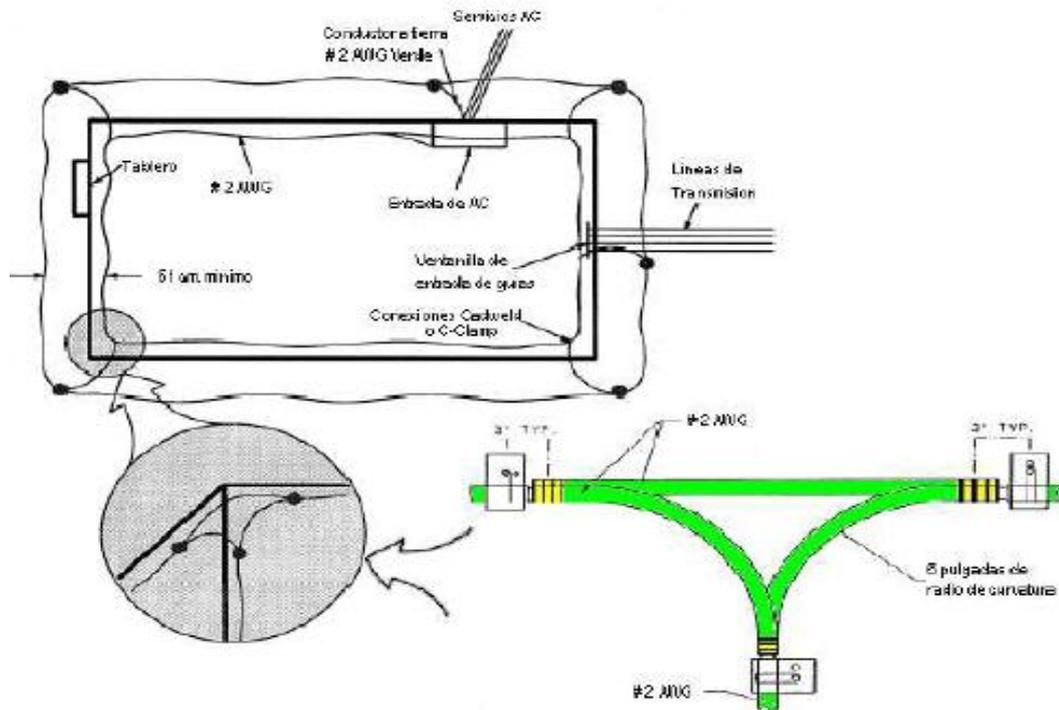
El sistema de aterrizamiento interno debe estar conectado al menos en un punto al anillo exterior. La conexión debe realizarse con un conductor de calibre #2 AWG o mayor que tenga un a chaqueta de color verde. La penetración a las paredes deberán realizarse con un ángulo de  $45^{\circ}$  para evitar curvaturas bruscas en el recorrido del conductor.

#### **3.3.3.1. Anillo de aterrizamiento.**

El objetivo principal del anillo es proporcionar una trayectoria de aterrizamiento para periféricos o aparatos de soporte dentro del sistema de comunicaciones o áreas de equipos.

Está formado por un conductor de calibre #2 AWG o mayor con chaqueta de color verde, y debe instalarse de tal manera que rodee el interior del shelter (cuarto de equipos) o caseta donde estén instalados los equipos. Ambas puntas del anillo deben conectarse a la ventana o barra de aterrizamiento interna. Este anillo debe estar instalado por lo menos a 2,43 metros (8 pies.) desde el piso y 15,24 cm (6") debajo del techo.

Adicionalmente, debe realizarse una conexión a tierra en cada esquina de la instalación, la cual debe estar conectada al anillo exterior de la instalación mediante un conductor de calibre #2 AWG o mayor el cual debe traspasar las paredes con un ángulo de  $45^{\circ}$ . El anillo debe estar sujetado a las paredes de la instalación cada 61 cm (24") y, cuando sea necesario, en los puntos de cambio de dirección (esquinas).



**Fig. 3.9** Anillo de aterrizamiento interno.

Fuente: “*Sistema de Puesta a Tierra para los Sistemas de Telecomunicaciones*”

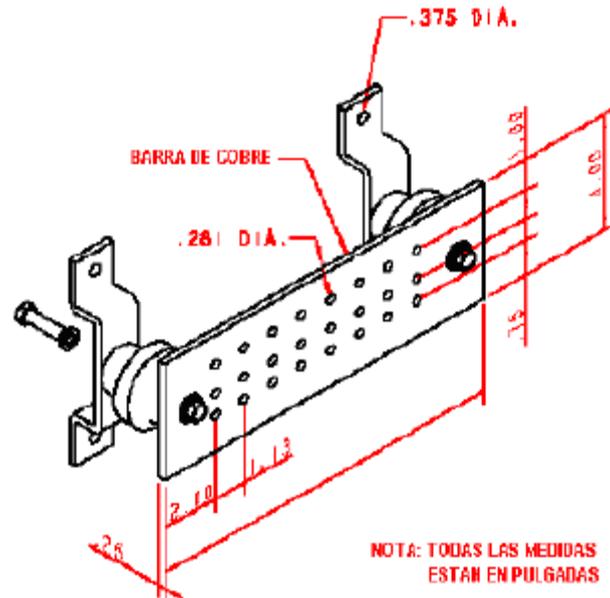
Al anillo deben conectarse todas las piezas metálicas de equipos secundarios que se encuentren en el interior de la instalación, como son: puertas y marcos metálicos, tableros de breakers, soportes de aires acondicionados, etc. Todas estas conexiones deben hacerse con un conductor calibre #6 AWG, e igualmente con chaqueta de color verde.

### 3.3.3.2. Barra de aterrizamiento.

La barra de aterrizamiento es el área donde terminan todas las conexiones a tierra provenientes de los equipos, guías, etc. Físicamente es una barra de cobre con orificios que tengan una configuración que permita resistir conexiones del tipo doble ojo.

En interiores, esta barra deberá estar colocada en un lugar de fácil acceso para los conductores y donde pueda conectarse a un punto del anillo externo con un conductor de calibre #2 AWG o mayor.

Las medidas de la barra deben ser las siguientes:



**Fig. 3.10** Barra de aterrizamiento (MGB) interna.

Fuente: “*Sistema de Puesta a Tierra para los Sistemas de Telecomunicaciones*”

El cableado hacia ésta barra debe ser el más corto posible evitando curvaturas agudas e innecesarias.

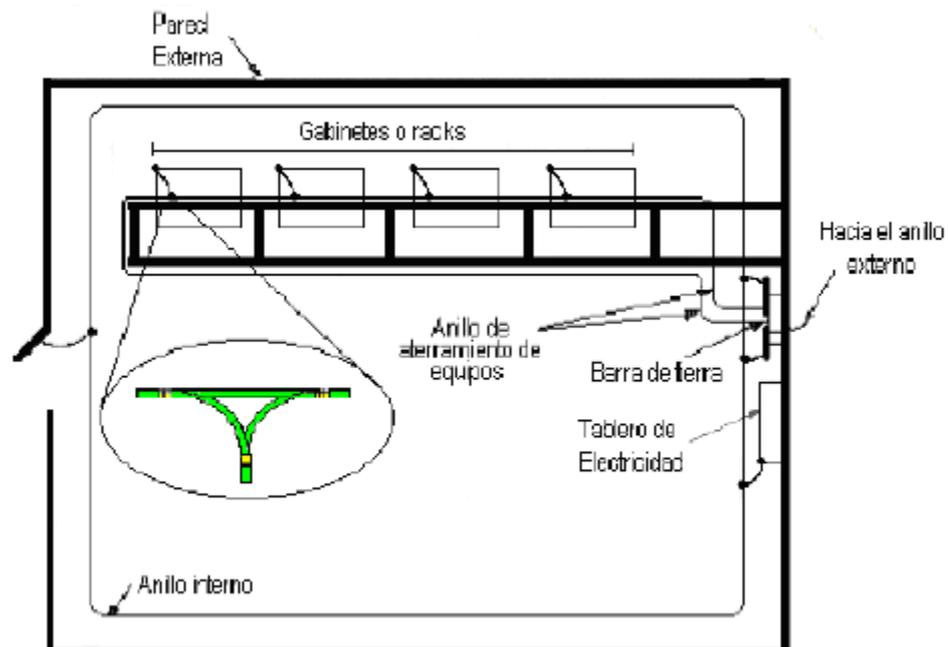
### 3.3.3.3. Aterrizamiento de los racks.

Todos los racks o bastidores que se encuentren en una instalación deben estar aislados del suelo y tendrán una barra de cobre la cual servirá de referencia a todos los equipos que se encuentren en ese rack. Esta barra deberá estar aislada por materiales no conductores del rack que la resiste, y estarán conectadas a la barra principal de aterrizamiento mediante cualquiera de los siguientes sistemas:

Un anillo de aterrizamiento para los equipos, el cual deberá estar instalado en la parte inferior de los rieles del sistema de escalerillas mediante el uso de enganches adecuados (ganchos diseñados para éste fin) separados aproximadamente cada 50 cm; este anillo será de un conductor de cobre de calibre no menor al #2 AWG color verde, donde ambos extremos deben estar conectados a la barra de tierra principal.

La conexión al anillo debe hacerse en dos puntos formando una V, utilizando un conductor de cobre de calibre # 6 AWG. La unión de los cables que conectan la barra

de tierra de los racks con el anillo de tierra para los equipos debe realizarse por medio de conectores de presión tipo C-Tab.



**Fig. 3.11** Anillo de tierra para los equipos.

Fuente: “Sistema de Puesta a Tierra para los Sistemas de Telecomunicaciones”

#### 3.3.3.4. Aterrizamiento de equipos (Ubicados en racks).

Las partes metálicas exhibidas de equipos fijos, no destinadas a conducir corriente y que tengan posibilidades de entrar en contacto con partes activas bajo tensión en condiciones anormales, serán puestas a tierra cuando exista cualquiera de las condiciones especificadas a continuación:

- Cuando estén dentro de una distancia de 2,40 metros verticalmente o de 1,50 metros horizontalmente de la tierra o de objetos metálicos puestas a tierra y expuestos a contacto de personas.
- Cuando estén instalados en lugares mojados o húmedos y no estén aislados, como por ejemplo en torres.
- Cuando estén en contacto eléctrico con metales.
- Cuando los equipos estén alimentados por cables colocados en canalizaciones metálicas u otro método de cableado que proporcionan puesta a tierra de equipos.

- Cuando se cumpla alguna de las condiciones anteriores, los equipos deberán conectarse a tierra. Esta conexión debe realizarse a la barra de tierra del rack que sostiene al equipo mediante un conductor de chaqueta color verde y un calibre sugerido por el fabricante del equipo, en caso de que este no sea especificado debe escogerse uno de acuerdo a la capacidad de corriente del equipo.

Para aterrizar los equipos no se permite utilizar barras de tierras de racks adyacentes. Si el rack donde está ubicado el equipo no contiene una barra de tierra debe colocarse una la cual esté conectada al sistema de aterrizamiento.

### **3.4. Puesta a tierra de equipos de fuerza.**

#### **3.4.1. Transformador de distribución.**

a) Para el caso de instalación del transformador de distribución a cargo de TEM:

La bajante de puesta a tierra desde los dispositivos DPS del transformador y de la estructura misma del transformador, será con conductor de cobre calibre 1/0 AWG, y se debe conectar directamente a un electrodo de aterrizamiento, mediante suelda exotérmica adecuada al calibre tanto del cable como de la varilla.

b) Para el caso de instalación de transformador de distribución a cargo de la Empresa Eléctrica:

Los transformadores instalados por las Empresas Eléctricas que tengan una conexión a una varilla copperweld con conector mecánico, el mismo debe ser reemplazado por suelda exotérmica más el conector mecánico.

#### **3.4.2. Generador y tableros.**

El generador, los tableros (TDX, TTA y TDP), la estructura del tanque de combustible y la caja de extractor de aire que se encuentran en el interior del cuarto de generador serán conectados con cable de cobre AWG # 6 aislado color verde

directamente a la barra de tierras del cuarto de generador (BTG), los terminales a usar deberán ser de cobre estañado de preferencia doble ojo.

La barra equipotencial del cuarto de generador, se instalará a 40 cm de altura desde el suelo lo más cercano posible al tablero de transferencia automática (TTA), la barra se conectará mediante suelda exotérmica directamente al anillo principal con conductor de cobre 1/0 AWG en tubería metálica flexible (funda sellada BX) de 1/2" de diámetro enterrada para el tramo outdoor.

### **3.4.3. Tablero de medidores.**

El tablero de medidores en donde se considera el inicio de la acometida de baja tensión hacia la estación, se encuentra el conductor neutro, el mismo que debe ser conectado a tierra, para tal propósito se debe instalar una caja de paso al interior de la estación la cual contiene una barra de cobre de 10 x 6 x 0.5 cms, a la que llega el neutro del medidor, y luego se direcciona por un lado hacia la malla principal de la estación a través de una varilla copperweld, y por otro lado hacia la acometida de la estación junto con los otros cables de fase.

La conexión se la realizará con conductor de cobre desnudo calibre 1/0 AWG. El conductor deberá ir dentro de tubería metálica flexible (funda sellada BX) de 1/2" de diámetro. El recorrido por el suelo de la tubería que contiene el conductor deberá ser enterrado hasta llegar a la varilla copperweld, la cual forma parte de la malla principal de tierra de la estación.

## CAPÍTULO IV

### **4. Diseño de la Malla Puesta a Tierra de la Estación Repetidora el Alisal**

#### **4.1. Medición de la Resistividad del Terreno con el Fluke 1625 Kit por el Método de Wenner en la estación El Alisal.**

La eficacia de los sistemas de conexión a tierra deben comprobarse usando instrumentos de prueba de toma de tierra como el 1625, que verifica la eficacia de este tipo de conexiones. El 1625 proporciona la solución perfecta, combinando la tecnología más avanzada en un instrumento compacto, absolutamente resistente y muy fácil de usar.

Además de realizar las mediciones de resistencia de tierra estándar de 3 y 4 polos, un innovador proceso mide de forma exacta las resistencias de cada electrodo de masa y los sistemas conectados a masa de forma individual y combinada sin desconectar ningún electrodo paralelo. Una aplicación específica de esta función es la posibilidad de realizar una medición rápida y exacta de las conexiones a tierra de las torres de energía eléctrica.

La resistencia de tierra y la resistividad del terreno deben medirse siempre al:

- Diseñar sistemas de puesta a tierra.
- Instalar un nuevo sistema de puesta a tierra y equipos eléctricos o electrónicos.
- Comprobar periódicamente sistemas de protección contra rayos y de puesta a tierra.
- Instalar equipos eléctricos de gran dimensión, como transformadores, generadores, conmutadores de alta tensión, maquinaria, etc.



**Fluke 1625**

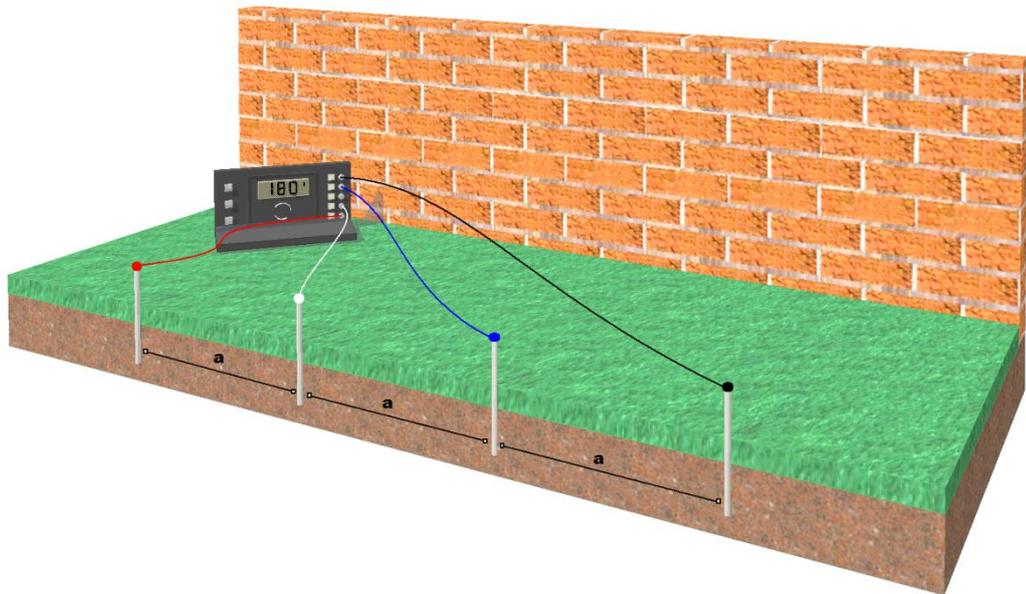
**Fig. 4.1.** Medidor de Resistencia de Tierra  
Fuente: [www.fluke.com](http://www.fluke.com)

#### **4.1.1. Método de Wenner (Aplicación del Proyecto)**

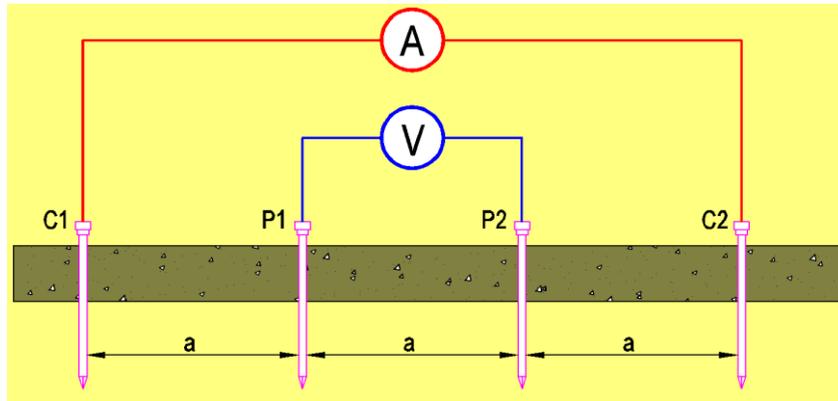
En 1915, el Dr. Frank Wenner del *U.S. Bureau of Standards* desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre.

Con objeto de medir la resistividad del terreno se hace necesario enterrar los 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración la cual no debe exceder la relación “ $a/20$ ” y es generalmente limitada a 0,3 metros, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón  $V/I$  es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.



(a)



(b)

**Fig. 4.2.** Configuración de Wenner  
Fuente: Los Autores

En la figura se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Si la distancia enterrada (B) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A). O sea  $A > 20B$ , la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot r$$

Donde:

$\rho$ : Resistividad aparente del terreno en Ohmios-m

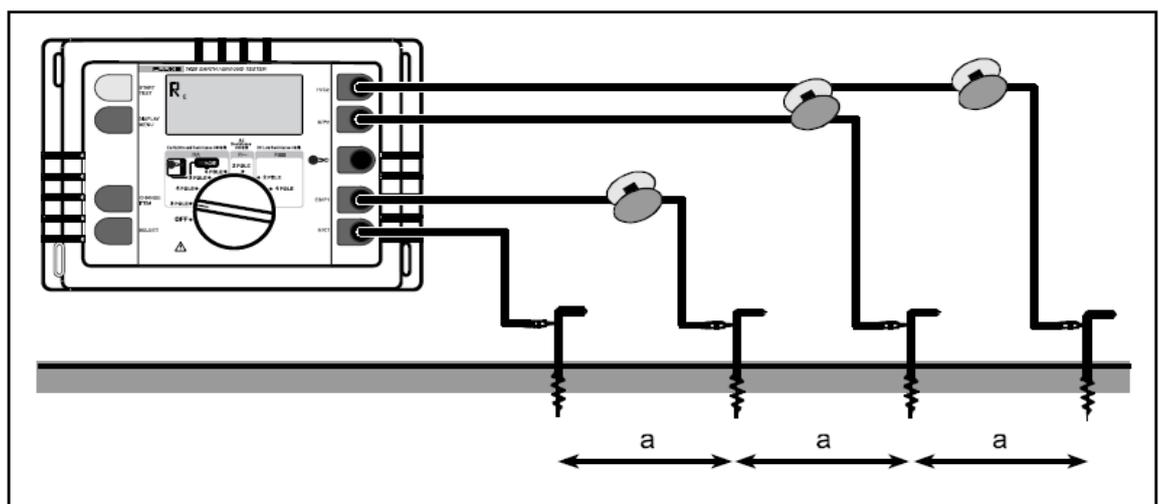
a: Espaciamiento en m de electrodos de prueba

R: Resistencia aparente del terreno

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

#### 4.1.2. Método de Wenner (Procedimiento de Medición).

El procedimiento de medición aplicado más abajo usa el método desarrollado por Wenner (V.Wenner, A method of measuring earth resistivity (Un método para la medición de la resistividad de la masa; Bull. National Bureau of Standards, Bulletin 12 (4), Paper 258, S 478-496; 1915/16).



**Fig. 4.3.** Medición de la Resistividad del Terreno  
Fuente: Manual Fluke 1625 Kit

1.- Cuatro puntas de masa de la misma longitud se colocan en el terreno, alineados y separados a distancias iguales entre sí. Las puntas de masa no deben enterrarse más profundamente que un máximo de 1/3 de “a”.

2.- Gire el selector giratorio central hasta la posición “R<sub>E</sub> 4 pole”. El cableado del instrumento debe realizarse de acuerdo con la imagen y las advertencias que aparezcan en la pantalla. Un destello de los símbolos de conexión  señala una conexión incorrecta o incompleta del cable que se está midiendo.

3.- Presiones el botón “START TEST”.

4.- Lea el valor medido de R<sub>E</sub>.

5.-A partir del valor de resistencia R<sub>E</sub>, se calcula la resistividad del terreno según la ecuación:

$$\rho_E = 2\pi \cdot a \cdot R_E$$

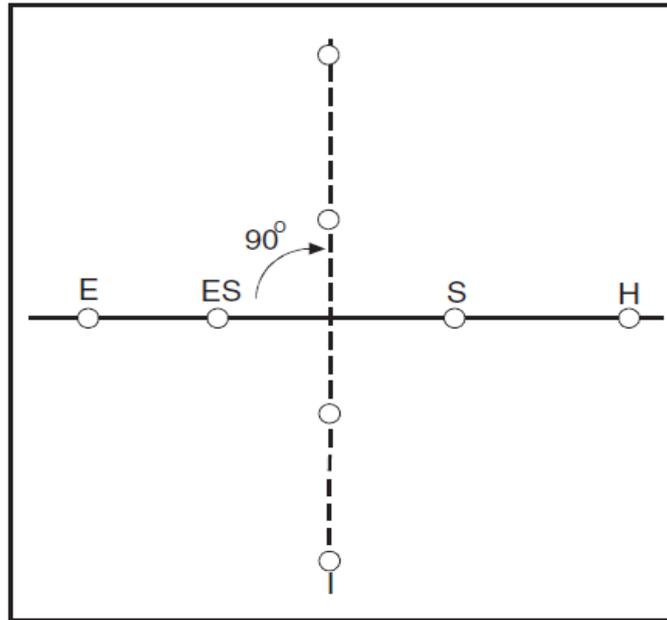
$\rho_E$  ..... valor medio de resistividad del terreno ( $\Omega\text{m}$ )

$R_E$  ..... resistencia medida ( $\Omega$ )

a ..... distancia de sonda (m)

El método de medición según Wenner determina la resistividad del terreno a una profundidad de, aproximadamente, la distancia “a” entre dos puntas de masa. Si se aumenta “a”, se pueden medir y comprobar la homogeneidad de estratos más profundos. Cambiando “a” varias veces, se puede medir un perfil a partir del cual es posible determinar un electrodo de masa adecuado.

Puesto que los resultados de la medición a veces están distorsionados y dañados por partes invisibles de metal, agua no visible, etc., siempre es aconsejable realizar una segunda medición, en la que el eje de las puntas esté girado un ángulo de 90°.



**Fig. 4.4.** Variación de Posición en los Electrodo  
Fuente: Manual Fluke 1625 Kit

6.-Resultados obtenidos de la medición:

Distancia "a" (m)	DIRECCIÓN A		DIRECCIÓN B		RESISTIVIDAD PROMEDIO
	Medición R ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ - m)	Medición R ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ - m)	$\rho$ ( $\Omega$ -m)
1	28,94	181,835 808	28,3	177,81 456	179,825184
1,5	18,55	174,830 04	18,45	173,88 756	174,3588
2	13,19	165,750 81	13,22	166,12 780	165,93930
2,5	9,46	148,597 68	9,66	151,73 928	150,16848
3	6,37	120,071 952	6,59	124,21 886	122,14540
3,5	4,13	90,8236 56	4,24	93,242 68	92,03316
4	2,51	63,0833 28	2,13	53,532 86	58,30809
4,5	1,756	49,6498 46	1,62	45,804 52	47,72718
5	1,12	35,1859 2	1,156	36,316 896	35,751408

**Tabla 4.1.** Relación entre distancia, resistencia y resistividad  
Fuente: Los Autores

## 4.2. Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra

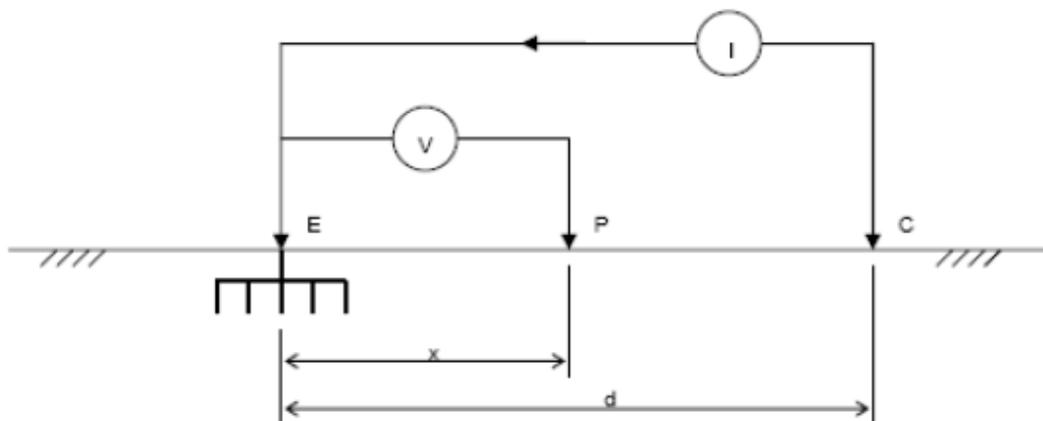
Uno de los métodos más utilizados para la medición de la resistencia puesta a tierra es el de caída de potencial, también conocido como el método del 62 % o de los tres puntos.

### 4.2.1. Método de Caída de Potencial

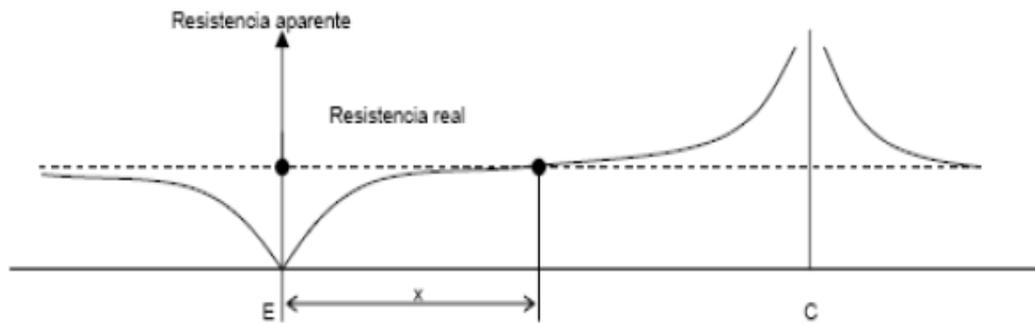
Consiste en hacer circular una corriente eléctrica a través del sistema de tierra objeto de estudio, midiendo al mismo tiempo los valores de caída de potencial que al paso de esta corriente provoca entre el sistema y un electrodo de potencial utilizado como referencia para la medición. Además del electrodo de potencial, el circuito está constituido por un electrodo de corriente cuya finalidad es cerrar el circuito que permite circular la corriente por el sistema a medir.

La ubicación del electrodo de corriente (C), estará en función de las dimensiones del sistema de puesta a tierra a medir, de forma tal que se considere en el infinito. Un criterio empírico supone una distancia mínima de partida igual a 5 veces la diagonal mayor del sistema a medir.

La distancia del electrodo de potencial estará en función de la ubicación del electrodo de corriente. Si se tiene en cuenta la interacción mutua, sistema de puesta a tierra-electrodo de potencial-electrodo de corriente, su ubicación más factible desde el punto de vista teórico es 0,62 la distancia del electrodo de corriente, de allí que se llame al método también como del 62%.



(a) Esquema de medición por el método de caída de potencial



(b) Curva de resistencia aparente para las diferentes posiciones del electrodo de potencial

**Fig. 4.5.** Método de Caída de Potencial

Fuente: Manual Extech Kit 382152

Si realizamos mediciones, ubicando el electrodo de potencial en diferentes posiciones entre el sistema de puesta a tierra y el electrodo de corriente, obtendremos una curva de potencial o resistencia aparente. La zona estable de la curva (como indica (b) de la figura 4.5) nos indica la resistencia real del sistema a medir.

Esta zona estable debe cumplir con la condición de que tres puntos contiguos de la misma no presenten una diferencia mayor de un 10%.

### 4.3. Cálculo Teórico de la Resistividad por el Modelo de Suelo a Dos Capas

Un modelo de suelo de dos capas puede representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión  $K$ , definido como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

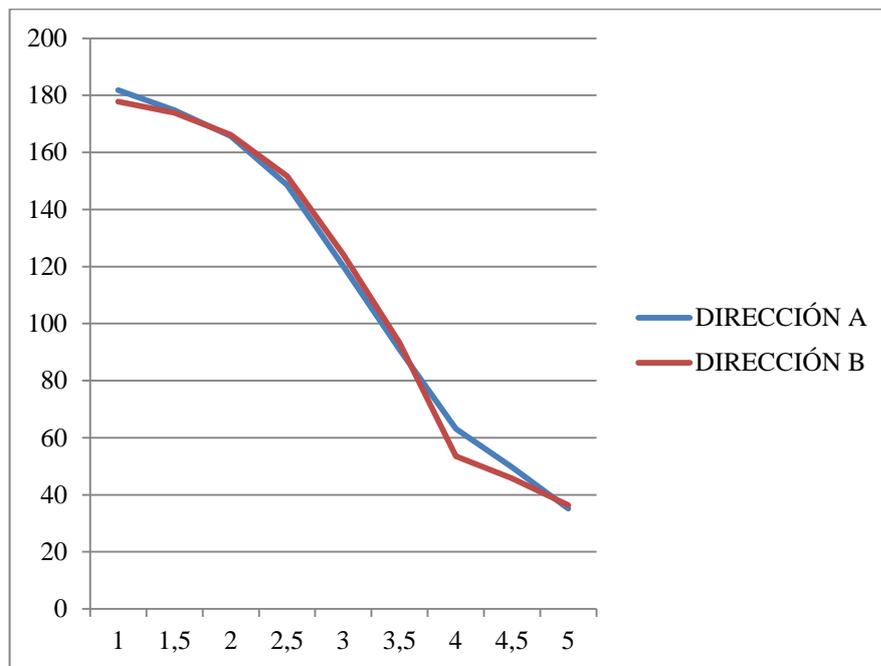
Donde:

$\rho_1 \rightarrow$  Resistividad de la capa superior en  $\Omega\cdot\text{m}$ .

$\rho_2 \rightarrow$  Resistividad de la capa inferior en  $\Omega\cdot\text{m}$ .

Se emplean los datos de medida de la Tabla 4.1 para aplicar el método de Sunde como se muestra a continuación:

a) Se grafican los datos de la Tabla 4.1 Resistividad ( $\rho$ ) vs Espaciamiento ( $a$ ); la curva se muestra en la gráfica 4.1.

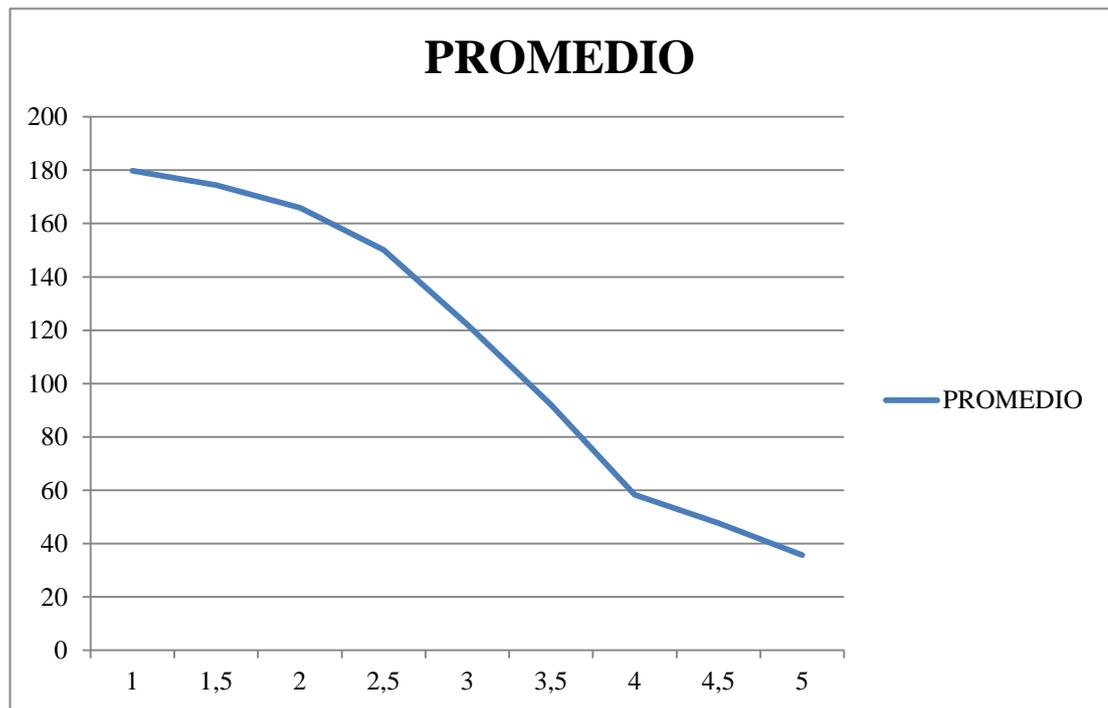


**Gráfica 4.1.** Curva de  $\rho$  vs  $a$  para Aplicación del Método de Sunde  
Fuente: Los Autores

b) Se grafica la Resistividad promedio ( $\rho$ ) de las 2 direcciones vs Espaciamiento ( $a$ ); la curva se muestra en la gráfica 4.2.

**Gráfica 4.2.** Curva de  $\rho$  promedio vs  $a$  para Aplicación del Método de Sunde  
Fuente: Los Autores

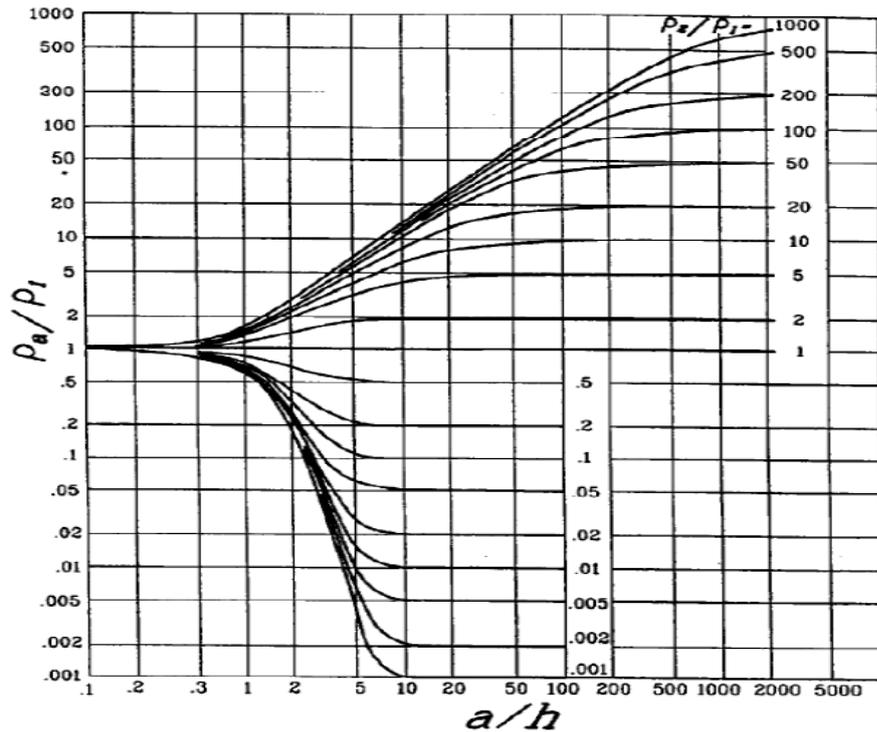
c) De la gráfica 4.2 y por inspección visual se tom



a:

$$\rho_1=179,825 \Omega\text{-m y } \rho_2=35,751 \Omega\text{-m.}$$

d) Se determina  $\rho_2/\rho_1$  y se dibuja esta curva por extrapolación en la Gráfica de Sunde de la gráfica 4.3.



**Gráfica 4.3.**Curvas de Sunde

Fuente: Ing. Juvencio Molina A. "Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistemas de Puesta a Tierra"

e) Se selecciona el valor de  $\rho_a/\rho_1$  sobre el eje "y" dentro de la región pendiente de la curva apropiada  $\rho_2/\rho_1$  de la gráfica de Sunde.

$$\rho_a/\rho_1 = 0,5$$

f) Se lee el espaciamiento de prueba correspondiente  $a/H$  sobre el eje "x".

$$a/H = 1.8$$

g) Se calcula  $\rho_a$  multiplicando el valor obtenido  $\rho_a/\rho_1$  por  $\rho_1$

$$\rho_a = \rho_a/\rho_1 * \rho_1$$

$$\rho_a = (0,5) * (179,825)$$

$$\rho_a = 89,912\Omega - m$$

h) En la gráfica resistividad promedio vs  $a$  de la gráfica 4.2 se lee que para  $\rho_a = 89,912\Omega - m$  el valor de  $a$  es:

$$a = 3,85$$

i) Calculando el valor de la relación  $a/H$ ; se calcula la profundidad "h" de la capa superior, usando la separación de prueba apropiada  $a$ .

$$h = \frac{a}{a/H}$$

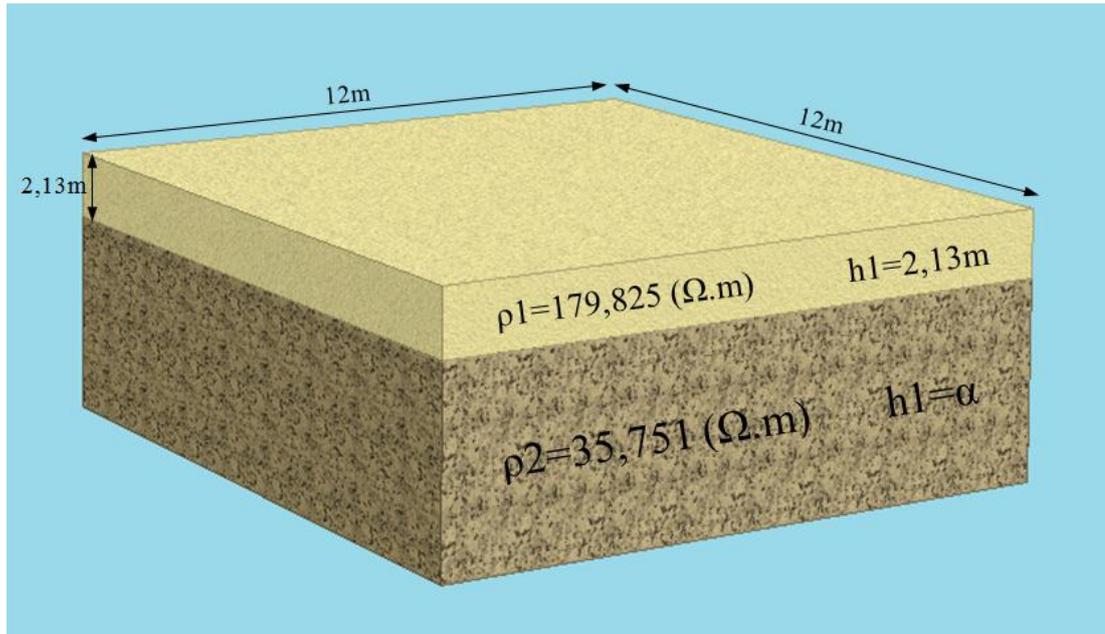
$$h = \frac{3,85}{1,8}$$

$$h = 2,13 \text{ m}$$

Entonces:

$$\rho_1 = 179,825\Omega - m ; h = 2,13 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 35,751\Omega - m ; h = \text{indefinida}$$



**Diseño en 3D 4.1. Modelo de Suelo a Dos Capas (Estación El Alisal)**

Fuente: Los Autores

#### 4.4. Cálculo Teórico de la Corriente de Cortocircuito (Icc)

Para la determinación de la corriente de cortocircuito se conoció las características del transformador. Estas características se muestran en la Tabla 4.2 que se indica a continuación.

VALORES NOMINALES	
Potencia Nominal	10 KVA
Número de Fases	1
Impedancia	1,6%
Voltaje en el Primario	12700 V
Voltaje en el Secundario	240/120 V
Corriente en el Primario	0,78 A
Corriente en el Secundario	41,66 A

**Tabla 4.2. Principales Características del Transformador**

Fuente: Los Autores

$$I_{Sec} = \frac{KVA}{V_{LL}}$$

$$I_{Sec} = \frac{10000}{240} = 41,66[A]$$

$$I_{CC} = I_{Sec} * \frac{100}{Z\%}$$

La corriente de cortocircuito simétrica máxima ( $I_{CCm\acute{a}x}$ ) será:

$$I_{CCm\acute{a}x} = 41,66 * \frac{100}{1,6} = 2603,75[A] \text{ Simétricos}$$

La corriente de cortocircuito asimétrica será:

$$I_{CCasim} = I_{CCm\acute{a}x} * F_{asim}$$

$F_{asim}$  = Factor de asimetría = 1,25 (factor que depende de la relación X/R en el punto de falla).

$$I_{CCasim} = 2603,75 * 1,25 = 3254,68[A] \text{ Asimétricos}$$

#### 4.5. Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra

Como se requiere una resistencia baja de puesta a tierra se optó por diseñar una malla de puesta a tierra que cumpla con la seguridad de protección tanto del personal técnico como de los equipos electrónicos ( $R \leq 5 \Omega$ ).

Tenemos los siguientes datos:

Resistividad del Suelo	= 179,825 ( $\Omega \cdot m$ )
Profundidad de Enterramiento de la Malla	= 0,6 (m)
Dimensiones del Área	=144 ( $m^2$ )
Nivel de Tensión (Primario)	=12.7 (KV)
Corriente Máxima de Falla	=2603,75 (A)
Tiempo Máximo de Falla	= 0,3 (seg)
Resistividad de la Superficie	= 2500 ( $\Omega \cdot m$ )

1) Selección del Conductor ( $A_C$ )

$$A_C = I * \sqrt{\frac{33 * t}{\log \left[ \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right]}}$$

Donde:

$A_C$  → Es el área en mm.

$t$  → Es el tiempo máximo en el cual fluye la corriente de falla

$T_m$  → Es la temperatura máxima en los nodos de la malla (450° con soldadura y 250° con amarre pernada)

$T_a$  → Temperatura ambiente (30°)

$$A_C = 2603,75 * \sqrt{\frac{33 * 0,3}{\log \left[ \frac{450 - 30}{234 + 30} + 1 \right]}} = 12741,02101 \text{ cm}$$

$$lcm = 5 * 10^{-4} mm^2$$

$$A_C = 12741,02101 * 5 * 10^{-4} = 6,37 mm^2$$

Se emplea como calibre mínimo el # 2/0 AWG de cobre de 7 hilos, con el objeto de mejorar la rigidez mecánica de la malla y soportar la corrosión ya que eléctricamente pueden usarse conductores hasta calibre 2 AWG.

## 2) Elección de la Malla

Se tiene cuadrados de 2 metros por lo tanto:

$$A = 12 \text{ m}$$

$$B = 12 \text{ m}$$

$$n = 4$$

$$m = 4$$

$$D = 4 \text{ m}$$

La longitud total del conductor es:

$$L_{cond} = (n * A) + (m * B)$$

$$L_{cond} = (4 * 12) + (4 * 12) = 96 \text{ (m)}$$

## 3) Cálculo del Factor $K_m$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{D^2}{16hd} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3x5x7x \dots x(2n-3)}{4x6x8x \dots (2n-2)} \right]$$

Donde:

$K_m$  = Factor que depende del dimensionamiento de la malla

D = Espaciamiento entre conductores en la malla

d = Diámetro de los conductores

h = Profundidad de enterramiento del conductor

n = Número de conductores transversales paralelos

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{4^2}{16x0,6x0,0093} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left[ \frac{3x5}{4x6} \right]$$

$$K_m = 0,676$$

## 4) Cálculo del Factor $K_i$

$$K_i = 0,656 + 0,172n$$

Donde:

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

n = Número de conductores transversales paralelos

$$K_i = 0,656 + (0,172)(4)$$

$$K_i = 1,344$$

5) Cálculo del factor  $K_S$

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots + \frac{1}{(n-1)D} \right]$$

Donde:

$K_S$  = Factor que.

D = Espaciamiento entre conductores en la malla.

h = Profundidad de enterramiento del conductor.

n = Número de conductores transversales paralelos.

De las condiciones del problema tenemos:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \times 0,60} + \frac{1}{4 + 0,60} + \frac{1}{2 \times 4} + \frac{1}{3 \times 4} \right]$$

$$K_S = 0,297$$

6) Cálculo de las Tensiones de Paso soportable por el cuerpo humano

$$E_{PT} = \frac{116 + 0,7\rho_S}{\sqrt{t}}$$

Donde:

$E_{PT}$  = Voltaje de paso tolerable para el cuerpo humano.

t = Duración máxima de la falla.

$\rho_S$  = Resistividad en la superficie del terreno.

De las condiciones del problema tenemos:

$$E_{PT} = \frac{116 + 0,7 \times 2500}{\sqrt{0,3}}$$

$$E_{PT} = 3406,834 \text{ V}$$

7) Cálculo de las Tensiones de Contacto soportable por el cuerpo humano

$$E_{CT} = \frac{116 + 0,17 \rho_S}{\sqrt{t}}$$

Donde:

$E_{CT}$  = Voltaje de paso tolerable para el cuerpo humano.

$t$  = Duración máxima de la falla.

$\rho_S$  = Resistividad en la superficie del terreno.

De las condiciones del problema tenemos:

$$E_{CT} = \frac{116 + 0,17 \times 2500}{\sqrt{0,3}}$$

$$E_{CT} = 987,726 \text{ V}$$

8) Cálculo del potencial de paso o de malla.

$$V_P = \frac{K_S \times K_i \times \rho \times I_{CC}}{L_T}$$

Donde:

$V_P$  = Voltaje de paso o de malla.

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

$K_S$  = Factor que.

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

$\rho$  = Resistividad del suelo.

$I_{CC}$  = Corriente de cortocircuito en Amp.

De las condiciones del problema tenemos:

$$V_p = \frac{0,297 \times 1,344 \times 179,825 \times 2603,75}{96}$$

$$V_p = 1946,856 V$$

9) Cálculo del potencial de contacto o de malla.

$$V_C = \frac{K_m \times K_i \times \rho \times I_{CC}}{L_T}$$

Donde:

$V_C$  = Voltaje de contacto o de malla.

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

$K_m$  = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

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

$\rho$  = Resistividad del suelo.

$I_{CC}$  = Corriente de cortocircuito en Amp.

De las condiciones del problema tenemos:

$$V_C = \frac{0,676 \times 1,344 \times 179,825 \times 2603,75}{96}$$

$$V_C = 4431,227 V$$

10) Método de Laurent y Nieman

$$R = 0,443\rho \left( \frac{1}{\sqrt{A\gamma}} + \frac{1}{L} \right)$$

Donde:

R = Resistencia en ohmios.

$A\gamma$  = Área de la malla de puesta a tierra en  $m^2$ .

L = Longitud total del conductor en m.

$\rho$  = Resistividad del suelo ( $\Omega$ -m).

$$R = 0,443 \times 179,825 \left( \frac{1}{\sqrt{144}} + \frac{1}{96} \right)$$

$$R = 7,46 \Omega$$

### 11) Método de Sverak

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

Donde:

$R_g$  = Resistencia de malla.

A = Área de la malla de puesta a tierra en  $m^2$ .

$L_T$  = Longitud total del conductor en m.

$\rho$  = Resistividad del suelo ( $\Omega$ -m).

h = Profundidad de la malla en m.

$$R_g = 179,825 \left[ \frac{1}{96} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 144}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,60\sqrt{20/144}} \right) \right]$$

$$R_g = 7,96 \Omega$$

### 12) Método de Schwarz para terreno de 2 capas

En la práctica, es aconsejable enterrar varillas de tierra profundas para alcanzar suelos de menor resistividad.

La resistencia de tierra de la malla está dada por:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{\sqrt{d_C \times h}} \right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

$$K_1 = -0,05 \frac{L_X}{L_Y} + 1,2$$

$$K_2 = 0,1 \frac{L_X}{L_Y} + 4,68$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad del terreno en  $\Omega$ -m.

$L_C$  = Longitud total de todos los conductores de la malla en m.

$h$  = Profundidad de los conductores de la malla en m.

$d_C$  = Diámetro del conductor de la malla en m.

$A$  = Área cubierta por los conductores de la malla de tierra en  $m^2$ .

$L_X, L_Y$  = Largo, ancho de la malla en m.

Cálculo de los coeficientes  $K_1$  y  $K_2$

$$K_1 = -0,05 \frac{L_X}{L_Y} + 1,2$$

$$K_1 = -0,05 \frac{12}{12} + 1,2$$

$$K_1 = 1,15$$

$$K_2 = 0,1 \frac{L_X}{L_Y} + 4,68$$

$$K_2 = 0,1 \frac{12}{12} + 4,68$$

$$K_2 = 4,78$$

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{\sqrt{d_c \times h}} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

$$R_1 = \frac{179,825}{\pi \times 96} \left[ \ln \left( \frac{2 \times 96}{\sqrt{0,0093 \times 0,6}} \right) + \frac{1,15 \times 96}{\sqrt{144}} - 4,78 \right]$$

$$R_1 = 7,317 \Omega$$

La resistencia de las varillas de tierra está dada por:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[ \ln \left( \frac{8L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2K_2 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right]$$

Donde:

$n_r$  = Número de varillas de tierra.

$L_r$  = Longitud de cada varilla en m.

$d_r$  = Diámetro de la varilla en m.

$$R_2 = \frac{179,825}{2 \times 3,1416 \times 15 \times 2,4} \left[ \ln \left( \frac{8 \times 2,4}{0,016} \right) - 1 + \frac{2 \times 4,78 \times 2,4}{\sqrt{144}} - (\sqrt{15} - 1)^2 \right]$$

$$R_2 = 2,002 \Omega$$

La resistencia de tierra mutua entre la malla y las varillas está dado por:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \times L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \times L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \times L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$R_m = \frac{179,825}{\pi \times 96} \left[ \ln \left( \frac{2 \times 96}{2,4} \right) + \frac{1,15 \times 96}{\sqrt{144}} - 4,78 + 1 \right]$$

$$R_m = 5,844 \Omega$$

Schwarz empleó la siguiente ecuación para cambiar la resistencia de puesta a tierra

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

Donde:

$R_1$  = Resistencia de tierra de los conductores de la malla en  $\Omega$ .

$R_2$  = Resistencia de tierra de todas las varillas de tierra en  $\Omega$ .

$R_m$  = Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla  $R_1$  y el grupo de varillas de tierra  $R_2$ , en  $\Omega$ .

$$R_g = \frac{(7,317)(2,002) - (5,844)^2}{(7,317) + (2,002) - 2(5,844)}$$

$$R_g = 8,232 \Omega$$

Al culminar con los cálculos se obtiene un valor de resistencia alto, con relación a lo que requiere el sistema. Para reducir la resistencia de la malla y obtener el valor deseado se necesita aumentar el área o disminuir la resistividad del suelo. Usando la segunda opción ya que el terreno es arenoso nos permitirá que haya una retención de humedad y en temporadas secas aumentaría el valor de la resistencia considerablemente. Para evitar este problema y obtener el valor de la resistencia requerida se procederá a cambiar el terreno. Esta sustitución se lo hará con tierra de cultivo en un radio de 0.5 m y una profundidad de 2 m alrededor de las varillas de puesta a tierra y sobre el conductor de puesta a tierra a una profundidad de 0.6 m. Al realizar este cambio se toma un valor de resistividad de acuerdo a la tabla 2.11 y procedemos a calcular nuevamente el valor de la resistencia de la malla de tierra.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{\sqrt{d_C \times h}} \right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$$

$$R_1 = \frac{100}{\pi \times 96} \left[ \ln \left( \frac{2 \times 96}{\sqrt{0,0093 \times 0,6}} \right) + \frac{1,15 \times 96}{\sqrt{144}} - 4,78 \right]$$

$$R_1 = 4,068 \Omega$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[ \ln \left( \frac{8L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2K_2 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right]$$

$$R_2 = \frac{100}{2 \times 3,1416 \times 15 \times 2,4} \left[ \ln \left( \frac{8 \times 2,4}{0,016} \right) - 1 + \frac{2 \times 4,78 \times 2,4}{\sqrt{144}} - (\sqrt{15} - 1)^2 \right]$$

$$R_2 = 1,113 \Omega$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \times L_C} \left[ \ln \left( \frac{2 \times L_C}{L_r} \right) + \frac{K_1 \times L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$$

$$R_m = \frac{100}{\pi \times 96} \left[ \ln \left( \frac{2 \times 96}{2,4} \right) + \frac{1,15 \times 96}{\sqrt{144}} - 4,78 + 1 \right]$$

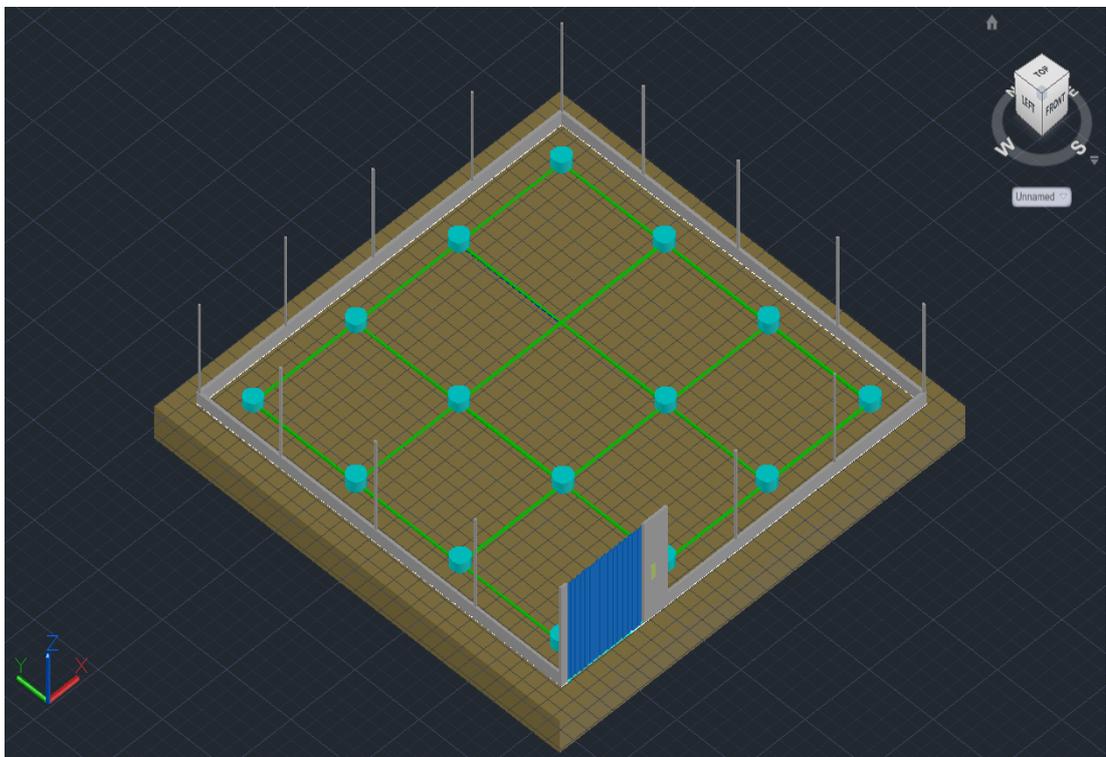
$$R_m = 3,250 \Omega$$

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

$$R_g = \frac{(4,068)(1,113) - (3,250)^2}{(4,068) + (1,113) - 2(3,250)}$$

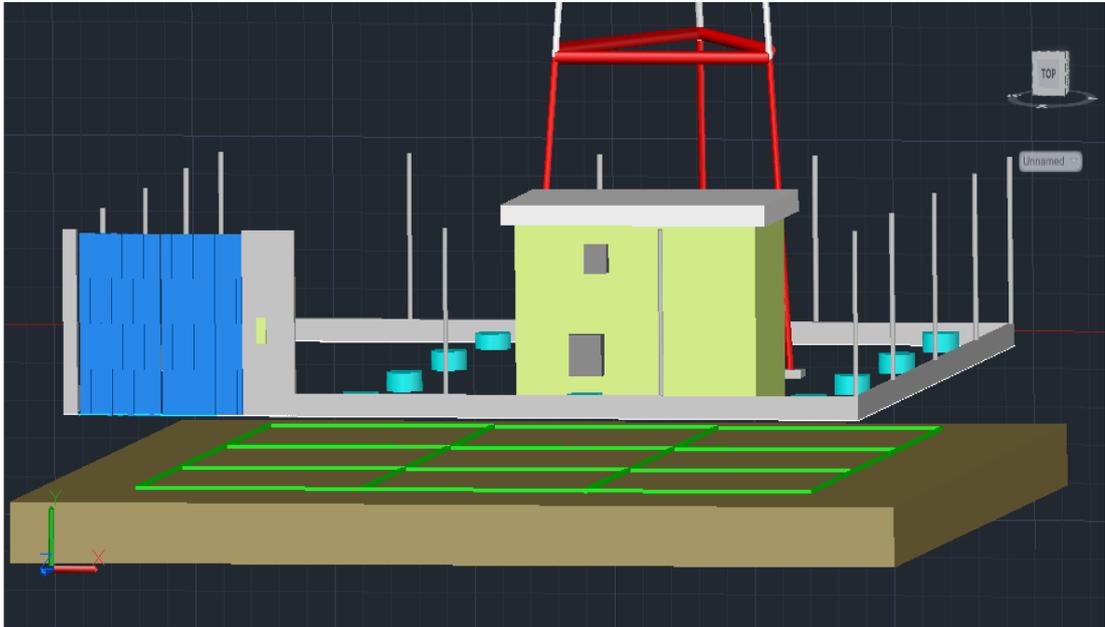
$$R_g = 4,575 \Omega$$

#### 4.6. Diseño de la Malla de Puesta a Tierra



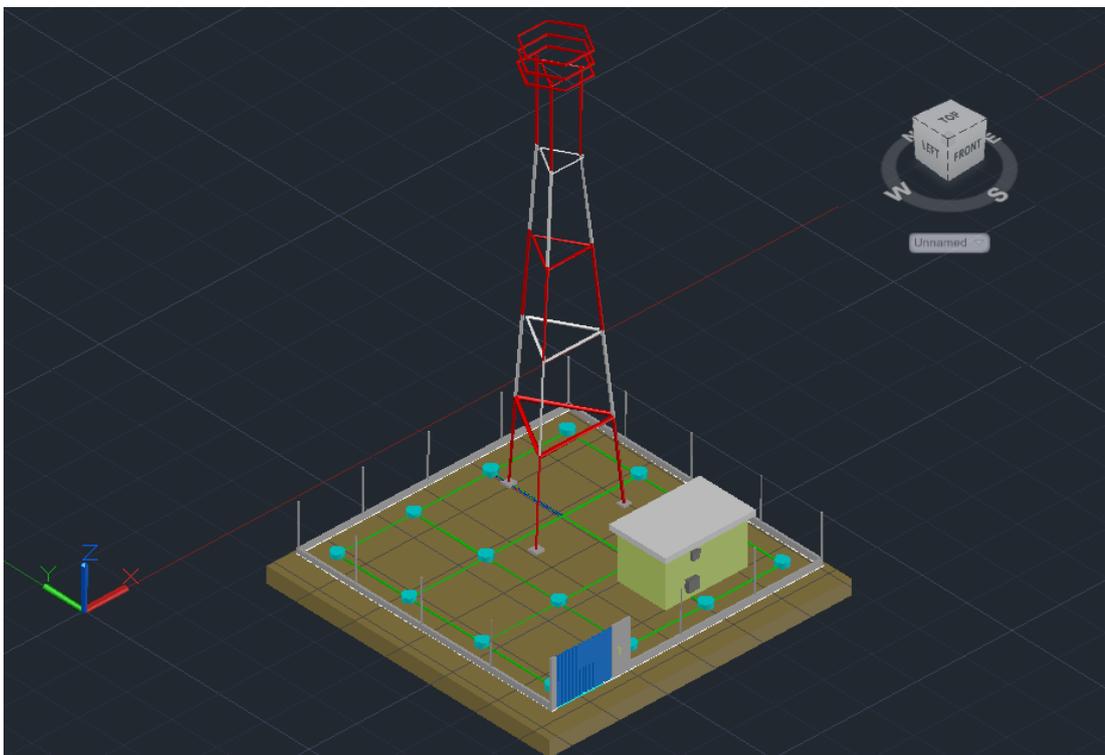
**Diseño en 3D 4.2.** Diseño de la Malla Puesta a Tierra (Estación El Alisal)

Fuente: Los Autores



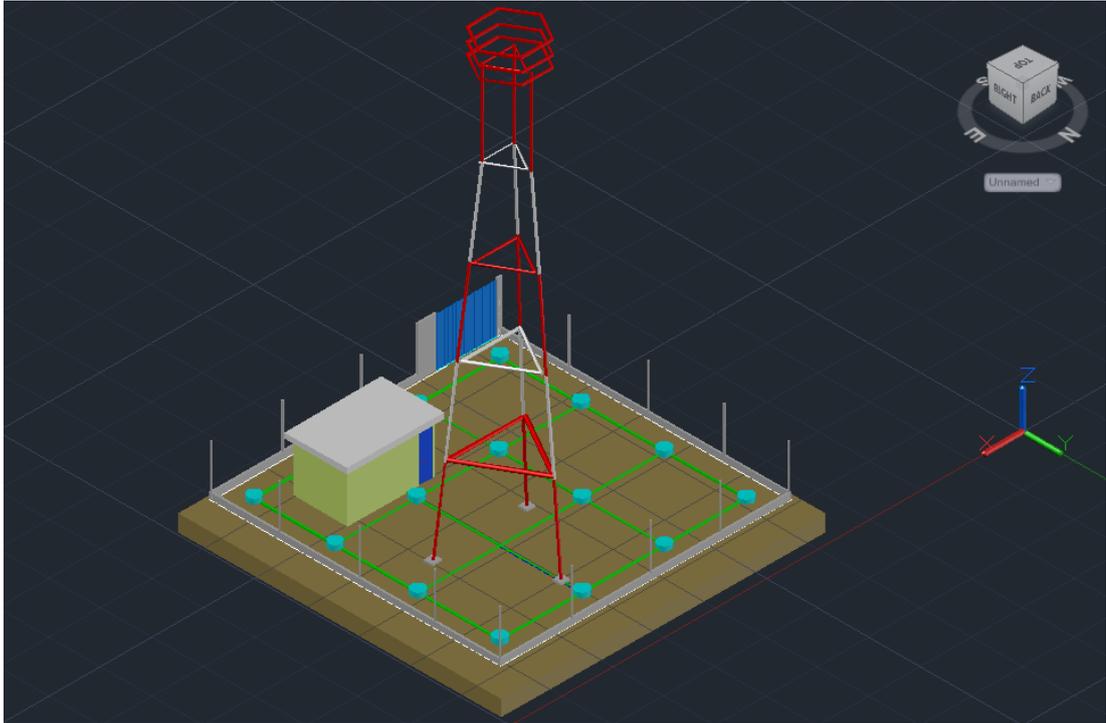
**Diseño en 3D 4.3.** Diseño de la Malla Puesta a Tierra (Estación El Alisal)

Fuente: Los Autores



**Diseño en 3D 4.4.** Diseño de la Malla Puesta a Tierra (Estación El Alisal)

Fuente: Los Autores



**Diseño en 3D 4.5.** Diseño de la Malla Puesta a Tierra (Estación El Alisal)

Fuente: Los Autores

## CONCLUSIONES

- El valor medido de la resistividad del terreno se ve afectado por las condiciones del terreno, del medio ambiente o temperatura y principalmente de la estacionalidad del año.
- Es importante realizar un estudio de la resistividad del terreno ya que de ello depende para obtener la resistencia de puesta a tierra requerida y solicitada por el cliente.
- Antes de emprender el diseño o mejoramiento de la malla de puesta a tierra se realizó un análisis general del área y del cubrimiento de la malla. Un diseño preliminar incluirá la longitud y el calibre del conductor que se extiende alrededor de la periferia del área, más los conductores en paralelo para brindar acceso a los nuevos equipos.
- Las mallas de puesta a tierra requieren de grandes áreas de terreno para obtener valores bajos de resistencia, por lo tanto aumenta el costo de construcción.
- Las tensiones de paso y de contacto obtenidas, son menores que los máximos permisibles, por lo cual el sistema de puesta a tierra garantiza la seguridad de las personas que se encuentren en el patio de la estación según la norma IEEE Std. 80-2000.
- El diseño y cálculo de resistencia realizado para la Estación presenta una resistencia de puesta a tierra de  $4,57 \Omega$  lo cual es bueno, ya que las normas dicen que estos sistemas de telecomunicaciones deben tener valores por debajo de los  $5 \Omega$  cumpliendo así los requerimientos para sistemas de telecomunicaciones.

## RECOMENDACIONES

- Para las mediciones de resistividad se recomienda utilizar el método de Wenner, ya que sus resultados son confiables siempre y cuando los electrodos auxiliares estén enterrados a una profundidad entre 20 y 30 cm.
- En caso de que el valor de resistencia calculado no sea el esperado, se recomienda utilizar mejoradores de suelo como tierra de sembrado, Thor Gel u otros, que contribuyan para reducir el valor de resistividad del terreno.
- Para la realización de las soldaduras exotérmicas se debe utilizar los moldes de acuerdo al número del cable, electrodo y asegurarse que no se encuentren en mal estado, porque al momento de formarse el cobre líquido puede fugar por las grietas con lo cual no se obtendrá una buena adherencia e incluso romper el cable.
- Utilizar guantes de cuero para agarrar los moldes después de realizar la conexión exotérmica, como estos son de grafito no se enfrían rápidamente.
- Reemplazar los equipos de medición análogos por equipos digitales para obtener un error menos significativo y tener menos inconvenientes en las mediciones de resistividad y resistencia.
- La inspección, conservación y renovación de la puesta a tierra debe realizarse periódicamente, con el objetivo de controlar el valor de la resistencia de puesta a tierra, para ello no solo basta la medición de la resistencia sino también verificar el estado de los electrodos y uniones.
- Para obtener valores más bajos de la resistencia de la malla de tierra se recomienda utilizar el mejorador de suelo SAN-EARTH, se instalan fácilmente esparciendo el polvo seco en una tira sobre un conductor, y alrededor del mismo, en una zanja horizontal. Cuando la zanja se rellena, SAN-EARTH absorbe la humedad del suelo circundante y se endurece para convertirse en un sólido conductor.

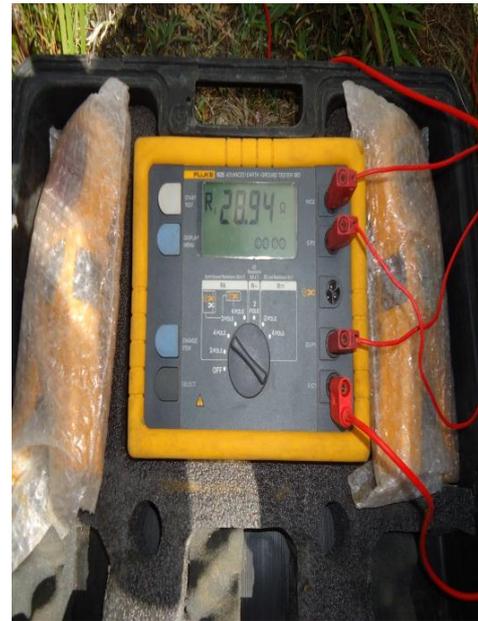
## BIBLIOGRAFÍA

1. Pablo Díaz, “Soluciones Prácticas para la Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos de Distribución”, Editorial Mc Graw Hill 2001.
2. Martínez R, Juan. “Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas”.
3. RUELSA. “Teoría y diseño de sistemas de tierras según las normas NOM e IEEE”. <http://www.ruelsa.com/notas/tierras.html>.
4. Dr. Paulo M. De Oliveira- De Jesús, “Introducción a Sistemas de Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos de Potencia Aspectos Teóricos”, Universidad Simón Bolívar-Caracas-Venezuela, Enero 2010.
5. Ing. Juvencio Molina A. “Aspectos Teóricos y Prácticos de Sistema de Puesta a Tierra”, Caracas-Venezuela, Enero 2010.
6. [www.fluke.com](http://www.fluke.com), Medidor de Resistencia de Tierra Fluke 1625 Kit.
7. NFPA 780, Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, Edition 1997.
8. IEEE Std 1100-1999. “Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment”.
9. IEEE Std 80-2000. “Guide for Safety in AC Substation Grounding”.
10. RAMÍREZ, José y CANO, Eduardo, Criterios de Diseño de Sistema de Puesta a Tierra Utilizando IEEE-80 y Evaluado con MEF, Universidad Nacional de Colombia, Colombia-Manizales, Marzo 2010. (FORMULAS PARA CALCULO DE MALLA DE PUESTA A TIERRA)
11. GONZALEZ LONGATT. Francisco, “*Sistemas de Puesta a Tierra: Una Introducción a la Seguridad*”.

12. QQUESHUAYLLO. Wilbert, *“Diseño y Ejecución de una Puesta a Tierra de Baja Resistencia”* UNMSM.
13. RAMÍREZ. José y CANO. Eduardo, *“Criterios de diseño de sistema de puesta a tierra usando IEEE-80 y evaluado con MEF, Universidad Nacional de Colombia, Colombia-Manizales, Marzo 2010”*.

# **ANEXOS**

- **Medición de Resistividad del Terreno en 2 direcciones con el Fluke 1625**



- **Excavación de zanja para malla de puesta a tierra**

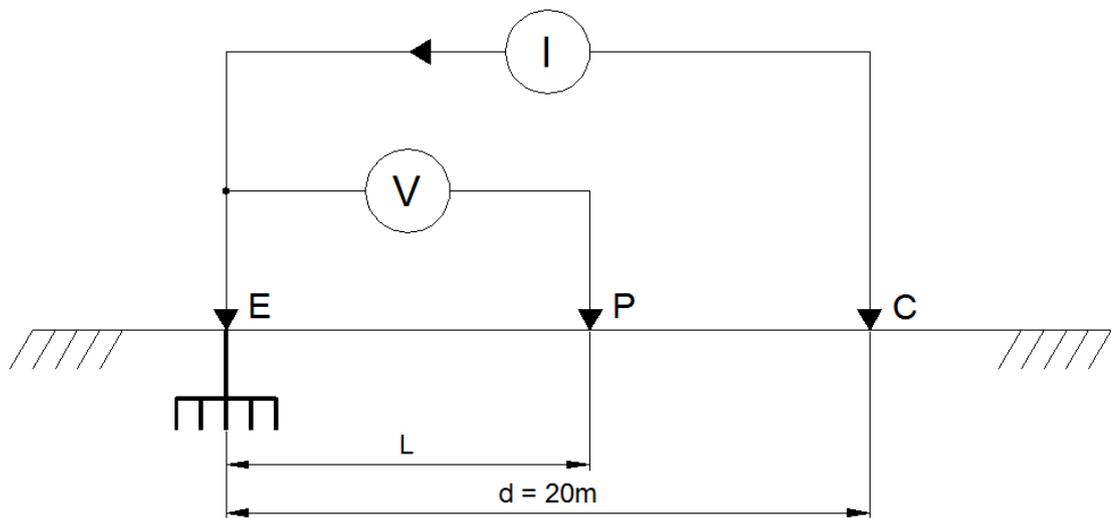


- **Conexiones realizadas con soldadura exotérmica**



- **Medición de Resistencia de Puesta a Tierra utilizando el Método de Caída de Potencial**

Para la medición de la resistencia de la malla de tierra se ubicó el electrodo de corriente (C) a 20 m de distancia del pozo de revisión como se indica en la gráfica.





**Medición para L=6 m**



**Medición para L=9 m**

**Medición para L=12 m**



**Medición para L=15 m**

**Medición para L=18 m**

El 62% del electrodo C corresponderá a una resistencia de puesta a tierra para una distancia de 12 m.

- **Mejorador de Suelo SAN-EARTH**



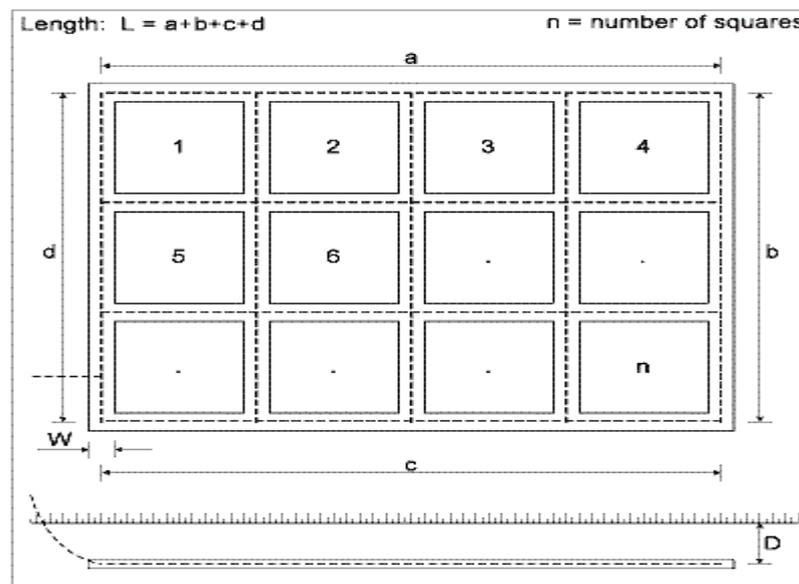
### Calculadora de cuadrícula de conexión a tierra

Se realizó en el Software con los datos del diseño del sistema de puesta a tierra y se observa que utilizando el mejorador de suelo SAN-EARTH se obtiene un valor de resistencia de  $2,97 \Omega$ .

Resistividad del terreno	<input type="text" value="179,4"/>	$\Omega$ -m
Longitud del electrodo (L)	<input type="text" value="0"/> pies <input type="text" value="96"/>	m
Anchura del electrodo (W)	<input type="text" value="0"/> pies <input type="text" value="0.4"/>	m
Profundidad del electrodo (D)	<input type="text" value="0"/> pies <input type="text" value="0.6"/>	m
Número de cuadrados (n)	<input type="text" value="9"/>	

Calcular	Restablecer
----------	-------------

**Resistencia calculada:  $2.97\Omega$**



- **Implantación de la Estación El Alisal**



- **Cuartos de Equipos y Generador**



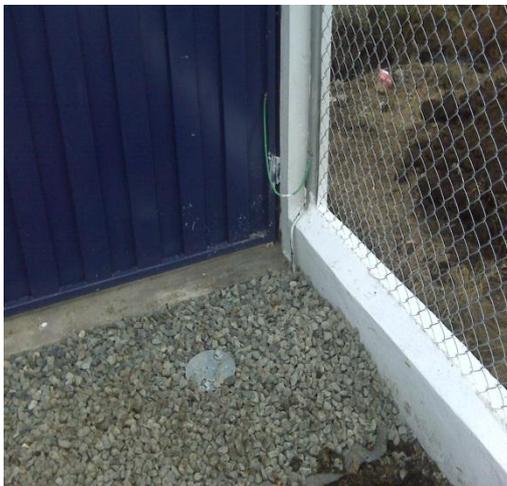
○ **Elementos que deben ser Conectados al Sistema de Puesta a Tierra**



**Barras y Escalerillas**



**Antenas**



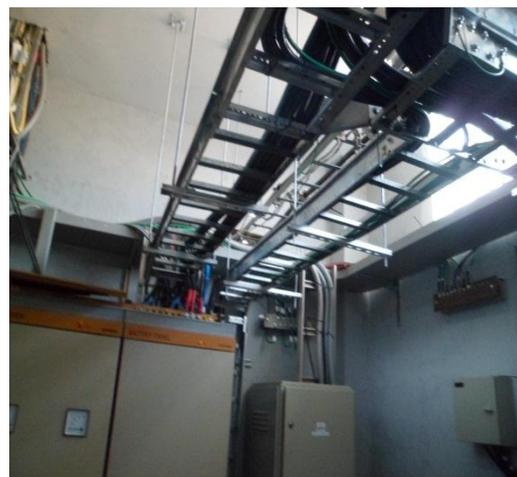
**Puerta y Cerramiento de Malla**



**Estructura Metálica de Torre**



**Equipos de Transmisión**



○ **Características Técnicas del Transformador**

 PROTOCOLO MONOFÁSICO	
ESR: 10.153C	FRECUENCIA: 60 Hz
NORMA: IEEE C57.12.90	

RESISTENCIA EN ALTA TENSIÓN (Ohm)		
POS.	To	85°C
2	87.71	110.98

RESISTENCIA EN BAJA TENSIÓN (mOhm)		
POS.	To	85°C
2	29.32	37.10

RELACION DE TRANSFORMACIÓN (T.T.R.)			
	Calculada	Medida	% Error
A=	54.240	54.244	0.007
B=	52.917	52.928	0.021
C=	51.594	51.608	0.027
D=	50.271	50.275	0.008
E=	48.948	48.958	0.020

PRUEBA SIN CARGA				
Po=	42.00	W.	Io= 0.58	%

PRUEBA DE CORTO CIRCUITO				
Pos.	Ex	Ix	Wx	x
2	377.3	0.79		105.9

PRUEBA DE AISLAMIENTO				
a) CON TENSIÓN APLICADA				
AT	0	KV	BT 10	KV
b) CON TENSIÓN INDUCIDA				
TENSIÓN (V)	TIEMPO (s)	FRECUENCIA (Hz)		
15	18	400		
NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO (BIL)				
AT	1.25	KV	BT 30	KV

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS		
PESO TOTAL (Kg)	VOL. LIQ. AISLANTE (L)	
135.0	43.0	
DIMENSIONES APROXIMADAS	DIAMETRO 356	mm
TANQUE	ALTO 620	mm

Número de Serie	12684110		
K.V.A.	10.00	TIPO	CSP Autoprotegido
PRIMARIO	Q2000GRDY/12700(1B)	V	.79 A
SECUNDARIO	120/240 V	V	83.33/ 41.67 A
TEMPERATURA	18.0 °C	Incr. Temp:	65 °C
Tk.	1.27	Altd. Diseño (msnm)	3,000
Clase Aislamiento	AO	Refrigeración	ONAN

ENSAYO DE ACEITE	
LÍQUIDO AISLANTE MINERAL REFERENCIA	
PDV DIELECTRICO	
TENSIÓN DE RUPTURA	METODO
34.0 KV.	ASTMD 1816

CÁLCULOS DE PERDIDAS EN EL COBRE E IMPEDANCIA		
Vc — Ic	172.90	W
Ic	0.79	A
Pcu To — Ic	105.90	W
Pcu To — In	105.20	W
I'R — AV	54.38	W
I'R — BV	50.91	W
Σ I'R To	105.29	W
Σ I'R 85° C	133.22	W
P. S. 85° C	0.83	W
P. Cu 85° C	134.05	W
Z 85° C	1.6	%

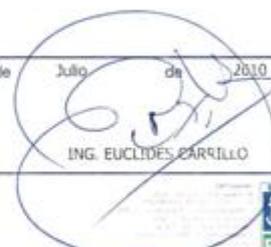
RESISTENCIA DE AISLAMIENTO			
MEGGER 5000V	AT / BT =	>4000	M Ω
	AT / T =	0	M Ω
MEGGER 2500V	BT / T =	>4000	M Ω

OBSERVACIONES:

FECHA 29 de Julio de 2010

REALIZADO POR  ING. EUCLIDES CARRILLO



SELLO DE CALIDAD  
INEN  
Norma NTE NEN 2100



REGISTRO  
DINV  
REG. 25  
E. J. C. S. S.

Ambato - Ecuador: Fábrica Santa Rosa Km. 7 1/2 vía a Guaranda, Principal s/n, Casilla 18-01-817, P.O. Box: (593-3) 2754 188, Fax: (593-3) 2754 086, Telefax: (593-3) 2754 189 / 2754 067 / 2754 197  
 Quito - Ecuador: Calle Herrando de la Cruz N° 32-112 y Av. Mariana de Jesús, Telfs.: (593-2) 2557 519 / 2906 463 / 3203 020 / 3203 133  
 Guayaquil - Ecuador: Av. Francisco de Orellana y Linderos esp. frente a DICIENTRO Edif. AS1, Telfs.: (593-4) 2239 288, Telefax: (593-4) 2239 376 / 2646 680  
 Cuenca - Ecuador: Calle Larga N° 1-215 y Miguel Angel Estrella, Telf.: (593-7) 2645 126 / Santo Domingo - Ecuador: Av. Tuálichila y Río Zamora, Telefax: (593-2) 2759 947  
 e-mail: ventas@ecuatran.com / www.ecuatran.com

EC-RG-CC-LA-04-01