

# UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA



# UCSC

## Análisis, Evaluación y Mejoras en Sistemas de Puesta a Tierra de Sitios de Telecomunicaciones.

Christofher Erwin Cruz Leal.

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:  
**Ingeniero Civil Eléctrico**

**Profesor Patrocinante:**

Merardo R. Retamal E.

**Profesores Guía:**

Dr. Ricardo A. Bustos P.

Dr. Guillermo E. Ramírez A.

Concepción, Marzo de 2019

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Medio Ambiente y Energía

Profesor Patrocinante:  
Merardo R Retamal E.

# Análisis, Evaluación y Mejoras en Sistemas de Puesta a Tierra en Sitios de Telecomunicaciones.

Christofher Erwin Cruz Leal.

Informe de Habilitación Profesional  
Para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Marzo 2019

## Resumen

En este documento se presenta un análisis de mediciones de resistencias de puesta a tierra de estaciones de radio base en sitios de telecomunicaciones y también de las resistividades de terreno presentes en los suelos de cada estación de radio base, ambas efectuadas bajo estándares internacionales vigentes y acompañados de una base teórica, donde principalmente se definen parámetros geoelectricos del suelo y particularidades presentes en los sistemas de puesta a tierra en sitios de telecomunicaciones en Chile. Luego de un análisis de las mediciones se efectúa una evaluación de los resultados obtenidos de resistencias de SPAT de los RBS y se contrastan con los valores establecidos en los estándares que rigen en la actualidad. Finalmente, se presentan los diseños de nuevos sistemas de puesta a tierra para los sitios de telecomunicaciones en los que sea requerido y no cumplan con los requisitos mínimos establecidos, donde se detalla el procedimiento y las variables necesarias para efectuar un diseño de sistema de tierra apegado a lo estipulado en el estándar IEEE Std. 80-2000 con el fin de cumplir los requisitos de seguridad y servicio en cada uno de los sitios de telecomunicaciones en los que se realizan los análisis.



## **Agradecimientos**

Agradezco enormemente a mi familia, novia y amigos por el apoyo constante, a mis compañeros y profesores de la universidad por los conocimientos entregados y por los buenos momentos, por otro lado, a mi profesor guía Merardo Retamal por el compromiso y confianza que depositó en mi persona y en este proyecto, finalmente a las profesionales Movistar y Entel por la oportunidad de realizar las mediciones en sus dependencias.

# Tabla de Contenidos

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XII</b>
<b>ABREVIACIONES</b> .....	<b>XIV</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.2 TRABAJOS PREVIOS .....	2
1.2.1 Revisión Bibliográfica .....	2
1.2.2 Discusión .....	7
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	7
1.4 OBJETIVOS .....	8
1.4.1 Objetivo General.....	8
1.4.2 Objetivos Específicos.....	8
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES .....	8
1.6 TEMARIO Y METODOLOGÍA .....	9
<b>CAPÍTULO 2. MODELACIÓN GEOELÉCTRICA DEL SUELO</b> .....	<b>10</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	10
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS .....	10
2.2.1 Clasificación de materiales.....	10
2.2.2 Potenciales y gradientes en el suelo .....	11
2.3 RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS .....	13
2.3.1 Resistividad eléctrica.....	13
2.3.2 Resistividad del terreno .....	14
2.3.3 Mejoramiento de la resistividad del suelo .....	16
<b>CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN RBS</b> .....	<b>18</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	18
3.2 ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN SISTEMA DE TIERRA.....	18
3.3 SITIO DE TELECOMUNICACIONES.....	20
3.4 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN UN SITIO DE TELECOMUNICACIONES .....	21
3.4.1 Configuraciones típicas de electrodos de puesta a tierra en telecomunicaciones.....	21
3.4.2 Protección en Telecomunicaciones.....	24
3.4.3 Protección contra descargas atmosféricas .....	26
3.4.4 Elementos de energía en un sistema de telecomunicaciones .....	29

<b>CAPÍTULO 4. MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....</b>	<b>31</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	31
4.2 NORMATIVA IEEE PARA LA MEDICIÓN DE UN SPAT .....	31
4.2.1 <i>Caída de potencial</i> .....	31
4.2.2 <i>Medida en triangulo</i> .....	33
4.2.3 <i>Medida de tierra con cuatro polos</i> .....	34
4.2.4 <i>Resistencia de tierra selectiva de tres o cuatro polos</i> .....	34
4.3 METODOLOGÍA Y EQUIPAMIENTO DE MEDICIÓN UTILIZADA EN LAS MEDICIONES DE RESISTENCIA DE SPAT EN FLUKE® 1625 .....	35
<b>CAPÍTULO 5. MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO .....</b>	<b>40</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	40
5.2 NORMATIVA IEEE PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE TERRENO.....	40
5.2.1 <i>Método de Schlumberger</i> .....	40
5.2.2 <i>Método de Wenner</i> .....	41
5.3 RESISTIVIDAD EQUIVALENTE.....	42
5.4 METODOLOGÍA Y EQUIPAMIENTO UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD .....	44
<b>CAPÍTULO 6. DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....</b>	<b>47</b>
6.1 INTRODUCCIÓN.....	47
6.2 NORMATIVA IEEE PARA EL DISEÑO DE UN SPAT .....	47
6.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN SPAT .....	47
6.3.1 <i>Tensión de toque y de paso admisible por el ser humano</i> .....	47
6.3.2 <i>Determinación de impedancia equivalente y corriente de falla</i> .....	49
6.3.3 <i>Potencial de tierra</i> .....	53
6.3.4 <i>Dimensionamiento del conductor</i> .....	53
6.3.5 <i>Diseño inicial y resistencia de puesta tierra</i> .....	55
6.3.6 <i>Longitud de enterramiento del conductor</i> .....	57
6.3.7 <i>Conductores paralelos</i> .....	58
6.3.8 <i>Tensión máxima de toque</i> .....	59
6.3.9 <i>Tensión máxima de paso</i> .....	59
<b>CAPÍTULO 7. MEDICIONES DE CAMPO .....</b>	<b>61</b>
7.1 INTRODUCCIÓN.....	61
7.2 UBICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE SITIOS SOMETIDOS A MEDICIÓN .....	61
7.3 MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	61
7.3.1 <i>Procedimiento Sector Collao (ID:A)</i> .....	61
7.3.2 <i>Tabla de Resultados</i> .....	65
7.4 MEDICIONES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA .....	66

7.4.1 Procedimiento Sector Cerro Centinela (ID: B) .....	66
7.4.2 Tabla de Resultados.....	69
7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	70
<b>CAPÍTULO 8. DISEÑOS PROPUESTOS.....</b>	<b>72</b>
8.1 INTRODUCCIÓN.....	72
8.2 DISEÑO SITIO CORONEL ID: D (ARREGLO RECTANGULAR SIN VARILLAS) .....	72
8.3 DISEÑO SECTOR COLON ID: C (ARREGLO EN “L” CON VARILLAS) .....	78
8.4 DISEÑO SECTOR CERRO LOS MELLIZOS ID: H (ARREGLO RECTANGULAR CON VARILLAS Y CABLE DE GUARDIA).....	86
<b>CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>96</b>
9.1 SUMARIO.....	96
9.2 CONCLUSIONES .....	96
9.3 TRABAJO FUTURO.....	99
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO A. MEDICIONES OBTENIDAS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
MARCADOR NO DEFINIDO.	
A.1 TABLAS DE DATOS DE RESISTENCIA DE SPAT .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
A.2 CURVAS DE RESISTENCIA DE SPAT .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>ANEXO B. MEDICIONES OBTENIDAS DE RESISTIVIDAD DE TERRENO... ¡ERROR! MARCADOR NO</b>	<b>DEFINIDO.</b>
DEFINIDO.	
B.1 TABLAS DE DATOS DE RESISTIVIDAD DE TERRENO .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
B.2 CURVAS DE RESISTIVIDAD DE TERRENO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>ANEXO C. CÁLCULOS PARA DISEÑO DE SPAT .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
C.1 Obtención de resistividades equivalentes..... ¡Error! Marcador no definido.	
C.2 Obtención de impedancias y corrientes de falla. .... ¡Error! Marcador no definido.	
C.3 Obtención de calibre del conductor. .... ¡Error! Marcador no definido.	
C.4 Diseño IEEE..... ¡Error! Marcador no definido.	
<b>ANEXO D. TABLAS DE VALORES.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
D1. TABLA PARA LA TÉCNICA DE LA PENDIENTE DE TAGG CON DOS DECIMALES. .. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
D.2 TABLA DE EQUIVALENCIA KCMIL, AWG, MM <sup>2</sup> . .... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
D.3 TABLA DE CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTORES. .... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
<b>ANEXO E. IMÁGENES.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## Lista de Tablas

TABLA 2. 1 Valor de resistividad aproximada por tipo de suelo.....	15
TABLA 3. 1 Niveles cerámicos recomendados zona centro-norte de Chile.....	28
TABLA 6. 1 Impedancias porcentuales recomendadas de los transformadores $3\phi$ .....	50
TABLA 6. 2 Pérdidas en el cobre asociadas a los transformadores $3\phi$ tipo intemperie 13.2 kV. ....	51
TABLA 6. 3 Temperatura máxima de fusión. ....	55
TABLA 7. 1 Identificación de sitios de medición. ....	61
TABLA 7. 2 Resultados obtenidos por método de Schlumberger para ID: A.....	62
TABLA 7. 3 Tabla de resultados de resistividad de terreno. ....	66
TABLA 7. 4 Resultados obtenidos de resistencia de tierra sector Cerro Centinela (Entel). ....	67
TABLA 7. 5 Mediciones efectuadas para el método de la pendiente de Tagg. ....	68
TABLA 7. 6 Resultado por método de la pendiente de Tagg. ....	69
TABLA 7. 7 Resultado de Resistencia de SPAT de todas las RBS.....	70
TABLA 7. 8 Valores ideales de resistencias de puesta a tierra según sistema eléctrico. ....	70
TABLA 8. 1 Tabla comparativa para sitio sin acondicionamiento químico y con acondicionamiento químico.....	85
TABLA 8. 2 Tabla comparativa para sitio sin acondicionamiento químico y con acondicionamiento químico.....	92
TABLA 8. 3 Parámetros para distintos valores de impedancia porcentual. ....	93
TABLA 8. 4 Calibre de cable de guardia necesario para un rayo de 200 [kA]. ....	94
TABLA 8. 5 Calibre de cable de guardia necesario para un rayo de 100 [kA] .....	94
TABLA 8. 6 Calibre de cable de guardia necesario para un rayo de 50 [kA] .....	94

## Lista de Figuras

FIGURA 2. 1 Gradientes al interior del suelo para uno y dos electrodos. ....	12
FIGURA 2. 2 Influencia de la separación de electrodos en el fenómeno de apantallamiento. ....	13
FIGURA 3. 1 Tipos de conexiones mecánicas entre electrodos y conductores. ....	19
FIGURA 3. 2 Tipos de conexiones por método exotérmico entre electrodos y conductores. ....	20
FIGURA 3. 3 Setup típico de un sitio de telecomunicaciones. ....	21
FIGURA 3. 4 Configuración típica de anillos de tierra en sitio de telecomunicaciones. ....	22
FIGURA 3. 5 Configuración radial de electrodos de puesta a tierra. ....	23
FIGURA 3. 6 Configuración de anillo interior o halo en telecomunicaciones. ....	24
FIGURA 3. 7 Barra principal equipotencial de tierra. ....	25
FIGURA 3. 8 Anillos de tierra en un SPAT de telecomunicaciones. ....	26
FIGURA 3. 9 Sistema de energía de telecomunicaciones. ....	30
FIGURA 4. 1 Principio eléctrico para obtener la resistencia de SPAT .....	32
FIGURA 4. 2 Método de caída de potencial. ....	32
FIGURA 4. 3 Ejemplo de medición por método de caída de potencial. ....	33
FIGURA 4. 4 Método de medida triangular o de tres polos. ....	34
FIGURA 4. 5 Método de medición de 4 polos. ....	34
FIGURA 4. 6 Conexión equipo Fluke 1625 para método de caída de potencial. ....	35
FIGURA 4. 7 Procedimiento de medición del método selectivo. ....	36
FIGURA 4.8 Conexión en Fluke 1625 para el método selectivo. ....	37
FIGURA 4. 9 Principios eléctricos del método de medición de resistencia de tierra. ....	38
FIGURA 4. 10 Conexión y procedimiento para el método selectivo. ....	38
FIGURA 4. 11 Barra principal de tierra de una RBS. ....	39
FIGURA 4. 12 Conexión de pinza amperimétrica en el electrodo medido. ....	39
FIGURA 5. 1 Medición de resistividad por el método de Schlumberger. ....	41
FIGURA 5. 2 Medición de resistividad por método de Wenner. ....	42
FIGURA 5. 3 Método de Schlumberger en Fluke 1625. ....	44

FIGURA 5. 4 Disposición de electrodos de medición en método de Schlumberger. ....	45
FIGURA 6. 1 Tensiones de toque y de paso. ....	48
FIGURA 6. 2 Diagrama unilineal completo del sistema. ....	49
FIGURA 6. 3 Diagrama unilineal del sistema simplificado. ....	49
FIGURA 7. 1 Curva de resistividad aparente. ....	62
FIGURA 7. 2 Curva de resistividad aparente en papel log-log. ....	63
FIGURA 7. 3 Curva patrón correspondiente al terreno. ....	63
FIGURA 7. 4 Resultados obtenidos por medio del software geoelectrico IPI2Win.....	64
FIGURA 7. 5 Modelo teórico del terreno de tres capas.....	65
FIGURA 7. 6 Curva de resistencia de SPAT sector Cerro Centinela (Entel). ....	67
FIGURA 8. 1 Arreglo rectangular de 10m x 20m.....	74
FIGURA 8. 2 Distribución de tensión de toque al interior del arreglo de conductores de tierra (Coronel Entel). ....	77
FIGURA 8. 3 Distribución de tensión de paso al interior del arreglo de conductores de tierra (Coronel Entel). ....	77
FIGURA 8. 4 Arreglo de conductores en L. ....	80
FIGURA 8. 5 Distribución de tensión de toque al interior del arreglo de conductores de tierra (Colon Entel). ....	84
FIGURA 8. 6 Distribución de tensión de paso al interior del arreglo de conductores de tierra (Colon Entel). ....	84
FIGURA 8. 7 Arreglo rectangular de 10m x 8 m con barras. ....	88
FIGURA 8. 8 Distribución de tensión de toque al interior del arreglo de conductores de tierra (Mellizos Movistar). ....	91
FIGURA 8. 9 Distribución de tensión de paso al interior del arreglo de conductores de tierra (Mellizos Movistar). ....	92

# Nomenclatura

$R$	: Resistencia en [ $\Omega$ ].
$\rho$	: Resistividad eléctrica [ $\Omega$ -m].
$l$	: Longitud.
$S$	: Sección.
$\rho_s$	: Resistividad aparente por el método de Schlumberger.
$\rho_w$	: Resistividad aparente por el método de Wenner.
$\rho_{eq}$	: Resistividad equivalente del terreno.
$\rho_{eq,2}$	: Resistividad equivalente del terreno de dos estratos.
$\rho_{eq,3}$	: Resistividad equivalente del terreno de tres estratos.
$\rho_{eq,4}$	: Resistividad equivalente del terreno de cuatro estratos.
$F_i$	: Variable auxiliar del estrato $i$ .
$u_i$	: Variable auxiliar del estrato $i$ .
$v_i$	: Variable auxiliar del estrato $i$ .
$h_i$	: Profundidad del estrato $i$ .
$\rho_i$	: Resistividad aparente del estrato $i$ .
$r_0$	: Variable auxiliar.
$q_0$	: Variable auxiliar.
$t_f$	: Tiempo de falla.
$I_A$	: Corriente asimétrica.
$R_g$	: Resistencia de puesta a tierra.
$A$	: Área.
$L_c$	: Longitud total del conductor.
$h$	: Profundidad de enterramiento.
$R_1$	: Resistencia de conductores.
$R_2$	: Resistencia de varillas.
$R_m$	: Resistencia mutua.
$d_c$	: Diámetro del conductor.
$d_r$	: Diámetro de las varillas.

$L_x$	: Largo de la malla en metros.
$L_y$	: Ancho de la malla en metros.
$n_r$	: Numero de varillas enterradas.
$H$	: Espesor de la capa superior.
$C_s$	: Factor de reducción.
$h_s$	: Espesor de la capa superficial.
$\rho_{sup}$	: Resistividad superficial del terreno en [ $\Omega$ -m].
$I_f$	: Corriente de falla.
$I_g$	: Corriente simétrica que circula por el sistema de tierra.
$S_f$	: Factor de división.
$C_p$	: Factor de crecimiento.
$C_f$	: Factor de decremento.
$I$	: Corriente eficaz en kA.
$T_m$	: Temperatura máxima admisible.
$TCAP$	: Factor de capacidad térmica.
$T_r$	: Temperatura de referencia del conductor.
$\alpha_r$	: Coeficiente térmico.
$t_c$	: Tiempo de circulación de la corriente.
$\rho_r$	: Resistividad del conductor de tierra.
$T_a$	: Temperatura ambiente.
$T_m$	: Temperatura máxima de fusión.
$L$	: Longitud de enterramiento del conductor.
$D$	: Espaciamiento entre conductores.
$n$	: Número de conductores paralelos en una malla rectangular.
$L_p$	: Longitud del perímetro de la malla en metros.
$D_m$	: Distancia máxima entre dos puntos de la malla.
$L_R$	: Longitud total de todas las barras enterradas.
$L_r$	: Longitud de una barra.
$V_c$	: Tensión de toque máximo.
$V_p$	: Tensión de paso máxima.
$GPR$	: Potencial de tierra (Ground Potential Rise).

# Abreviaciones

SPAT.	: Sistema de Puesta a Tierra.
D.C.	: Corriente directa (Direct Current).
A.C.	: Corriente alterna (Altern Current).
E.M.I.	: Interference electromagnetic.
E.M.C.	: Compatibility electromagnetic.
I.E.E.E.	: Institute of electrical and electronics engineers.
N.Ch.	: Norma Chilena.
S.E.V.	: Sondeo eléctrico vertical.
A.W.G.	: American wire gauge.
A.N.S.I.	: American national standard institute.
N.F.P.A.	: National fire protection association.
R.B.S	: Estación de radio base (Radio Base Station).

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Introducción General

. Dentro de cualquier instalación eléctrica es de gran importancia la seguridad frente a alguna posible falla en el sistema. Esto con el fin de proteger tanto a las personas como a los equipos e infraestructura de la instalación. En efecto, es primordial el resguardo de cualquier sistema eléctrico, especialmente si se refiere a un sistema de altas potencias. Para ello se deben emplear mecanismos de protección adecuados contra fallas de aislamiento que ocasionan tensiones por contacto indirecto. Para evitar lo anterior, el sistema debe tener un mecanismo de protección, siendo en dicho caso, la mejor opción, una malla de tierra.

La función principal de un Sistema de Puesta a Tierra (SPAT) es limitar posibles tensiones peligrosas que pueden presentar algunos componentes metálicos sin aislación. Dicho esto, un SPAT se define como un circuito de protección conectado en paralelo al sistema eléctrico en cuestión, que tiene como función resguardar a las personas que puedan estar en contacto con estos elementos en un momento dado. Además, en el caso de las torres de transmisión de telecomunicaciones se debe otorgar un camino para corriente de falla y descargas atmosféricas provocadas por tormentas eléctricas. Al mismo tiempo, una malla de tierra es capaz de evitar diferencias de potencial que pueden ser peligrosas para las personas que rodean la zona.

La efectividad de un SPAT, va a depender de los criterios y estudios realizados en la etapa de diseño de la malla de tierra y posterior evaluación final, dentro de dichos criterios se incluyen: tipos de conductores, dimensiones del arreglo de conductores, la profundidad de enterramiento el tipo o calibre del conductor utilizado entre otros. Todo lo anterior guiado en la normativa vigente establecida en nuestro país o bien internacionales en el caso de no ser suficiente los estándares chilenos, esto con el fin de proteger la vida de las personas y además de salvaguardar los equipos que pueden verse severamente dañados ante cualquier evento no deseado, pues dichos equipos son de un alto costo e importantes dentro de un sistema eléctrico, en especial en un sistema de telecomunicaciones que opera con dispositivos sensibles y sofisticados.

## 1.2 Trabajos Previos

Previo a las mediciones y cálculos involucrados en los objetivos presentados, es necesario un fundamento o base teórica, por lo que se presentan referencias bibliográficas que evidencian y exponen acerca de los temas relacionados con el trabajo a presentar.

### 1.2.1 Revisión Bibliográfica

- ♣ Huete y Villagrán, (2008), en “SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCION PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES,” *Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.*, Guatemala [1]

En este trabajo se presentan generalidades acerca de temas que caracterizan a sistemas de puesta a tierra en el ámbito de las telecomunicaciones, tales como los componentes principales de un sistema de tierra, ya sean electrodos, varillas o barras, conductores, la caracterización de barras de tierra, anillos de tierra principales y secundarias, características de los electrodos de tierra y configuración de electrodos típicas en un sistema de telecomunicaciones, pues estos al estar compuestos por un torre de trasmisión de radiofrecuencia y un gabinete de equipamiento, se tienen configuraciones estándares de sistemas de puesta a tierra como la configuración de anillos, también detalla parámetros físicos como características de los suelos como tipos de suelos o terrenos, además de esto da énfasis a las interferencia electromagnéticas que afectan a un sistema de tierra en telecomunicaciones, más conocidas como EMI.

- ♣ Retamal y Carranza, (2016), en Apuntes de la Asignatura “SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Capítulo 2: Características de Propagación del Suelo” *Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería,* Concepción. [2]

En este apunte se presentan características detalladas del comportamiento del terreno tales como sus propiedades eléctricas, principalmente el comportamiento de un flujo corriente a través del suelo. Se explica cómo se comporta una intensidad eléctrica al tener contacto con un terreno, lo cual resulta relevante, pues indica que un conductor por el cual circula una intensidad, genera un gradiente de campos magnéticos al estar enterrado sobre un terreno, por lo cual se debe tener el consideración el espaciamiento entre los electrodos enterrados necesarios para realizar los procedimientos de medición requeridos en este informe sin mayor problema.

- ♣ González-Longatt F.M, (2007) en “Sistemas de Puesta a Tierra y Protección Contra Descargas Atmosféricas” *II Seminario en Seguridad y Riesgos eléctricos en la Industria.*, Puerto Ordaz. [3]

En este trabajo se determinan y detallan las consideraciones y protecciones contra las sobretensiones de origen atmosférico. Dice que el nivel isoceraunico es más bajo a medida que se acerca al polo y más alto en los trópicos, por otro lado los tres métodos principales para mitigar el efecto de una descarga eléctrica, el primero es contar con un cable de guarda el cual debe tener la misma secciones que la línea de transmisión, la segundo son los explosores o cuernos de arco, los que generar un arco eléctrico entre dos conductores separados a una determinada distancia por último la protección mediante descargadores de sobretensión.

- ♣ Ramírez y Cano-Plana, (2010) en “SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF,” *Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y arquitectura*, Guatemala. [4]

En este trabajo, se describe el proceso de construcción y determinación de un sistema de puesta a tierra bajo las reglas o protocolos establecidos por la IEEE Std. 80. Se describen los principales tipos de mejoramiento de un terreno para reducir la resistividad de un terreno, como por ejemplo utilizando sales que aumenten la conductividad, electrodos que tengan una conductividad mayor o que liberen compuestos químicos que disminuyan la resistividad de la zona y otros métodos o bien la implementación de elementos conductores adicionales al arreglo , y así lograr conseguir mejores condiciones para realizar un diseño de malla de puesta a tierra, todo esto bajo lo establecido en el estándar IEEE Std. 80, el cual detalla el procedimiento de una instalación segura en sistemas de corriente alterna.

- ♣ Guerrero, Montiel, Rogers, Rodríguez, Cruz, y Viña, (2008), en “SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA LOS SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES,” *Universidad de Carabobo*, Valencia. [5]

Aquí, se evidencian algunas características técnicas y teóricas de un sistema de puesta a tierra, particularmente en sistemas de telecomunicaciones, da a conocer las especificaciones de las configuraciones para un sistema de tierra para telecomunicaciones, como por ejemplo los tipo de

electrodos más comunes como el Copperweld, el cual es de acero recubierta en cobre con un diámetro de 16 milímetros y su enterramiento debe ser a lo menos 2,4 metros por norma, también el electrodo de Chem-Rod, el cual contiene en su interior sales minerales que son liberadas para acondicionar el terreno que rodea el arreglo.

- ♣ IEEE STD 80-2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substation”, USA, 2000. [6]

En este estándar, se especifican todos los procedimientos para realizar cualquier operación en una subestación de corriente alterna con seguridad, pues todo lo especificado en esta norma, está comprobado y gran parte de los países se rige en el ámbito eléctrico por esta misma, debido a su confiabilidad. En cuanto a contenidos el estándar indica paso a paso los procedimientos para un correcto y seguro sistema de puesta a tierra para distintos sistemas eléctricos de corriente alterna. Dentro de lo estandarizado, se encuentran los cálculos para determinar el dimensionamiento óptimo de los conductores, la obtención de corriente de falla de un sistema de potencia, de acuerdo a su impedancia, factores de Split y decremento, también especifica los cálculos para la determinación de todos los parámetros eléctricos y físicos que implica un diseño de puesta a tierra segura, como las tensiones de paso y de toque o la corriente de malla. Además detalla de gran forma los métodos de medición de resistividad del terreno con los cálculos asociados y su interpretación.

- ♣ Oropeza, (2015), en “Libro de oro de puesta a Tierra Universal Grounding and Bonding,” México. [7]

Este libro consta de las características más importantes y relevantes, sin ahondar en detalles teóricos con respecto a un tema en específico correspondiente a sistemas de puesta a tierra, sino que abarca todo lo relacionado con un sistema de puesta a tierra de una manera amplia. En este libro se describen los métodos más utilizados para la medición de resistencia de puesta a tierra como el método de caída de potencial el cual es recomendado por la IEEE Std 1100-1992, y también los métodos principales de medición de resistividad eléctrica del terreno como el método de cuatro puntos también conocido como el método de Wenner y la variación al método de Wenner, llamada Schlumberger la cual resulta ser más sencilla y los resultados tienen variaciones insignificantes entre uno y otro método. Se especifican como realizar las mediciones y cálculos asociados a estas.

- ♣ Fluke Corporation. “1625-1 Earth/Ground Tester, (2014), en el Manual de Uso.” [8]

En este manual, se especifica la forma técnica de medir resistividad del terreno implementando las cuatro picas con el método de Schlumberger y resistencia de puesta a tierra de un electrodo construido por medio del método de caída de potencial con la variación de la utilización de pinzas amperimétricas, específicamente el equipo que se detalla es el equipo de medida Fluke 1625, el cual es utilizado para realizar las mediciones en este trabajo, por tanto, con este manual se logra ver las conexiones y particularidades del equipo de medida, además la interpretación de los resultados obtenidos por display en el equipo.

- ♣ Fluke Corporation. “Medida de la Resistencia de la toma de tierra en edificios, residenciales y en plantas industriales”. Consultado en 2018. [9]

En este manual, se detallan todos los procedimientos existentes de medida de una resistencia de puesta a tierra posibles de realizar por medio del equipo Fluke 1625, y los pasos a seguir frente a alguna falla o problema en la medición, se detalla el método de la pendiente de Tagg el cual es capaz de obtener el valor de resistencia de tierra determinando el valor de la pendiente de la curva generada en la medición, lo cual es necesario en el caso de tener problemas de espaciamiento en la medición o limitaciones de conductor de medidas, además ayuda a la comprensión otorgando ejemplos, diagramas de conexión junto con una pequeña reseña teórica de método de medición.

- ♣ ANSI/IEEE Std 81-1983 “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System” *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, -USA. (1941). [10]

En este estándar, se detalla el proceso de medición y cálculos de la resistencia de puesta a tierra de un SPAT ya diseñado de una manera segura y asegurando resultados correctos, precisando en la obtención de la resistencia de tierra por medio de cálculos teóricos donde se explican los métodos más usados, como el de Laurent o el método de Schwarz, los cuales son útiles al determinar teóricamente la resistencia de tierra de un sistema, conociendo sus principales parámetros, lo cual es útil en el caso de no contar con un equipo de medida para obtener el valor de resistencia de puesta a tierra. También se establecen criterios de seguridad para todos los procedimientos de medición.

- ♣ Astorga, (2011), en “SUMINISTRO, MONTAJE Y OPERACION INICIAL PLANTA DE OSMOSIS INVERSA PLACILLA SIERRALTA, COPIAPO INGENIERIA DE DETALLA MEMORIA DE CALCULO SISTEMA DE PUETS A TIERRA BT,” *AGUAS CHAÑAR S. A.*, Chile, Copiapó. [11]

En esta memoria de cálculo, se indican los procedimientos prácticos y cálculos realizados en un proceso de medición de resistividad de un terreno, luego indica los procedimientos de cálculos necesarios para obtener la resistividad equivalente de un terreno siguiendo el método de Burgsdorf-Yacobs, el cual determina la resistividad equivalente de un terreno de n capas, teniendo previamente determinadas las resistividades aparentes por cada estrato, su profundidad característica, el enterramiento de la malla y el área que cubrirá esta misma. Esto resulta importante a la hora de proponer un diseño de un sistema de tierra, pues la resistividad equivalente, es uno de los parámetros fundamentales, por lo que establecer la resistividad equivalente es uno de los parámetros más importantes para establecer un buen dimensionamiento de un SPAT.

- ♣ Claudio González Cruz (2001), en “Cálculo de Corrientes de Cortocircuito en Baja Tensión” *Instituto Nacional de Capacitación Profesional Área Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones Sede Colón.* [12].

En este documento se indica el procedimiento para obtener corrientes de cortocircuito en sistema de baja tensión, considerando valores estandarizados en normativas internacionales, pues resulta complicado obtener los parámetros eléctricos necesarios para obtener y realizar el cálculo de una corriente de cortocircuito en sistemas de baja tensión, por tanto se plantea parámetros importantes y necesarios como impedancia porcentual de transformadores y pérdidas típicas en transformadores asignadas por el nivel de potencia aparente que posee un transformador.

## **1.2.2 Discusión**

La revisión bibliográfica recién mostrada da cuenta que un sistema de puesta a tierra resulta vital e imprescindible en cualquiera de los sistemas eléctricos ya sean de mayor o menor envergadura. Al ser el sistema de puesta a tierra el único camino por el cual circulará una corriente de falla dentro de un sistema, y además considerando en especial que un sistema de tierra de telecomunicaciones cuenta con protección contra descargas atmosféricas, un buen dimensionamiento de él es una protección a la hora de que acontezca algún problema o falla en el sistema eléctrico de potencia. Por tanto, todos los procesos previos y posteriores involucrados en la constitución o diseño de un sistema de puesta a tierra, tales como la obtención de resistividad, o un buen dimensionamiento del calibre del conductor, entre otros, darán como resultado un SPAT correcto que cumpla con su función principal de proteger a las personas y al equipamiento presente en el sistema. Lo anterior debe ser efectuado de manera responsable y rigurosa, basándose estrictamente en las normativas o estándares establecidos, en este caso el estándar IEEE.

## **1.3 Hipótesis de Trabajo**

Un sistema de puesta a tierra tiene como objetivo principal resguardar la integridad de las personas y del equipamiento perteneciente al sistema eléctrico, frente a alguna posible elevada intensidad de corriente generada por una falla. Al realizar un diseño de un sistema de puesta a tierra para cualquier sistema eléctrico se ven involucradas diversas variables, tales como el área o sección del arreglo de conductores, la conductividad y resistividad del terreno, las características del sistema eléctrico, entre otros. En base a lo anterior, en este trabajo se establece la siguiente hipótesis de trabajo:

Es posible identificar aquellas variables que más afectan el diseño de los sistemas de puesta a tierra de diversos sitios de telecomunicaciones de la región del Biobío, mediante el análisis de variabilidad de los resultados obtenidos a partir de procedimientos de diseño estandarizados.

## **1.4Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Evaluar el estado de los sistemas de puesta a tierra de 10 estaciones de radio base (RBS) pertenecientes a las concesionarias de telecomunicaciones ENTEL y MOVISTAR ubicadas en la región del Biobío y así verificar si estos cumplen con los estándares de seguridad establecidos por la normativa vigente. Finalmente en el caso de ser necesario, proponer un diseño de un nuevo sistema de puesta a tierra para el sitio en la que sea requerido.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar y aplicar todos los parámetros y teoría involucrada en un SPAT destinado a RBS, a fin de realizar un buen análisis y diseño de un sistema de puesta a tierra.
- Efectuar una adecuada medición de la resistencia de puesta a tierra de las diez radioestaciones.
- Efectuar una efectiva medición de la resistividad del terreno presente en las diez radioestaciones.
- Desarrollar diseños de puesta a tierra bajo los estándares internacionales reconocidos.

## **1.5 Alcances y Limitaciones**

Todas las mediciones de resistividad fueron realizadas por medio del método de Schlumberguer y las mediciones de resistencia de puesta a tierra se llevaron a cabo con el método selectivo, además todos los sondeos presentes en este informe se hicieron con el telurómetro Fluke® 1625. También se debe tener en cuenta que los sondeos fueron desarrollados en diferentes estaciones del año por tanto con condiciones climáticas distintas. Por otra parte al dimensionar la corriente de falla e impedancia del sistema eléctrico se hacen estimaciones de impedancia porcentual y pérdidas, ambos parámetros correspondientes a los transformadores de alimentación de las RBS.

Los software utilizados para elaborar los cálculos y curvas son Matlab® 2013 y Microsoft Excel® 2013, en el caso del software empleado en el diseño de un sistema de puesta a tierra y obtención de gráficos de tensiones de toque y de paso corresponde al programa Etap® 12.6.

## 1.6 Temario y Metodología

Para todo sistema eléctrico resulta imprescindible contar con un sistema de tierra que asegure la protección de las personas y del sistema. Para cumplir lo anterior es necesario mantener el valor de resistencia de puesta a tierra dentro de los estándares de seguridad vigentes. Debido a esto, en este informe se comprueba lo anterior y luego, de ser necesario, se plantea un nuevo diseño de puesta a tierra, con el fin de efectuar un SPAT que se encuentre dentro de la normativa de seguridad establecida.

Primero se presenta un capítulo introductorio en el cual se presentan objetivos, hipótesis de trabajo, discusión, alcances y limitaciones. Luego, en el capítulo dos se presentan características del suelo tales como sus componentes y propiedades eléctricas que este posee. En el capítulo tres se exponen particularidades de los sistemas de puesta a tierra orientados y aplicados específicamente en una estación de radio base. Posteriormente en el capítulo cuatro se distinguen los métodos utilizados para efectuar una medición de resistencia de un SPAT según los estándares vigentes de igual forma en el capítulo cinco se distinguen los métodos utilizados para efectuar una medición de resistividad del terreno según los estándares vigentes. En el capítulo seis se caracteriza la normativa y estándares involucrados en el diseño de un nuevo SPAT. Luego de definir y realizar todos los procedimientos de sondeo, en el capítulo siete, se presentan tablas con los resultados obtenidos en las mediciones de campo efectuadas tanto para resistividades del terreno y resistencias de SPAT de cada una de las diez estaciones de radio base. Posterior al análisis del estado de los sistemas de puesta a tierra de las diez RBS, en el capítulo ocho, se presentan los diseños propuestos de nuevos SPAT para las RBS en los casos que sea necesario y finalmente se presentan las conclusiones y trabajos futuros referentes a los análisis y evaluaciones realizadas en este informe.

## Capítulo 2. Modelación Geoeléctrica del Suelo

---

### 2.1 Introducción

Un suelo o terreno posee distintas propiedades que definen las características de este, tales como su salinidad, estratigrafía, humedad. Uno de los parámetros fundamentales en el diseño de un SPAT es la resistividad que posee el suelo en el que se encuentra el arreglo de conductores de tierra, la cual es modificada o moldeada por cada uno de las características y propiedades del terreno.

### 2.2 Características de los suelos.

#### 2.2.1 Clasificación de materiales

Para comprender de mejor manera la función de un sistema de puesta a tierra, es vital tener claro el concepto de conductividad eléctrica y los tipos de materiales o componentes presentes en el medio.

- **Elementos conductores**

Son los distintos elementos que existen en la naturaleza que pueden ser clasificados de acuerdo a su conductividad eléctrica. Los elementos conductores son aquellos que poseen una gran cantidad de electrones libres en su último orbital, por lo que dichos electrones son capaces de moverse con soltura a través de los orbitales de un átomo. Dentro de los elementos conductores más conocidos se encuentra el cobre, el oro y el aluminio, siendo el cobre el más utilizado de todos debido a su bajo costo y sus excelentes propiedades conductoras.

- **Elementos semiconductores**

Los elementos semiconductores, tienen la particularidad de comportarse como conductor o aislante dependiendo de algunos factores como la temperatura, el campo eléctrico, campo magnético, radiación o presión a la cual están siendo sometidos. Estos elementos tienen las características de poseer capas de valencia casi llenas, por ende, no son ni buenos ni malos conductores. Los elementos más conocidos son el germanio y el silicio, siendo este último el más utilizado en la fabricación de diodos y transistores.

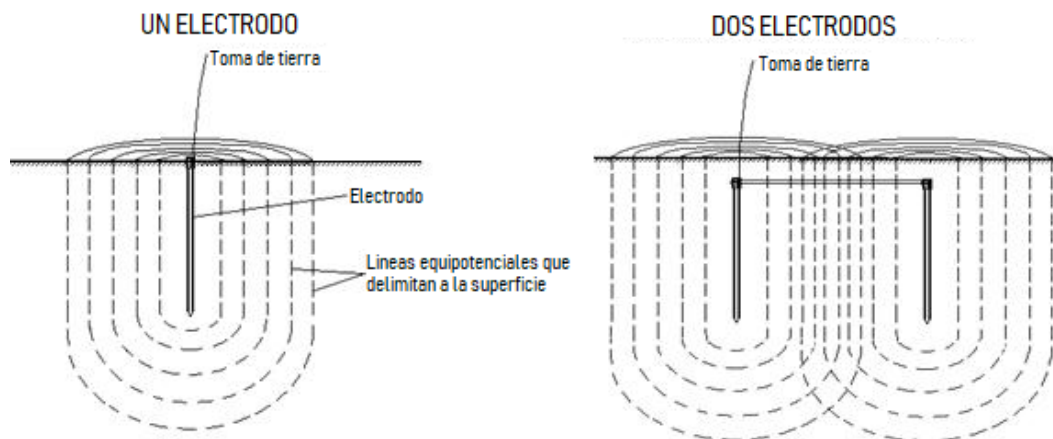
- **Elementos aislantes**

Los elementos aislantes tienen la particularidad de repeler o aislar la corriente eléctrica debido a que su último orbital está lleno, y por lo tanto, no admite el movimiento de electrones a través de esta pues la capa de valencia no posee electrones libres. Existe una gran cantidad de tipos de material aislante, donde los más conocidos son: el aire, la madera, el plástico y el caucho. Sin embargo, cuando se presenta un nivel de tensión muy elevado y las condiciones del medio son de una determinada forma, un elemento aislante puede llegar a ser conductor debido a un desorden atómico causado por la fuerte intensidad eléctrica aplicada sobre el elemento, como por ejemplo en el caso de un rayo.

## **2.2.2 Potenciales y gradientes en el suelo**

Un terreno generalmente posee más de un componente químico en su composición, por tanto, es común que en el trabajo de diseño de un SPAT se considere un terreno heterogéneo. Esto significa un problema en el modelo del terreno, pues el comportamiento de la corriente a través del suelo se verá influenciada por las variaciones de propiedades este, lo cual resulta complicado de conocer y modelar.

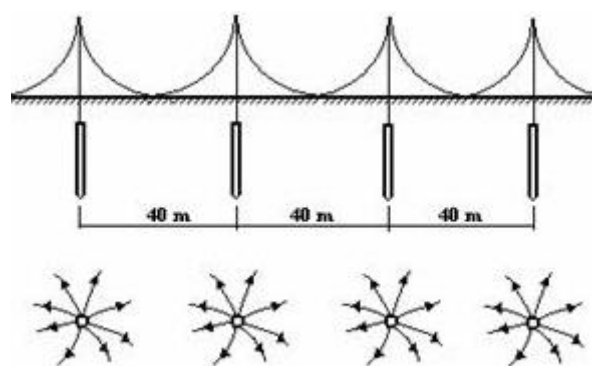
Cuando se inyecta un flujo de corriente al interior del suelo, este se expande en dimensiones de una forma radial. Un factor importante a considerar es que, debido al paso de corriente a través de electrodos o conductores enterrados en el suelo, aparece una caída de tensión a partir del electrodo, lo cual es considerable pues esta intensidad genera gradientes que pueden ser peligrosos para personas. También a la hora de diseñar e implementar un SPAT, se debe considerar dicho gradiente de potencial dado que este influencia a otros electrodos instalados en un sistema, lo cual se denomina factor de apantallamiento. El factor de apantallamiento es un fenómeno que consiste en que como la distribución de la corriente en un terreno uniforme y homogéneo genera líneas equipotenciales de intensidad radiales, teniendo un solo electrodo no hay problema, pero al tener dos electrodos paralelos, en función de la distancia que existe entre ambos, es posible que se provoque un solapamiento entre las áreas de los gradientes generados por cada electrodo, lo cual causa un incremento en la intensidad de la corriente tal como se indica en la siguiente figura.



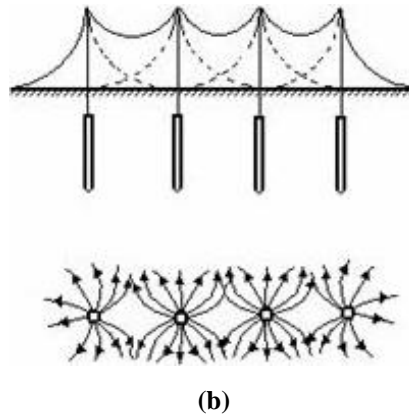
**FIGURA 2. 1 Gradientes al interior del suelo para uno y dos electrodos.**

Fuente: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCION PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES. *Manuel Enrique Huete Serano. Guatemala 2008.*

De igual forma, este fenómeno se debe tener en cuenta en el proceso de medición de la resistencia de puesta a tierra de un SPAT, pues en el momento en que se inyectan corrientes en un suelo para una medición, ésta genera gradientes de igual forma que si ocurriera una falla, pero con una intensidad menor. Por lo tanto, la distancia entre los electrodos de medición debe ser la adecuada como se muestra en la figura 2.2 (a) para que los resultados sean significativos y no se vean influenciados por el solapamiento entre los gradientes de dos electrodos de medición como se muestra en la figura siguiente.



(a)



**FIGURA 2. 2 Influencia de la separación de electrodos en el fenómeno de apantallamiento.**

(a) Electrodos separados a gran distancia; (b) Electrodos separados a poca distancia.

Fuente: SISTEMA DEPUESTA A TIERRA Y PROTECCION PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES. *Manuel Enrique Huete Serano. Guatemala 2008.*

En la figura 2.2, (a) se observa que mientras los electrodos enterrados se encuentren a una distancia prudente no existe un solapamiento entre las líneas de campo de gradientes indicadas, por tanto, no se ven influenciadas entre electrodos. Por otra parte, en (b) se observa que la distancia de separación entre los electrodos enterrados es acotada, lo cual origina un solapamiento entre las líneas de campo de gradientes indicadas en la figura. Sin embargo, no se debe olvidar que lo anterior se asume para un terreno homogéneo en el cual las propiedades del suelo son constantes, de otra forma estos gradientes se verían afectados por las condiciones del terreno.

## 2.3 Resistividad de los suelos

### 2.3.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica ( $\rho$ ), corresponde a la representación de la dificultad que presenta la corriente eléctrica en atravesar un elemento o bien la capacidad física que tienen los elementos para oponerse al paso de cierta intensidad de corriente. Teóricamente la resistencia eléctrica de algún elemento conductor de electricidad se define por la siguiente ecuación.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (2.1)$$

Luego despejando la resistividad de la ecuación (2.1), se obtiene el siguiente resultado de la resistividad de un elemento con conductividad homogénea en ohmios por metros:

$$\rho = \frac{s \cdot R}{l} [\Omega \cdot m]. \quad (2. 2)$$

Donde;

$R$ = Resistencia eléctrica.

$\rho$ = Resistividad eléctrica.

$l$ = Longitud.

$s$ = Sección del conductor.

### 2.3.2 Resistividad del terreno

Dentro de un sistema de puesta a tierra, el factor proporcional más determinante es la resistividad del terreno y del subsuelo en el que el sistema de puesta a tierra está enterrado, por tanto, es crucial el estudio previo de la resistividad del suelo o terreno en cuestión. La resistividad de la tierra en estudio depende de factores como: el tipo de elementos químicos que componen el terreno, la humedad que presenta la zona, la temperatura del suelo y la profundidad. Dado lo anterior, implica que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro. A continuación se presentan los factores que influyen y determinan la resistividad del terreno determinado en mayor medida.

- **Temperatura y Humedad**

La humedad es un parámetro que afecta la resistividad del terreno, pues mientras mayor sea la cantidad de agua en el terreno mayor será su conductividad y menor su resistividad. Por otro lado, la temperatura afecta la humedad del terreno, por lo que si la temperatura es muy baja, el terreno puede llegar a congelarse y tener una resistividad demasiado alta. Por otra parte, un terreno con temperatura demasiado alta, genera una resistividad también demasiado alta, entonces tanto la temperatura como la humedad alteran la resistividad de un suelo. Al realizar mediciones de resistividad de terreno bajo condiciones desfavorables en el ámbito climático, se obtienen resultados poco representativos de la realidad del terreno.

- **Estratigrafía**

Al interior del subsuelo existe una variación en la estructura a lo largo de este, lo cual implica cambios transversales y longitudinales de resistividad debido a la composición del suelo.

- **Compactación y salinidad**

Otro parámetro importante es el tipo de grano del cual está compuesto el suelo pues este definirá cuan compacto será el terreno. Mientras más compacto se encuentre un terreno, más aumenta la conductividad de este y mientras más separados estén los granos, menos compacto será el suelo y mayor será su resistividad pues los pequeños espacios de aire impiden ligeramente el paso de corriente eléctrica. Por otro lado, la salinidad implica un cambio en resistividad pues la sal es una materia absorbente de humedad, por lo cual mientras más contenido con sales exista se tendrá una menor resistividad de suelo.

Previo a cualquier cálculo y medición, es posible conocer una posible resistividad del terreno en cuestión pues existen correspondientes resistividades determinadas a ciertos tipos de terrenos, los cuales están disponibles en la siguiente tabla.

**TABLA 2. 1 Valor de resistividad aproximada por tipo de suelo.**

<b>Naturaleza del terreno</b>	<b>Valor medio de Resistividad (<math>\Omega</math>-m)</b>
Lama	5-100
Humus	10-150
Limo	20-100
Arcillas	80-330
Tierra de jardín	140-480
Caliza fisurada	500-1000
Caliza compacta	1000-5000
Granito	1500-10000
Arena común	3000-9000
Basalto	10000-20000

Fuente: [4] SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-...,” Pág. 28-29.

Con lo anterior es posible tener una idea o un rango aproximado de resultados esperados previos a una medición de resistividad, tan solo con un reconocimiento de terreno y su resistividad media asociada.

### 2.3.3 Mejoramiento de la resistividad del suelo

En ocasiones no se obtiene el valor de resistencia requerido para el sistema de puesta a tierra o resulta complicado diseñar un SPAT con ciertos requerimientos ya sea por temas de espaciado disponible en la zona o bien por temas netamente económicos. Para ello existen dos opciones de mejoramiento de la resistividad del terreno. Una de ellas es realizar un nuevo diseño, incluyendo más electrodos y cambiando la distribución de los mismos, o bien aumentar la dimensión de la malla. Por otro lado, existe la posibilidad de acondicionar el terreno con diferentes materiales que favorecen el paso de la corriente, es decir que aumentan la conductividad del terreno. A continuación, se mencionan los métodos más reconocidos para el mejoramiento del terreno [4].

- Utilización de electrodos a base de productos químicos conocidos internacionalmente como “chem rod” o bien barras químicas, los cuales constan de un conductor hueco de cobre al cual se rellena con sal química. Luego a través de orificios que tiene el conductor esparce la sal alrededor del terreno logrando que la solución de sal se filtre en el terreno debido a la humedad. Sin embargo, en la utilización de este método se debe considerar que los químicos implantados en el terreno migran y en algún momento se terminan los compuestos dentro de la barra química, por lo que se recomienda un mantenimiento del SPAT cada un determinado periodo de tiempo.
- Utilización de electrodos revestido de concreto, pues el concreto es un material higroscópico por lo que atrae la humedad. Sin embargo, este método facilita la corrosión, lo cual es un factor a tener en cuenta.
- Uso de sales que faciliten el paso de la corriente a través de la tierra, tales como, magnesio, cloruro de sodio, cloruro de calcio, sulfato de cobre, entre otros. Este método resulta ser útil no obstante se debe considerar que estas sales esparcidas en el terreno normalmente emigraran hacia zonas no deseadas.
- Colocación de materiales artificiales de alta conductividad alrededor de los electrodos y de los conductores de la malla.

- El uso de una arcilla natural llamada bentonita, elemento no corrosivo y con una resistividad de  $2.5 \Omega\text{-m}$  a un 300% de humedad y al igual que el concreto es de naturaleza higroscópica es decir que atrae la humedad y con ello aumenta la conductividad.

Realizando alguna de las opciones presentadas anteriormente es posible reducir el parámetro más determinante en el diseño de un SPAT, el cual es la resistividad del terreno. Por ende, reduciendo este parámetro, en el proceso de diseño, se obtendrán resultados de arreglos más pequeños que requieren menor cantidad de conductor. Así se reduce el costo del SPAT, que posteriormente debe ser evaluado tanto económicamente como técnicamente, para así determinar el mejor plan de acción en el diseño de un sistema de puesta a tierra para un sistema eléctrico determinado.

## Capítulo 3. Sistemas de Puesta a Tierra en RBS

---

### 3.1 Introducción

Una estación de radio base es un sistema eléctrico que consta de algunas características singulares, en los sistemas de puesta a tierra en sitios de telecomunicaciones, tales como los elementos que componen el sistema de tierra como sus configuraciones típicas, elementos presentes en los sitios, sistemas y subsistemas del sistema eléctrico. A continuación, se muestra los distintos tipos de protección presentes en una RBS considerando la protección contra descargas atmosféricas.

### 3.2 Elementos principales de un sistema de tierra

La función principal de un sistema de puesta a tierra es mantener un sistema eléctrico dentro de los estándares de seguridad de personas y de servicio de equipos, en este informe el sistema eléctrico corresponde a un sistema de telecomunicaciones, el cual al igual que todo sistema de potencia, cuenta con un SPAT correspondiente y para ello se necesita una serie de elementos que conforman este sistema de seguridad [1]. Un SPAT se define como un conjunto o arreglo de conductores que se encuentran conectados entre sí de una forma equipotencial y que distribuye una posible corriente de falla a través del terreno. Los principales componentes de un SPAT son los siguientes:

- **Electrodos de puesta a tierra**

Los electrodos son elementos altamente conductores que se encargan de distribuir una corriente eléctrica de falla a través del suelo. Existen diversas formas o tipos de arreglos de electrodos, los cuales definirá el comportamiento del SPAT. También se cuenta con distintos tipos de electrodos de puesta a tierra, donde los más comunes son: varillas, placas y conductores. También se pueden ocupar tubos y flejes. Una particularidad de los sistemas de tierra en telecomunicaciones es que la torre de transmisión suele ser utilizada también como un electrodo de tierra, principalmente para ser usada como un camino más fácil para una descarga atmosférica.

- **Anillo de enlace**

Es un conjunto de conductores de toma de tierra que unen los electrodos con el punto de puesta a tierra.

- **Punto de SPAT**

Es el punto de toma de tierra en el cual se realiza la unión entre el conductor principal de tierra y el anillo de enlace, el cual se encuentra fuera de la tierra.

- **Conductores de protección**

Son los cables que unen los elementos de sistema con ciertos elementos de protección contra posibles contactos indirectos con la finalidad de mantener la seguridad del sistema de puesta a tierra.

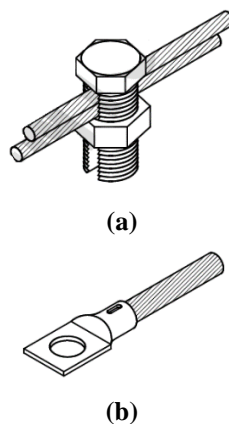
- **Derivación de conductores principales de tierra**

Son los cables destinados a unir el conductor principal de tierra con los conductores de protección o bien directamente con las masas.

En el proceso de construcción de arreglos de electrodos, el elemento o componente más repetitivo son las conexiones, por ende, resulta importante la selección del tipo de unión que tendrá el arreglo diseñado, el cual debe cumplir con los estándares vigentes establecidos. Existen dos diferentes métodos principales para unir un electrodo con un conductor, los cuales se indican a continuación:

- **Unión mecánica**

Consta de piezas metálicas las cuales son usadas como empalme entre los conductores a unir. Estos empalmes se unen mecánicamente a presión por rosca y deben ser de bronce.

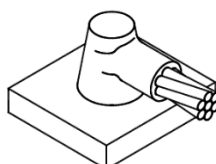


**FIGURA 3. 1 Tipos de conexiones mecánicas entre electrodos y conductores.**

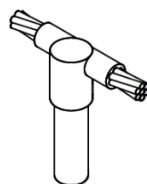
(a) Conector de tornillo partido; (b) Terminal de ponchar.

- **Unión exotérmica.**

Consta en un proceso de soldadura a altas temperaturas por medio de un metal de empalme lo cual genera una unión molecular entre el metal de unión y ambos conductores, haciendo así un empalme mucho más fuerte y seguro.



(a)



(b)

**FIGURA 3. 2 Tipos de conexiones por método exotérmico entre electrodos y conductores.**

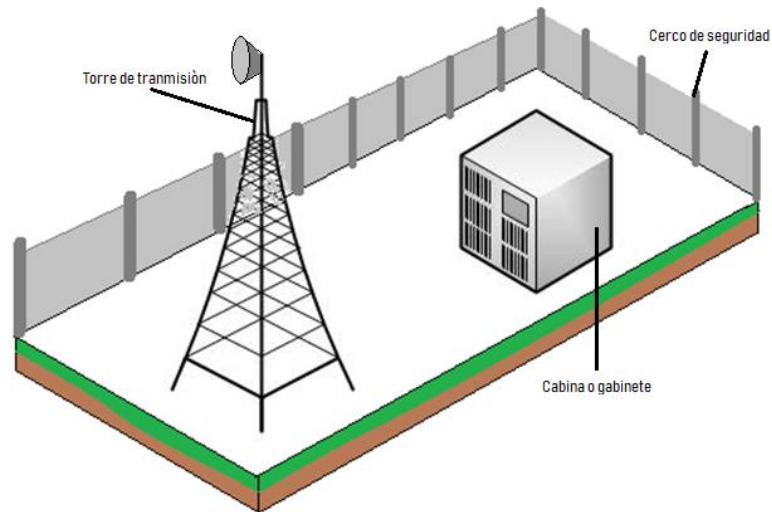
(a) Unión cable-platina con soldadura exotérmica; (b) Unión cable-electrodo con soldadura exotérmica.

Fuente: PROYECTO DE NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC DE 389/03. Pág. 14

### 3.3 Sitio de Telecomunicaciones.

Un sitio de telecomunicaciones, en esta ocasión, pertenecientes a ENTEL y MOVISTAR, estructuralmente están compuestas por la misma cantidad y tipos de elementos. Generalmente un sitio de telecomunicaciones consta de una torre de transmisión metálica aterrizada sobre sus cuatro patas o soportes, la cual se encarga de elevar y sostener todo el equipamiento del sistema radiante, es decir, las antenas que componen el sistema y también generalmente se cuenta con un sistema de seguridad contra descargas atmosféricas. Dentro del sitio de telecomunicaciones o Estación de Radio Base (RBS), se cuenta con un gabinete o cabina la cual contiene los equipos encargados de la modulación y tratamientos de señales, inversores, rectificadores, bancos de baterías y grupos electrógenos. En ocasiones se cuenta con dos cabinas que separan los equipos de alimentación y los equipos de procesamiento de señales. Finalmente, todo sitio de telecomunicaciones, por seguridad debe contar

con un cerco que recubra la zona y protege a las personas del sistema de potencia. A continuación, se muestra la distribución típica de un Setup de un sitio de telecomunicaciones.



**FIGURA 3. 3 Setup típico de un sitio de telecomunicaciones.**

El sistema de puesta a tierra, otorga un camino de baja impedancia que une todo el equipamiento eléctrico y electrónico implementado en la torre de comunicaciones y la tierra y particularmente un SPAT de telecomunicaciones se divide en cuatro subsistemas:

- ❖ Sistema contra descargas o rayos.
- ❖ Sistema de protección contra fallas.
- ❖ Sistema de electrodos de puesta a tierra.
- ❖ Sistema de referencia.

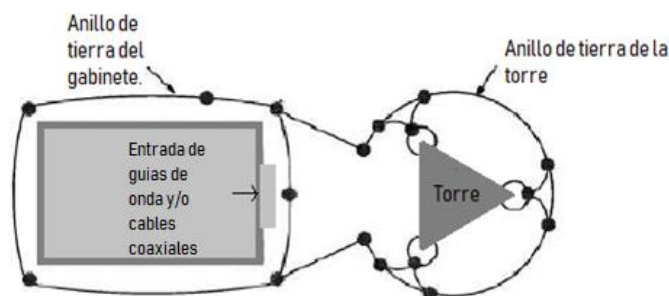
### **3.4 Sistema de puesta a tierra en un sitio de telecomunicaciones.**

#### **3.4.1 Configuraciones típicas de electrodos de puesta a tierra en telecomunicaciones**

El elemento encargado de facilitar un camino de baja impedancia para una falla o una descarga atmosférica es el electrodo, el cual es un subsistema del sistema completo de puesta a tierra. Los sistemas de electrodos en el ámbito de las telecomunicaciones, generalmente constan de más de un

electrodo, formando arreglos o configuraciones de ellos. El arreglo completo de electrodos debe estar conectado a un punto común, al igual que debe estar directamente conectado con los demás subsistemas y también a objetos metálicos presentes en la zona como tuberías metálicas. Las varillas del sistema deben ser de un conductor de cobre, pues este material es más resistente al fenómeno de corrosión que otro tipo de conductores como el aluminio. En efecto está prohibido la utilización de un conductor de aluminio. En el caso de utilizar conductores de acero recubierto de cobre estos deben tener las dimensiones mínimas de  $8\text{mm}$  de radio y la longitud de este no debe ser inferior a  $2,4\text{ m}$ .

Existen especificaciones y estándares para la instalación correcta de un sistema de puesta a tierra en un sitio de telecomunicaciones. El aterrizaje de la torre debe ser por conductor de un determinado calibre para luego dirigirse al sistema de conductores que constan principalmente de un anillo de aterramiento que circunde la torre e interconecte todos los puntos en los que esta tiene contacto con la tierra. En cada una de sus patas, también este anillo de torre debe estar conectado con el anillo exterior de tierra al menos en un punto. Si bien existen otros métodos de configuración de sistema de puesta a tierra, esta configuración es la más usada.

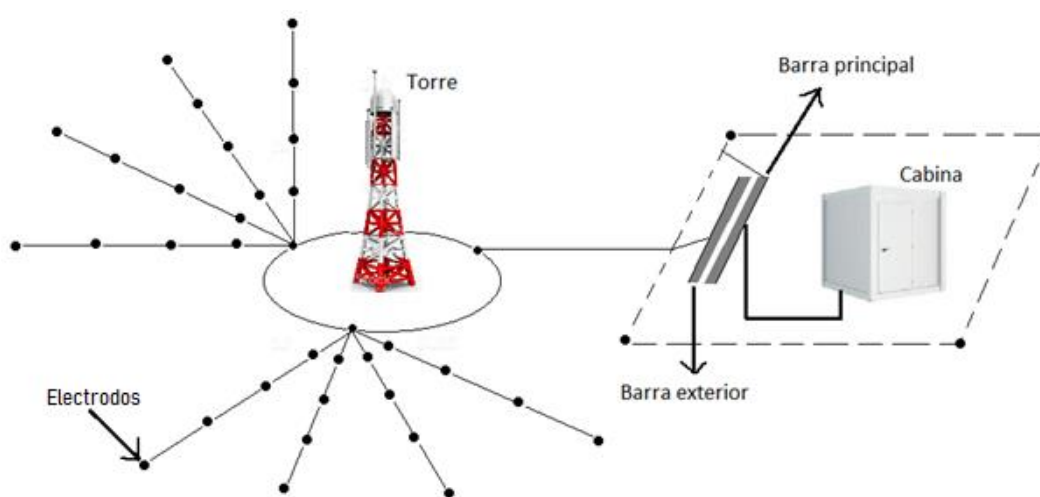


**FIGURA 3. 4 Configuración típica de anillos de tierra en sitio de telecomunicaciones.**

Esta configuración es recomendada para el anillo externo de tierra, con la que se logra un plano equipotencial, por ende, una instalación protegida por medio de un sistema perimetral. En el caso que la torre no aterrice ningún punto en la tierra, se debe usar un conductor de cobre estañado desnudo de un calibre no menor a 2 AWG que lleve el aterrizaje de la torre hacia un punto de aterrizaje válido en el sistema.

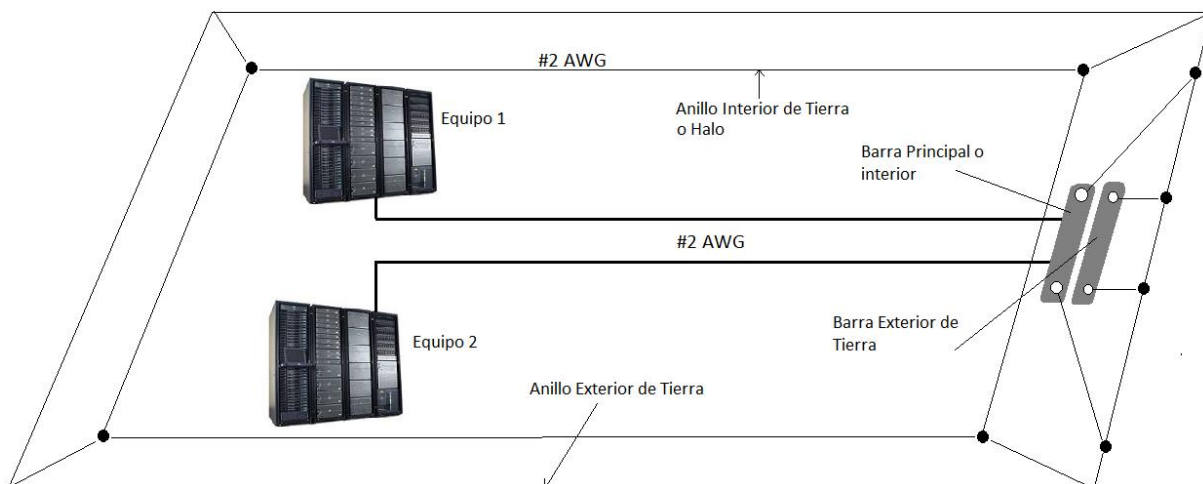
Para lograr una equipotencialidad en el SPAT todas las piezas metálicas presentes en la instalación deben ser conectadas en el anillo exterior, eso incluye equipos torre entre otros

subsistemas. A continuación se muestra una imagen referencial de una instalación típica de un sitio de telecomunicaciones. Las características de un sistema de puesta a tierra dependen en gran medida de la disposición de los electrodos enterrados a través del área del terreno, por lo cual existen configuraciones típicas para sistemas de comunicaciones que dan características propias a un SPAT. La primera de ellas es la configuración radial, que es eficiente tanto para un sistema de baja frecuencia como para un SPAT contra radiofrecuencias [5]. El principio de funcionamiento de esta configuración es que la mayor cantidad de energía que fluya a través de los electrodos se aleje lo más posible de la torre de comunicaciones y de la caseta o edificio del equipamiento.



**FIGURA 3. 5 Configuración radial de electrodos de puesta a tierra.**

Técnicamente se tienen algunas consideraciones para esta configuración de electrodos como que la longitud radial no sea menor que 15 *m*, preferentemente de 22 *m*. Además, con el fin de reducir aún más la resistencia de tierra, se tiene la opción de añadir radiales adicionales a partir de la torre. Otra configuración corresponde al anillo interior de tierra o también llamado *halo*, el cual beneficia altamente la equipotencialidad del sistema, lo cual es importante en el ámbito de telecomunicaciones de alta frecuencia y por lo tanto requieren un plato equipotencial extenso para así minimizar las diferencias de potenciales entre todos los equipos interconectados a alta frecuencia. Este método se basa en el principio de la “Jaula de Faraday”.



**FIGURA 3. 6 Configuración de anillo interior o halo en telecomunicaciones.**

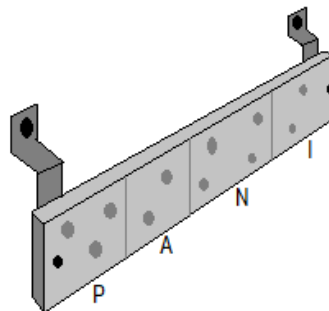
Tal como se muestra en la imagen anterior, cuando se conecta el anillo interior de tierra en las cuatro esquinas de la estructura este no debe conectarse a la barra principal o interior de tierra. Por otro lado, el anillo exterior se conecta a la barra principal. Es importante que no exista conexión alguna entre el anillo interior o halo y la barra principal o interior de tierra, de ser así el halo y la barra principal están conectadas, no debe existir interconexión entre el anillo interior y el anillo exterior.

### 3.4.2 Protección en Telecomunicaciones

La característica principal de un sistema de puesta a tierra en un sistema de telecomunicaciones es que se debe considerar: una torre de transmisión y dispositivos que utilizan corriente continua y corriente alterna. Por tanto, debido a que la torre de transmisión es metálica y tiene una altura y dimensiones considerables, resulta vital la instalación de un pararrayos en dicha torre, que será una vía de evacuación de una descarga eléctrica. Al romperse el dieléctrico entre una nube y la tierra se producirá una corriente eléctrica durante 500 a 100 microsegundos y de intensidad que llega a superar los 50 kA. En efecto, si se tiene un radio en el cual existe una probabilidad de que una descarga atmosférica caiga sobre un terreno, dicha probabilidad aumentara en la zona en la que está instalada la torre de telecomunicaciones debido a su composición metálica y dimensiones.

En el caso de la industria de telecomunicaciones, las conexiones a tierra difieren de las típicas en sistemas eléctricos de corriente alterna. A diferencia de otros sistemas, en los SPAT de

telecomunicaciones se usa una barra de tierra principal ubicada fuera del equipo de servicio que se usa como referencia a tierra de varios sistemas, tales como, equipos de radio frecuencia, tierra de las baterías, entre otras. La barra principal debe quedar accesible para realizar la conexión de la tierra de telecomunicaciones y tierra de corriente continua sin mayor dificultad. Uno de los mayores beneficios de contar con una barra principal es poder organizar de mejor forma todas conexiones requeridas por el sistema. El método más recomendado y considerado universal para los sistemas de telecomunicaciones, es contar con un punto único de conexión a tierra, el cual se logra conectando todos los elementos del sistema a un punto de tierra común que se conoce como barra principal de tierra. Dicha barra corresponde al centro de actividad del sistema de tierra en donde se alojan las protecciones contra transitorios y absorbedores de carga. Esta barra está construida en cobre y sus dimensiones mínimas son de  $6,35\text{ mm}$  de espesor,  $55\text{ mm}$  de largo y  $78\text{ mm}$  de ancho. La barra esta subdividida en cuatro secciones: zona de generadores (P), zona de absorbedores (A), zona de tierra no aislada (N) y zona de tierra aislada y esta cuenta con diversas perforaciones en donde deben conectarse por medio de conectores tipo ojo con dos pernos con conexión de compresión o soldadura exotérmica tal como se indica en la siguiente figura [5].



**FIGURA 3. 7 Barra principal equipotencial de tierra.**

Donde:

- **P:** Corresponde a la zona de generadores, es decir los blindajes de teléfonos, tierra de equipos de radio, etc.
- **A:** Corresponde a la zona de absorbedores, esta zona incluye la conexión tierra neutro de un edificio, tubería de agua, anillo de tierra exterior, entre otros.
- **N:** Corresponde a la zona de la tierra de la zona no aislada, como baterías de 12 V o de 48 V.
- **I:** Corresponde a la zona de la tierra de la zona aislada, en la que se encuentra la barra de ventana de tierra.

Un sistema de tierra en telecomunicaciones también cuenta con los anillos de tierra exterior e interior. El anillo interior o anillo de la torre, consiste en un alambre enterrado alrededor de la base de la torre, mientras que el anillo externo, en ocasiones, corresponde a un alambrado enterrado que circunda el exterior del edificio y cumple la función de igualar el potencial del terreno en los alrededores de la torre y el container. Estos dos anillos se conectan entre sí [5], y se complementan con una varilla de tierra.

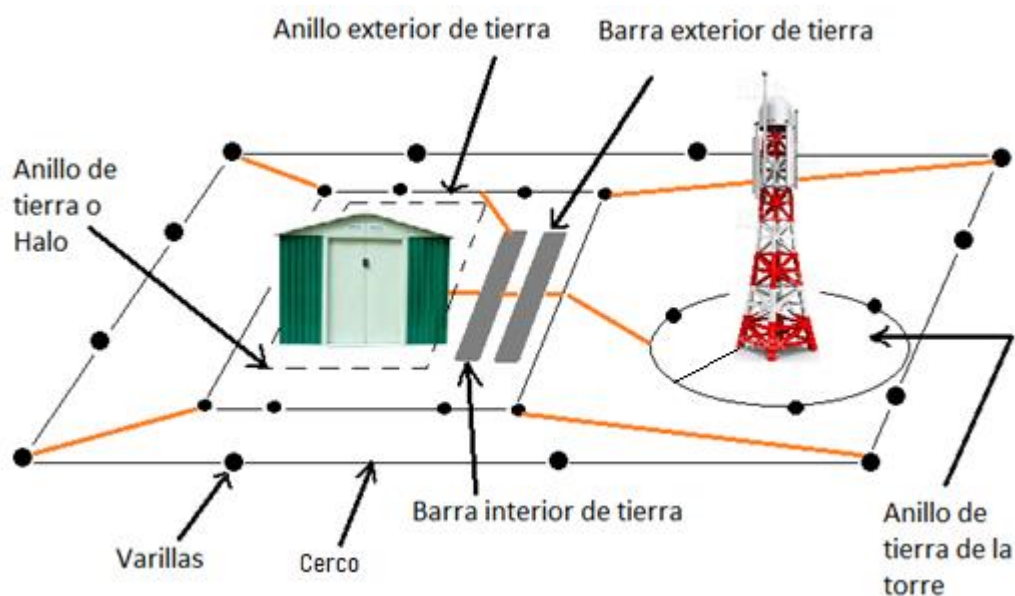


FIGURA 3. 8 Anillos de tierra en un SPAT de telecomunicaciones.

### 3.4.3 Protección contra descargas atmosféricas

En el caso de telecomunicaciones, la torre de transmisión generalmente se trata de ubicar en una zona elevada para así proporcionar un mayor radio de transmisión y las ondas eviten los obstáculos que deterioran la señal transmitida para los clientes, lo cual origina que aumente la probabilidad de que la RBS reciba una descarga eléctrica.

Un evento eléctrico capaz de generar sobretensiones de niveles elevados en un sistema es una descarga atmosférica, y como conocemos, una sobretensión de nivel alto es capaz de ocasionar serios problemas de seguridad para personas y equipos. En efecto, para lograr tomar medidas eficientes contra una descarga de ese nivel es necesario una elevada inversión, pues los costos asociados a un

buen sistema de protección contra descargas son altos, sin embargo son costos necesarios pues un evento de esta envergadura en el peor de los casos, puede dejar inoperante todos los equipos electrónicos necesarios para la operación de un sistema de comunicación y también puede acabar con la vida de una persona. Un rayo puede transportar una energía estimada de 1.250.000 kilojoules lo que equivale a 350 kWh, lo que es extremadamente elevado para un evento que ocurre en milésimas de segundo. Por otro lado, la intensidad de corriente de un rayo se estima del orden de 50.000 A, sin embargo, se han registrado rayos hasta de 200.000 A. No obstante, cabe destacar que el peligro más considerable de una descarga es el factor tiempo, pues la duración en que se disipe toda la energía del rayo es proporcional a los daños que ocasiona esta y se sabe que toda la energía de un rayo tarda en disiparse entre 100 y 300 micro segundos y el pico de corriente tarda en disiparse entre 1 a 2 microsegundos. Debido a estos parámetros resulta complicado estimar el comportamiento de un rayo, por lo que contar con un sistema de protección contra estos eventos eléctricos es imprescindible. La probabilidad que un rayo caiga cercano a un área determinada depende de cada país y cada zona bajo estudio, lo cual determina si una zona tiene mayor peligro de descargas atmosféricas que otras. También se debe considerar que cada rayo tiene parámetros diferentes, los cuales están estandarizados según su probabilidad de ocurrencia en la norma AS 1768-1983.

Existen protecciones exteriores contra descargas atmosféricas, las cuales constan de las protecciones que salvaguardan la totalidad de instalación y dispositivos en el exterior, es decir, a todos los aparatos que se encuentren sobre la torre. El sistema de protección externa es el encargado de tomar la corriente que vienen desde el rayo y aterrizarla de una manera efectiva hacia el sistema de puesta a tierra. Estos sistemas externos se componen de tres componentes principales: el sistema de terminación de aire, que son estructuras metálicas situadas al lado o cerca de la instalación que está bajo protección; el sistema de conductores bajantes, el cual define los parámetros de los conductores y se encarga de llevar la corriente desde el sistema terminación de aire hasta el sistema de terminación de tierra, y por último, el sistema de terminación de tierra que es el encargado de disipar toda la intensidad del rayo sin provocar niveles de sobre voltajes elevados.

Los sistemas de protección contra descargas se pueden clasificar en protecciones primarias y secundarias, el nivel primario consta de los sistemas de pararrayos, estructuras metálicas, terminales aéreos, tomas de tierra y blindajes, mientras que el nivel secundario es el encargado de salvaguardar

equipos a nivel de alimentación o sistema y por último el nivel terciario se encarga de los dispositivos electrónicos y del manejo y transmisión de datos.

La consideración de un sistema de protección contra descargas atmosféricas va a depender de la frecuencia con la que se presentan descargas eléctricas en el sistema bajo cuestión. Para esto se determina que una zona tendrá mayor probabilidad de descarga mientras más cerca se encuentre de la línea del ecuador, y tendrá una menor probabilidad las zonas más cercanas a los polos. En Chile se cuenta principalmente con tres zonas, la franja costera, valles interiores y precordilleranas, y según una herramienta informática llamada “Space Time Domain Search” perteneciente a la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) se obtienen los resultados de niveles ceráunicos para la zona centro-norte del país, los cuales se ven plasmados en la siguiente tabla.

**TABLA 3. 1 Niveles ceráunicos recomendados zona centro-norte de Chile.**

<b>Zona</b>	<b>Nivel Ceráunico por año.</b>
Franja Costera	5
Valles interiores	30
Precordillerana	50

En zonas precordilleranas o alejadas de la costa se tienen entre 30 a 50 tormentas al año, por tanto, la probabilidad de la descarga atmosférica en una RBS es más probable en dichas zonas, a diferencia de zonas costeras donde no se sobrepasan las 5 tormentas al año.

Los elementos más comunes de protección contra descargas atmosféricas son los siguientes:

- **Pararrayos o captores**

El pararrayo se debe ubicar en la zona más alta de la torre de telecomunicaciones y este se debe encargar de absorber la corriente de la descarga y la dirige hacia la tierra. En ocasiones es necesario más de un terminal según la robustez del sistema. Este sistema de protección va conectado por medio de colectores, normalmente cables de cobre desnudo que tienen su destino a una toma de tierra.

El pararrayos, también conocido como varilla de Franklin, consiste básicamente en una estructura altamente conductora, metálica y con punta. El material empleado para las puntas es el

tungsteno y el resto de la estructura se fabrica a base de hierro o acero galvanizado. Las medidas comunes de estos elementos son entre 0.5 a 2 metros de longitud y una sección de base la cual no debe ser inferior a  $500 \text{ mm}^2$ .

- **Los pararrayos autoválvula o descargadores.**

Estos descargadores tienen la función principal de proteger el equipamiento presente en el sistema eléctrico de posibles sobretensiones que se originan en la red de energía comercial. En el caso que se produzca una descarga directamente sobre la red comercial, esta origina elevadas sobretensiones transitorias las cuales se transmiten a través de las líneas de distribución y se dirigen a las instalaciones internas del sistema eléctrico. Los descargadores están destinados a transportar los transitorios que generan una descarga atmosférica, actuando como un limitador de tensiones elevadas permitiendo únicamente valores admisibles por el sistema eléctrico de telecomunicaciones y de esta forma evitar cualquier daño a equipos del sistema. El elemento principal de un descargador es un disco de resistencia calculada el cual permite la circulación de flujos elevados de corriente por medio de un camino de baja impedancia y por otro lado ofrece una gran impedancia para flujos de corriente débiles o normales, con lo cual se asegura el correcto y seguro paso de corriente entre la línea de energía y la tierra en el caso de producirse una descarga atmosférica.

- **Cables de guardia**

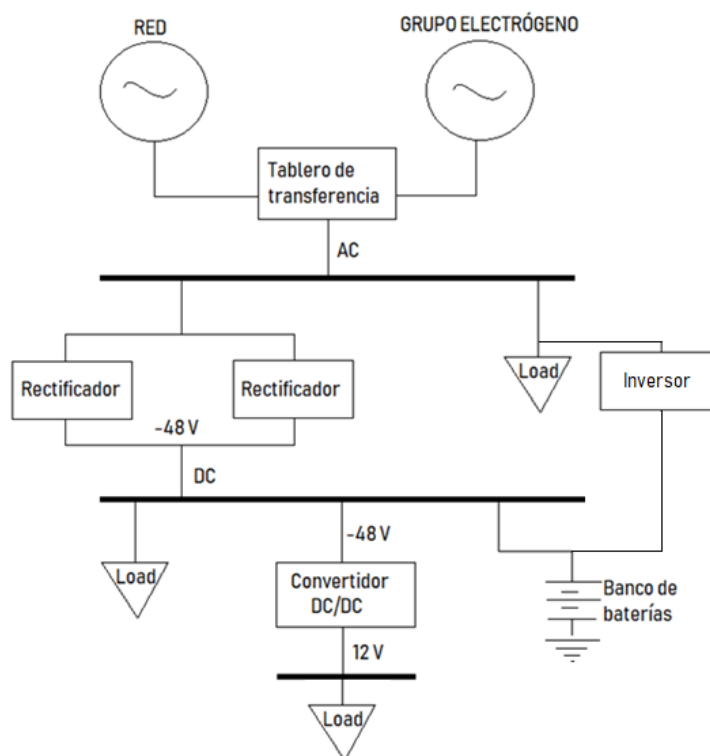
Los cables de guardia son recomendados para subestaciones los cuales deben tener una sección igual a la de las líneas de transmisión. Estos cables deben estar a una altura mínima determinada por la altura y ancho del equipo a proteger. Con este sistema de protección la corriente transiente generada por un rayo debería bajar por el camino de baja impedancia otorgado por los cables de guardia. En sistemas de telecomunicaciones, el cable de guardia va acompañado de un pararrayos y luego conectado directamente al SPAT del sistema, con esto asegurar que el mayor porcentaje de intensidad generada por el transiente sea disipado a lo largo del terreno.

### **3.4.4 Elementos de energía en un sistema de telecomunicaciones**

Un sistema de telecomunicaciones consta de una parte de corriente alterna y otra de corriente continua. El suministro principal de energía es señal alterna proveniente de los sistemas de distribución o bien de un grupo electrógeno. Luego esta señal de corriente alterna es rectificada para

así contar con suministro de corriente continua en el sistema. Aunque previo a la rectificación se alimentan cargas con corriente alterna como la iluminación, entre otros. A continuación, se ubican baterías de diferentes niveles de tensión entre los buses de carga y descarga. Este sistema de batería es vital para un sistema de comunicaciones, pues mantener el servicio es lo más importante para una compañía de esta índole. Entonces, si en algún momento el suministro de energía alterna sufre un corte, pasa a ser utilizada la energía continua proveniente de las baterías, donde los niveles típicos de tensión utilizados varían entre 12[V], -48[V]. Luego esta corriente continua es manipulada por convertidores DC-DC con el fin de otorgar un suministro a las cargas que operan con corriente continua. En el caso de contar con una carga que opera con corriente alterna, la señal pasa por equipos inversores. Debido a que un sistema de telecomunicaciones no debe verse afectado por un apagón o un corte de suministro de energía eléctrica proveniente de la red, es vital la presencia de grupos electrógenos a diésel aguas arriba del sistema eléctrico y por otro lado, los bancos de baterías cumplen la función intermedia en el paso de alimentación de energía comercial y el grupo electrógeno.

En la figura 3.9, se muestra un esquema de los elementos básicos que componen un sistema de energía DC en telecomunicaciones en Chile:



**FIGURA 3. 9 Sistema de energía de telecomunicaciones.**

## Capítulo 4. Medición de resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra

---

### 4.1 Introducción

Un sistema de puesta a tierra se caracteriza principalmente por el valor de resistencia que este posee pues es el valor que indica el nivel de oposición que posee el arreglo ante el flujo de una corriente de falla. En este capítulo, se describen los procesos de medición de un SPAT existente aceptado por el IEEE y además, se detalla el método utilizado en las mediciones realizadas en este informe.

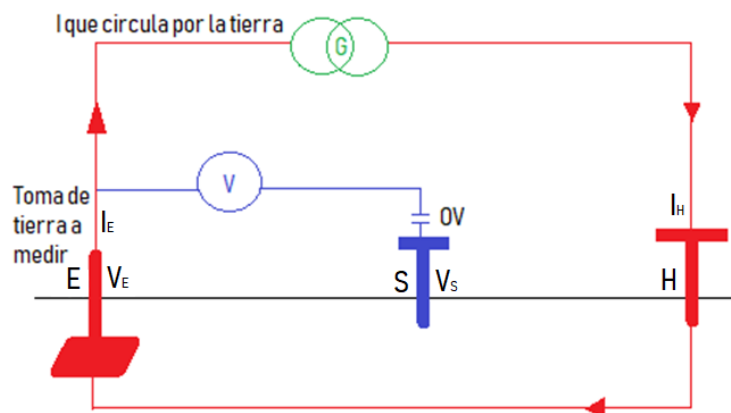
### 4.2 Normativa IEEE para la medición de un SPAT

Uno de los estándares internacionales más reconocidos en el ámbito eléctrico es el estándar IEEE. Para este caso particular, el estándar utilizado es el IEEE Std.81-2003 el cual detalla los procesos más eficientes y aceptados de medición de resistencia de SPAT.

#### 4.2.1 Caída de potencial

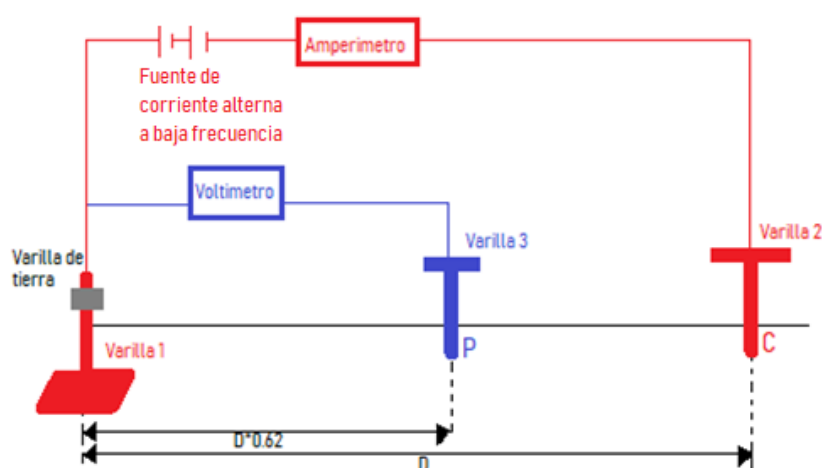
El principio de operación para realizar una medición de resistencia de tierra de un sistema de puesta a tierra, se realiza por medio de dos varillas o electrodos (S y H). Este método consiste en hacer circular una corriente alterna de baja frecuencia por medio de un generador a través de una toma auxiliar por la que circulara la corriente inyectada entre la toma de tierra a medir (E) y la toma de inyección de corriente (H). Luego se mide el nivel de tensión entre la toma de tierra a medir (E) y un punto de potencial nulo (S), como se muestra en la figura 4.2, donde el instrumento obtiene el resultado por medio de la siguiente ecuación.

$$R_E = \frac{V_E - V_S}{I_E - I_H}, \quad (4.1)$$



**FIGURA 4. 1 Principio eléctrico para obtener la resistencia de SPAT**

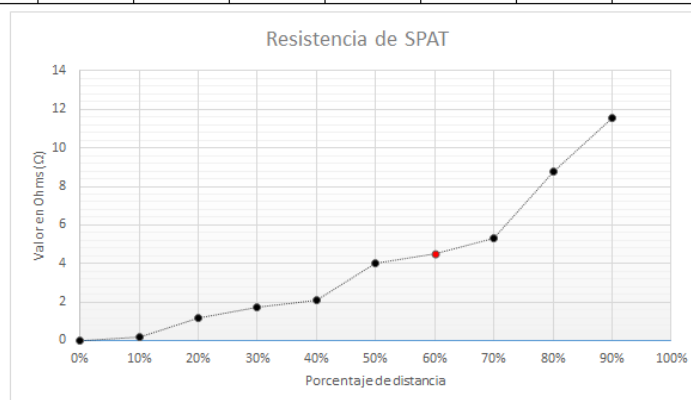
Este método requiere la utilización de dos varillas o electrodos de medición (ver figura 4.2), una de ellas para la inyección de corriente (varilla 2 en Fig. 4.2) y la otra para la referencia de potencial nulo (varilla 3 en Fig. 4.2), también se requiere un amperímetro, una fuente y un voltímetro. Tal como se comentó anteriormente, para obtener una medición cercana a la realidad, se debe evitar que la varilla 3 se vea influenciada por la corriente de la varilla 1 y la varilla 2. Para ello se procede a colocar la varilla 3 al 62% de D, donde D corresponde a la distancia entre el electrodo de puesta a tierra y la “varilla 2”, luego se proceda a mover la “varilla 3” a un  $\pm 10\%$  para concluir que la medición varia lo mínimo, con lo cual se comprueba que la medición no es afectada por el paso de la corriente en “varilla 1” y la “varilla 2”, tal como se muestra en la figura 4.1.



**FIGURA 4. 2 Método de caída de potencial.**

A continuación, se muestra un ejemplo de medición de resistencia de puesta a tierra con nueve puntos de sondeo de resistencia de tierra, donde se logra apreciar que aproximadamente entre 50% 70% los datos no sufren cambios debido a la influencia los gradientes en el suelo generados por la inyección de corriente en el terreno. Por tanto, en ese rango de porcentajes se encuentra el valor real de resistencia de puesta a tierra del sistema eléctrico medido, el cual teóricamente está definido en el 62.3% de la distancia total de sondeo.

Porcentaje	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Distancia	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
Valor en Ohms	0	0.21	1.17	1.73	2.11	4	4.49	5.34	8.79	11.55

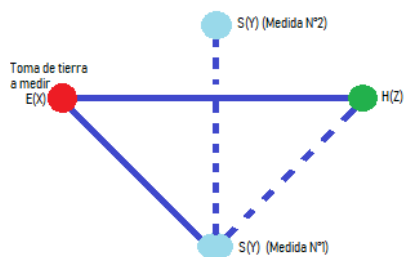


**FIGURA 4. 3 Ejemplo de medición por método de caída de potencial.**

Se debe considerar que este resulta ser el método de medición de resistencia de tierra más utilizado debido a su simpleza y confiabilidad en los resultados.

#### 4.2.2 Medida en triángulo

Este método consiste en clavar los electrodos S (potencial nulo), H (inyección de corriente) y E (electrodo de puesta a tierra) formando un triángulo equilátero. Luego se realiza una segunda medida cambiando la posición de la varilla S de un lado a otro tal como se muestra a continuación:

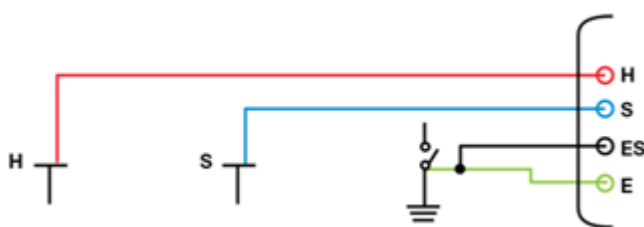


**FIGURA 4. 4 Método de medida triangular o de tres polos.**

Luego se procede a comprobar si los dos resultados son parecidos o bien con un bajo porcentaje de error (5%) implica que la medición está bien, de no ser así se realiza el mismo procedimiento, pero aumentando las distancias de separación. No obstante, este tipo de medición no resulta ser el más confiable pues este puede llegar a entregar resultados inciertos.

### 4.2.3 Medida de tierra con cuatro polos

Para la medida de resistencias muy débiles de pocos ohmios ( $0.1 \Omega$  a  $1 \Omega$ ), este método resulta ser muy útil. Este método se basa en el mismo principio que la medida de tres polos, pero con una conexión adicional entre la toma de tierra de la malla y el telurómetro (ES), la cual elimina la influencia de resistencias paralelas producidas generalmente por conductores o estructuras metálicas enterradas en las cercanías del SPAT bajo sondeo. La conexión se efectúa tal como se muestra a en la figura 4.5.



**FIGURA 4. 5 Método de medición de 4 polos.**

### 4.2.4 Resistencia de tierra selectiva de tres o cuatro polos

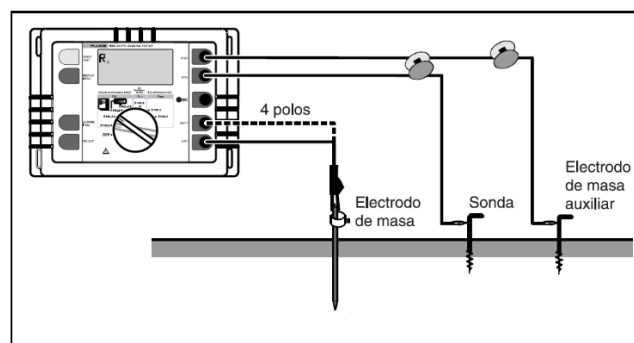
El método selectivo es una variación al método de caída de potencial y posible solo en medidores de resistencia de alta gama como por ejemplo el equipo Fluke 1625. El gran beneficio de este método es que se puede efectuar la medición de resistencia de puesta a tierra sin la necesidad de

desconexión de la toma de tierra, lo que implica en mayor seguridad para el personal que se encuentra midiendo, pues al desconectar el electrodo de un sistema bajo tensión, supone algún posible riesgo para el operador. Además, en cuanto al sistema eléctrico, la desconexión y conexión del sistema puede ocasionar transitorios de intensidad que pueden ser dañinos para el sistema de energía. Este método utiliza los mismos principios que el método de caída de potencial que utiliza dos picas, una para la inyección de corriente y la otra para la medida de potencial. La regla de colocación de estas picas es idéntica que para el método de caída de potencial. Además de la implementación de ambas picas (de potencial y de corriente), se debe realizar una conexión adicional con el equipo y la barra o electrodo en el cual se efectúa la medición, esto con el fin de reducir o atenuar la influencia de malla, electrodos o grandes estructuras metálicas cercanas al sistema de tierra bajo medición.

### 4.3 Metodología y equipamiento de medición utilizada en las mediciones de resistencia de SPAT en Fluke® 1625

#### Caída de potencial

El método de caída de potencial es usado para determinar la resistencia total en un sistema de puesta a tierra usando dos estacas o electrodos, uno de corriente y otro de potencial, y además un anclaje al electrodo de tierra de interés, tal como se muestra en la siguiente imagen.



**FIGURA 4. 6 Conexión equipo Fluke 1625 para método de caída de potencial.**

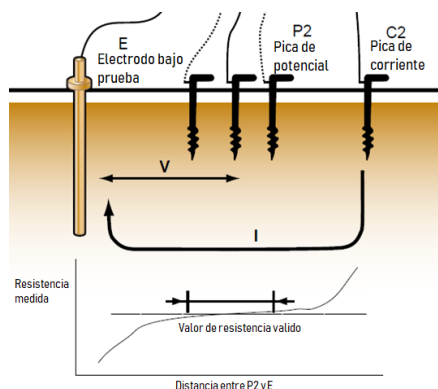
En la figura 4.6, se aprecian los dos electrodos, uno de corriente y otro de potencial, también se aprecia el electrodo de puesta a tierra que se está midiendo. Técnicamente se aconseja instalar los electrodos de corriente a una distancia mínima de 20 metros de distancia con respecto al electrodo de tierra, y el electrodo de potencial a un 62% de la distancia total con respecto al electrodo de tierra,

esto debido a la interpolación de los campos generados por los electrodos de corriente y de tierra, por este motivo este método también se conoce como el método del 62%.

El método de caída de potencial, es el método tradicional para medir la resistencia de toma de tierra, pero un inconveniente importante es que para realizar este tipo de medición es necesaria la desconexión de la toma de tierra ubicada en la barra principal de tierra, lo cual puede ser un tanto peligroso para los operadores como para los equipos, pues todo el sistema queda momentáneamente sin sistema de protección de tierra. Luego frente a alguna falla durante el tiempo de medición se ocasionaría graves daños a los equipos. Debido a lo anterior, se plantea otro método de medición que se basa en el mismo fundamento teórico que el método de caída de potencia, pero no tiene la necesidad de desconectar la toma de tierra. Dicho proceso se conoce como el método selectivo.

### Método selectivo.

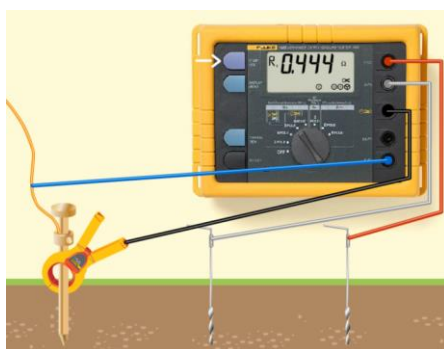
El método selectivo consiste en un método similar a la caída de potencial, con la particularidad de la utilización de una pinza amperimétrica, lo cual beneficia la seguridad del personal y del equipamiento al ser un elemento no invasivo y operar por medio de inducción, pues en caída de potencial se requiere una desconexión del electro de masa, mientras que con el método selectivo esto no es necesario. El método de medición consiste en realizar una serie de medidas a través de suelo en cuestión, dividiendo este, en ciertos porcentajes. Luego teniendo entre 5 y 10 mediciones, es posible generar una curva de resistencia versus distancia, donde se debe apreciar el punto de resistencia en donde la curva este aplanada, o bien la pendiente de la curva sea cercana a cero. Como a continuación se muestra en la figura 4.7 [9].



**FIGURA 4. 7 Procedimiento de medición del método selectivo.**

En el caso de no obtener un plano en la curva, se debe obtener la resistividad por el método de la *pendiente de Tagg*.

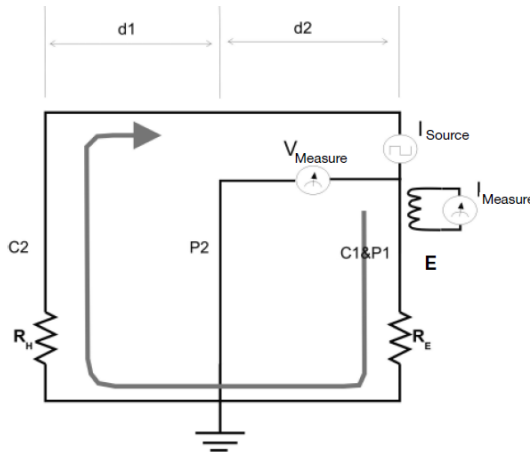
Como ya se ha mencionado, la gran ventaja del método selectivo es asegurar la integridad del personal, pues no se corre ningún peligro al efectuar la medición, por el contrario del método de caída de potencial, que puede causar problemas principalmente en el proceso de reconexión. A continuación, se muestra como es la conexión en el equipamiento Fluke 1625, el cual es el telurómetro utilizado para los sondeos realizados en este informe.



**FIGURA 4.8 Conexión en Fluke 1625 para el método selectivo.**

Tal como se ha descrito en palabras, para el método se necesita un electrodo de corriente (rojo), un electrodo de potencial (blanco), una pinza amperimétrica sensorial que rodee el electrodo de tierra, finalmente también es necesaria la confección de una pinza alrededor del electrodo (azul) medido la cual es encargada de eliminar posibles efectos de resistencias paralelas, con lo que se asegura que la medición efectuada sea del electrodo en cuestión sin la influencia de algún otro sistema existente en alrededores.

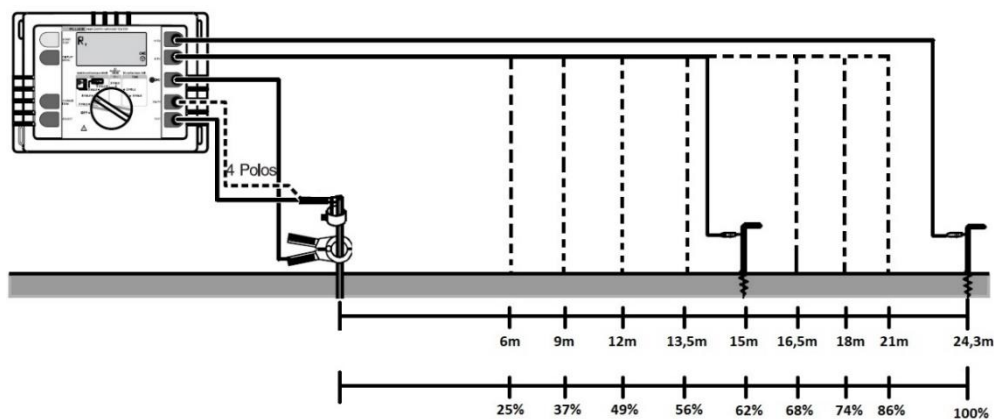
Eléctricamente, se tiene que el electrodo de corriente hace circular una intensidad de corriente alterna entre este mismo y el electrodo medido a través del terreno y luego mide de forma simultánea la caída de potencial entre el electrodo de potencial y el electrodo medido, por último, calcula por ley de ohm la resistencia entre la varilla de potencial y el electrodo bajo medición, tal como se muestra en la siguiente figura.



**FIGURA 4. 9 Principios eléctricos del método de medición de resistencia de tierra.**

El equipo Fluke 1625, dispone de tres conductores con un alcance de 30 metros aproximadamente, por tanto esta será la distancia máxima de medición en la cual se ubicara la pica de corriente. Aunque lo ideal es una separación mayor para que los electrodos no influyan entre sí, con una separación de 20 metros es suficiente para obtener buenos resultados. Sin embargo, para asegurar resultados fidedignos, se realizará el método de la pendiente de Tagg que soluciona este tipo de problemas [10].

Teniendo la distancia máxima se subdivide la distancia en 9, tal como se muestra en la figura 4.10.



**FIGURA 4. 10 Conexionado y procedimiento para el método selectivo.**

Realizando el procedimiento de medición descrito en la figura anterior, es posible obtener una curva con las resistencias medidas en cada distancia, para así finalmente lograr determinar la resistencia total de la malla existente en el sitio de telecomunicaciones.

La conexión por medio de la pinza amperimétrica, se realizó en la barra principal de tierra, y se corrobora que todo el conexionado de picas y conectores estuviera en orden.



**FIGURA 4. 11 Barra principal de tierra de una RBS.**

En la figura anterior se logra ver la barra principal de tierra, en donde llegan todas las conexiones de tierra, incluyendo anillos, electrodos, equipamiento de operación, entre otros sistemas y subsistemas.



**FIGURA 4. 12 Conexión de pinza amperimétrica en el electrodo medido.**

En la imagen anterior se logra ver que efectivamente no fue necesario desconectar la toma de tierra, solo es necesario realizar la conexión del conector a la barra para eliminar la influencia de resistencias paralelas de un sistema de puesta a tierra cercano, y además se logra observar que la utilización de la pinza amperimétrica es bastante sencilla y no implica ningún riesgo.

## Capítulo 5. Medición de resistividad del terreno

---

### 5.1 Introducción

Un sistema de puesta a tierra, se encuentra ligado directamente a la tierra, suelo o terreno, siendo el parámetro eléctrico más importante del suelo la resistividad. Por tanto resulta vital la medición de dicha resistividad previo a cualquier proceso de diseño de un SPAT. Existen diferentes métodos para efectuar una medición de resistividad del suelo, las cuales se identifican en este capítulo, además de los estándares vigentes y aceptados para este tipo de mediciones.

### 5.2 Normativa IEEE para la medición de Resistividad de Terreno

La normativa vigente para este tipo de mediciones corresponde al estándar internacional IEEE Std. 80-2003, en la que se definen los procesos válidos para efectuar una correcta medición de resistividad de algún terreno. Para lograr un resultado eficiente del sistema de puesta a tierra, el primer parámetro medible es la resistividad de la tierra, la cual indica posibles puntos óptimos para la instalación de la malla de tierra. Existen diversos métodos de medición de la resistividad del terreno, siendo el más utilizado el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) donde destacan los métodos de Schlumberger y Wenner.

Luego de obtener las resistividades aparentes por alguno de los distintos métodos de medición se puede obtener la resistividad equivalente del sitio bajo medición, la cantidad de estratos presentes en dicho terreno y su resistividad característica.

#### 5.2.1 Método de Schlumberger

Es un método de medición que consta de cuatro electrodos o polos, dos de ellos corresponden a electrodos de potencial y los otros dos son electrodos que inyectan corriente alterna a baja frecuencia. Este método tiene la característica de mantener los electrodos de potencial en el mismo lugar, pero moviendo los electrodos de corriente, lo cual entrega resultados fidedignos y el proceso de medición es más rápido y con menos variaciones físicas. Este método es muy útil para conocer la resistividad de capa profundas y además de la profundidad que tiene cada capa.

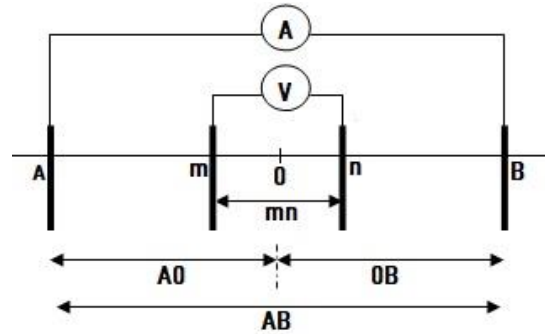


FIGURA 5. 1 Medición de resistividad por el método de Schlumberger.

La ecuación que caracteriza la resistividad por medio del método de medición de Schlumberger se muestra a continuación:

$$\rho_s = \pi \cdot mn \cdot \left[ \frac{A0^2}{mn^2} - \frac{1}{4} \right] \cdot R, \quad (5. 1)$$

Donde,

$A0 = B0$  = Distancia en metros entre los electrodos de corriente y el centro.

$mn$  = Distancia entre los electrodos de potencial.

$R$  = Valor entregado por el equipo telurómetro en  $\Omega$ .

### 5.2.2 Método de Wenner

El método de Wenner, es el método universal, del cual se deriva el método de Schlumberger, entonces el principio de operación es mismo que en caso de Schlumberger, salvo que, en este método, se mueven tanto los electrodos de potencial como los electrodos de corriente a una distancia “a”, tal como se muestra en la siguiente imagen.

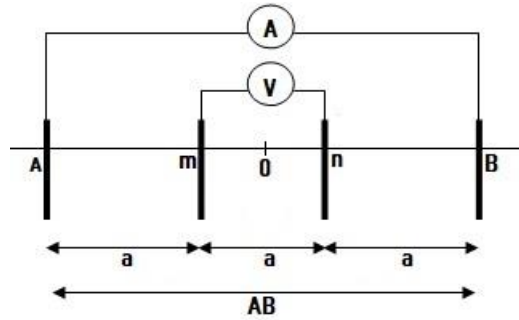


FIGURA 5. 2 Medición de resistividad por método de Wenner.

El parámetro obtenido mediante este método de medición es, la resistencia en Ohms ( $R$ ), con la cual es posible obtener los valores de resistividad en  $\Omega$ -m por medio de la siguiente formula:

$$\rho_w = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R, \quad (5. 2)$$

Donde

$a$ = Distancia de separación entre los electrodos.

$R$ = Valor entregado por el equipo telurómetro en  $\Omega$ .

### 5.3 Resistividad equivalente

Una vez obtenidos los puntos de resistividad aparente, se construye la curva de resistividad correspondiente. Se puede obtener la resistividad equivalente de todos los estratos medidos.

Para obtener la resistividad equivalente, se utiliza el método de Burgsdorf-Yacobs, las cuales se definen para “ $n$ ” estratos, logrando mayor efectividad en el cálculo entre dos a 4 estratos.

$$\rho_{eq} = \frac{F_n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} [F_i - F_{i-1}]}. \quad (5. 3)$$

Donde

$n$ = Cantidad de estratos.

$F_i$ = Variable auxiliar del estrato “ $i$ ”.

$\rho_i$ = Resistividad en  $\Omega$ -m de la capa “ $i$ ”.

Entonces para un terreno de 2 estratos la resistividad equivalente tiene la siguiente forma:

$$\rho_{eq,2} = \frac{F_2}{\frac{F_1 - F_0}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2}} \quad (5.4)$$

Para un terreno de tres estratos:

$$\rho_{eq,3} = \frac{F_3}{\frac{F_1 - F_0}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2} + \frac{F_3 - F_2}{\rho_3}} \quad (5.5)$$

Para un terreno de cuatro estratos:

$$\rho_{eq,4} = \frac{F_4}{\frac{F_1 - F_0}{\rho_1} + \frac{F_2 - F_1}{\rho_2} + \frac{F_3 - F_2}{\rho_3} + \frac{F_4 - F_3}{\rho_4}} \quad (5.6)$$

Como se observa, para obtener la resistividad equivalente, es necesario determinar la variable auxiliar  $F_i$ . Para ello, se realiza una serie de cálculos de variables auxiliares para la simplificación de los resultados finales. La variable auxiliar  $F_i$  se obtiene de la siguiente forma:

$$F_i = \sqrt{1 - \frac{V_i^2}{r_0^2}} \quad (5.7)$$

Radio equivalente de la malla a diseñar:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (5.8)$$

Donde

$S$  = Área de la malla a diseñar en  $m^2$

Cálculo de variable auxiliar  $r_0^2$ :

$$r_0^2 = r^2 - b^2, \quad (5.9)$$

Donde

$b$  = Profundidad de enterramiento de la malla en metros.

Cálculo de variable auxiliar  $q_0^2$

$$q_0^2 = 2 \cdot r \cdot (r + b), \quad (5.10)$$

Cálculo de variable auxiliar  $u_i^2$ :

$$u_i^2 = q_0^2 + r_0^2 + h_i^2. \quad (5.11)$$

Donde

$h_i$  = Profundidad en metros de la capa "i".

Cálculo de variable auxiliar  $v_i^2$ :

$$v_i^2 = \frac{1}{2} \cdot \left[ u_i^2 - \sqrt{u_i^4 - 4 \cdot q_0^2 \cdot r_0^2} \right]. \quad (5.12)$$

Con esto es posible obtener la resistividad equivalente del terreno asumiendo una cierta cantidad de estratos presentes en el suelo con su determinada resistividad.

## 5.4 Metodología y equipamiento utilizado para la medición de resistividad

Para realizar los cálculos y diseño de un sistema de puesta a tierra, la variable geológica de resistividad del terreno resulta vital. En caso que el método utilizado para realizar la medición es el método de Schlumberger. El método realizado consta de 4 varillas, dos de inyección de corriente y dos de potencial, y el conexionado de cada una de ellas se muestra a continuación:

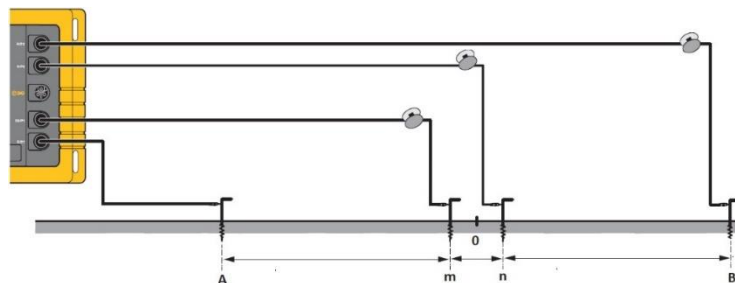
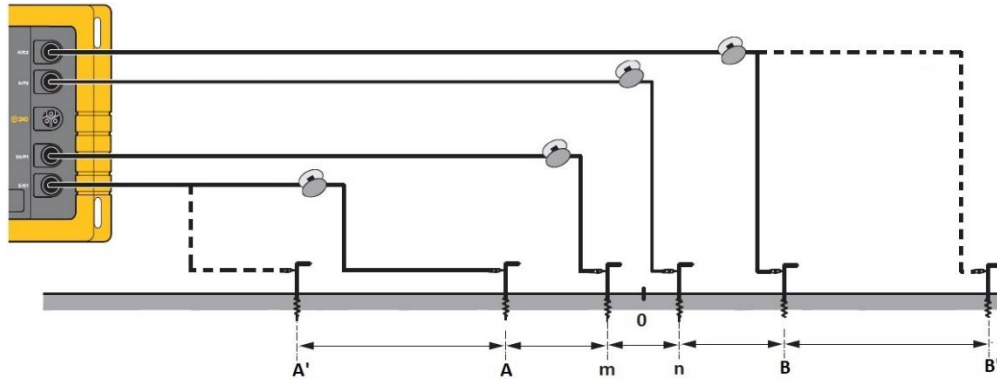


FIGURA 5.3 Método de Schlumberger en Fluke 1625.

Siendo los electrodos “A” y “B” las encargadas de inyectar corriente a baja frecuencia a través del suelo bajo medición y los electrodos  $m$  y  $n$  corresponden a las varillas de potencial y punto 0 corresponde al punto central. Los electrodos deben estar enterrados a una profundidad no mayor a  $\frac{a}{3}$ . Luego el método de Schlumberger se caracteriza por mantener las picas de potencial a una distancia “mn” estática, y luego se procede a distanciar las picas de corriente a una distancia A0 y B0, como se muestra en la imagen siguiente [7].



**FIGURA 5. 4 Disposición de electrodos de medición en método de Schlumberger.**

De esta manera se debe ir aumentando la distancia A0 y B0 de forma equitativa hasta llegar a la distancia A0 máxima de 50 metros aproximadamente, apegándose al espaciamiento disponible para la realización del proceso. Luego, teniendo estas lecturas efectuadas por el equipo de medida, ahora se procede a obtener la resistencia aparente de cada punto medido por medio de la ecuación (5.1). Una vez obtenidas las resistividades aparentes de cada punto medido, es posible realizar una curva con dichos puntos. Con esta curva de resistividad, es posible realizar un análisis previo cualitativo de la misma, de ese modo se puede estimar la cantidad de estratos que posiblemente tendrá el modelo del terreno en cuestión. Generalmente los terrenos constan de dos a cuatro estratos diferentes en una misma zona. Para organizar el tipo de curva acorde a la cantidad de estratos que posee el terreno se tienen familias que determinan los estratos o capas de tierra para el caso.

- Dos estratos.

$$\rho_1 < \rho_2$$

$$\rho_1 > \rho_2$$

- Tres estratos.

$$H/\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$$

$$A/\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$$

$$K/\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$$

$$Q/\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$$

- Cuatro estratos.

$$QQ/\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$$

$$QH/\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$$

$$HK/\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$$

$$KQ/\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$$

$$HA/\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$$

$$AK/\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$$

$$KH/\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$$

$$AA/\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$$

Ahora para obtener la cantidad exacta de estratos, su resistividad y altura correspondiente se lleva a cabo el procedimiento de superposición bilogarítmica de Román, la cual se lleva a cabo contrastando la curva obtenida con una serie de curvas patrón determinadas para distintos tipos de terrenos. De acuerdo con las curvas patrón establecidas por Orellana-Monney que caracterizan un tipo y composición de un terreno en particular, es posible realizar una comparación entre la curva de resistividad aparente y alguna curva patrón hasta encontrar una que se superponga a la otra con el menor error posible. Por términos de normativa se requiere el uso de este método, pues es aprobado por los estándares internacionales. Sin embargo, existen software que realizan este proceso automáticamente, comparando las curvas de una manera más exacta, lo cual entrega resultados más confiables. El último paso del proceso consiste en la obtención de la resistividad equivalente de una cantidad  $n$  de estratos, como ya se cuenta con las resistividades de cada estrato y la altura de cada una, es posible obtener la resistividad equivalente por medio de las ecuaciones Burgsdorf-Yacobs.

Burgsdorf-Yacobs determina la resistividad equivalente de un terreno de  $n$  capas. Luego sobre este suelo se añade una malla de tierra horizontal y así es posible obtener la resistividad equivalente, la cual se define en la ecuación (5.3).

## Capítulo 6. Diseño de un Sistema de Puesta a Tierra

---

### 6.1 Introducción

El proceso que determina la eficiencia y el nivel seguridad que entrega finalmente un Sistema de Puesta a Tierra del sistema eléctrico de telecomunicaciones, es el proceso de diseño. El estándar internacional que detalla este procedimiento paso a paso es la IEEE Std. 80-2000. En que se muestran todos los procesos necesarios para realizar un correcto diseño y obtener los resultados esperados. En este capítulo se muestran todos los pasos o secuencias involucradas en el diseño de un SPAT, independiente del sistema eléctrico que se esté protegiendo.

### 6.2 Normativa IEEE para el diseño de un SPAT

El estándar IEEE Std. 80-2000 indica el procedimiento paso a paso, donde los parámetros más importantes son el valor de la resistencia de puesta a tierra del diseño, y los valores que implican la seguridad de las personas, tal como las tensiones de paso y de toque presentes en el perímetro del arreglo. Dichos valores es necesario que sean menores que a los soportados por un ser humano, de no ser así, se debe rediseñar y volver a los pasos anteriores para cambiar o modificar parámetros hasta que el diseño de SPAT se encuentre dentro de los requerimientos establecidos.

### 6.3 Procedimiento de diseño de un SPAT

#### 6.3.1 Tensión de toque y de paso admisible por el ser humano

Primero se debe describir el sitio en el cual se diseñara la malla, con su resistividad de terreno correspondiente y también las dimensiones y características previas o propuestas para el arreglo de conductores. Luego como el objetivo principal de un sistema de aterrizaje a tierra es, salvaguardar la integridad de las personas, es necesario conocer los límites de potenciales que son capaces de resistir las personas ante algún tipo de falla eléctrica en un sistema. Estos parámetros son la *tensión de paso* y de *toque*.

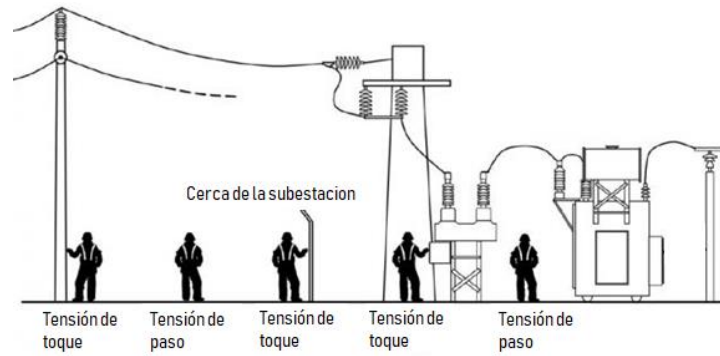


FIGURA 6. 1 Tensiones de toque y de paso.

- **Tensión de toque para persona de 50 kg y 70 kg.**

$$V_{toque(50Kg)} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right), \quad (6.1)$$

$$V_{toque(70Kg)} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right), \quad (6.2)$$

- **Tensión de paso para persona de 50 kg y 70 kg.**

$$V_{paso(50Kg)} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_{sup}) \left( \frac{0.116}{\sqrt{t_f}} \right), \quad (6.3)$$

$$V_{paso(70Kg)} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_{sup}) \left( \frac{0.157}{\sqrt{t_f}} \right), \quad (6.4)$$

Donde

$C_s$  = Factor de reducción de la capa superficial.

$\rho_{sup}$  = Resistividad del material de superficie en  $\Omega$ -m.

$t_f$  = Tiempo de falla.

Para determinar  $C_s$  se utiliza la siguiente formula [6]:

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \rho/\rho_{sup})}{2h_s + 0.09}, \quad (6.5)$$

Donde

$\rho$  = Resistividad del terreno debajo del material de superficie en  $\Omega$ -m.

$h_s$  = Espesor del material de superficie en metros.

$\rho_{sup}$  = Resistividad del material de superficie en  $\Omega$ -m.

Finalmente, si  $C_s = 1$ , implica que  $\rho = \rho_s$ .

### 6.3.2 Determinación de impedancia equivalente y corriente de falla

Para conocer el dimensionamiento del conductor es vital el conocimiento de dos parámetros del sistema, que son la impedancia equivalente y la corriente de falla. Para ello, se estudia el siguiente método para obtener dichos parámetros. Ahora el diagrama unilineal más representativo para estos casos queda de la siguiente forma:

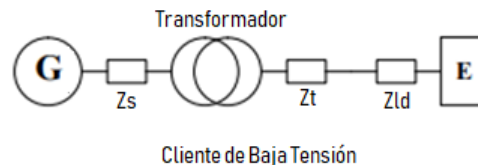


FIGURA 6. 2 Diagrama unilineal completo del sistema.

Donde:

$Z_s$  = Impedancia del sistema.

$Z_T$  = Impedancia del Transformador.

$Z_{LD}$  = Impedancia de la línea de distribución.

Para este caso en particular, se ven involucrados los sistemas de distribución de baja tensión, lo cual dificulta la obtención o determinación de la impedancia de línea de la compañía distribuidora de energía. En vista de ello, se considera que el empalme eléctrico de la instalación correspondiente a la radio estación se encuentra ubicado directamente en los bornes del secundario del transformador de distribución perteneciente a la compañía, quedando el diagrama unilineal queda de la siguiente forma:

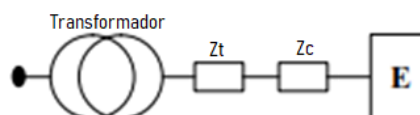


FIGURA 6. 3 Diagrama unilineal del sistema simplificado.

Donde:

$Z_t$  = Impedancia del sistema.

$Z_c$  = Impedancia del cable.

Para obtener la impedancia adjudicada por el transformador de distribución se resuelve la siguiente ecuación:

$$Z_T = \frac{Z\% U_L^2}{100 S_T}. \quad (6.6)$$

Donde:

$Z\%$ : Impedancia porcentual.

$U_L$  = Tensión entre fases del secundario del transformador.

$S_T$  = Potencia aparente del transformador.

En vista de que la impedancia porcentual es un dato complicado de obtener para el caso de sistemas de baja tensión, se utiliza la siguiente tabla de equivalencia:

**TABLA 6. 1 Impedancias porcentuales recomendadas de los transformadores 3 $\phi$ .**

Potencia (KVA)	Z%
112.5	3.0%
150	3.5%
225	4.0%
300	4.5%
500	5.0%
700	6.0%
1000	7.0%

Fuente: ANSI/IEEE Std 242-1986 "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination ...". Pág. 12

La componente real de la impedancia del transformador se calcula de la siguiente forma:

$$I_n = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_L^2}, \quad (6.7)$$

$$R_T = \frac{P_{cu}}{3I_n^2}. \quad (6.8)$$

Donde:

$P_{cu}$  = Pérdidas en el cobre.

Por el hecho de que las pérdidas en el cobre es un dato complicado de obtener, pues este se encuentra en la ficha técnica de cada transformador, se utiliza la siguiente equivalencia:

**TABLA 6. 2 Pérdidas en el cobre asociadas a los transformadores 3 $\phi$  tipo intemperie 13.2 kV.**

Potencia (KVA)	P <sub>CU</sub> (W)
15	600
30	900
45	1200
75	1700
150	2950
300	5000

Fuente: NSEG 16.E.n.78. "Electricidad. Especificaciones De Transformadores de Distribución 13.2 kV". Pág. 9

Se obtiene la reactancia del transformador por medio de la siguiente ecuación:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}. \quad (6.9)$$

La impedancia del transformador de distribución se define de la siguiente forma:

$$Z_{Teq} = R_T + jX_T. \quad (6.10)$$

Donde:

$R_T$  = Resistencia del transformador.

$X_T$  = Reactancia del transformador.

Luego se debe considerar la impedancia que aporta el cable, por ende se procede a obtener la resistencia del cable por medio de la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{P_{cu} \cdot L}{S}. \quad (6.11)$$

Donde:

$L$ =Longitud del cable en metros.

$S$ = Seccion de cable en  $mm^2$ .

Se calcula la reactancia del cable por medio de la siguiente ecuacion:

$$X_c = X_L \cdot L. \quad (6.12)$$

Donde

$X_L$ = Reactancia de la linea.

Luego la impedancia del cable se define de la siguiente forma:

$$X_c = \sqrt{Z_c^2 - R_c^2}. \quad (6.13)$$

Se puede obtener la impedancia correspondiente al cable de la siguiente forma.

$$Z_{ceq} = R_c + jX_c. \quad (6.14)$$

Para obtener la corriente de falla, primero se calcula la impedancia equivalente del sistema, considerando el transformador y el cable.

$$Z_{eq} = Z_{Teq} + Z_{ceq}. \quad (6.15)$$

Finalmente, la corriente de falla se define de la siguiente forma:

$$I_f = \frac{U_L}{\sqrt{3} \cdot |Z_{eq}|}. \quad (6.16)$$

Además, se deben tomar en cuenta dos factores que afectan la corriente simétrica, el *factor de crecimiento* y el *factor de decremento*. Por lo que finalmente, la corriente simétrica que fluye a través de la malla queda de la siguiente manera:

$$I_G = S_f \cdot I_f \cdot C_p \cdot D_f. \quad (6.17)$$

Donde

$C_p$ = Factor de crecimiento, que considera el crecimiento del sistema.

$D_f$ =Factor de decremento.

$S_f$ =Factor de split.

El factor de Split se define por:

$$SF = \left| \frac{Z_1}{Z_2} \right|. \quad (6.18)$$

El factor de decremento se define como (Ver Anexo B.4):

$$df = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left( 1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right)}, \quad (6.19)$$

Donde

$$T_a = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f}. \quad (6.20)$$

### 6.3.3 Potencial de tierra.

Por medio de la siguiente ecuación (6.21) se puede calcular el potencial de tierra, donde se compara el potencial de tierra con la tensión de toque tolerable por una persona de 70 Kg..

$$GPR = I_g \cdot R_g. \quad (6.21)$$

### 6.3.4 Dimensionamiento del conductor

Para dimensionar el conductor a utilizar tanto para el SPAT como para un cable de guardia o de bajada para la protección contra descargas atmosféricas, se debe tener en cuenta que los tipos de conductores más utilizados son los de cobre, de acero recubierto en cobre, de acero y de aluminio. Para determinar la sección mínima del conductor enterrado de la malla basada en la máxima temperatura de cortocircuito deducida por Sverak es:

$$A_{mm^2} = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}, \quad (6.22)$$

O en kcmil:

$$A_{kcmil} = I \cdot \frac{197,4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}, \quad (6.23)$$

Donde

$A_{mm^2}$  = Sección del conductor en  $mm^2$

$A_{kcmil}$  = Sección del conductor en kcmil.

$I$  = Corriente de falla eficaz en KA.

$T_m$  = Temperatura máxima admisible en °C.

$T_a$  = Temperatura ambiente en °C. (25°-30°).

$TCAP$  = Factor de capacidad térmica en  $J/cm^3/°C$ .

$T_r$  = Temperatura de referencia del conductor.

$\alpha_r$  = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia.

$K_0 = 1/\alpha_r - T_r$ .

$t_c$  = Tiempo de circulación de la corriente en segundos.

$\rho_r$  = resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia en  $\mu\Omega/cm^3$ .

En Anexo B.3 se encuentra una tabla con las constantes correspondientes a los conductores más usados en mallas de tierra y en anexo B.2 se encuentra la tabla de equivalencia para Kcmil, mm y AWG. Otra opción para determinar el área del conductor es en cmils, y se obtiene por medio de la siguiente formula:

$$A_{cmils} = I \cdot \sqrt{\frac{33 \cdot t}{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right)}}, \quad (6.24)$$

Donde

$A_{cmils}$  = es el área del conductor en cmils.

$I$  = Corriente eficaz en kA.

$T_a$ =Temperatura ambiente

$T_m$ = Temperatura máxima de fusión.

En la siguiente tabla se indica la temperatura máxima de fusión acorde al tipo de conductor utilizado indicada en el estándar internacional IEEE Std. 80-2000.

**TABLA 6. 3 Temperatura máxima de fusión.**

<b>Tipo</b>	<b>Temperatura de fusión °C</b>
Alambre de cobre recocido	1083
Alambre de cobre dura.	1084
Núcleo de acero con revestimiento de cobre.	1084/1300
Alambre de aluminio.	657
Aleación de aluminio.	660
Alma de acero con recubrimiento de aluminio.	660/1300
Alma de acero con cubierta de Zinc.	410/1300
Acero inoxidable.	1400

También se debe considerar la corrosión como un factor importante para la determinación del tipo de conductor. En este caso, como el cobre es un material resistente a la corrosión, es altamente recomendado un cable de cobre, o bien un cable de aluminio blindado de cobre. Otra consideración es que las bajadas al arreglo de conductores de tierra deben tener la capacidad de soportar una mayor cantidad de intensidad de corriente por lo que el conductor debe tener un sección mayor. En la norma ANSI C2-198 se indica la sección del conductor de bajada mínima, siendo un conductor AWG N°6 para el cobre y un AWG N°4 para el aluminio.

### **6.3.5 Diseño inicial y resistencia de puesta tierra**

En esta ocasión se estiman las dimensiones de la malla, como ancho, largo, cantidad de conductores, disposición de estos y su diámetro, además la profundidad de enterramiento de la malla o arreglo. Con estos parámetros es posible obtener la resistencia de puesta a tierra para una malla o arreglo de conductores sin varillas con el método de Sverak.

$$R_g = \left[ \frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]. \quad (6.25)$$

Donde

$L_c$ = Longitud total de conductores en metros.

$A$ = Área en  $m^2$  cubierta por la malla diseñada.

$h$ = Distancia en metros de enterramiento de la malla diseñada.

La ecuación anterior resulta valida y significativa solo para el caso de mallas cuadradas o rectangulares con reticulados y sin varillas enterradas, en efecto, para otro caso con varillas se utiliza otro método conocido como el método de Schwartz.

Para determinar la resistencia equivalente de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo, con electrodos verticales y una malla horizontal, el método más aceptado y certero es por medio de las ecuaciones de Schwartz. Este método generalmente otorga resultados de resistencias mayores que en el método de Sverak, pues, este método considera las *resistencias mutuas* entre las varillas y los conductores y también la resistencia de las varillas, por lo cual este método resulta ser más exacto y preciso en cuanto a resultados. La resistencia de tierra, según Schwartz se define de la siguiente forma.

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_m}. \quad (6.26)$$

La resistencia de la malla formada por los conductores  $R_1$  se obtiene de:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L_c}{\sqrt{h \cdot d_c}} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right], \quad (6.27)$$

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2, \quad (6.28)$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68. \quad (6.29)$$

Para calcular la resistencia que tienen las varillas se obtiene de la siguiente formula:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n_r \cdot L_r} \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K_1 \cdot L_r}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right]. \quad (6.30)$$

Luego la resistencia mutua se obtiene de la siguiente manera:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]. \quad (6.31)$$

### 6.3.6 Longitud de enterramiento del conductor

Para mantener el potencial entre los límites de seguridad establecidos se debe determinar una distancia o longitud de enterramiento del conductor, lo cual se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L = \frac{K_m \cdot K_i \cdot \rho_e \cdot \sqrt{t_f}}{116 + 0.17 \cdot \rho_s}. \quad (6.32)$$

Donde:

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

$\rho_s$  = Resistividad superficial del terreno en  $\Omega$ -m.

Luego obtener los  $K_m$  y  $K_i$ , que se calculan mediante las fórmulas siguientes.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d_c} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot h \cdot d_c} - \frac{h}{4 \cdot d_c} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right]. \quad (6.33)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n. \quad (6.34)$$

Donde

$D$  = Espaciamiento entre conductores de la malla en metros.

$h$  = Profundidad de la zanja de enterramiento de la malla en metros.

$d_c$  = Diámetro del conductor de metros.

$n$  = Número de conductores paralelos de una malla rectangular.

$K_{ii} = 1$  (Para malla con barras verticales a lo largo del perímetro).

$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$  (Para mallas sin barras verticales o con unas pocas barras localizadas fuera del perímetro).

$K_h = \left( 1 + \frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{2}}$  (Con  $h_0 = 1$ , profundidad de referencia de la malla).

### 6.3.7 Conductores paralelos

Para determinar el número de conductores paralelos de una malla rectangular se utiliza la siguiente ecuación:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d, \quad (6.35)$$

Donde

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p}$$

$L_p$  = Longitud del perímetro de la malla en metros.

$L_c$  = Longitud total de conductor del reticulado en metros.

$n_b = 1$  (para mallas cuadradas).

$n_c = 1$  (para mallas cuadradas y rectangulares).

$n_d = 1$  (para mallas cuadradas, rectangulares y en L)

De no ser mallas cuadradas, y ser de otra forma como, por ejemplo, poligonal, se utilizan las siguientes formulas:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}, \quad (6.36)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}}, \quad (6.37)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}, \quad (6.38)$$

Donde

$A$  = Área de la malla en metros cuadrados.

$L_x$  = Máxima longitud de la malla en dirección x.

$L_y$  = Máxima longitud de la malla en dirección y.

$D_m$  = Máxima distancia entre dos puntos en la malla.

### 6.3.8 Tensión máxima de toque

El voltaje de toque se define como, la tensión de toque entre la mano y los pies y el voltaje máximo de toque es la diferencia de potencial entre el conductor del SPAT y el centro del retículo del arreglo de conductores. Este valor de voltaje se obtiene mediante la siguiente formula:

$$V_C = K_m \cdot K_i \cdot \rho \cdot \frac{I_G}{L_M}, \quad (6.39)$$

$$L_M = L_C + L_R, \quad (6.40)$$

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R, \quad (6.41)$$

Donde

$L_C$ = Longitud total de conductor del reticulado en metros.

$L_R$ = Longitud total de todas las barras en metros.

$L_r$ = Longitud de cada barra en metros.

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

### 6.3.9 Tensión máxima de paso.

Se debe comprobar si efectivamente el potencial que existe entre dos puntos sobre la superficie del terreno separado por un metro no resulta ser peligroso para una persona. Para esto se debe comprobar la siguiente ecuación:

$$V_p = K_s \cdot K_i \cdot \rho_e \cdot \frac{I_G}{L_s}, \quad (6.42)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right], \quad (6.43)$$

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R, \quad (6.44)$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (6.45)$$

Donde;

$L_C$ = Longitud total de conductor del reticulado en metros.

$L_R$ = Longitud total de las barras verticales.

$D$ = Espaciamiento entre conductores.

$h$ = Profundidad de enterramiento.

$I_G$ = Corriente de falla simétrica.

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

Con lo anterior descrito, se puede determinar si efectivamente la malla proporciona seguridad a las personas y al equipamiento presente en el sistema.

## Capítulo 7. Mediciones de Campo

### 7.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las mediciones realizadas, tanto de resistividad del terreno y resistencia de puesta a tierra de diez sitios de telecomunicaciones, donde se incluyen los procedimientos efectuados para obtener dichos resultados.

### 7.2 Ubicación e identificación de sitios sometidos a medición

Los sitios bajo mediciones de campo son diez, los cuales se encuentran dentro de la VIII Región y se identifican tabla 7.1:

**TABLA 7. 1 Identificación de sitios de medición.**

<b>RBS</b>	<b>Fecha</b>	<b>Concesionaria</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>ID</b>
<i>Collao</i>	<i>24-10-2018</i>	<i>Entel</i>	<i>-36.816001</i>	<i>-73.020951</i>	<i>A</i>
<i>Cerro Centinela</i>	<i>18-06-2018</i>	<i>Entel</i>	<i>-36.711735</i>	<i>-73.127695</i>	<i>B</i>
<i>Colón</i>	<i>26-08-2018</i>	<i>Entel</i>	<i>-36-791501</i>	<i>-73.086865</i>	<i>C</i>
<i>Coronel</i>	<i>07-11-2018</i>	<i>Entel</i>	<i>-37.034911</i>	<i>-73.142196</i>	<i>D</i>
<i>Michaihue</i>	<i>19-11-2018</i>	<i>Entel</i>	<i>-36.843273</i>	<i>-73.140416</i>	<i>E</i>
<i>Cerro Centinela</i>	<i>15-01-2019</i>	<i>Movistar</i>	<i>-36.711410</i>	<i>-73.127694</i>	<i>F</i>
<i>Lota Bajo</i>	<i>16-01-2019</i>	<i>Movistar</i>	<i>-37.083470</i>	<i>-73.142290</i>	<i>G</i>
<i>Cerro los Mellizos</i>	<i>16-01-2019</i>	<i>Movistar</i>	<i>-37.423331</i>	<i>-73.241392</i>	<i>H</i>
<i>San Pedro de la Paz</i>	<i>15-01-2019</i>	<i>Movistar</i>	<i>-36.828270</i>	<i>-73.107530</i>	<i>I</i>
<i>Collao</i>	<i>28-12-2018</i>	<i>Movistar</i>	<i>-36.817679</i>	<i>-75.022051</i>	<i>J</i>

### 7.3 Mediciones de resistividad del terreno

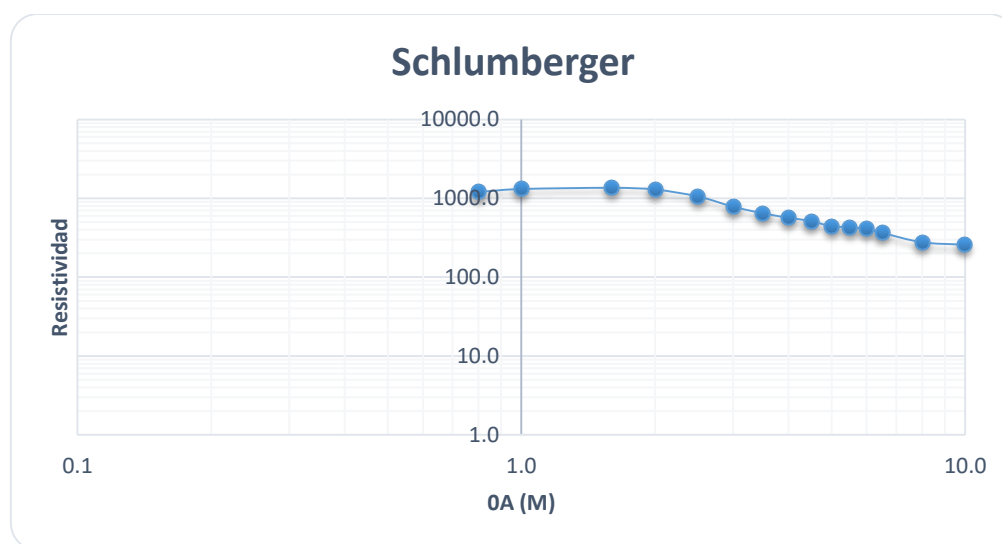
#### 7.3.1 Procedimiento Sector Collao (ID:A)

En el sitio de telecomunicaciones se llevó a cabo la medición de resistividad del terreno por medio de un SEV por el método de Schlumberger, donde por medio del equipo Fluke 1625 se obtuvieron las siguientes lecturas y resistividades aparentes:

**TABLA 7. 2 Resultados obtenidos por método de Schlumberger para ID: A.**

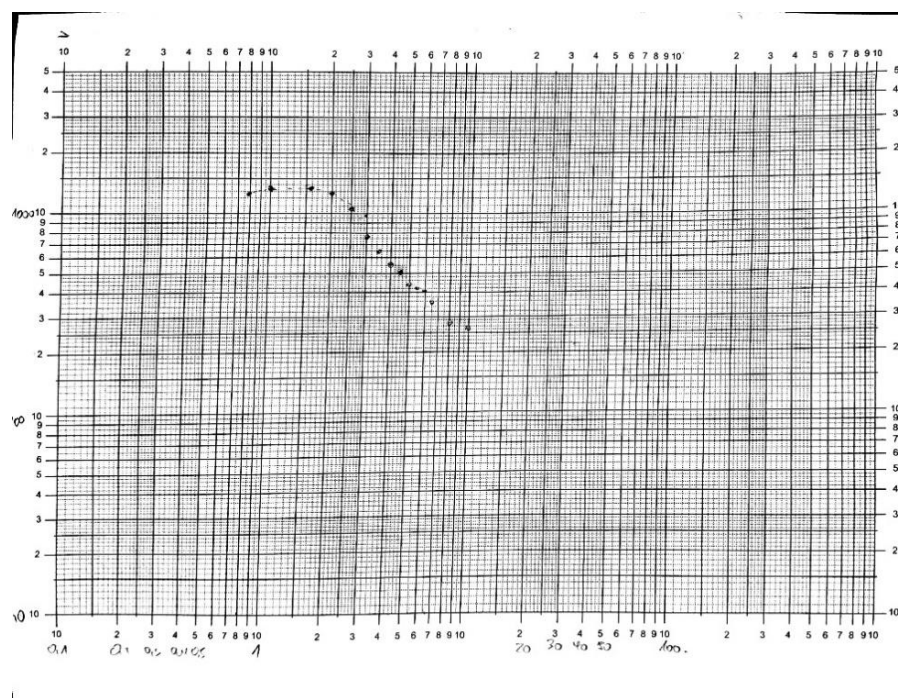
Estación de medición	0A (m)	MN (m)	Valor en $\Omega$	Resistividad ( $\Omega$ -m)
1	0.8	1	987.00	1209.30
2	1	1	559.00	1317.10
3	1.6	1	187.90	1363.60
4	2	1	110.10	1297.10
5	2.5	1	56.20	1059.30
6	3	1	28.60	786.20
7	3.5	1	17.20	648.40
8	4	1	11.50	569.00
9	4.5	1	8.20	515.20
10	5	1	5.70	443.20
11	5.5	2	9.40	431.90
12	6	4	16.30	409.70
13	6.5	4	12.20	366.50
14	8	4	5.90	278.00
15	10	8	7.93	258.80

Ahora con las resistividades aparentes calculadas en  $\Omega$ -m, es posible generar la curva de resistividad al interior de un gráfico bilogarítmico.



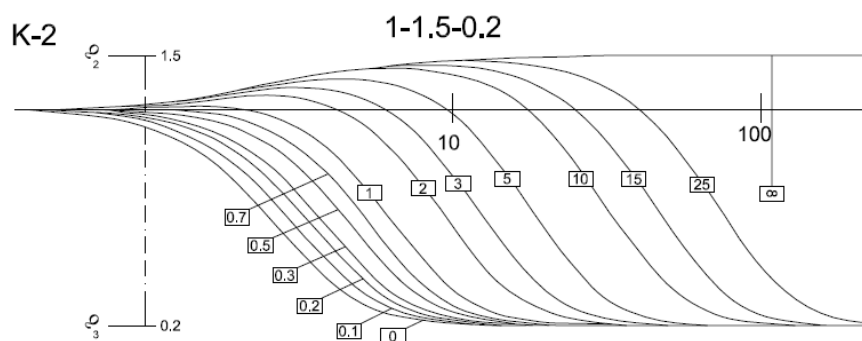
**FIGURA 7. 1 Curva de resistividad aparente.**

Luego del análisis cualitativo de la curva, se logra ver que la curva de resistividad cabe dentro de las familias “K” de las curvas patrón, que consta de dos a tres estratos. De esta forma, se espera que el modelo final tenga estas características. Siguiendo el método indicado y aceptado por los estándares y la normativa chilena se procede a efectuar el grafico en un papel log-log, para efectuar posterior contraste con las curvas patrón. El grafico dibujado en la hoja bilogarítmica se muestra a continuación.



**FIGURA 7. 2 Curva de resistividad aparente en papel log-log.**

Luego realizando la superposición se logra determinar que la curva con mayor similitud corresponde a la curva K2, la cual se muestra a continuación.



**FIGURA 7. 3 Curva patrón correspondiente al terreno.**

Donde se tiene que:

*Factor Multiplicativo de  $\rho = 1 - 1.5 - 0.2$ ,*

*Factor Multiplicativo de  $h = 2$ ,*

Entonces, luego de encontrar el origen se tiene que:

$$\rho_1 = 1200 \cdot 1 = 1200 [\Omega - m],$$

$$\rho_2 = 1200 \cdot 1.5 = 1800 [\Omega - m],$$

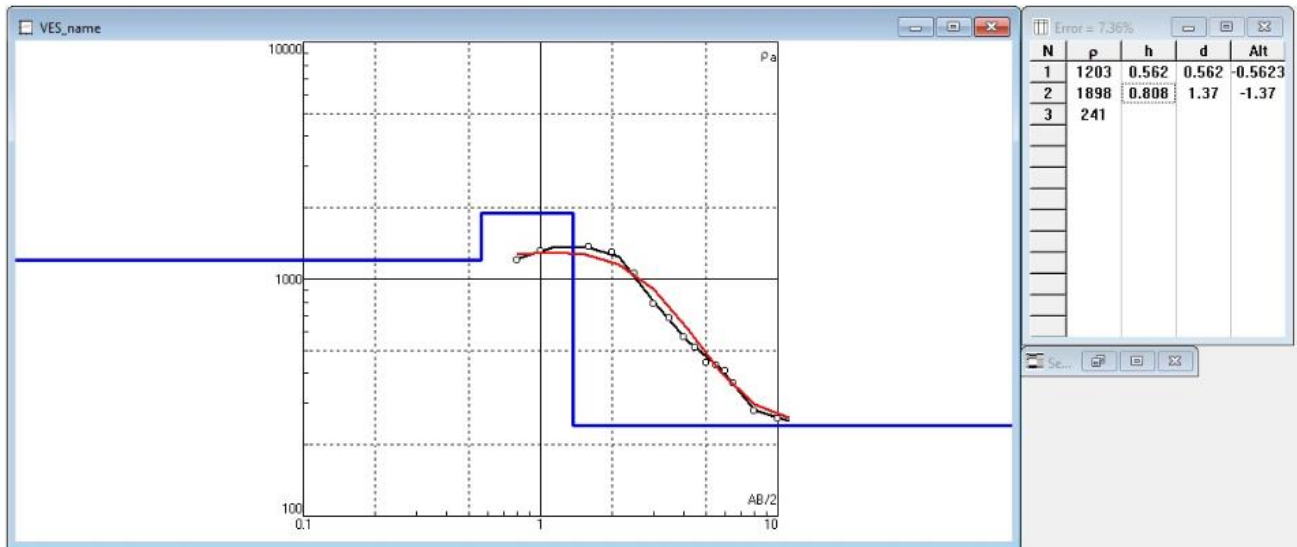
$$\rho_3 = 1200 \cdot 0.2 = 240 [\Omega - m],$$

$$h_1 = 0,5 \cdot 1 = 0.5 [m],$$

$$h_2 = 0.5 \cdot 2 = 1 [m],$$

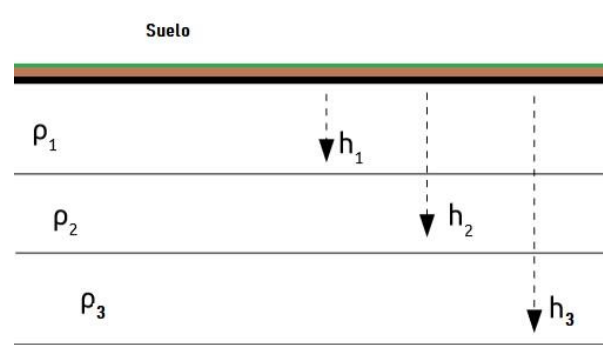
$$h_3 = \infty$$

Al comprobar lo anterior por medio del software IPI2Win se tienen resultados altamente similares, lo que corrobora los resultados obtenidos en el proceso de superposición de curvas efectuado.



**FIGURA 7. 4 Resultados obtenidos por medio del software geoelectrico IPI2Win.**

De esta forma se tiene un terreno de tres estratos, el cual se representa gráficamente en la siguiente imagen:



**FIGURA 7. 5 Modelo teórico del terreno de tres capas.**

Donde

$$\rho_1 = 1203 [\Omega - m],$$

$$\rho_2 = 1898 [\Omega - m],$$

$$\rho_3 = 241 [\Omega - m],$$

$$h_1 = 0.562 [m],$$

$$h_2 = 0.808 [m],$$

$$h_3 = \infty$$

Con esto se logra ver que la resistividad  $\rho_2$  es la mas alta y  $\rho_3$  es la mas baja. Estos resultados obtenidos son de gran importancia a la hora de decidir el enterramiento de una malla diseñada, optando preferentemente por los estratos con menor resistividad, en este caso es conveniente enterrar la malla a una distancia superior a 1 metro.

### 7.3.2 Tabla de Resultados.

Ahora se indican los resultados obtenidos de resistividad de terreno de cada uno de los sitios visitados, donde dichos resultados fueron obtenidos utilizando la ecuación (5.1) y el procedimiento utilizado anteriormente en 7.3.1. En la tabla se muestra la cantidad de estratos, el valor de resistividad de cada uno y la altura de cada estrato. Todo el procedimiento fue realizado por medio del método de SEV de Schlumberger.

TABLA 7. 3 Tabla de resultados de resistividad de terreno.

RBS	ID	N° de Estratos	$\rho_1[\Omega\text{-m}]$	$\rho_2[\Omega\text{-m}]$	$\rho_3[\Omega\text{-m}]$	$h_1[\text{m}]$	$h_2[\text{m}]$	$h_3[\text{m}]$
<i>Collao</i>	<i>A</i>	3	1203	1898	241	0.56	0.81	$\infty$
<i>Cerro Centinela</i>	<i>B</i>	3	10.32	29.47	27.46	0.31	7.67	$\infty$
<i>Colón</i>	<i>C</i>	3	511	573	266	0.40	1.51	$\infty$
<i>Coronel</i>	<i>D</i>	3	983	11.80	653	1.22	3.51	$\infty$
<i>Michaihue</i>	<i>E</i>	3	712	203	45	0.76	1.21	$\infty$
<i>Cerro Centinela</i>	<i>F</i>	2	96	234	-	9.46	$\infty$	-
<i>Lota Bajo</i>	<i>G</i>	2	102	0.354	-	4.37	$\infty$	-
<i>Cerro los Mellizos</i>	<i>H</i>	3	8420	764	109	1.00	3.20	$\infty$
<i>San Pedro de la Paz</i>	<i>I</i>	2	276	86.40	-	3.21	$\infty$	-
<i>Collao</i>	<i>J</i>	3	937	39	669	0.40	0.29	$\infty$

En la tabla 7.3 se observa que, dentro de los terrenos medidos, existe mayor presencia de terrenos de tres estratos y algunos de dos estratos, lo cual es esperable pues es poco común encontrarse con terrenos homogéneos. De igual forma, debido a las dimensiones de la medición, es decir el alcance o distancia de medición, no es común tener un terreno con más de tres estratos.

## 7.4 Mediciones de resistencia de puesta a tierra

### 7.4.1 Procedimiento Sector Cerro Centinela (ID: B)

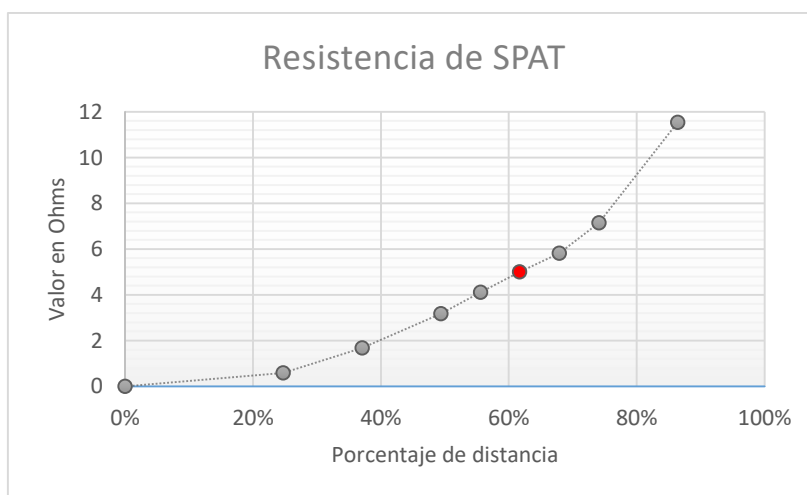
Durante el proceso de medición de resistencia de puesta a tierra, siguiendo el método selectivo por medio de la pinza amperimétrica y llevando a cabo todo el procedimiento descrito anteriormente, se plasman los resultados obtenidos en la tabla 7.4.

**TABLA 7. 4 Resultados obtenidos de resistencia de tierra sector Cerro Centinela (Entel).**

Porcentaje de espaciamiento	Distancia (m)	Valor en Ohms
0%	0.0	0.00
25%	6.0	0.58
49%	12.0	1.68
37%	13.5	3.18
56%	15.0	4.11
62%	16.5	5.00
74%	18.0	5.82
86%	21.0	11.54
100%	24.3	-

Teóricamente, de acuerdo con el método selectivo, el valor real de la resistencia de puesta a tierra se caracteriza por el valor correspondiente al 62% indicado en la tabla, lo cual sería de  $5[\Omega]$ , sin embargo, esto se debe corroborar mediante el análisis de la curva de los datos obtenidos.

Graficando los valores en Ohms vs. Porcentaje de distancias indicadas en la tabla anterior se obtiene la siguiente curva:



**FIGURA 7. 6 Curva de resistencia de SPAT sector Cerro Centinela (Entel).**

En el gráfico se logra apreciar que la curva tiene una pendiente suave, tendiendo a ser ligeramente más exponencial en los extremos, tal como se esperaba. Sin embargo, en el 62% de espaciamiento no se logra apreciar una pendiente casi nula de los valores, esto es debido a problemas de espaciamiento en la realización de las mediciones. En vista de esto, el fundamento del método de caída de potencia pasa a no ser válida, por lo cual se hace necesario recurrir a otro método de análisis llamado “Pendiente de Tagg”, que determina el valor exacto de la distancia en la que el valor de resistencia de tierra será el más cercano a la realidad y se define en el estándar IEEE Std. 81-1983 [10].

Para realizar esta técnica se debe proceder a obtener el valor  $\mu$  por medio la ecuación 7.1.

$$\mu = \frac{R_{60\%} - R_{40\%}}{R_{40\%} - R_{20\%}}, \quad (7.1)$$

Debido a lo indicado en la ecuación (7.1), es necesaria la obtención de tres nuevas mediciones de resistencia de puesta a tierra, las cuales se presentan en la tabla 7.5:

**TABLA 7. 5 Mediciones efectuadas para el método de la pendiente de Tagg.**

Porcentaje	Valor en Ohms
20%	0.41
40%	2.89
60%	4.72

$$\mu = \frac{4,72 - 2,89}{2,89 - 0,41} = 0,74.$$

Finalmente, por medio de la tabla para la técnica de la pendiente de Tagg (ver Anexo D.1) se obtiene el valor real del porcentaje de espaciamiento en el cual resistencia presente en la malla del sitio de comunicaciones será la correcta.

Observando la tabla se tiene que:

$$\mu = 0,74 = 59,1\%.$$

Finalmente.

**TABLA 7. 6 Resultado por método de la pendiente de Tagg.**

Porcentaje	Valor en $\Omega$
59%	4,58

De esta forma la resistencia del sistema de puesta a tierra de este sitio de telecomunicaciones es de 4,58 [ $\Omega$ ].

- **Comentarios y alcances de la medición.**

Si bien el método principal de medición es el método de caída de potencial, este fue reemplazado por el método selectivo con pinzas, lo cual es favorable para el proceso en el ámbito de seguridad y efectividad. Además este método sigue la misma lógica y fundamentos en la obtención de resultados que el método de la caída de potencial. Sin embargo, durante el proceso de medición, la distancia máxima alcanzada por el conductor es de 24,3 metros, lo cual no resulta ser suficiente para que el método del 62% sea exactamente verídico, pues este método recomienda como mínimo una distancia total de 40 metros. Por otro lado, el espaciamiento presente en el sector era reducido por lo que, de haber contado con un conductor más extenso, las mediciones de igual forma se verían limitadas por el espacio disponible. No obstante, este tipo de situaciones suelen ocurrir durante este tipo de mediciones, por lo que se determinó un nuevo método de obtención de resistencia de tierra llamado “Pendiente de Tagg” el cual se basa en la pendiente de la curva generada por medio de los datos obtenidos.

El proceso de medición fue cauteloso y no se tuvo ningún riesgo durante este, debido a que, el equipo Fluke 1625 cuenta con la opción de realizar el método selectivo por medio de pinzas amperimétricas. Tomando en cuenta que es un sistema de telecomunicaciones, hubiese sido perjudicial para la empresa realizar la desconexión del sistema completo tal como es necesario en el método de caída de potencial.

#### **7.4.2 Tabla de Resultados.**

Ahora en la tabla 7.7 se indican los resultados obtenidos de resistencia de SPAT de cada uno de los sitios visitados, donde dichos resultados fueron obtenidos utilizando el procedimiento de

medición de caída de potencial con pinza amperimétrica, con el cual se obtiene el valor de resistencia de puesta a tierra del RBS correspondiente.

**TABLA 7. 7 Resultado de Resistencia de SPAT de todas las RBS.**

<b>RBS</b>	<b>ID</b>	<b>Valor en [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Estado del SPAT</b>
<i>Collao</i>	<i>A</i>	<i>4.60</i>	<i>Buen estado</i>
<i>Cerro Centinela</i>	<i>B</i>	<i>4.58</i>	<i>Buen estado</i>
<i>Colón</i>	<i>C</i>	<i>-</i>	<i>Mal estado</i>
<i>Coronel</i>	<i>D</i>	<i>-</i>	<i>Mal estado</i>
<i>Michaihue</i>	<i>E</i>	<i>4.52</i>	<i>Buen estado</i>
<i>Cerro Centinela</i>	<i>F</i>	<i>5.50</i>	<i>Buen estado</i>
<i>Lota Bajo</i>	<i>G</i>	<i>1.00</i>	<i>Buen estado</i>
<i>Cerro los Mellizos</i>	<i>H</i>	<i>53.00</i>	<i>Mal estado</i>
<i>San Pedro de la Paz</i>	<i>I</i>	<i>3.50</i>	<i>Buen estado</i>
<i>Collao</i>	<i>J</i>	<i>3.20</i>	<i>Buen estado</i>

## 7.5 Análisis de resultados obtenidos

Para contrastar los resultados, primero se debe contar con una referencia, por tanto a continuación, se presentan valores ideales de resistencia de puesta a tierra para determinados sistemas eléctricos, basado en la IEEE (142-1991) y por el NFPA 70 (NEC 250-56).

**TABLA 7. 8 Valores ideales de resistencias de puesta a tierra según sistema eléctrico.**

<b>Sistema</b>	<b>Resistencia [<math>\Omega</math>]</b>
<i>Grandes subestaciones, líneas de</i>	<i>1</i>
<i>Transmisión, estaciones de generación.</i>	
<i>Líneas de distribución.</i>	<i>5</i>
<i>Subestaciones de plantas industriales.</i>	<i>1-5</i>
<i>Torres de telecomunicaciones.</i>	<i>5</i>
<i>Protección contra rayos.</i>	<i>10</i>
<i>Un electrodo simple.</i>	<i>25</i>

Como se observa, un valor de resistencia ideal para un sitio de comunicaciones es de  $5\Omega$ , con lo que experimentalmente, se debe esperar este valor de resistencia teórico. Definido lo anterior, se logra ver que de las mediciones de resistencia de puesta a tierra realizadas en las diez RBS, la mayoría de estas se encuentran dentro del valor establecido para torres de telecomunicaciones, a excepción de tres que se detallan a continuación:

- **Colón ID: C**

Al realizar la medición en la RBS del sector de Colón, el instrumento Fluke® 1625 dio como resultado que se tiene circuito abierto en la medición, tras corroborar que las conexiones se encuentran bien se concluye que el arreglo muy posiblemente se encuentre desconectado en algún lugar, lo cual al ser un SPAT equipotencial finalmente se obtiene como resultado de la medición nula o circuito abierto tal como indica el equipo de medida. Por tanto, se debe proponer un nuevo diseño para esta RBS.

- **Coronel ID: D**

En el sector Coronel resulto imposible realizar una medición debido a la estructura del cableado del sistema de tierra. Por otra parte, los anillos de tierra tanto de la torre de transmisión electromagnética y de la caseta se encontraban cortados. Además, se logró ver que no se contaba con una barra principal de tierra, sino que se contaba con diversas tomas de tierra para los equipamientos, con lo cual se puede asumir que el sistema de tierra presente no es equipotencial. De igual forma se logra notar un evidente deterioro, debido a la antigüedad de esta RBS. Por ello, se procede a proponer un nuevo diseño de SPAT para la RBS del sitio Coronel.

- **Cerro Los Mellizos ID: H**

En la medición realizada en el sector Cerro Los Mellizos ubicada en la comuna de Curanilahue por el método selectivo, se obtuvo un valor de resistencia de tierra de  $53 [\Omega]$  lo cual está muy lejos de lo establecido por los estándares internacionales correspondientes a torres de telecomunicaciones. Por tanto, se procede a proponer un nuevo diseño de SPAT para este sitio de telecomunicaciones con el fin de reducir el alto valor de resistencia de SPAT que posee esta RBS.

## Capítulo 8. Diseños propuestos

---

### 8.1 Introducción

En este capítulo se presentan los diseños propuestos para los sitios en los cuales los resultados de resistencia de SPAT no fue el adecuado por lo que es necesario una mejora al sistema de tierra de la correspondiente RBS.

### 8.2 Diseño Sitio Coronel ID: D (Arreglo Rectangular sin Varillas)

Teniendo el valor de resistividad equivalente, es posible realizar el diseño de una malla de tierra, siguiendo paso a paso el protocolo de diseño implementado por el estándar 80 de IEEE. A continuación, se realiza el procedimiento de diseño de un sistema de puesta a tierra (los cálculos se efectuaron por medio del Software Matlab, para ver líneas de código ver Anexo A, B y C)

#### Paso 1: Descripción del sitio.

El sitio en el cual se realizará la malla tendrá las dimensiones de  $20\text{ m} \cdot 10\text{ m} = 200\text{ m}^2$  sobre un terreno  $\rho_1 = 983\text{ }[\Omega - \text{m}]$ ,  $\rho_2 = 11.8\text{ }[\Omega - \text{m}]$  y  $\rho_3 = 653\text{ }[\Omega - \text{m}]$  con una resistividad equivalente de  $57.7\text{ }[\Omega - \text{m}]$  de acuerdo a los cálculos disponibles en anexo C.1.

#### Paso 2: Dimensionamiento del conductor

El dimensionamiento del conductor se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$A_{kcmil} = I \cdot \frac{197,4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Para realizar este cálculo es necesario el conocimiento de la corriente de falla asimétrica y también la impedancia total del sistema donde se considera un transformador de alimentación de media tensión de 150 KVA donde se estima que posee una impedancia porcentual de 3.5%, en base al estándar IEEE 242 y pérdidas en el cobre de 2950 [W], en base a la NSEG 16. Los cálculos respectivos se encuentran disponibles en anexo C.2.

$$Z_{eq} = 17.28 + 10.48i$$

$$Z_k = \sqrt{17.28^2 + 10.48^2} = 20.2 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

$$I_f = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{231 \text{ [V]}}{\sqrt{3} \cdot 20.5 \text{ [m}\Omega\text{]}} \cong 6.6 \text{ [kA]}$$

$$.A_{kcmil} = 43.6 \text{ kcmil}$$

De acuerdo con la tabla de equivalencias (disponible en Anexo D.2), esto es equivalente a:  
 $43.6 \text{ kcmil} \approx 3 \text{ AWG}$

Finalmente, el parámetro importante es el diámetro del conductor en metros es cual resulta ser:  
 $\text{diametro del conductor} \approx 5,83 \text{ mm} = 0,00583 \text{ m}$

### Paso 3: Tensiones de toque y de paso.

Ahora las tensiones de toque y de paso quedan determinadas de acuerdo con las resistividades aparente, equivalente y de la primera capa. También estos valores dependen del tiempo de despeje de falla.

Primero resulta necesario determinar el valor de  $C_s$ , el cual se define en la ecuación (6.5):

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \rho/\rho_s)}{2h_s + 0.09},$$

$$C_s = 0.9121$$

Voltajes de paso para personas de 50 Kg y 70 Kg se definen por las ecuaciones (6.3) y (6.4):

$$V_{paso(50Kg)} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{paso(50Kg)} = 3688.8 \text{ [V]}$$

$$V_{paso(70Kg)} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{paso(70Kg)} = 4992.6 \text{ [V]}$$

Voltajes de toque para personas de 50 Kg y 70 Kg se definen por las ecuaciones (6.1) y (6.2):

$$V_{toque(50Kg)} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{toque(50Kg)} = 1081 [V]$$

$$V_{toque(70Kg)} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{toque(70Kg)} = 1463.1 [V]$$

#### Paso 4: Diseño inicial.

En el diseño de la malla se considera un área de malla de  $200m^2$ , con un largo horizontal de  $10 m$  y vertical de  $20 m$ , con un espaciamiento entre cada conductor de malla de  $2 m$ , un largo total de conductores de  $230 m$  y enterrado a una profundidad de  $0,6 m$  y sin varillas de Copperweld.

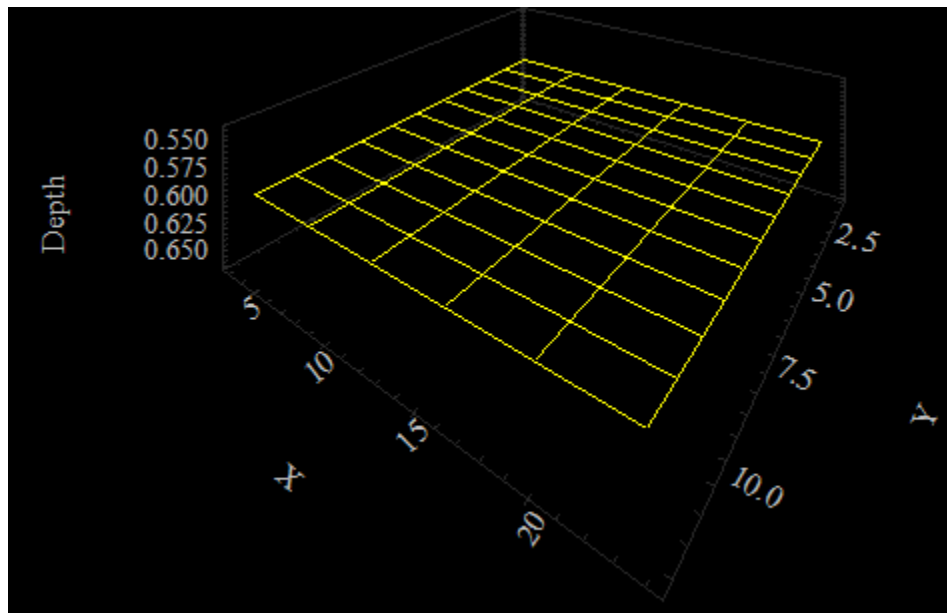


FIGURA 8. 1 Arreglo rectangular de 10m x 20m.

#### Paso 5: Determinación de resistencia de malla.

Con los parámetros determinados en los pasos anteriores es posible determinar el valor que finalmente tendría la resistencia de puesta a tierra del arreglo diseñado utilizando la ecuación (6.25).

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

$$R_g = 1.93 \Omega.$$

Con lo anterior, finalmente la resistencia de puesta a tierra de la malla diseñada tiene un valor de  $1,93 \Omega$ .

### **Paso 6: Determinación de corriente de malla.**

Con el valor de impedancia equivalente estimada en el paso 2, es posible obtener el factor de split, el factor de decremento y finalmente la corriente de tierra.

$$Z_1 = 17.28 + 10.48i$$

Luego.

$$Z_2 = Z_1 + R_g = 19.2 + 10.4i$$

Ahora el factor de Split se define por:

$$SF = \left| \frac{Z_1}{Z_2} \right| = 0,9235$$

El factor de decremento tiene el siguiente valor:

$$df = 1,0026.$$

Finalmente, la corriente de malla o de sistema de tierra se obtiene de la siguiente forma:

$$I_g = df \cdot SF \cdot I_f = 6111.9[A].$$

### **Paso 7: Determinación del potencial de tierra.**

Por medio de la ecuación se puede calcular el potencial de tierra.

$$GPR = I_g \cdot R_g,$$

$$GPR = 6111.9[A] \cdot 1.93 \Omega = 11796 [V].$$

Con el cálculo anterior se tiene que el potencial de tierra tiene un valor de  $11796[V]$ .

### **Paso 8: Determinación malla de voltaje.**

Ahora, se determina el voltaje máximo de paso y de toque para finalmente comparar con los valores determinados al comienzo del diseño de valores soportables por las personas, y verificar si efectivamente la malla diseñada cumple con salvaguardar la integridad de las personas frente a una falla.

Primero se obtiene la variable  $K_m$  por medio de la ecuación (6.33).

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

$$K_m = 0,61,$$

$$K_{ii} = 1,$$

$$K_i = 1.47.$$

Se calcula la tensión de toque de la malla por medio de la ecuación (6.39) obteniendo el siguiente valor:

$$V_c = K_m \cdot K_i \cdot \rho_e \cdot \frac{I_G}{L_c} = 1418.1 [V].$$

Finalmente se realiza la diferencia entre las tensiones de malla y tensiones soportadas por las personas de 70 Kg.

$$V_c - V_{toque(70Kg)} = -45.04 [V] < 0$$

Con lo anterior se comprueba que la malla diseñada cumple con la restricción de seguridad de las personas, por lo cual el diseño es satisfactorio.

Ahora se muestra gráficamente el comportamiento de las tensiones de toque y de paso distribuidas a lo largo de la malla, en función de la disposición de los conductores horizontales y el área y dimensiones del reticulado diseñado.

- **Tensión de toque.**

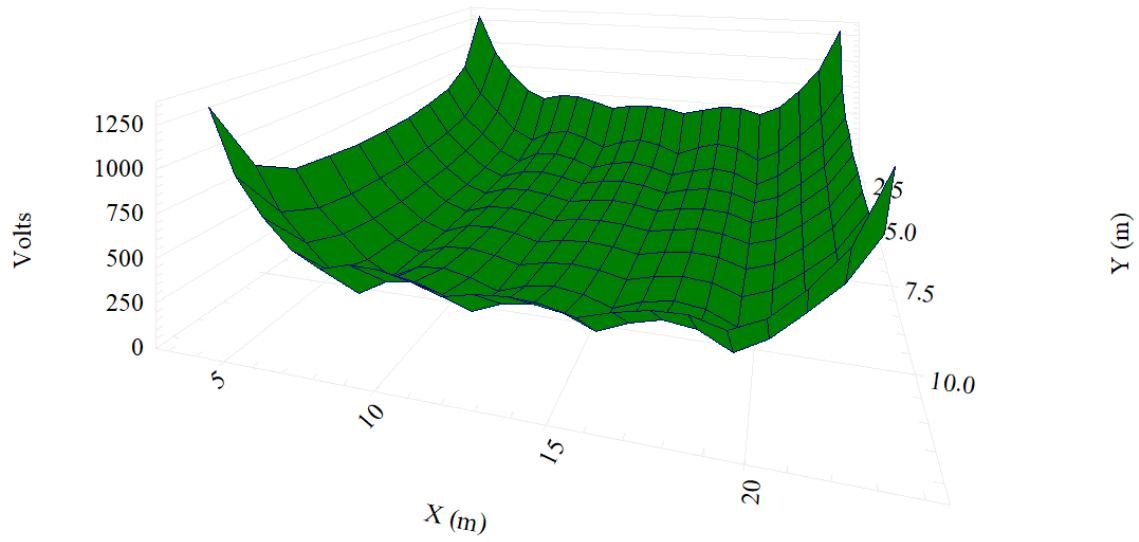


FIGURA 8. 2 Distribución de tensión de toque al interior del arreglo de conductores de tierra (Coronel Entel).

- **Tensión de paso.**

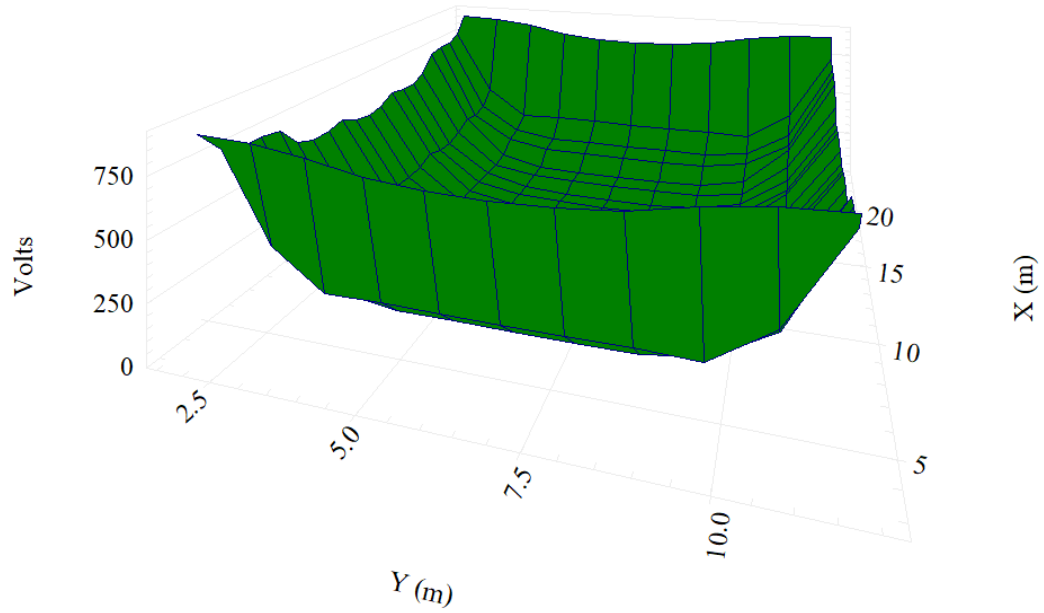


FIGURA 8. 3 Distribución de tensión de paso al interior del arreglo de conductores de tierra (Coronel Entel).

### 8.3 Diseño Sector Colon ID: C (Arreglo en “L” con Varillas)

#### Paso 1: Descripción general y resistividad del terreno.

El sistema de puesta a tierra constará de un arreglo el cual tendrá una forma de “L”. Debido al elevado valor de resistividad presente en el terreno se considera la opción de un acondicionamiento de este por medio de la aplicación de químicos sobre la zona (por ejemplo Thor-Gel) hasta alcanzar un valor de resistividad del terreno de  $120 [\Omega - m]$ . Así, en los cálculos se considera una resistividad equivalente de  $120 [\Omega - m]$  para un área de malla de  $500 m^2$ , enterrado a una profundidad de  $0,6 m$ .

#### Paso 2: Dimensionamiento del conductor

El conductor debe tener cierta dimensión tal que el flujo de corriente a través de este no se vea limitado por su sección. Para esto es necesario conocer la corriente de falla. Dicho esto, el calibre del conductor se calcula en kcmil:

$$A_{kcmil} = I \cdot \frac{197,4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Para realizar este cálculo es necesario el conocimiento de la corriente de falla asimétrica y también la impedancia total del sistema donde se considera un transformador de alimentación de media tensión de 300 KVA donde se estima que posee una impedancia porcentual de 4.5%, en base al estándar IEEE 242 y pérdidas en el cobre de 5 [kW], según la NSEG 16. Los cálculos correspondientes están disponibles en anexo C.2

$$Z_{eq} = 13.25 + 7.63i.$$

$$Z_k = \sqrt{13.25^2 + 7.63^2} = 15.3 [m\Omega].$$

$$I_f = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{231 [V]}{\sqrt{3} \cdot 15.3 [m\Omega]} \cong 8.7211 [kA].$$

$$A_{kcmil} = 75 kcmil.$$

De acuerdo con la tabla de equivalencias (disponible en Anexo D.2), esto es equivalente a:  
 $75 kcmil \approx 1 AWG$

Finalmente, el parámetro importante es el diámetro del conductor en metros es cual resulta ser:  
 $diametro\ del\ conductor \approx 7.35\ mm = 0,00735\ m$

### Paso 3: Tensiones de toque y de paso.

Las tensiones de toque y de paso quedan determinadas de acuerdo con las resistividades aparente, equivalente y de la primera capa. También estos valores dependen del tiempo de despeje de falla.

Primero resulta necesario determinar el valor de  $C_s$ :

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \rho/\rho_s)}{2h_s + 0.09},$$

$$C_s = 0.9801$$

Voltajes de paso para personas de 50 Kg y 70 Kg:

$$V_{paso(50Kg)} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{paso(50Kg)} = 2765.0 [V]$$

$$V_{paso(70Kg)} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{paso(70Kg)} = 3742.3 [V]$$

Voltajes de toque para personas de 50 Kg y 70 Kg:

$$V_{toque(50Kg)} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{toque(50Kg)} = 805.09 [V]$$

$$V_{toque(70Kg)} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{toque(70Kg)} = 1150.6 [V]$$

### Paso 4: Diseño inicial.

En el diseño de la malla se considera un área de malla de  $500 m^2$ , enterrado a una profundidad de  $0,6 m$ , con un espaciamiento entre conductores de dos metros, con cincuenta y tres varillas enterradas de un largo de 3 metros distribuidos de la siguiente manera.

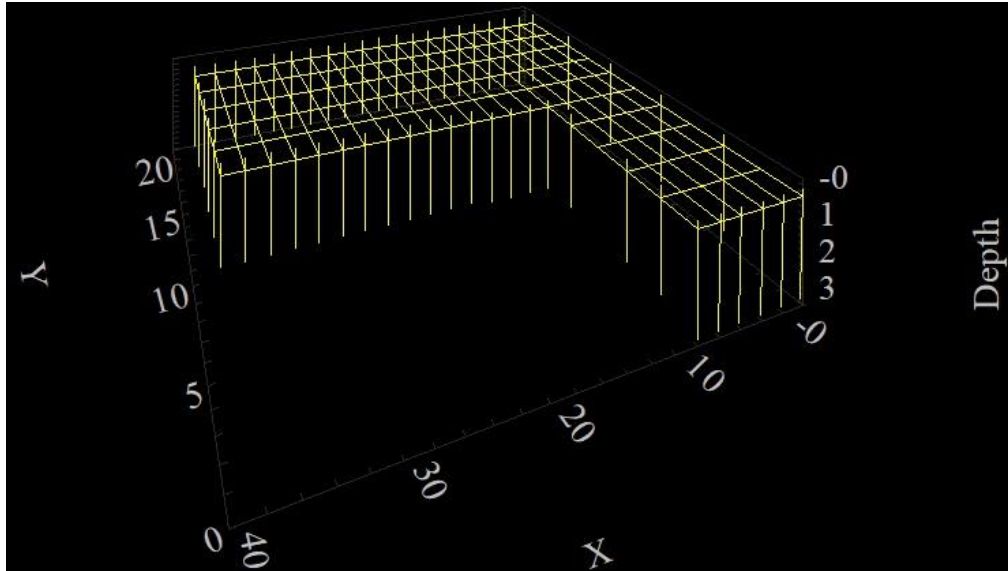


FIGURA 8. 4 Arreglo de conductores en L.

#### Paso 5: Determinación de resistencia de malla.

Con los parámetros determinados en los pasos anteriores es posible determinar el valor que finalmente tendría la resistencia de puesta a tierra de la malla diseñada utilizando en este caso el método de Schwartz

Este método es válido para, determinar la resistencia equivalente de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo, con electrodos verticales y una malla horizontal. Este método generalmente otorga resultados de resistencias mayores que en el método de Sverak, pues, este método considera las resistencias mutuas entre las varillas y los conductores y también la resistencia de las varillas, por lo cual este método resulta ser más exacto y preciso en cuanto a resultados. En este caso se considera una reducción en la resistividad del terreno por medio de acondicionamiento químico, como por ejemplo Thor-Gel. La ecuación para determinar la resistencia de tierra es la siguiente:

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

Ahora se obtiene la resistencia de la malla formada por los conductores  $R_1$ .

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L_c}{\sqrt{h \cdot d_c}} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] = 2.1832 \Omega,$$

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2 = 1.1,$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68 = 4.88,$$

Para calcular la resistencia que poseen las varillas se utiliza la siguiente formula:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n_r \cdot L_r} \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K_1 \cdot L_r}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] = 2.136 \Omega,$$

Luego la resistencia mutua se obtiene de la siguiente manera:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] = 2.0135 \Omega.$$

Finalmente, la resistencia de puesta a tierra tiene el valor de:

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_m} \approx 2.014 \Omega.$$

### **Paso 6: Determinación de corriente de malla.**

Con el valor de impedancia equivalente estimada en el paso 2, es posible obtener el factor de split, el factor de decremento y finalmente la corriente de tierra.

$$Z_{eq} = Z_1 = 13.25 + 7.63i$$

Luego.

$$Z_2 = Z_1 + R_g = 13.25 + 7.63i + 2.0846$$

$$Z_2 = 15.33 + 7.63i$$

El factor de Split se define por:

$$SF = \left| \frac{Z_1}{Z_2} \right| = 0.8927$$

El factor de decremento se define como:

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

Donde

$$T_a = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f} = 0.003$$

$$df = \sqrt{1 + \frac{0.003}{0.3} \left(1 - e^{-\frac{1}{0.003}}\right)} = 1.004$$

Finalmente, la corriente de malla o de sistema de tierra se obtiene de la siguiente forma:

$$I_g = df \cdot SF \cdot I_f = 7.8162[kA].$$

### **Paso 7: Determinación del potencial de tierra.**

Por medio de la ecuación (6.21) se puede calcular el potencial de tierra.

$$GPR = I_g \cdot R_g,$$

$$GPR = 16294 [V].$$

### **Paso 8: Determinación malla de voltaje.**

Se determina el voltaje máximo de paso y de toque para finalmente comparar con los valores determinados al comienzo del diseño de valores soportables por las personas, y verificar si efectivamente la malla diseñada cumple con salvaguardar la integridad de las personas frente a una falla.

Primero se obtiene la variable  $K_m$ :

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

$$K_m = 0.3359,$$

$$K_{ii} = 1,$$

$$K_i = 2.7496.$$

Se calcula la tensión de toque del arreglo:

$$V_C = K_m \cdot K_i \cdot \rho_e \cdot \frac{I_G}{L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R} = 1007.8 [V].$$

Se calcula el voltaje máximo de paso se deben obtener las siguientes variables:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right],$$

$$K_s = 0.5854,$$

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R,$$

$$L_s = 585.15.$$

Así la tensión de paso de la malla según la ecuación (4.50), tiene el siguiente valor:

$$V_p = K_s \cdot K_i \cdot \rho_e \cdot \frac{I_G}{L_s},$$

$$V_p = 2580.2 [V].$$

Finalmente se realiza la diferencia entre las tensiones de malla y tensiones soportadas por las personas de 70 Kg.

$$V_C - V_{toque(70Kg)} = -142.71 [V] < 0$$

$$V_p - V_{paso(70Kg)} = -1162.1 [V] < 0$$

Con lo anterior se corrobora que el diseño propuesto cumple con las condiciones de seguridad para las personas y también con la resistencia de puesta a tierra establecida para un sistema eléctrico de telecomunicaciones. Se muestran gráficamente en Fig 8.5 y Fig 8.6 el comportamiento de las tensiones de toque y de paso distribuidas a lo largo de la malla, en función de la disposición de los conductores horizontales y de las varillas verticales.

- **Tensión de toque.**

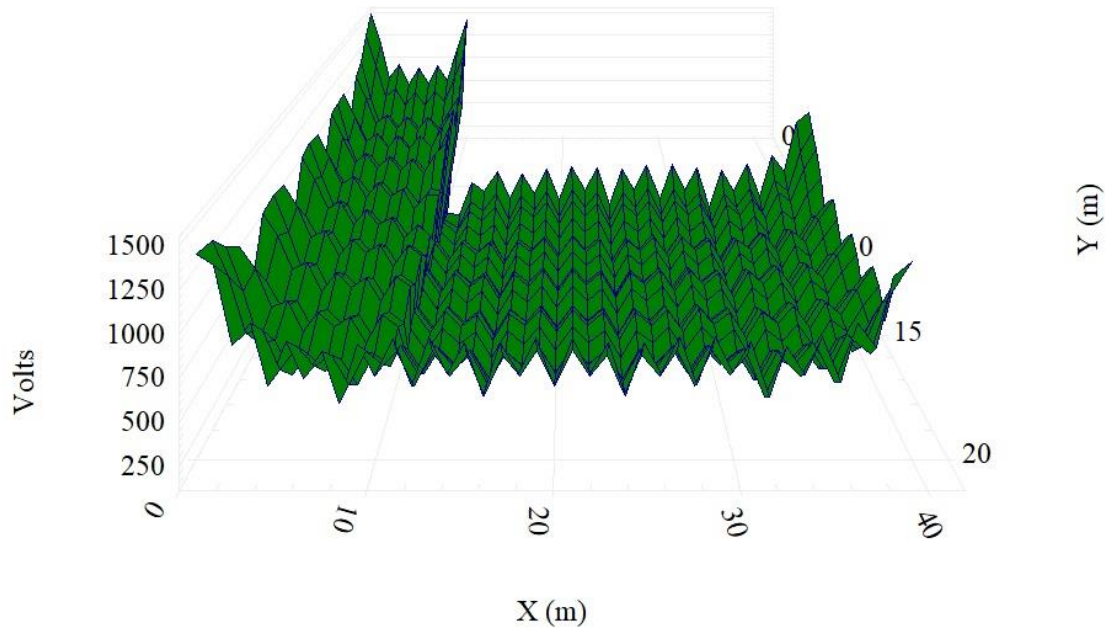


FIGURA 8. 5 Distribución de tensión de toque al interior del arreglo de conductores de tierra (Colon Entel).

- **Tensión de paso.**

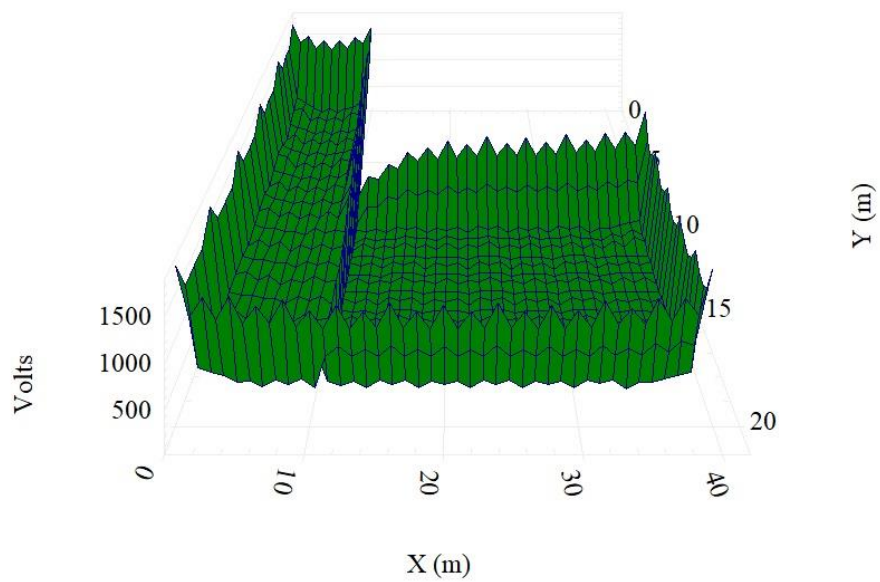


FIGURA 8. 6 Distribución de tensión de paso al interior del arreglo de conductores de tierra (Colon Entel).

- **Resultados sin acondicionamiento de terreno.**

En el caso de no contar con un proveedor para el acondicionamiento del terreno, se tienen los resultados de las variaciones de las variables principales del SPAT diseñado en la tabla 8.1.

**TABLA 8.1** Tabla comparativa para sitio sin acondicionamiento químico y con acondicionamiento químico.

<b>Parámetro</b>	<b>Sin Acondicionamiento</b>	<b>Con Acondicionamiento</b>
<i>Cantidad de varillas</i>	60	53
<i>Cantidad de conductor</i>	1370 [m]	600 [m]
<i>Área del SPAT</i>	$20m \cdot 40m + 20m \cdot 10m = 1000 [m^2]$	$10m \cdot 30m + 20m \cdot 10m = 500 [m^2]$
<i>Conductor</i>	1 AWG	1 AWG
<i>Resistencia de SPAT</i>	1.08 [ $\Omega$ ]	2.09 [ $\Omega$ ]

En vista de la comparativa realizada en la tabla 8.1, en ámbitos de espaciamiento resulta ser más conveniente la opción de acondicionamiento del terreno por medio de químicos que aumenten su conductividad, de esta forma se logra reducir notoriamente la cantidad de conductor necesario para la construcción del SPAT, la cantidad de varillas de Copperweld presentes en la malla, el área o sección necesaria para el arreglo de conductores, sin embargo no se logra reducir el valor de la resistencia de puesta a tierra del sistema. El acondicionamiento químico resulta ser una opción favorable en ámbitos espaciales, pero el caso de los costos, es necesaria una evaluación económica, pues dependerá del valor monetario actual del conductor utilizado (Steel Cooper-Clad), de la varillas de Copperweld y del acondicionador químico del suelo. Por otro lado considerar que el área utilizada resulta ser un parámetro limitado en estos casos, pues los sitios de telecomunicaciones no poseen propiedades con áreas tan extensas y también resaltar que la resistividad equivalente de un terreno dependerá principalmente del área que cubre el arreglo y de la profundidad de enterramiento de este.

Tener en cuenta que estos resultados fueron efectuados por medio del mismo procedimiento de diseño determinado por la IEEE (Disponible en Anexo C.4) y además que en ambos casos se cumple con los estándares de seguridad de tensiones de paso y de toque tolerables para las personas.

## 8.4 Diseño Sector Cerro Los Mellizos ID: H (Arreglo Rectangular con Varillas y Cable de guardia)

### Paso 1: Descripción del sitio.

El arreglo tendrá las dimensiones de  $10\text{ m} \cdot 8\text{ m} = 80\text{ m}^2$  y una profundidad de enterramiento de  $0.6\text{ m}$ . Por motivos de construcción y diseño, debido al elevado valor de resistividad que posee el terreno, en el proceso se asume una resistividad equivalente de  $105\text{ }[\Omega - \text{m}]$ , de esta forma se minimizan las dimensiones que tendrá el SPAT.

### Paso 2: Dimensionamiento del conductor

El dimensionamiento del conductor se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$A_{kcmil} = I \cdot \frac{197,4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Para realizar este cálculo es necesario el conocimiento de la corriente de falla asimétrica y también la impedancia total del sistema donde se considera un transformador de alimentación de media tensión de 25 KVA donde se estima que posee una impedancia porcentual de 3%, (aunque no se detalla esta impedancia para transformadores de 15 KVA, por tanto se asume ese valor) y pérdidas en el cobre de 600 [W] según la NSEG 16. Los cálculos correspondientes se encuentran disponibles en anexo C.2.

$$Z_{eq} = 61.51 + 38.61i$$

$$Z_k = \sqrt{61.51^2 + 38.61^2} = 72.6\text{ }[m\Omega]$$

$$I_f = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{231\text{ }[V]}{\sqrt{3} \cdot 82.2\text{ }[m\Omega]} \cong 1.82362\text{ }[kA]$$

$$A_{kcmil} = 15.56\text{ }kcmil$$

De acuerdo con la tabla de equivalencias (disponible en Anexo D.2), esto es equivalente a:  
 $15.56\text{ }kcmil \approx 8\text{ }AWG$ .

Finalmente, el diámetro del conductor en metros tiene un valor de:

*diametro del conductor*  $\approx 3.26 \text{ mm} = 0,00326 \text{ m}$

### **Paso 3: Tensiones de toque y de paso.**

Las tensiones de toque y paso quedan determinadas de acuerdo con las resistividades aparente, equivalente y de la primera capa, también estos valores dependen del tiempo de despeje de falla.

Primero resulta necesario determinar el valor de  $C_s$ :

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \rho/\rho_s)}{2h_s + 0.09},$$

$$C_s = 2.1861$$

Voltajes de paso para personas de 50 Kg y 70 Kg:

$$V_{paso(50Kg)} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{paso(50Kg)} = 7400.5 [V]$$

$$V_{paso(70Kg)} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{paso(70Kg)} = 7001.6 [V]$$

Voltajes de toque para personas de 50 Kg y 70 Kg:

$$V_{toque(50Kg)} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{toque(50Kg)} = 1987.7 [V]$$

$$V_{toque(70Kg)} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \left( \frac{0.157}{\sqrt{t}} \right)$$

$$V_{toque(70Kg)} = 2690.2 [V]$$

### **Paso 4: Diseño inicial.**

En el diseño de la malla se considera un área del arreglo de conductores de  $80 \text{ m}^2$ , con un largo horizontal de  $10 \text{ m}$  y de  $8 \text{ m}$ , con un espaciamiento entre cada conductor de malla de  $2 \text{ m}$  y enterrado a una profundidad de  $0,6 \text{ m}$ , 98 metros de conductor y adicionalmente con 8 varillas de copperweld enterradas con un largo de  $3 \text{ m}$  distribuidos de la siguiente forma que se detalla en la figura 8.7:

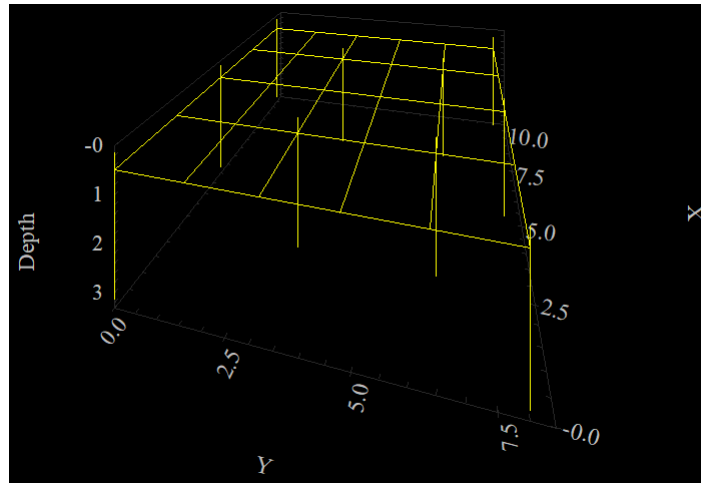


FIGURA 8.7 Arreglo rectangular de 10m x 8 m con barras.

### Paso 5: Determinación de resistencia de malla.

Con los parámetros determinados en los pasos anteriores es posible determinar el valor que finalmente tendría la resistencia de puesta a tierra de la malla diseñada utilizando las ecuaciones definidas por Schwartz.

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

Así, se obtiene la resistencia de la malla formada por los conductores  $R_1$ .

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L_c}{\sqrt{h \cdot d_c}} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] = 5.47 \, \Omega,$$

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2 = 1.137,$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68 = 4.805,$$

Para calcular la resistencia que poseen las varillas se utiliza la siguiente formula:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n_r \cdot L_r} \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K_1 \cdot L_r}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] = 6.0525 \, \Omega,$$

Luego la resistencia mutua se obtiene de la siguiente manera:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] = 4.3783 \Omega.$$

Finalmente la resistencia de puesta a tierra tiene el valor de:

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_m} = 5.04 \Omega.$$

Finalmente, la resistencia de puesta a tierra de la malla diseñada tiene un valor de aproximadamente  $5.0 \Omega$ .

### **Paso 6: Determinación de corriente de malla.**

Con el valor de impedancia equivalente estimada en el paso 2, es posible obtener el factor de split, el factor de decremento y finalmente la corriente de tierra.

$$Z_1 = 61.51 + 38.61i$$

Luego.

$$Z_2 = Z_1 + R_g = 66.54 + 38.61i$$

Ahora el factor de Split se define por:

$$SF = \left| \frac{Z_1}{Z_2} \right| = 0,943$$

El factor de decremento se define como (Ver Anexo D.4):

$$df = 1,0023.$$

Finalmente, la corriente de malla o de sistema de tierra se obtiene de la siguiente forma:

$$I_g = df \cdot SF \cdot I_f = 1725.3[A].$$

### **Paso 7: Determinación del potencial de tierra.**

$$GPR = I_g \cdot R_g,$$

$$GPR = 8697.2 [V].$$

### Paso 8: Determinación malla de voltaje.

Ahora, se determina el voltaje máximo de paso y de toque para finalmente comparar con los valores determinados al comienzo del diseño de valores soportables por las personas, y verificar si efectivamente la malla diseñada cumple con salvaguardar la integridad de las personas frente a una falla.

Primero se obtiene la variable  $K_m$  por medio de la ecuación (4.41).

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

$$K_m = 0,59.$$

$$K_{ii} = 1.$$

$$K_i = 1,4523.$$

Se calcula la tensión de toque del arreglo.

$$V_c = K_m \cdot K_i \cdot \rho_e \cdot \frac{I_G}{L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R} = 1102.3 [V].$$

Para obtener el voltaje máximo de paso:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right],$$

$$K_s = 0,6548.$$

$$L_s = 0.75 \cdot L_c + 0.85 \cdot L_R.$$

$$L_s = 93.9.$$

Así la tensión de paso de la malla según la ecuación (4.50), tiene el siguiente valor:

$$V_p = K_s \cdot K_i \cdot \rho_e \cdot \frac{I_G}{L_s},$$

$$V_p = 1834.6 [V].$$

Finalmente se realiza la diferencia entre las tensiones de malla y tensiones soportadas por las personas de 70 Kg.

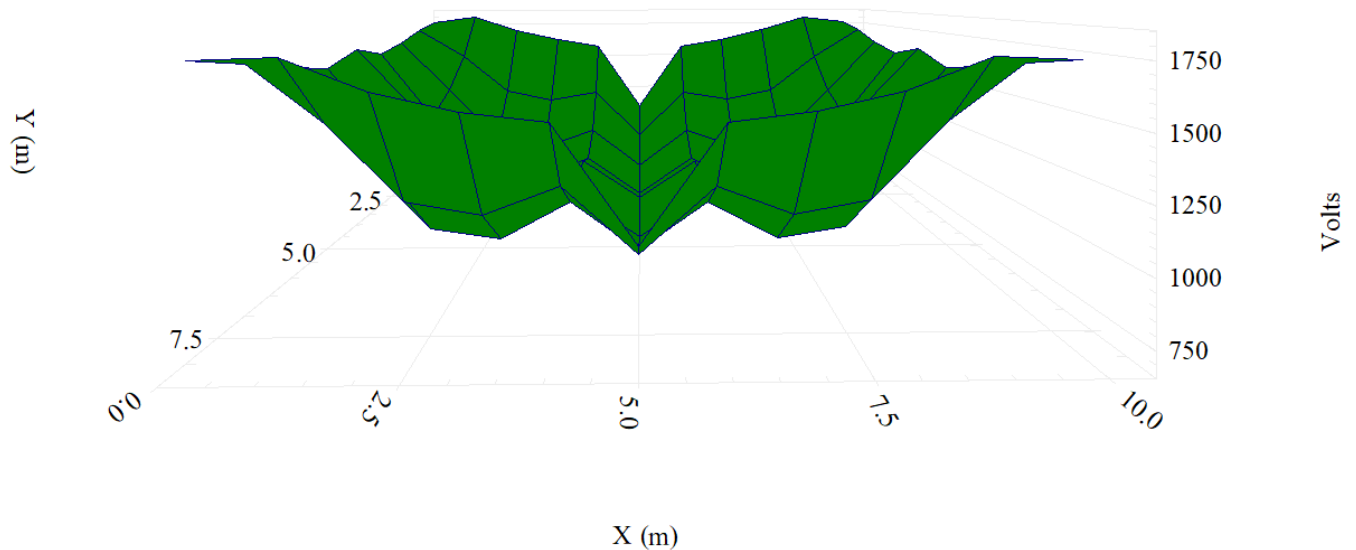
$$V_C - V_{toque(70Kg)} = -1587.9 [V] < 0$$

$$V_p - V_{paso(70Kg)} = -8181.5 [V] < 0$$

Con lo anterior se comprueba que la malla diseñada cumple con la restricción de seguridad de las personas, por lo cual el diseño es satisfactorio.

En Fig 8.8 y Fig 8.9 se muestra gráficamente el comportamiento de las tensiones de toque y de paso distribuidas a lo largo de la malla, en función de la disposición de los conductores horizontales y de las varillas verticales.

- **Tensión de toque.**



**FIGURA 8. 8 Distribución de tensión de toque al interior del arreglo de conductores de tierra (Mellizos Movistar).**

- **Tensión de paso.**

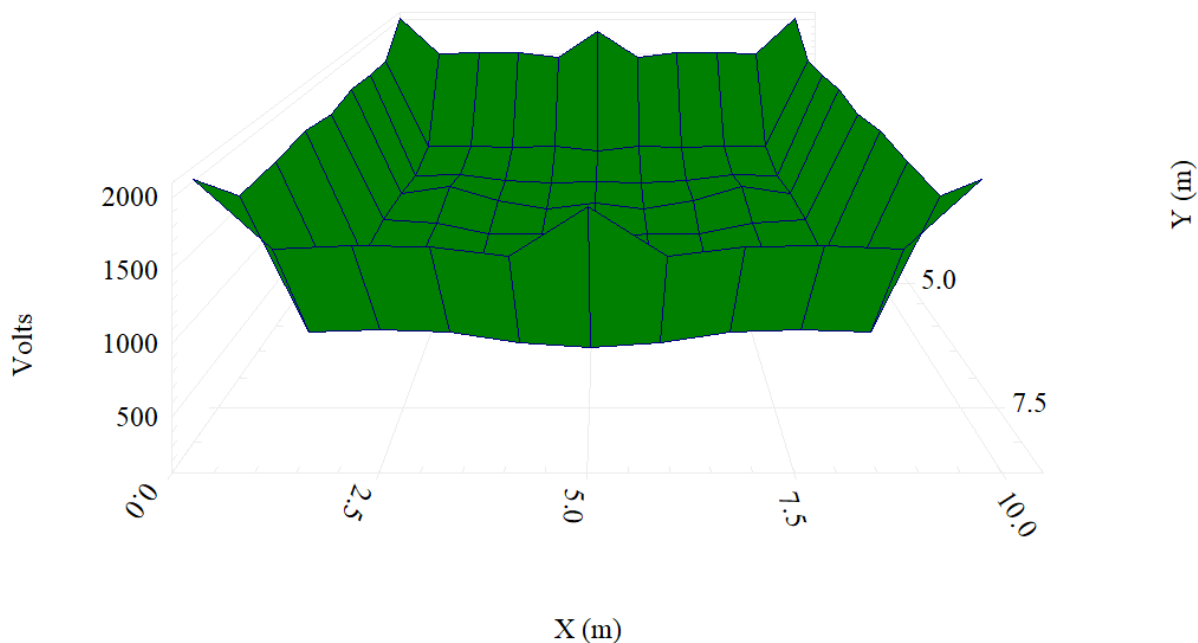


FIGURA 8. 9 Distribución de tensión de paso al interior del arreglo de conductores de tierra (Mellizos Movistar).

- **Resultados sin acondicionamiento de terreno.**

En el caso de no contar con un proveedor o con la posibilidad de acondicionamiento del terreno, se tienen los resultados de las variaciones de las variables principales del SPAT diseñado en la tabla 8.2.

TABLA 8. 2 Tabla comparativa para sitio sin acondicionamiento químico y con acondicionamiento químico.

Parámetro	Sin Acondicionamiento	Con Acondicionamiento
Cantidad de varillas	15	8
Cantidad de conductor	280 [m]	98 [m]
Área del SPAT	$20m \cdot 10m = 200 [m^2]$	$10m \cdot 8m = 80 [m^2]$
Conductor	8 AWG	8 AWG
Resistencia de SPAT	4.66 [ $\Omega$ ]	5.04 [ $\Omega$ ]

En la tabla 8.2 se pueden ver los parámetros de interés principales de un SPAT, con lo cual es posible concluir en optar por acondicionamiento químico del suelo o no. En este caso, se logra ver que con el acondicionamiento químico se logra reducir notablemente el área del arreglo de conductores, de igual forma la cantidad de varillas de Copperweld y de conductor necesario para la construcción de esta malla. El calibre de conductor no varía, pues la intensidad de corriente de falla no sufre variaciones con el acondicionamiento por tanto la sección mínima de conductor tampoco. Por último se logra ver que el valor de resistencia de puesta a tierra es ligeramente menor para el caso de un terreno sin acondicionamiento, lo cual es lógico pues la cantidad de conductor utilizado es considerablemente mayor.

- **Resultados con impedancia porcentual distinta.**

En vista de que no queda claro el valor de impedancia porcentual asociada a un transformador de media tensión de 25 KVA y en los cálculos se asume un valor de  $z\%=3.0$ , se registran los resultados que dependen de este parámetro para tres distintos casos probables, los cuales se encuentran en la tabla 8.3.

**TABLA 8. 3 Parámetros para distintos valores de impedancia porcentual.**

<b>Parámetro</b>	<b>Z%=2</b>	<b>Z%=3</b>	<b>Z%=4</b>
$Z_{eq}$	$61.51+j 28.51$	$61.51+j 38.61$	$61.51+j 68.5$
$I_f$	1.9671 [KVA]	1.82362 [KVA]	1.4486[KVA]
Calibre de Conductor	8 AWG	8 AWG	9 AWG
Corriente de tierra $I_g$	1.8451 [KVA]	1.7293 [KVA]	1.4020 [KVA]
$V_{toque}$	1178.9 [V]	1102.3 [V]	895.77 [V]
$V_{paso}$	1962.1 [V]	1834.6 [V]	1490.9 [V]
Resistencia de SPAT	5.040	5.041	5.048

Como se ve reflejado en la tabla 8.3 el valor de resistencia de SPAT no sufre ninguna alternación significativa, en el caso de tensiones de toque, de paso y corriente de falla se logra ver variaciones un tanto más significativas, pero tampoco en gran medida. Con lo anterior se puede concluir que si bien no se tiene el dato del valor de impedancia porcentual exacto asociado a un

transformador de 25 KVA, las variaciones con respecto a posibles valores que pueda tener el transformador las variaciones que tendrá esta variable sobre el diseño de SPAT son mínimas, por tanto la variación entre uno u otro valor de Z% no serían muy significativas.

### Paso 9: Dimensionamiento cable de guardia.

A continuación en la tabla 8.4, 8.5 y 8.6 se presentan tres opciones de conductor a utilizar para la implementación del cable de guardia para el sistema contra descargas eléctricas para distintos niveles de corriente. Los parámetros de cada conductor se encuentran disponibles en Anexo D.3.

**TABLA 8. 4 Calibre de cable de guardia necesario para un rayo de 200 [kA].**

<b>Tipo de Conductor</b>	Steel 1020	<i>Aluminium EC</i>	Copper Clad Steel
Calibre <i>Kcmil</i>	140 [ <i>kcmil</i> ]	105 [ <i>kcmil</i> ]	105 [ <i>kcmil</i> ]
Calibre <i>AWG</i>	3/0 [ <i>AWG</i> ]	1/0 [ <i>AWG</i> ]	1/0 [ <i>AWG</i> ]

**TABLA 8. 5 Calibre de cable de guardia necesario para un rayo de 100 [kA]**

<b>Tipo de Conductor</b>	Steel 1020	<i>Aluminium EC</i>	Copper Clad Steel
Calibre <i>Kcmil</i>	70 [ <i>kcmil</i> ]	52 [ <i>kcmil</i> ]	52 [ <i>kcmil</i> ]
Calibre <i>AWG</i>	1 [ <i>AWG</i> ]	3 [ <i>AWG</i> ]	3 [ <i>AWG</i> ]

**TABLA 8. 6 Calibre de cable de guardia necesario para un rayo de 50 [kA]**

<b>Tipo de Conductor</b>	Steel 1020	<i>Aluminium EC</i>	Copper Clad Steel
Calibre <i>Kcmil</i>	35 [ <i>kcmil</i> ]	26 [ <i>kcmil</i> ]	26 [ <i>kcmil</i> ]
Calibre <i>AWG</i>	4 [ <i>AWG</i> ]	6 [ <i>AWG</i> ]	6 [ <i>AWG</i> ]

De acuerdo a las tablas 8.4, 8.5 y 8.6 se logra ver que mientras mayor es el valor de corriente de descarga de rayo mayor será el calibre del conductor necesario, por otra parte se presentan tres diferentes tipos de conductor con distintas propiedades y parámetros, donde se evidencia que para conductores con mejores propiedades conductivas, se tendrá una menor sección del conductor para el cable de guardia. Por tanto, al escoger el tipo de conductor a utilizar, además de que el calibre cumpla con los niveles de protección, se debe tener en consideración las variables conductivas del cable, la robustez del material y finalmente los costos monetarios.

Se debe considerar que una descarga puede llegar hasta valores de 200 [kA], pero el nivel de daños que puede ocasionar al sistema y personas depende fuertemente del tiempo que dura la descarga, este caso se considera un tiempo de descarga de 2 [ms].

## Capítulo 9. Conclusiones

---

### 9.1 Sumario

El trabajo presentado se basa en el análisis, evaluación y mejoras de sistemas de puesta a tierra, con la particularidad de que el sistema eléctrico bajo análisis resulta ser un sistema de telecomunicaciones pertenecientes a las concesionarias Entel y Movistar. Este informe define conceptos importantes y establece una sólida base teórica necesaria para realizar una correcta ejecución de los objetivos definidos. También consta de una parte donde se efectúan mediciones, dichas mediciones tienen la finalidad de determinar la resistividad del terreno estudiado y por otra parte, obtener el valor de la resistencia de puesta a tierra del SPAT ya instalado en cada uno de los sitios de los sistemas de telecomunicaciones. Cada una de estas mediciones va acompañada de un análisis de los resultados obtenidos para efectuar una evaluación de estos mismos. Luego, todo lo anterior es útil para llevar a cabo un diseño de un nuevo sistema de puesta a tierra, el cual será propuesto como una mejora del sistema ya existente y va acompañado de comentarios que favorecen un mejoramiento del sistema de puesta a tierra del sistema de telecomunicaciones en el caso de ser necesarios.

### 9.2 Conclusiones

- En la etapa de diseño, las variables más determinantes e influyentes en los resultados finales son la corriente de falla, la duración de la falla, la resistividad equivalente del terreno y resistividad superficial. Influyendo fuertemente en los valores de tensiones de toque y de paso soportables por las personas presentes en el terreno, de igual forma en el valor de resistencia de puesta a tierra.
- En el caso de contar con un terreno reducido en un sistema de telecomunicaciones y es necesario un sistema de puesta a tierra robusto. Una buena opción es utilizar barras Copperweld y también el acondicionamiento del terreno por medio de elementos químicos que aumentan la conductividad del terreno, con lo que la resistividad bajaría y el sistema de tierra reduciría la sección del arreglo considerablemente y la cantidad de conductores necesarios para su construcción. Es más, una mejor opción son electrodos llamados Chem-Rod que son

compuestos por químicos que se expanden alrededor del terreno, además son más versátiles y las opciones de colocación son más diversas que en el caso de una malla rectangular. Sin embargo se deben considerar los costos asociados.

- Al agregar varillas de Copperweld al SPAT, los valores más altos de tensión a lo largo del área de la malla se encuentran alrededor de dichas varillas, debido a que constan de mayor capacidad conductiva, en efecto, al ocurrir una falla las varillas conducirán una mayor cantidad de corriente que el arreglo de conductores.
- Al medir la resistividad del terreno se debe considerar el estado del clima y humedad presente en el terreno de la medición. Debido a que según lo realizado en este informe, en el proceso de diseño de un sistema de tierra uno de los parámetros de mayor influencia en los resultados finales es la resistividad del terreno, es conveniente realizar las mediciones durante periodos climáticos más secos con el fin de efectuar un diseño de malla que proteja el sistema frente a alguna falla o alguna descarga durante cualquier período o estación del año, es decir para un peor caso existente con una resistividad de terreno lo más alta posible.
- La resistividad superficial es un parámetro que tiene gran influencia sobre los valores de tensiones de toque y de paso del SPAT. Debido a esto, es común que se cuente con cemento o mezcla con rocas en la superficie del suelo en el que se ubica el sistema de puesta a tierra, para así aumentar la resistividad superficial del terreno y proteger a las personas.
- Al efectuar el diseño de un SPAT, la disposición de electrodos de tierra sobre la malla de conductores es esencial para obtener resultados deseados. Por ejemplo, si se desea tener una malla que posea niveles de tensión de toque y de paso similares a través de toda el área del arreglo de conductores, entonces es conveniente implementar solo una malla equipotencial sin electrodos, y en el caso de no obtener los resultados propuestos debido a las condiciones del terreno, es posible equiparar los niveles de tensión de toque y paso con distintos tipos de electrodos con diferentes resistividades y características distribuidos en las zonas requeridas. Lo anterior da cuenta de la versatilidad de los electrodos o barras de puesta a tierra, los cuales pueden ser distribuidos de diversas formas en beneficio del sistema de puesta a tierra. Por otro lado la disposición de los electrodos enterrados preferentemente debe ser equitativa en cuanto

al espaciamiento, pues de otra forma los niveles de tensión de toque y de paso presentes al interior del SPAT tendrán demasiada variabilidad en distintos puntos de este.

- El proceso de diseño de un SPAT resulta un procedimiento versátil pues son diversas las variables posibles que pueden ser manipuladas, tales como, resistividad del terreno, tipo de conductor, tipo de arreglo, tipo de barras, entre otros. Donde finalmente se definirá el diseño final en base a los requerimientos del cliente, los cuales pueden ser de carácter técnico, de carácter de costos y presupuesto u otros. Pero siempre respetando los estándares de seguridad establecidos.
- En el caso de mediciones de resistividad de terreno por el SEV de Schlumberger, debido a las distancias máximas utilizadas, las cuales varían entre 10 [m] y 30 [m], es común obtener como resultado terrenos de dos o tres estratos como máximo, lo cual es debido a que mientras más distancia abarque la medición de resistividad, mayor será el área de influencia del equipo sobre el terreno. De esta forma es recomendable efectuar estas mediciones con una distancia entre los electrodos de corriente mínima de 30 [m] para lograr un modelo más representativo del terreno.
- Las resistividades del terreno de dos sitios relativamente cercanos pueden ser muy variables, debido a la estratificación del suelo y de los elementos adicionales al terreno, como estructuras metálicas o cualquier elemento conductor enterrado en la cercanía, pues estos influyen en gran medida los valores finales obtenidos.

### 9.3 Trabajo Futuro

- Proponer a las concesionarias de telecomunicaciones Entel y Movistar a que efectúen mantenciones de los SPAT de las RBS cada dos años, y de esa forma asegurar la equipotencialidad de los SPAT y descartar posibles problemas originadas por un mal sistema de tierra.
- Dar énfasis a los sistemas de protección contra descargas, es decir dimensionando un buen SPAT acompañada de un pararrayos eficiente y de lo mejor presente en el mercado. De igual forma el cable de guardia, el cual debería ser sobredimensionado en RBS con recurrentes descargas de rayo.
- Realizar un estudio de la implementación de un Sistema de Puesta a Tierra a base de la nanotecnología del polímero grafeno, pues este tiene algunas ventajas sobre los conductores convencionales, tales como, peso, costo y resistencia a diversas condiciones.

## Bibliografía

- [1] Manuel Enrique Huete Serrano, Carlos Gabriel Gómez Villagrán. “SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCION PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES,” *Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.*, Guatemala, -Sep. 2008.
- [2] Merardo Retamal Encina, Jorge Carranza Castro. “SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Capítulo 2: Características de Propagación del Suelo” *Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería.*, Concepción, Nov. 2016.
- [3] González-Longatt F.M, (2007) en “Sistemas de Puesta a Tierra y Protección Contra Descargas Atmosféricas” *II Seminario en Seguridad y Riesgos eléctricos en la Industria.*, Puerto Ordaz.
- [4] José Samuel Ramírez Castaño, Eduardo Antonia Cano Plata. “SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF,” *Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y arquitectura*, Guatemala, -Mar. 2010.
- [5] José H. Guerrero M., Alejandro C. Montiel O., Rogers D. Rodríguez H, Cruz M. Viña V. “SISTEMA DE PUESTA TIERRA PARA LOS SITEMAS DE TELECOMUNICACIONES,” *Universidad de Carabobo.*, Valencia, -Jun. 2008.
- [6] IEEE STD 80-2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substation” *The institute of Electrical Electronics Engineers, Inc* , -USA- Ene. 2000.
- [7] Javier Oropeza Angeles. “Libro de oro de puesta a Tierra Universal Gruonding and Bonding,” Mexico, -Nov. 2015.
- [8] Fluke Corporation. “1625-1 Earth/Ground Tester Manual de Uso, Ene -. 2014.
- [9] Fluke Corporation. “Medida de la Resistencia de la toma de tierra en edificios, residenciales y en plantas industriales”.
- [10] ANSI/IEEE Std 81-1983 “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System” *The institute of Electrical Electronics Engineers, Inc.*, -USA, - Sep. 1941.

- [11] Juan Astorga Gómez. “SUMINISTRO, MONTAJE Y OPERACION INICAL PLANRA DE OSMOSIS INVERSA PLACILLA SIERRALTA, COPIAPO INGENIERIA DE DETALLA MEMORIA DE CALCULO SISTEMA DE PUETS A TIERRA BT,” *AGUAS CHAÑAR S. A.*, Chile, Copiapó, -Nov. 2011.
- [12] Claudio González Cruz. “Cálculo de Corrientes de Cortocircuito en Baja Tensión” *Instituto Nacional de Capacitación Profesional Área Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones Sede Colón*. Chile, 2001.
- [13] Manuel Enrique Huete Serano “SISTEMA DEPUESTA A TIERRA Y PROTECCION PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES” *Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica*. Guatemala 2008.

