

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACION 115/13,8kV CADAFE

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Nagy B., Erika X.
para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACION 115/13,8kV CADAFE

Prof. Guía: Ing. Nerio Ojeda
Tutor industrial: Ing. Blas Arévalo Dodero

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Nagy B., Erika X.
para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2009

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 06 de mayo de 2009

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Erika X. Nagy B., titulado:

DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACION 115/13,8 kV CADAFE

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Noel Díaz
Jurado

Prof. Julián Pérez
Jurado

Prof. Nerio Ojeda
Prof. Guía



DEDICATORIA

A Dios, a mi Familia y a todos mis buenos amigos que han estado conmigo a lo largo de mi vida

AGRADECIMIENTOS

A **Xiomara Basante** y a **Pal Nagy** que siempre lucharon para darme todo lo necesario para apoyarme a lograr mis metas.

A mi hermano **Pablo Nagy** quien me acompañó a lo largo de toda la carrera universitaria como amigo, compañero de estudios y hermano.

A todos los compañeros de clase que hicieron de la carrera universitaria un camino más llevadero.

A **Fermín Noda** por ser mi compañero en las buenas y en las malas.

A todos los profesores que me formaron para ser la persona que soy.

A mis tutores **Nerio Ojeda** y **Blas Arévalo** quienes siempre estuvieron dispuestos a darme su apoyo para obtener el mejor fruto posible.

A todo el personal de la compañía **Deproex C.A.**, quienes me apoyaron y contribuyeron con la elaboración de este trabajo.

A **Ligia Medrano** por ser una persona amable, incondicional y altamente dedicada al apoyo estudiantil.

Nagy B., Erika X.

DISEÑO DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACION 115/13,8kV
CADAFE.

Profesor Guía: Nerio, Ojeda. **Tutor Industrial:** Ing. Blas Arévalo Dodero. **Tesis.** Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. **Ingeniero Electricista. Opción:** Potencia. **Institución:** Deproex, C.A.

Palabras Claves: Subestación, Malla de Puesta a Tierra, Tensión de Toque, Tensión de Paso, Resistividad del Suelo, CADAFE, IEEE-80-2000.

Resumen: En el presente trabajo se propone el diseño de una malla de puesta a tierra para la subestación San Jaime con niveles de tensión 115/13,8 kV y perteneciente a la empresa CADAFE. Esta malla debe facilitar el paso de corriente de cortocircuito en caso de ocurrir una falla en el sistema causada por diversos factores como son: las descargas atmosféricas sobre los cables de guarda, unión de una o varias fases por medio de ramas, etc., para poder garantizar la continuidad del suministro eléctrico por largo tiempo y evitar riesgos de fallas o muerte de algún ser humano. Dicha propuesta debe poseer niveles de tensión de toque tolerables por el cuerpo humano superiores a los de tensión de malla y niveles de tensión de paso tolerables por el cuerpo humano mayores a la tensión de paso. Para el análisis se utilizó como enfoque el procedimiento establecido por la norma IEEE-80-2000 y cumplir a su vez con los requerimientos mínimos de CADAFE; el planteamiento inicial es formulado en base a la propuesta más básica, de forma tal que si no cumple con los rangos establecidos se va elaborando un modelo más complejo hasta encontrar el diseño definitivo con los menores costos. Se obtiene como resultado final una malla que cumple con los rangos de tensión establecidos, con un área de 146m × 68m, cuadrículas de 2m² con conductor #4/0 de cobre, anexando 14 jabalinas con una longitud de 7,2m c/u.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL	v
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS	xi
SIGLAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	14
CAPÍTULO I	16
PROBLEMA	16
1.1.- Planteamiento del problema.....	16
1.2.- Objetivo General	17
1.3.- Objetivos Específicos	17
1.4.- Metodología	18
CAPÍTULO II	19
MARCO TEORICO	19
2.1.- Generalidades:.....	19

2.2.- Definiciones Sistema de Puesta a Tierra.....	19
2.3.- Clasificación de los sistemas de Puesta a tierra	20
2.4.- Malla de tierra	20
2.5.-Elementos.....	20
2.6.- Efectos fisiológicos de la corriente de tierra.....	21
2.7.- Aumento del potencial de tierra (GPR)	21
2.8.- Tensión de toque	21
2.9.- Tensión de paso.....	22
2.10.- Corriente simétrica de falla a tierra	22
2.11.- Resistividad del terreno	23
2.12.-Propiedades de suelo	23
2.13.- Resistividad Aparente.....	24
2.14.- Métodos para la medición de resistividad eléctrica del subsuelo.....	25
2.15.- Método de Wenner	25
2.16.- Factores que afectan la resistividad	28
2.17.- Método de Wenner α,β	28
2.18.- Corriente de falla asimétrica efectiva	28
2.19.- Factor de división de la corriente de falla.....	29
2.20.- Suelo	30
2.21.- Sondeo Eléctrico Vertical	30
2.22.- Distancias interelectrónicas.....	30
2.23. – Factor de decremento	30

CAPÍTULO III	32
MARCO METODOLÓGICO	32
3.1.- Dimensionamiento.....	32
3.1.1.- Ubicación Geográfica	33
3.1.2.- Adquisición de las curvas de resistividad	34
3.1.3.- Análisis de la Resistividad Aparente	37
3.1.4.- Análisis de las curvas.....	38
3.1.5.- Método Gráfico de Sunde	39
3.1.5.1.-Esquema de cálculo.....	39
3.1.5.2.-Implementación del método sobre los valores obtenidos en campo..	40
3.1.5.2.1.-Primera medición.....	40
3.1.5.2.2.-Segunda medición.....	41
3.1.5.2.3.-Tercera medición	41
3.1.5.2.4.-Cuarta medición.....	42
3.1.5.2.5.-Quinta medición	43
3.1.5.2.6.-Sexta medición	43
3.1.5.3.- Interpretación de resultados	44
3.1.6.- Análisis programa IPI2WIN	44
3.1.6.1.-Resultados de la Primera medición.....	45
3.1.6.2.-Resultados de la Segunda medición.....	46
3.1.6.3.-Resultados de la Tercera medición.....	46
3.1.6.4.-Resultados de la Cuarta medición.....	47

3.1.6.5.-Resultados de la Quinta medición.....	47
3.1.6.6.-Resultados de la Sexta medición.....	48
3.1.7.- Diseño de la Malla	48
3.1.7.1.- Consideraciones adicionales.....	51
3.1.7.2.- Procedimiento.....	51
3.1.7.3.- Tamaño del Conductor.....	52
3.1.7.4.- Cálculo de potenciales Tolerables: E_{paso} y E_{toque}	63
3.1.7.5.-Diseño inicial.....	66
3.1.7.6.-Determinación de la resistencia de la malla (R_g).....	66
3.1.7.7.-Corriente máxima de la malla (I_G).....	67
3.1.7.8.-Número efectivo de conductores paralelos en una malla (n).....	73
3.1.7.9.- Cálculo del voltaje de malla (E_m).....	75
3.1.7.10.- Verificación de las condiciones de seguridad	78
3.1.8.- Diseño para la Subestación San Jaime 115/13,8 kV	79
3.1.9.-Puesta a tierra de los equipos por norma CADAPE	82
3.1.9.1.- Puesta a tierra cerca perimetral, puertas y portones	82
3.1.9.2.- Puesta a tierra de Transformadores trifásico	82
3.1.9.3.- Puesta a tierra de transformadores de corriente, tensión y condensador de acoplamiento de soporte	82
3.1.9.4.- Puesta a tierra de Pararrayos en soportes y contadores de descarga	83
3.1.9.5.- Puesta a tierra de Pórticos y Torres	83
3.1.9.6.- Puesta a tierra de Casa de Mando y Relés	84
3.1.9.7.- Puesta a tierra de Armarios, Tableros y Cargadores de Baterías.	84

3.1.9.8.- Puesta a tierra de Cables	84
3.1.9.9- Puesta a tierra de Cables de Guarda	85
3.1.10.-Puesta a tierra de los equipos por norma IEEE std-80-2000.....	85
3.1.10.1- Puesta a tierra de pantalla de cable de control.....	85
3.1.10.2- Potenciales de transferencia	86
3.1.10.2.1.- Cables neutros de bajo voltaje	87
3.1.10.2.2.- Equipo portátil y herramientas que se alimentan desde la subestación.	87
CONCLUSION	89
RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIGRÁFICAS	92
ANEXOS	95
[ANEXO 1]	95
PLANOS DE MALLA DE PUESTA A TIERRA Y CONECTORES	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Disposición de los electrodos para la medición de resistividad con el método de Wenner	26
Figura 2. Relación espaciamento-profundidad de alcance. [8]	27
Figura 3. Disposición de Wenner	27
Figura 4. Disposición de electrodos en los dispositivos <i>Wenner α, β</i> [9].....	28
Figura 4. Disposición de electrodos en los dispositivos de Wenner	28
Figura 5. Relaciones entre valores reales de la corriente de falla y valores de I_F, I_f y D_f para la duración de la falla t_f . [5].....	29
Figura 6. Ubicación de los electrodos para la medición de Resistividad.....	35
Figura 7. Curvas de resistividad	37
Figura 8. Gráfica del método de Sunde[5].....	39
Figura 9. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la primera medición.....	40
Figura 10. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la segunda medición.....	41
Figura 11. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la tercera medición.....	42
Figura 12. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la cuarta medición.....	42
Figura 13. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la quinta medición.....	43
Figura 14. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la sexta	

medición.....	44
Figura 15. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Primera medición.	45
Figura 16. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Segunda medición.	46
Figura 17. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Tercera medición.	46
Figura 18. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Cuarta medición.	47
Figura 19. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Quinta medición.	47
Figura 20. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Sexta medición. .	48
Figura 21. Diagrama de bloques del procedimiento del diseño [5].....	52
Figura 22. C_s Versus h_s [5]	65
Figura 23. Malla cuadrada sin jabalinas	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia de tierra específica ρ_E para diferentes tipos de suelos. [7]24	
Tabla 2. Medición de resistividad de la S/E San Jaime	36
Tabla 3. Sondeo a	45
Tabla 4. Sondeo b	46
Tabla 5. Sondeo c	46
Tabla 6. Sondeo d	47
Tabla 7. Sondeo f.....	47

Tabla 8. Sondeo g	48
Tabla 9. Valores típicos de D_f [5].....	56
Tabla 10. Constante de los materiales.[5].....	58
Tabla 11. Corriente admisible de los conductores de cobre[20]	59
Tabla 12. Constante de los materiales. [5].....	62
Tabla 13: Iteración para el cálculo de malla de puesta a tierra para la subestación San Jaime.....	81

SIGLAS

CADAFE	<i>Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico</i>
GPR	<i>Ground potential rise</i>
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
PAT	<i>Puesta a Tierra</i>

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia están compuestos por equipos por donde circula el flujo de potencia desde los puntos de generación a los centros de consumo. La seguridad del personal y de los equipos dentro del sistema de potencia es de especial consideración para la calidad y continuidad de los servicios.

Los sistemas de puesta a tierra, son los elementos fundamentales encargados, entre otras funciones, de propiciar un camino de baja impedancia que permita drenar de forma adecuada corrientes de cortocircuito y sobretensiones, en condiciones de falla de un sistema de potencia, asegurando la continuidad del suministro eléctrico y a su vez asegurar que cualquier punto accesible a las personas que puedan transitar o permanecer allí, no genere tensiones de paso o de contacto que superen los umbrales de sensibilidad. Se debe tener presente que el criterio fundamental para garantizar la seguridad en la subestación, es la máxima corriente que pueden tolerar el cuerpo humano, debida a la tensión de paso o de contacto y no el valor de la resistencia de puesta a tierra que se pueda obtener.

Por lo tanto al diseñar un sistema de puesta a tierra, es fundamental determinar tensiones máximas aplicadas al ser humano en caso de falla y en función de esto elaborar un diseño acorde que no esté sobredimensionado ni que genere riesgos al transitar por el perímetro de la subestación.

En el presente trabajo se desarrollará la metodología para el diseño de la malla de puesta a tierra para la Subestación San Jaime 115/13,8 kV CADAFE, utilizando la norma IEEE-80-2000 (Guide for Safety in AC Substation Grounding), la norma IEEE-81-1983 (Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System) y tomando la metodología propuesta por los mismos, además, se verificará la propuesta con

la “Guía para el diseño de malla de tierra para subestaciones” de CADAFE.

El estudio consta de 3 capítulos. En el capítulo 1, se describen los objetivos y alcance del proyecto. En el capítulo 2 se hace una revisión general de los conceptos utilizados en el diseño de la malla de puesta a tierra. En el capítulo 3 se trata en detalle el diseño de dicha malla y se analizan los resultados.

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1.- Planteamiento del problema

En la presente investigación se hará el estudio de la subestación San Jaime que requiere del diseño de un Sistema de Puesta Tierra adecuado que permita drenar las corrientes generadas por descargas atmosféricas o fallas en el sistema eléctrico.

Se debe garantizar que la Tensión de Malla (E_m) sea menor que la Tensión de Toque (E_{Toque}) y que la tensión de Paso tolerable (E_s) sea menor que la Tensión de Paso (E_{Paso}), con el objetivo de brindar seguridad a las personas dentro de la Subestación y en el perímetro cercano alrededor de esta, tomando en cuenta que los fenómenos fisiológicos que produce la corriente eléctrica en el organismo humano dependen del valor de la intensidad de la corriente, duración del contacto, peso, altura, estado del punto de contacto a tierra, entre otras.

Es necesario establecer las conexiones de puesta a tierra para la casa de mando así como los equipos, tableros y relés encontrados en el mismo. Para ello se utilizará la “Especificación Técnica para el sistema de puesta a tierra” de CADAFE [20].

El diseño debe adherirse a la norma IEEE-80-2000 (Guide for Safety in AC Substation Grounding) y a las Normas CADAFE para minimizar los riesgos de seguridad industrial y proporcionar prácticas de instalación correctas de un sistema eléctrico.

1.2.- Objetivo General

Plantear un modelo de Malla de Puesta a Tierra para una Subestación 115/13,8kV que cumpla con las normas establecidas por CADAPE y las internacionales, confirmando su veracidad en el ámbito de los valores mínimos propuestos para este tipo de subestación.

1.3.- Objetivos Específicos

- Realizar la medición de resistividad del terreno de una Subestación con ubicación propuesta en El Fuerte Paramaconí, al oeste de la ciudad de Maturín, estado Monagas.
- A partir de estos valores de resistividad del terreno, proponer una estructura de malla que incluya el número de conductores y las dimensiones de la cuadrícula que esta puede generar, cumpliendo con el rango establecido de tensión de paso y tensión de toque.
- Investigar las normas propuestas por CADAPE para el diseño de la malla de puesta a tierra en una Subestación 115/13,8kV, haciendo mayor énfasis en la puesta a tierra de equipos en el patio y tableros de la casa de mando.
- Realizar el estudio de requerimiento de puesta a tierra de los equipos a ubicar en la casa de mando, tomando en cuenta las normas de CADAPE para este tipo de subestación.
- Realizar los planos de la malla de puesta a tierra y la puesta a tierra de cada uno de los equipos involucrados en la subestación, totalizando el número de bajantes, conectores y conductores necesarios para la puesta a tierra de los mismos.

1.4.- Metodología

Los fundamentos teóricos, principios básicos e información requerida fue obtenida por la empresa Deproex, C.A. y recopilación de otras fuentes; realizándose una revisión de las normativas generales y particulares de CADAFE en específico la “Guía para el diseño de malla de tierra para subestaciones”, “Especificación técnica para el sistema de puesta a tierra” y la “Presentación de proyectos de subestaciones de transmisión. Sistemas de puesta a tierra”. Entre las normativas internacionales se utilizó la norma IEEE-81-1983 [23] y la norma IEEE-80-2000 [5]. Además se recolectó información proveniente de páginas web e informes realizados por la empresa Deproex para otras subestaciones.

La adquisición de los valores de resistividad del suelo fue llevado a cabo aplicando el método de Wenner y utilizando el equipo electrónico marca MEGGER modelo DET5/4R. Posteriormente estos valores fueron analizados y verificados con los tutores y especialistas de la empresa. Se solicitó la información de la corriente de falla a tierra estimada por CADAFE para la subestación San Jaime, con la que se procedió a prediseñar la geometría de la puesta a tierra ofreciéndose así, un modelo en función del área de la subestación y de los equipos a proteger.

Se realizó el análisis de los criterios propuestos por CADAFE con respecto a la puesta a tierra de los equipos en la casa de mando y de la protección contra descargas atmosféricas investigando lo relativo a la puesta a tierra de cada equipo involucrado en la subestación y muro perimetral.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1.- Generalidades:

La importancia del sistema de puesta a tierra nace de la necesidad que tenemos de proteger a las personas e instalaciones ante las tensiones peligrosas para su integridad, teniendo además en cuenta que en algunos casos sirven como parte conductora de una instalación. En adelante se tratarán los aspectos relacionados a la malla de puesta a tierra.

2.2.- Definiciones Sistema de Puesta a Tierra

“En el manual de Mantenimiento de Líneas y Operaciones de Subestaciones CADAFE (1996), se indica que el Sistema de Puesta a Tierra de una Subestación es diseñado a fin de garantizar las máximas condiciones de seguridad del personal que opera las subestaciones y los equipos instalados en las mismas.” [1].

El propósito de un sistema puesto a tierra “es eliminar la tensión de toque que pudieran poner en peligro la vida de las personas, propiedades y para que operen las protecciones por sobrecorriente de los equipos. Esto se logra conectando al punto de conexión del sistema eléctrico con la referencia tierra, todas las partes metálicas que puedan llegar a energizarse, mediante un conductor apropiado a la corriente de corto circuito del propio sistema en el punto en cuestión”. [2]

2.3.- Clasificación de los sistemas de Puesta a tierra

- “Sistema de Puesta a Tierra a Baja Frecuencia: es el conjunto de elementos que, en caso de una falla a tierra en alguna parte de un sistema de potencia con sus neutros puestos a tierra, constituyen junto con el suelo, el divisor de corrientes de retorno a los neutros de las fuentes de energía eléctrica contribuyentes a la falla.
- Puesta a tierra de protección: es aquella que se instala con el objetivo primario de prevenir accidentes a las personas que interactúan con el sistema de potencia.
- Puesta a tierra de servicio: es aquella conexión a tierra que pertenece al circuito de corriente de trabajo; es decir, el centro de la estrella de generadores y transformadores”. [1]

2.4.- Malla de tierra

“Es el conjunto de elementos conductores, que enterrados en el suelo de la subestación, permite disipar a través de ella, corrientes de cortocircuito a tierra del sistema de potencia y controlar gradientes de potencial en la superficie del suelo” [3].

2.5.-Elementos

“El elemento central de una instalación de puesta a tierra es el electrodo, que es un elemento metálico (fierro, acero, cobre, aluminio, etc.), por medio del cual se introduce la corriente a la tierra; los electrodos adoptan formas geométricas bien ensayadas para tal fin y son: semiesferas, pica (tubo, varilla, bastón, etc.), banda (conductor, etc.) placa y anillo. Son componentes importantes, por supuesto, los conductores de tierra (los que unen al elemento por proteger con el electrodo), los conductores colectores (líneas conductoras que unen a varios electrodos para la operación en paralelo), así como los conectores de unión (que hacen factible la unión correcta entre los diversos elementos del sistema de tierra).”[3]

2.6.- Efectos fisiológicos de la corriente de tierra

“Al circular la corriente de tierra por los electrodos se origina en ellos y en la tierra que los rodea fenómenos de naturaleza eléctrica, magnética y térmica. Así por ejemplo, desde el punto de vista de la seguridad para las personas, el potencial de electrodo y su distribución sobre el terreno son el problema central por atender, ya que se manifiesta como tensiones de contacto y de paso en ellas si se encuentran en la zona de influencia del sistema de tierra; tales tensiones no sólo pueden afectar la salud, sino hasta ocasionar la muerte. La disciplina tecnológica de la medicina que se encarga de tales efectos es la electrofisiología; y a partir de experimentos en personas y animales, se ha determinado el grado de peligrosidad de la corriente sobre el cuerpo humano, es decir, los valores de corriente y de tensión que son peligrosos para él, tales magnitudes están normalizadas y sirven de base para el diseño de los sistemas de puesta a tierra.”[4]

2.7.- Aumento del potencial de tierra (GPR)

“Es el máximo potencial eléctrico que una subestación con malla de puesta a tierra puede alcanzar, relativo a una distancia de un punto puesto a tierra que se asume como el potencial de tierra remoto. Este voltaje GPR, es igual a los máximos tiempos de corriente de malla y resistencia de malla.” [5]

2.8.- Tensión de toque

“Es la diferencia de potencial entre objetos metálicos o estructuras dentro de los lugares de la subestación que puede establecer un puente por el contacto directo mano-mano o mano-pie.

En una subestación convencional, el peor voltaje de toque se encuentra comúnmente en la diferencia de potencial entre una mano y el pie en un punto a la

distancia máxima alcanzable. Sin embargo, en el caso de un contacto metal con metal desde mano con mano o desde mano con pie, ambas situaciones se deberían investigar para las posibles condiciones de peor alcance.

Este valor determina la máxima tensión que puede admitir una persona en condición de tensión de toque, sin experimentar fibrilación ventricular.” [5].

2.9.- Tensión de paso

“Es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pie sin tener contacto con cualquier objeto puesto a tierra.

Este valor determina la máxima tensión que puede admitir una persona en condición de tensión de paso, sin experimentar fibrilación ventricular.” [5].

2.10.- Corriente simétrica de falla a tierra

“Es el valor rms máximo de la corriente simétrica de falla, después del inicio de una falla a tierra. Como tal se presentan los valores rms de la componente simétrica en el primer medio ciclo de una onda de corriente que se desarrolla después del instante de una falla en el tiempo cero. Para las fallas de fase a tierra tenemos que $I_{f(0+)}=3(I_0)$ ”, donde $I_{f(0+)}$ es el valor rms inicial de una corriente simétrica de falla a tierra e I_0 es el valor rms de una corriente simétrica con secuencia cero que se desarrolla un instante después del inicio de la falla, manifestándose en las reactancias subtransitorias de las máquinas en movimiento que contribuyen a la falla.”[5]

2.11.- Resistividad del terreno

Para iniciar el estudio, es necesario conocer el tipo de terreno de la plataforma sobre la cual se va a construir la Subestación y ello se logra obteniendo los valores de resistividad de las diferentes capas.

Dicho terreno es el medio que se encarga de disipar las corrientes y por lo tanto estamos hablando de un semiconductor cuya resistividad varía en función de su composición geológica. Es importante considerar la hipótesis de un suelo biestratificado o multicapa ya que a menudo se encuentran diferentes capas, cada una con diferente resistividad. [4]

2.12.-Propiedades de suelo

El terreno está compuesto por una serie de factores que afectan la resistividad del mismo, pudiéndose nombrar entre otros los siguientes:

“1.- Absorción, 2.- Compactación y presión del suelo, 3.-Concentración de sales, 4.- Densidad, 5.- Estratificación del suelo, 6.- Factor de Formación, 7.- Fluidos Saturados, 8.- Frecuencia, 9.- Humedad del suelo, 10.- Nivel Freático, 11.- Permeabilidad magnética, 12.- Porosidad, 13.- Potencial de Hidrógeno, 14.- Potencial de Ionización, 15.- Resistividad, 16.- Solubilidad, 17.- Temperatura del suelo, 18.- Textura, 19.- Tipo de suelo”. [6]

“Es de gran importancia que se investigue la resistividad del suelo cada vez que se tenga como objetivo la instalación de un sistema de puesta a tierra. La resistividad del suelo varía por diversas razones. Entre ellas están la naturaleza del suelo, la profundidad desde la superficie, el tipo y la concentración de químicos en el suelo, el contenido de humedad y la temperatura.”[2] Por ejemplo, en la tabla 1 se indica un rango de valores de la resistividad específica de la tierra en función de la naturaleza del suelo.

Tabla 1. Resistencia de tierra específica ρ_E para diferentes tipos de suelos. [7]

Naturaleza del suelo	Resistencia específica de tierra en $\rho_E \Omega m$
Terrenos pantanosos	8 ... 60
Tierra Cultivable, terrenos arcillosos, gravilla húmeda	20 ... 300
Terreno arenosos húmedo	200 ... 600
Terreno arenoso seco, gravilla seca	200 ... 2000
Suelo pedregoso	300 ... 8000
Rocas	10^4 ... 10^{10}

“Las resistividades del suelo varían entre un intervalo de $1\Omega m$ a $1000\Omega m$, por lo tanto, es necesario realizar la integración de datos geológicos en la superficie por medio de curvas de resistividades para poder interpretar los espesores de las capas presentes en el terreno”. [7]

“A partir de los datos encontrados en la medición de campo se puede realizar un corte geoelectrico, que especifica los espesores y resistividades de cada medio estratificado del entorno. Para un estudio de suelo biestratificado, el corte geoelectrico está compuesto por dos (2) capas, donde la última capa siempre tiene espesor infinito.” [8]

2.13.- Resistividad Aparente

“La resistividad ρ , es un coeficiente que depende de la naturaleza y del estado físico del cuerpo considerado.

Así mismo teniendo la ley de Ohm: $R : V/I$

Donde la resistividad tiene un valor fijo para la materia homogénea. Para este caso se considera una situación homogénea por lo que el valor de resistividad obtenido es ficticio.” [9]

2.14.- Métodos para la medición de resistividad eléctrica del subsuelo

“Para estudiar los fenómenos electromagnéticos del suelo, ocasionados por inyecciones de corriente permanentes o transitorias en el sistema de puesta a tierra, es necesario determinar los parámetros electromagnéticos del terreno.”[10]

“Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. El método consiste en la inyección de corriente alterna o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación, mediante otro par de electrodos, de la diferencia de potencial. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada”.[11]

En cualquier dispositivo electródico, si conocemos el factor geométrico g , la corriente eléctrica I inyectada por los electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, podemos calcular la resistividad aparente”.[11]

2.15.- Método de Wenner

“Este método fue elaborado por Frank Wenner del US Of Standards en 1915 (F. Wenner, A Method of Measuring Earth Resistivity; Bull, National Bureau of Standards, Bull 12(4) 258, s478-496; 1915/16). El estudio consiste en inducir un campo eléctrico artificial creado en superficie al hacer pasar corriente por el subsuelo para determinar las resistividades aparentes en el mismo, a partir de estas resistividades, es posible deducir la distribución de resistividades reales en un punto sondeado.”[12]

Utilizando la configuración de Wenner, necesitamos conocer las distancias entre los electrodos y teniendo la medición de intensidad de corriente que pasa por los electrodos y la diferencia de potencial que aparece en los otros puntos, se puede obtener la resistividad aparente calculada por la siguiente ecuación:

$$\rho = 2 * a * \pi * R \quad (1)$$

Donde:

ρ = Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)

a = Distancia entre electrodos (m).

R = Resistencia medida en el terreno. (Ω)

La disposición de los electrodos se muestra en la figura 1.

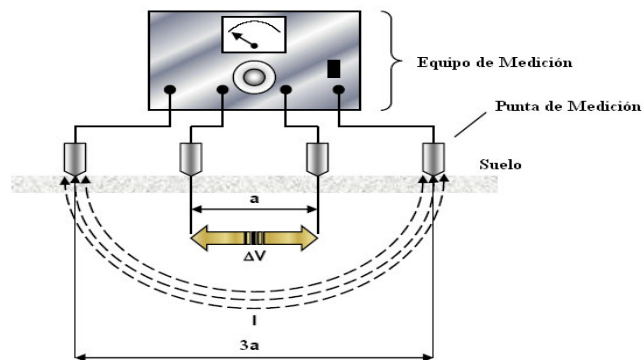


Figura 1. Disposición de los electrodos para la medición de resistividad con el método de Wenner

Para abarcar una mayor área por el sondeo eléctrico es necesario que los electrodos estén a una mayor separación eléctrica.

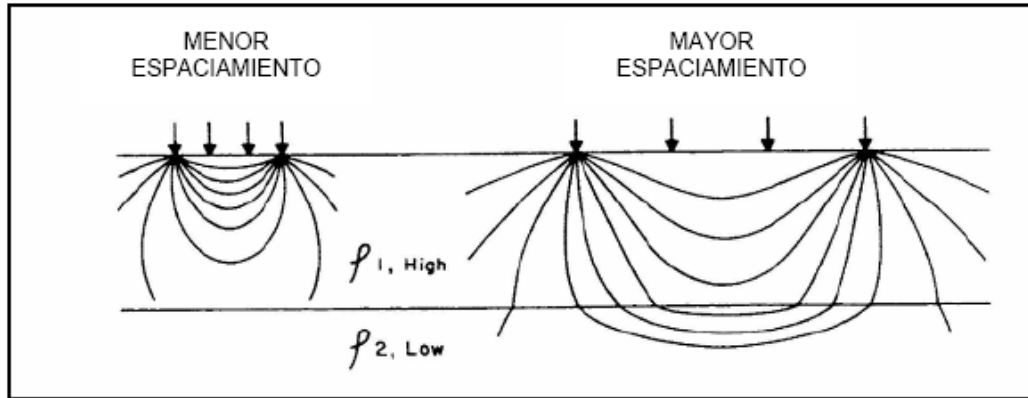


Figura 2. Relación espaciamiento-profundidad de alcance. [8]

“Para esta configuración los cuatro electrodos se colocan en una línea recta, con igual separación y profundidad de penetración en el terreno. (Figura 2). El método de medición consiste en que los electrodos C_1 y C_2 (externos) se utilizan para inyectar la corriente y los electrodos P_1 y P_2 (Centrales) sirven para medir la diferencia de potencial que al dividirse por la corriente inyectada da un valor de resistencia R .” [13]

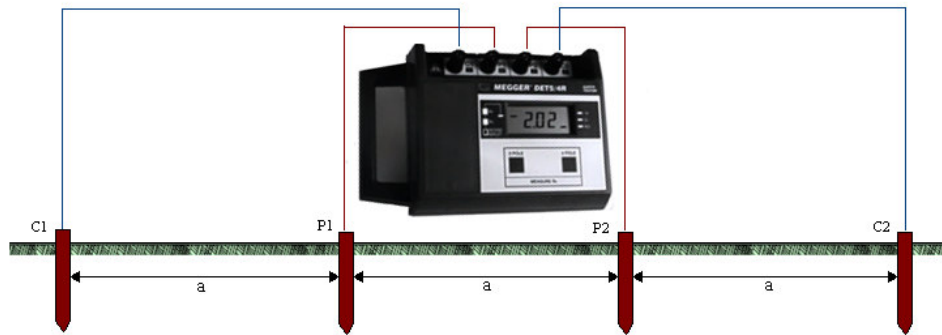


Figura 3. Disposición de Wenner

“El método de Wenner permite una visualización más rápida de la curva, ya que la resistividad puede ser obtenida en forma más directa a partir de los valores de resistencia R leídos en el instrumento.” [13]

2.16.- Factores que afectan la resistividad

- “Constante dieléctrica: indica la distorsión de las cargas que produce un campo eléctrico externos sobre materia no metálica.” [9]
- “Anisotropía: afecta el valor de resistividad según su dirección.” [9]

2.17.- Método de Wenner α, β

“La Figura 4 muestra la disposición de electrodos en los dispositivos Wenner α y β , donde m es un número real positivo (Roy, 1972). Un caso particular del dispositivo α -Wenner son los dispositivos Wenner ($m = 1$). El dispositivo doble dipolo es un caso particular del β -Wenner cuando $m \gg 1$.”[9]

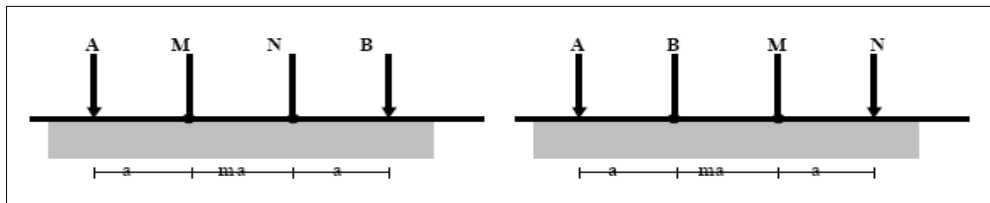


Figura 4. Disposición de electrodos en los dispositivos de Wenner

2.18.- Corriente de falla asimétrica efectiva

“Valor rms de la onda de corriente asimétrica, integrada sobre el intervalo de duración de la falla”. [5]

En la fig. 5 se puede ver las relaciones entre valores reales de la corriente de falla y valores de I_F, I_f y D_f para la duración de la falla t_f

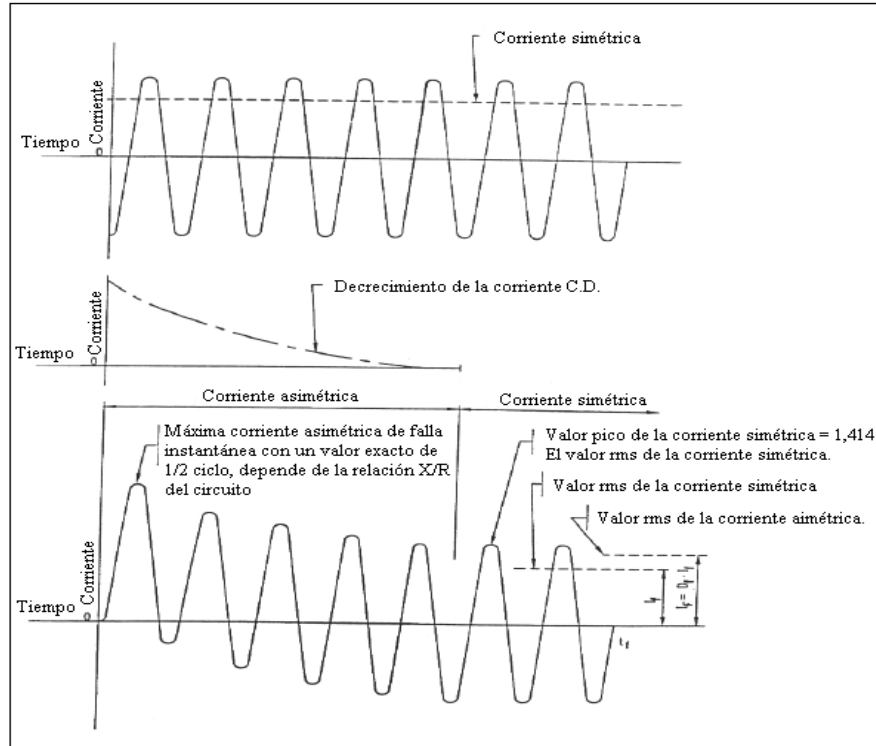


Figura 5. Relaciones entre valores reales de la corriente de falla y valores de I_f , I_f y D_f para la duración de la falla t_f [5]

2.19.- Factor de división de la corriente de falla

“Es un factor que representa al inverso de la relación de la corriente simétrica de la falla a la parte de la corriente que fluye entre la malla de puesta a tierra y en los alrededores del terreno a ser protegido.

El factor de división de la corriente podría cambiar durante la duración de la falla, por las diversas relaciones de decaimiento de las contribuciones a la falla y la secuencia de las operaciones de los dispositivos de interrupción. Sin embargo, para calcular el valor de diseño de la corriente máxima de la malla y la corriente simétrica de malla, suponemos que la relación es constante durante la duración total de la falla dada.”[5]

2.20.- Suelo

“Medio conductor semi-infinito que limita con el aire, al cual se considera un medio semi-infinito perfectamente aislante”[14].

2.21.- Sondeo Eléctrico Vertical

“El sondeo eléctrico vertical genera la información necesaria para la determinación de los cambios verticales de las propiedades geoelectricas del subsuelo. La interpretación de la información obtenida de los sondeos permite determinar la profundidad y espesores de los diferentes estratos de diferentes resistividades, al incrementarse sistemáticamente las distancias interelectrónicas con el consecuente aumento en la penetración del sondeo.”[15]

2.22.- Distancias interelectrónicas

“Separación entre los electrodos de medición, en el estudio de suelo.”[15]

2.23. – Factor de decremento

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

Para duraciones de fallas relativamente grandes, el efecto de la compensación DC se puede asumir que está más compensado por la disminución de la componente subtransitoria de CA. Un factor de decremento de 1.0 se puede utilizar para duraciones de fallas de 30 ciclos o más.”[5]

2.24. – Programa IPI2WIN

“El IPI2WIN es un programa que está diseñado para la interpretación en una dimensión de las curvas de sondeo eléctrico a lo largo de un perfil. Para iniciar un estudio con este programa son necesarios los datos obtenidos en campo sobre el sistema de mediciones y los valores de resistividad aparente que forman una curva dividida por segmentos.

La interpretación de un perfil constituye la base de la creación de este programa. Esto significa que los datos para un perfil son tratados como una unidad que representa la estructura geológica del área estudiada. Este principio es implementado principalmente mediante el uso de técnicas de interpretación interactiva.

El proceso interactivo es resuelto usando filtrado lineal. Los filtros fueron desarrollados en el Laboratorio de Prospección Eléctrica Somero de la Facultad de Geología de la Universidad Estatal de Moscú, Rusia. La implementación del algoritmo del filtrado provee una solución precisa para una amplia gama de modelos que cubren todas las situaciones geológicas razonables.”[32]

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Se procedió a recopilar información de forma sistemática de la variedad de procedimientos que cumplieran con los requisitos del proyecto, basados en el sistema de puesta a tierra, esto con el fin de obtener conocimientos más a fondo y así mediante la verificación del método seleccionar los más adecuados para la implementación. En primer lugar se estudiaron las normas y estándares que aplican, para conocer más a fondo el trabajo que se iba a realizar y así poder tomar las mejores decisiones a la hora de resolver cualquier posible problema.

La búsqueda y selección del método a utilizar produjo una segunda investigación, la cual se basó en conocer la parte teórica del diseño a implementar.

3.1.- Dimensionamiento

Se generó una tabla con la información recolectada en el área de trabajo, procurando tenerlos en el momento del diseño. La tabla se dividió en categorías de acuerdo al orden de prioridades, tomando en cuenta como información fidedigna aquellas propuestas por la IEEE y las normas proveniente de CADAPE.

- La corriente de falla escogida para el diseño o análisis la provee la división de planificación y estudios de CADAPE. En este caso se toma el mayor valor de cortocircuito suministrado (2380,16 MVA, 115/13,8kV, 11,95 /23,98 kA para el año 2015) con relación $X/R = 23,7$.
- Área de terreno de la subestación 66m × 85 m
- La norma de CADAPE [20] propone que la profundidad de enterramiento de la malla no sea menor a 0,5 m, por lo que se trabajará con ese valor por ser la mejor opción.

- El tiempo de despeje de la falla se determinó mediante el ajuste del disparo de las protecciones, es este caso será de 0,5 s.
- El material a utilizar en la superficie de la S/E será piedra picada, cuya resistividad es de $3000 \Omega \cdot m$ y estará distribuida a una profundidad de 0,10m.
- Temperatura ambiente $30^{\circ}C$.
- Impedancia de tierra remota de cada línea de transmisión del electrodo a tierra $R_{tg} = 20\Omega$.
- Impedancia de tierra remota de cada electrodo de distribución a tierra $R_{dg} = 25 \Omega$.
- Impedancia propia del cable de guarda aéreo del lado de 115kV, $Z_{s-1} = 1,24 + 0,55j$.
- Impedancia del neutro corrido del lado de 13,8kV $Z_{s-f} = (1,24 + 0,55j) \Omega$.

El tiempo necesario para la interpretación de los datos, el estudio de suelo, el diseño de la malla y la disposición de los bajantes fueron basados en diseños realizados anteriormente en la empresa, ya que ellos marcan la pauta de un tiempo aproximado de duración por cada análisis.

En base a las características mostradas anteriormente se procedió a estudiar las siguientes variables:

3.1.1. Ubicación Geográfica

La subestación San Jaime está ubicada en un lote de terreno en el Fuerte Paramaconí, al oeste de la ciudad de Maturín, Edo. Monagas. La plataforma presenta los siguientes límites geográficos:

- Norte:** con Terrenos del Fuerte Paramaconí.
- Este:** con Terrenos del Fuerte Paramaconí.
- Oeste:** con Terrenos del Fuerte Paramaconí
- Sur:** con Carretera vía Mangozal y Urb. Villa de los Ángeles.

Las coordenadas geográficas de sus vértices, referidas a DATUM UTM LA CANOA Huso 20 son:

P1	N1.074.168.107	E475.590,152
P2	N1.074.215,975	E475.677,950
P3	N1.074.055.275	E475.654,778
P4	N1074.101,836	E475.740,179

Como referencia adicional, sus equivalencias en coordenadas militares se muestran a continuación:

P1	N1.074.443.530	E475.832,500
P2	N1.074.474,680	E475.477,520
P3	N1.074.320.000	E475.423,000
P4	N1.074.351,160	E475.518,020

Estas posiciones pueden ser mostradas tanto en coordenadas geográficas como en cartesianas. Cada punto representa la ubicación geográfica de los vértices del terreno donde va a ser ubicada la subestación y son utilizadas como un sistema de referencia satelital.

3.1.2. Adquisición de las curvas de resistividad

La medición de los sondeos eléctricos se realizó de tal forma que cubra el mayor espacio requerido hacia ambos lados desde un punto céntrico. Se ubica el centro del terreno y de ahí se llevan los cables de corriente hasta los diferentes puntos de medición. Tanto los electrodos de potencial como los de corriente se enterraron a una profundidad de 30cm. Una vez ubicado los electrodos se procede a inyectar la corriente al suelo. Se observa el valor de resistencia arrojado por el equipo y se registra el valor del mismo para proceder a tomar otra medición. Este procedimiento se repitió para una separación entre electrodos de 3 m; es decir, si al inicio la separación era de 3 m; la siguiente medición será con una separación de 6 m.

Para realizar las mediciones es necesario tomar en cuenta algunas precauciones para que los resultados sean satisfactorios. Al inicio se deben colocar los electrodos con un buen contacto con el terreno, en caso de que el terreno sea deslizante, remover el material suelto hasta encontrar tierra firme. En caso de que el suelo tenga una capa gruesa de arena verter agua en el punto de clavado de los electrodos y verificar el punto de contacto de la bornera de los instrumentos y la toma de los electrodos. Verificar la presencia de corrientes inducidas y que la resistencia de los electrodos auxiliares y conductores sea de tal magnitud que no influyan en las mediciones.

Los sondeos eléctricos se realizaron por medio del equipo Digital Earth Tester, marca Megger DET5/4R, Serial N°: 6210-182/051205/3725; las direcciones tomadas para la medición de resistividad se muestran en la figura 6, tomando en cuenta como máxima medición 72m de largo y ancho.

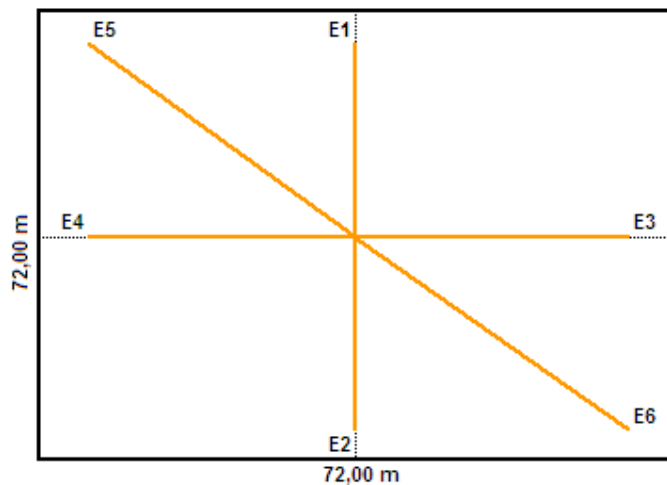


Figura 6. Ubicación de los electrodos para la medición de Resistividad

En la tabla 1 se muestran los valores de resistencia obtenidos en cada medición, con separaciones entre los electrodos de 3m, 6m, 9m y 12m entre ellos y con punto de referencia los ejes tomados en la figura 6.

Tabla 2. Medición de resistividad de la S/E San Jaime

EJE	PUNTO	(a) SEPARACION ENTRE ELECTRODOS (m)	RESISTENCIA R (Ω)	RESISTIVIDAD (Ω-m) $\rho = a^2 \cdot \pi \cdot R$
E1	1	3	39,14	737,77
	2	6	25,6	965,09
	3	9	18,04	1020,13
	4	12	15,1	1138,51
E2	5	3	3920	738,9
	6	6	26,3	991,48
	7	9	22,45	1269,51
	8	12	16,7	1259,15
E3	9	3	36,2	682,35
	10	6	24,6	927,39
	11	9	17,9	1012,22
	12	12	10,7	806,76
E4	13	3	39,18	738,52
	14	6	35,7	1345,85
	15	9	27,69	1565,83
	16	12	21,8	1643,68
E5	17	3	42,3	797,33
	18	6	35,6	1342,08
	19	9	29,3	1256,87
	20	12	22,9	1726,61
E6	21	3	37,5	706,85
	22	6	25,4	2201,62
	23	9	16,3	921,74
	24	12	10,63	801,48

Para poder obtener las curvas de resistividad de la figura 7 se procedió a graficar los valores calculados de resistividad de las mediciones realizadas en función de la separación de los electrodos tomados en cada dirección.

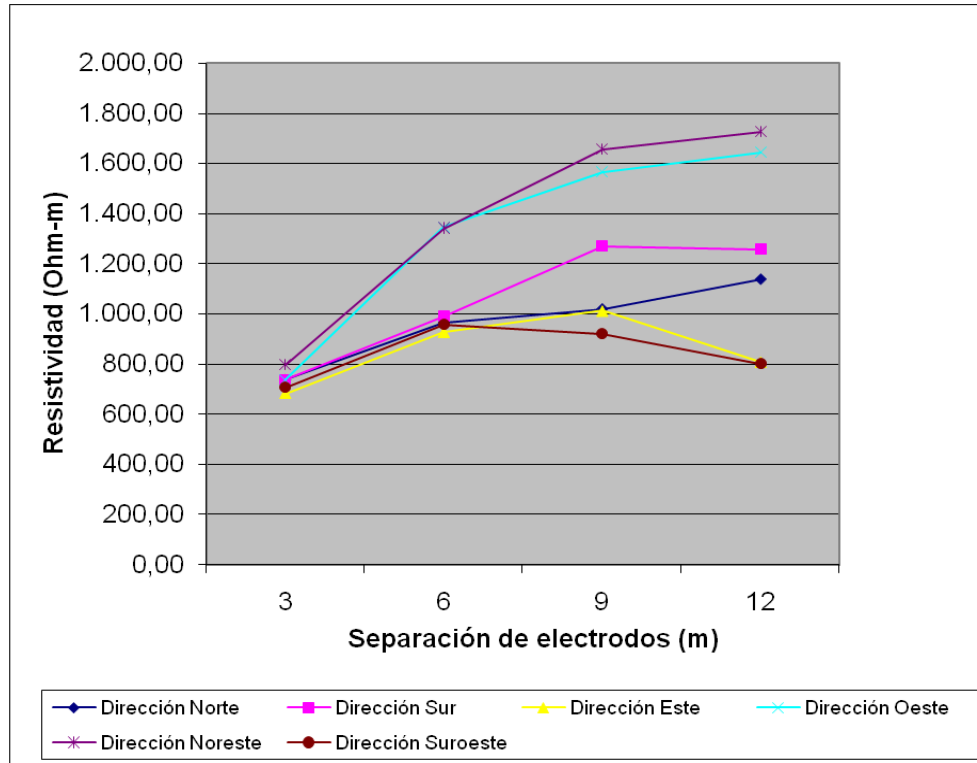


Figura 7. Curvas de resistividad

3.1.3. Análisis de la Resistividad Aparente

Este es un concepto importante para analizar los resultados obtenidos en la medición. El equipo Megger DET5/4R arroja un valor de resistencia calculado a partir de la corriente inducida por el electrodo A y la tensión medida en los electrodos M y N. A partir de ese valor y utilizando la ecuación (1) podemos obtener la resistividad aparente en $\Omega \cdot m$ de cada medición.

Tomando en cuenta que el suelo no es homogéneo, podemos encontrar valores de ρ_1 y ρ_2 para cada estrato donde varíe el tipo de terreno, por lo tanto, la resistividad hallada no puede considerarse como un promedio ni como media ponderada de las resistividades presentes, ya que puede ocurrir que sea mayor o menor que todas ellas.

“La resistividad aparente es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en la mayoría de los métodos geoelectricos y la que se toma como base para la interpretación.” [24]

3.1.4. Análisis de las curvas

Con la información generada una vez calculada la resistividad aparente, se empleó el método de Sunde propuesto por la IEEE-80-2000 (Guide for Safety in AC Substation Grounding). Este utiliza la figura 2 para modelar el suelo en dos estratos, los parámetros ρ_1 y ρ_2 son tomados de la figura de resistividad obtenida por el método de Wenner; ρ_1 corresponde al primer valor medido, así mismo ρ_2 representa el último valor de la figura 2.

Es preciso decir que, aplicando el método de Sunde sólo se puede obtener el valor de la profundidad del primer estrato, ya que los valores ρ_1 y ρ_2 son escogidos a simple vista de la figura de resistividad aparente, lo que hace que este método sea impreciso y que arroje resultados desfavorables con respecto a otros.

Es por ello que se procederá a comparar los resultados obtenidos en este procedimiento con la interpretación el programa de computación IPI2WIN. “Este programa está diseñado para la interpretación automática o semi-automática de datos de sondeo eléctrico vertical obtenidos con varios de los arreglos utilizados con más frecuencia en la prospectiva eléctrica” [35]. El estudio fue hecho modelando un suelo biestratificado, tal como especifica la norma CADAPE (Guía para realizar estudios de suelos de terreno para subestaciones). Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada sondeo eléctrico vertical se representan por medio de una curva en función de las distancias interelectrónicas media $AB/3$, donde la curva azul representa la resistividad verdadera, la Roja es la teórica y la Negra es la de campo.

3.1.5.- Método Gráfico de Sunde

3.1.5.1.-Esquema de cálculo

1. Graficar la curva de resistividad aparente vs la separación de los electrodos.
2. Estimar los valores de ρ_1 y ρ_2 , ρ_1 corresponde a los valores pequeños de separación de los electrodos para los cuales fue medido, así mismo ρ_2 corresponde a los valores de separación grande para los cuales fue medido.
3. Determinar ρ_2 / ρ_1 y seleccionar una curva de Sunde que se aproxime a las existentes o interpole y grafique una nueva.
4. Seleccionar en el eje Y el valor apropiado de ρ_a / ρ_1 , dentro de la pendiente de la curva ρ_2 / ρ_1 obtenida.
5. Leer el valor de a / h sobre el eje de las abscisas.
6. Multiplicar el valor obtenido ρ_a / ρ_1 por el valor de ρ_1 escogido al principio.
7. Leer a sobre la figura de resistividad aparente, el valor de ρ_a obtenido.
8. Mediante la relación a / h , calcular h con el valor de a conocido.

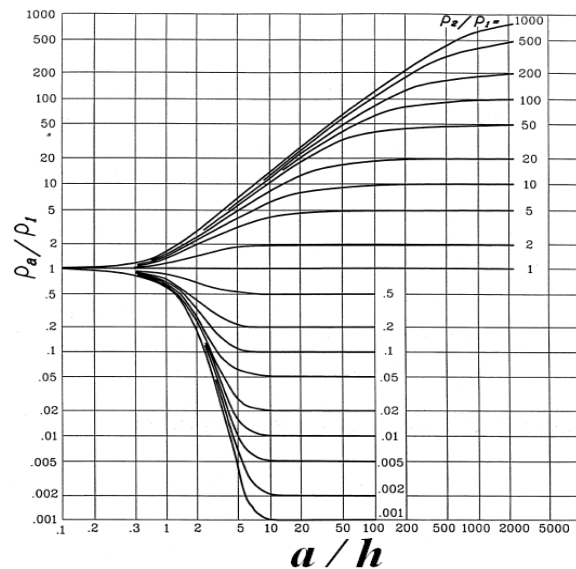


Figura 8. Gráfica del método de Sunde[5]

3.1.5.2.-Implementación del método sobre los valores obtenidos en campo

3.1.5.2.1.-Primera medición

1. Graficar la resistividad aparente vs separación de los electrodos para la primera medición (figura9).
2. Elegir los valores $\rho_1 = 737,77 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 1138,51 \Omega \cdot m$
3. $\rho_2 / \rho_1 = 737,77 / 1138,51 = 1,5$.
4. Seleccionar $\rho_a / \rho_1 = 1,50$.
5. Leer $a / h = 2$ desde la gráfica del método de Sunde (figura 8) por $\rho_a / \rho_1 = 1,50$.
6. Calcular ρ_a : $\rho_a = 1,5\rho_1 = 1,5(737,77) = 1106,65$.
7. Leer $a = 9$ en la curva de resistividad aparente (figura 9) con $\rho_a = 1106,65$.
8. Calcular h ; $h = \frac{a}{2} = 9 / 2 = 4,5m$.

$$a/h$$

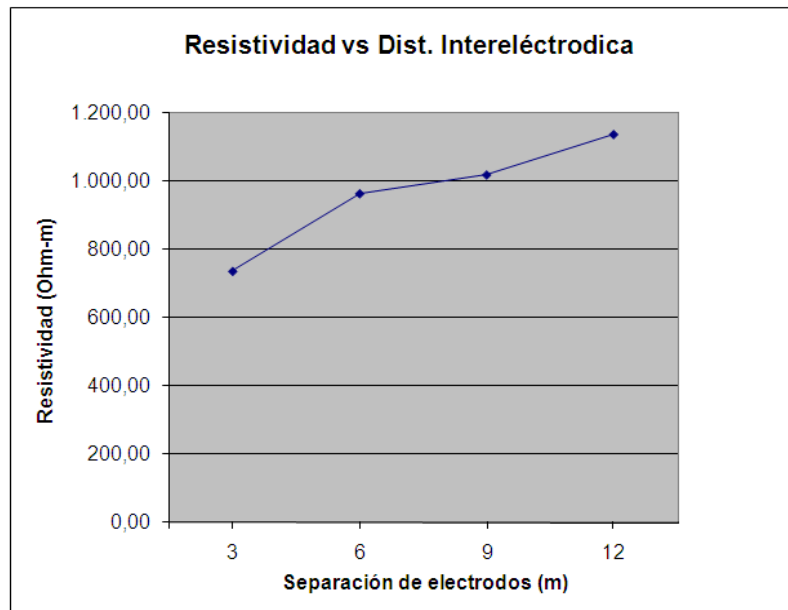


Figura 9. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la primera medición.

3.1.5.2.2.-Segunda medición

1. Graficar la resistividad aparente vs separación de los electrodos para la segunda medición (figura 10).
2. Elegir los valores $\rho_1 = 738,90 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 1259,15 \Omega \cdot m$
3. $\rho_2 / \rho_1 = 1259,15 / 738,90 = 1,70$. Graficar la curva sobre la figura del método de Sunde (figura 8).

No se puede determinar por el método de Sunde.

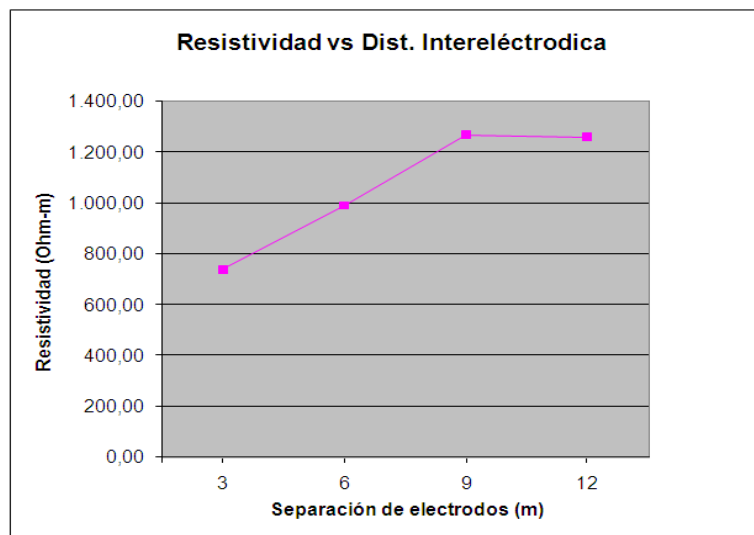


Figura 10. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la segunda medición.

3.1.5.2.3.-Tercera medición

1. Graficar la resistividad aparente vs separación de los electrodos para la tercera medición (figura 11).
2. Elegir los valores $\rho_1 = 682,36 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 806,76 \Omega \cdot m$
3. $\rho_2 / \rho_1 = 806,76 / 682,36 = 1,18$.

No se puede determinar por el método de Sunde.

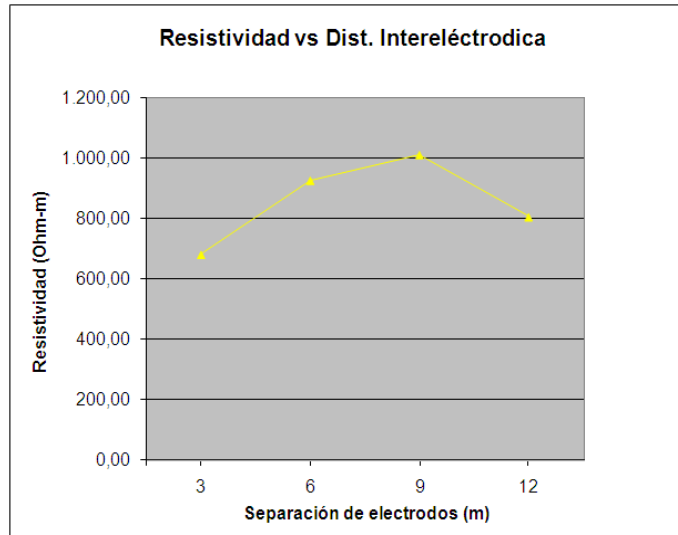


Figura 11. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la tercera medición.

3.1.5.2.4.-Cuarta medición

1. Graficar la resistividad aparente vs separación de los electrodos para la cuarta medición (figura 12).
2. Elegir los valores $\rho_1 = 738,53 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 1643,69 \Omega \cdot m$
3. $\rho_2 / \rho_1 = 1643,69 / 738,53 = 2,22$.

No se puede determinar por el método de Sunde.

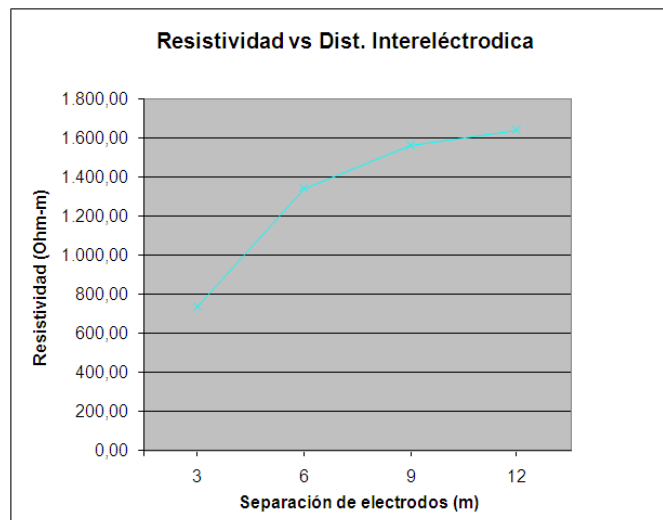


Figura 12. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la cuarta medición.

3.1.5.2.5.-Quinta medición

1. Graficar la resistividad aparente vs separación de los electrodos para la quinta medición (figura 13).
2. Elegir los valores $\rho_1 = 797,34 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 1726,62 \Omega \cdot m$
3. $\rho_2 / \rho_1 = 1726,62 / 797,34 = 2$. Graficar la curva sobre la figura del método de Sunde (figura 8).
4. Seleccionar $\rho_a / \rho_1 = 1,50$.
5. Leer $a/h = 2$ desde la figura 1 por $\rho_a / \rho_1 = 1,50$.
6. Calcular ρ_a : $\rho_a = 1,5\rho_1 = 1,5(797,34) = 1196,01$.
7. Leer $a = 5$ en la curva de resistividad aparente (figura 13) con $\rho_a = 1196,01$.
8. Calcular h ; $h = \frac{a}{2} = 5/2 = 2,5m$.

$$a/h$$

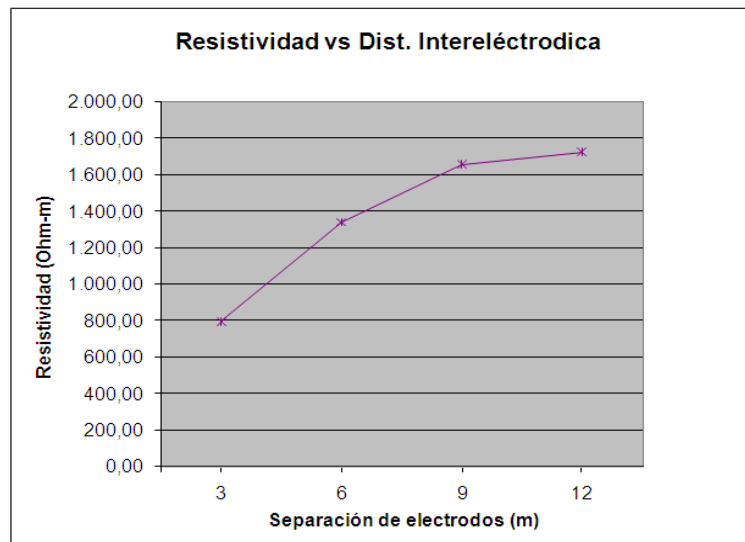


Figura 13. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la quinta medición.

3.1.5.2.6.-Sexta medición

1. Graficar la resistividad aparente vs separación de los electrodos para la sexta medición (figura 14).
2. Elegir los valores $\rho_1 = 706,86 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 801,48 \Omega \cdot m$

3. $\rho_2 / \rho_1 = 801,48 / 706,86 = 1,13$.

No se puede determinar por el método de Sunde.

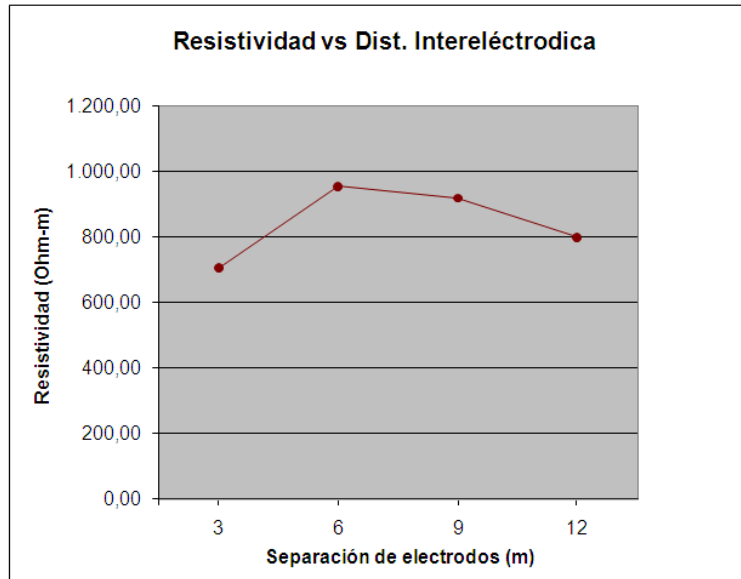


Figura 14. Resistividad aparente vs separación de los electrodos para la sexta medición.

3.1.5.3.- Interpretación de resultados

Debido a la aproximación del método gráfico de Sunde se utilizarán los resultados obtenidos por el programa de análisis IPI2WIN.

Derivado de la comparación y análisis de las curvas obtenidas con el programa IPI2WIN se obtuvo el siguiente modelo: la abertura máxima AB/3 fue de 12m, capa del suelo de cobertura superficial de ρ_1 igual a $597 \Omega \cdot m$. hasta una profundidad de 1,5 m. Sigue una capa de suelos superficiales de ρ_2 de $1.851 \Omega \cdot m$. y de espesor infinito, como se presenta a continuación en la siguiente pauta.

3.1.6. Análisis programa IPI2WIN

Para obtener un análisis correcto se debe introducir los valores de resistencia y las distancias interelectródicas obtenidas en cada sondeo; a partir de estos

valores el programa mostrará la curva de resistividad.

La curva de sondeo para un cierto punto es mostrada en las siguientes gráficas, donde los valores de resistividad aparente son marcados con círculos y la curva que resulta de suavizar los valores de campo por el método de Spline se presenta por una línea roja. El eje vertical representa las resistividades aparentes y el eje horizontal las distancias interelectródicas.

Los parámetros del modelo para el punto de sondeo analizado (resistividades, espesores, profundidad del primer estrato) son presentados en una tabla que arroja el programa, estos asumen automáticamente el modelo de dos capas que proporciona el mayor ajuste como modelo inicial para la interpretación del punto de sondeo.

3.1.6.1.-Resultados de la Primera medición

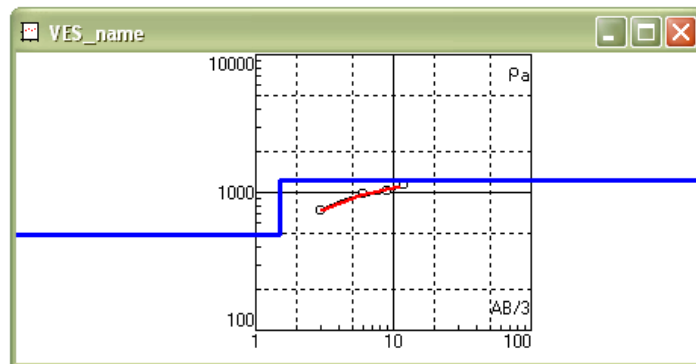


Figura 15. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Primera medición.

Tabla 3. Sondeo a

N	ρ	h	d	Alt
1	489.1	1.5	1.5	-1.5
2	1215			

3.1.6.2.-Resultados de la Segunda medición

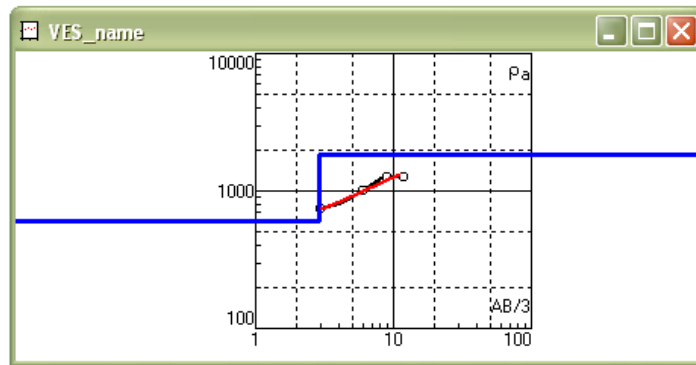


Figura 16. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Segunda medición.

Tabla 4. Sondeo b

N	ρ	h	d	Alt
1	597	2.93	2.93	-2.928
2	1851			

3.1.6.3.-Resultados de la Tercera medición

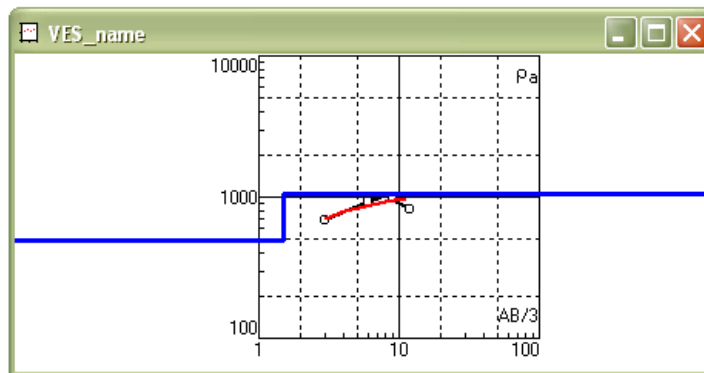


Figura 17. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Tercera medición.

Tabla 5. Sondeo c

N	ρ	h	d	Alt
1	498	1.5	1.5	-1.5
2	1048			

3.1.6.4.-Resultados de la Cuarta medición

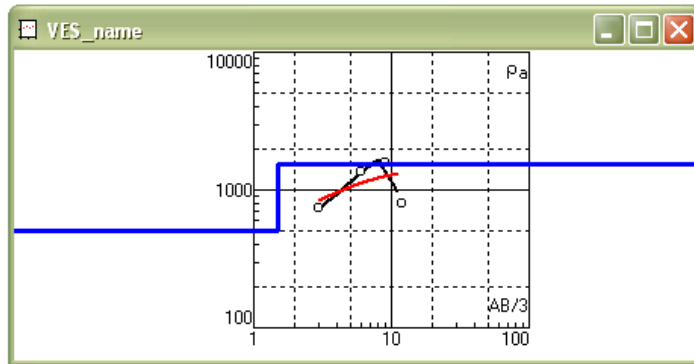


Figura 18. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Cuarta medición.

Tabla 6. Sondeo d

N	ρ	h	d	Alt
1	510	1.5	1.5	-1.5
2	1549			

3.1.6.5.-Resultados de la Quinta medición

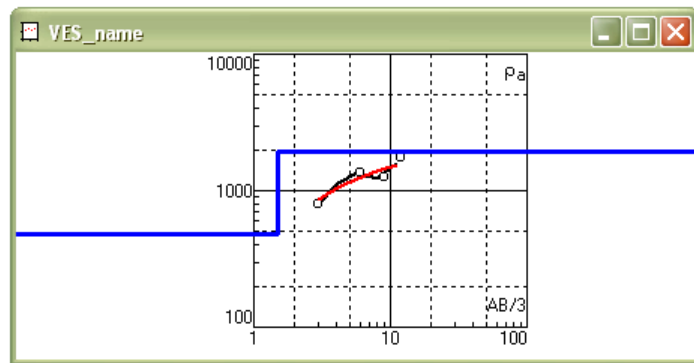


Figura 19. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Quinta medición.

Tabla 7. Sondeo f

N	ρ	h	d	Alt
1	481	1.5	1.5	-1.5
2	1923			

3.1.6.6.-Resultados de la Sexta medición

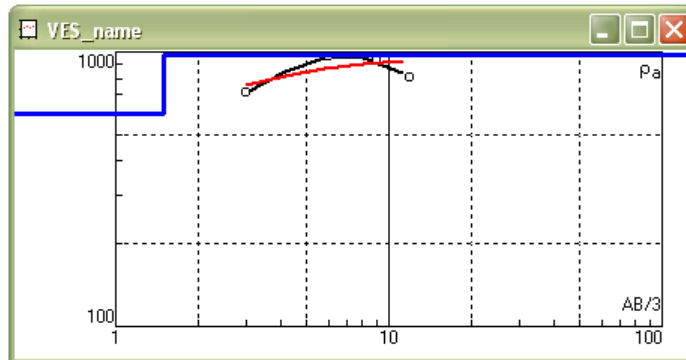


Figura 20. Curvas generada por el programa IPI2WIN en la Sexta medición.

Tabla 8. Sondeo g

N	ρ	h	d	Alt
1	595	1.5	1.5	-1.5
2	971			

3.1.7.- Diseño de la Malla

Para el diseño de la malla de puesta a tierra fueron considerados las ecuaciones, tablas y gráficas propuestas por la norma IEEE 80-2000.

El diseño de la malla fue realizado por medio de los siguientes pasos:

- **Paso 1:** El plano de planta de disposición general de equipos de la Subestación San Jaime debe dar un buen estimado del área a ser puesta a tierra. Un estudio de la resistividad del suelo, que se describe en la estructura del suelo y selección del modelo de suelo, determinará el perfil de la resistividad y el modelo de suelo que se necesite (esto es, modelo uniforme ó modelo de dos capas).
- **Paso 2:** El calibre del conductor se determina por las ecuaciones presentadas en los factores del tamaño de conductores (Cáp.3). La corriente de falla $3I_o$ debe ser la corriente máxima de falla esperada en un futuro, la cual será conducida por

medio de cualquier conductor en el sistema de puesta a tierra, y el tiempo, t_c , deberá reflejar el tiempo máximo de despeje (incluyendo el respaldo ó protecciones).

- **Paso 3:** Los valores tolerables de toque y de paso se determinan por las ecuaciones que se proporcionaron en el criterio del voltaje tolerable. La selección del tiempo, t_s , se basa en el juicio del ingeniero de diseño de las protecciones.
- **Paso 4:** En el diseño preliminar se incluirá un lazo conductor que rodee toda el área que será puesta a tierra, además de adecuar conductores cruzados para suministrar un acceso conveniente para la puesta a tierra de los equipos, entre otros. Los estimados iniciales del espaciamiento entre conductores y ubicación de las jabalinas de la puesta a tierra se basan en la corriente IG y el área a ser puesta a tierra.
- **Paso 5:** Los estimados de la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra en suelo uniforme será calculada utilizando la profundidad de la malla lo que hace que se aproxime más al valor real.
- **Paso 6:** La corriente IG se calcula por medio de las ecuaciones para la determinación de la corriente máxima de malla. Para prevenir un sobre diseño del sistema de puesta a tierra se tomará en cuenta, para el diseño de la malla, solamente la porción de la corriente de falla $3I_o$, que fluye desde la malla a una tierra remota. La corriente IG debe, de cualquier manera, reflejar el peor tipo de falla y su localización, el factor de decremento y cualquier expansión futura de la subestación.
- **Paso 7:** Si el GPR del diseño preliminar está por debajo del voltaje de paso tolerable, no se necesitará un análisis adicional. Solamente será necesario dejar conductores adicionales para dar acceso a las terminales de la puesta a tierra de los equipos.

- **Paso 8:** Los cálculos de la malla y voltaje de paso, tal como se han diseñado, podrán estar terminados siguiendo las técnicas y el análisis para suelos uniformes.
- **Paso 9:** Si el voltaje de malla calculado está por debajo del voltaje de toque tolerado, el diseño puede que esté completo (ver paso 10). Si el voltaje de paso calculado es mayor que el voltaje de paso tolerable, el diseño preliminar deberá ser revisado (ver paso 11).
- **Paso 10:** Si el voltaje de paso y el voltaje de toque calculados están por debajo de los voltajes tolerables, el diseño requerirá solamente de ciertos refinamientos requeridos para dar acceso a las terminales de la puesta a tierra de los equipos. Si no, el diseño preliminar se debe revisar (ver paso 11).
- **Paso 11:** Si se exceden los límites del voltaje de toque ó del voltaje de paso tolerables, se requerirá de una revisión del diseño de la malla. Esta revisión debe incluir pequeños espaciamientos entre conductores, electrodos de la puesta a tierra adicionales, etc.
- **Paso 12:** Antes de satisfacer los requerimientos del voltaje de toque y de paso, probablemente se requieran jabalinas y conductores de mallas adicionales. Los conductores de malla adicionales probablemente se requieran si el diseño de malla no incluye conductores cerca del equipo a ser puesto a tierra. Las jabalinas de puesta a tierra adicionales se pueden requerir en la base de los discriminadores de transitorios, transformadores de aislamiento, etc. El diseño final también se debe revisar para eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y los riesgos asociados para casos especiales que corresponden al tema.

A partir de estas premisas es necesario establecer los datos de diseño para la subestación en estudio.

3.1.7.1.- Consideraciones adicionales

Aunque la Subestación se encuentra en un área de 66m × 85 m se partirá de la premisa de una malla cuadrada sin jabalinas, para luego ir ajustando el diseño en función de los resultados obtenidos en cada iteración.

La malla de puesta a tierra será diseñada para satisfacer el compromiso de minimizar la cantidad de conductores, conexiones, excavación, bote y relleno, sin que los voltajes de toque y paso que puedan presentarse para las condiciones de diseño, excedan los correspondientes valores de voltaje de toque y paso tolerables.

La configuración mínima a considerar, será aquella que permita un corto y fácil acceso de las derivaciones de la malla principal y los equipos.

3.1.7.2.- Procedimiento

El análisis de la malla se realizará siguiendo el procedimiento propuesto por la norma IEEE 80-2000 y a su vez se comparará esta información con las especificaciones técnicas que rigen las normas de CADAPE.

En caso de existir discrepancias entre las normas, se implementarán las propuestas en el diseño y será tomada aquella que proporcione una mayor seguridad.

En la figura 21 se muestra un diagrama de bloques que ejemplifica el procedimiento para realizar el cálculo de una malla de puesta a tierra y como se debe proceder en caso de que el diseño no cumpla con los parámetros mínimos requeridos. $I_G R_G < E_{\text{toque}}$

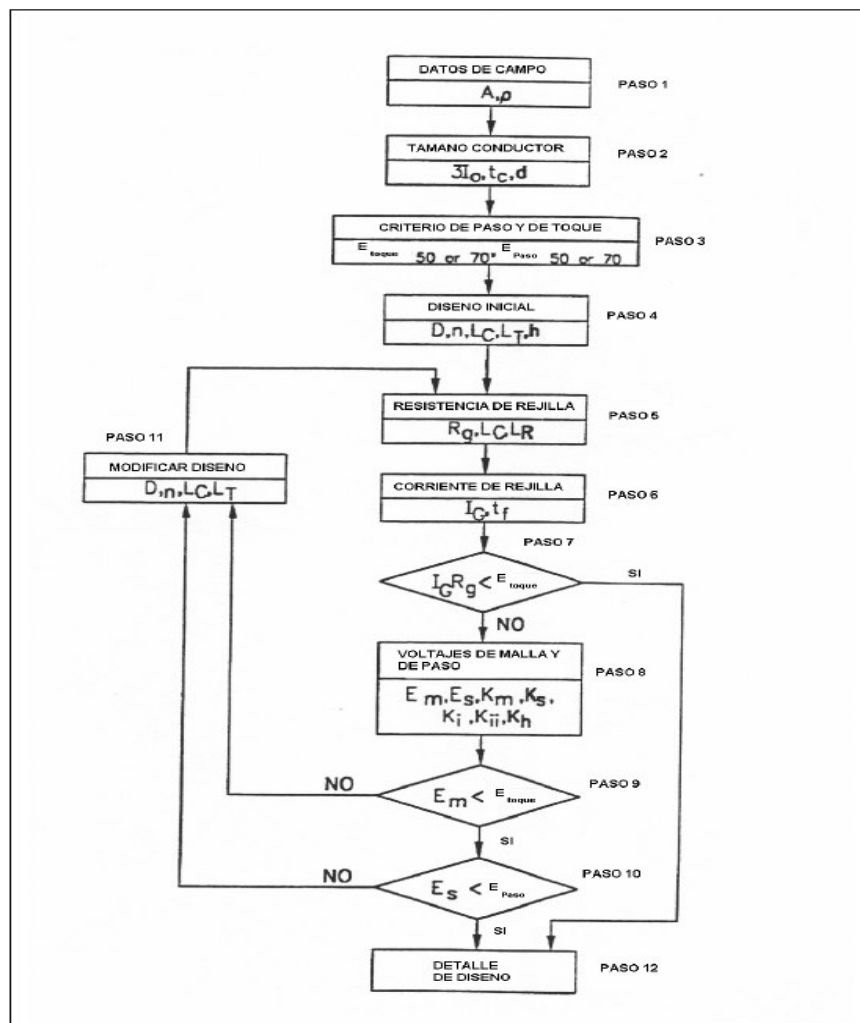


Figura 21. Diagrama de bloques del procedimiento del diseño [5]

3.1.7.3.- Tamaño del Conductor

La importancia de eliminar la falla radica implícitamente en un factor de exposición-accidental; es por ello que es favorable su rápida descarga a tierra. Con ello se reduce el riesgo de exponerse a un golpe eléctrico, que ocurren en situaciones en las cuales la falla persiste por varios minutos. Las pruebas y experimentos muestran que si la duración del paso de corriente a través del cuerpo es corta, el riesgo de lesiones severas o muerte se reducen enormemente.

Al evaluar el material, calibre del conductor o qué límite máximo permisible de temperatura se necesita aplicar en situaciones individuales de diseño, la elección final siempre debe reflejar las condiciones delineadas desde los requisitos básicos, hasta la selección de las conexiones.

Para determinar que material es el más apropiado para el estudio de puesta a tierra se debe estudiar las características de los mismos.

El cobre es un material muy utilizado en puesta a tierra por su alta conductividad, además tiene la ventaja de ser resistente a la mayor parte de la corrosión subterránea, ya que éste es catódico con respecto a los componentes presentes en el suelo.

El acero con revestimiento de cobre es utilizado en jabalinas subterráneas y en mallas de puesta a tierra. Este material asegura que la integridad de la red subterránea será protegida por años siempre que los conductores sean del calibre adecuado y no estén dañados y que las condiciones de suelo no sean corrosivas con el material que se esté usando.

Para el cálculo del conductor es necesario encontrar el valor de la corriente de falla a tierra simétrica. Hay que tomar en cuenta que en un sistema es difícil determinar qué tipo de falla puede ocurrir y que ubicación tendrá el flujo más grande de corriente entre la malla de tierra y sus alrededores, esto es debido a que no hay una regla específica que permita determinarla.

Es recomendable limitar la investigación a fallas de línea a tierra y de línea a línea a tierra.

En el caso de una falla simple de línea a tierra con resistencia de la estación aproximadamente nula, la corriente de falla simétrica a tierra $I_f = 3I_o$, se calcula por la ecuación siguiente:

$$I_o = \frac{E}{3 \cdot R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j \cdot (X_1 + X_2 + X_0)} \quad (2)$$

Donde:

I_o Corriente de falla simétrica a tierra en A.

E Valor de la tensión de fase - neutro en Volt.

R_f Valor de la resistencia estimada de la falla en ohmios (normalmente se asume $R_f = 0$).

R_1 Secuencia positiva de la resistencia del sistema equivalente en ohmios.

R_2 Secuencia negativa de la resistencia del sistema equivalente en ohmios.

R_0 Resistencia del sistema equivalente de la secuencia cero en ohmios.

X_1 Reactancia del sistema equivalente de la secuencia positiva en ohmios.

X_2 Reactancia del sistema equivalente de la secuencia negativa en ohmios.

X_0 Reactancia del sistema equivalente de la secuencia cero en ohmios.

Si la falla significa una ruptura del aislamiento dentro del lugar de la subestación, la única suposición segura es que la resistencia de la falla se asuma cero.

En el caso de que la falla ocurra fuera del área de la subestación, en una línea conectada a la subestación; es permisible, si se puede asignar un valor estimado (mínimo) de la resistencia de falla R_f para utilizarlo en los cálculos de la corriente de falla a tierra. Por otro lado, si la resistencia de falla real no se mantiene a un valor al menos tan grande como R_f utilizado en los cálculos, entonces debe ignorarse la resistencia de falla. De todas formas si se produce un

error al despreciar el valor de R_f todavía se estará dentro del margen de seguridad.

El peor tipo de falla en un sistema de puesta a tierra es comúnmente el que resulta en el valor más alto de la corriente máxima de la malla I_G . Debido que la corriente es proporcional a la secuencia cero o a la corriente de falla a tierra y al factor de división de la corriente y debido a que la división de la corriente es casi independiente del tipo de falla, se puede definir como el único resultado de la alta secuencia cero o el flujo de la corriente de falla hacia tierra, $3I_0$. En un lugar específico, una falla simple de línea a tierra será el peor tipo si $Z_1 Z_0 > Z_2^2$ en el punto de falla y la falla de línea a línea a tierra será el peor tipo de falla si $Z_1 Z_0 < Z_2^2$. En el caso frecuente donde Z_2 se asume igual a Z_1 , las comparaciones antes mencionadas se reducen a $Z_0 > Z_1$ y $Z_0 > Z_2$.

Podemos definir Z_0, Z_1 y Z_2 como:

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (3)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (4)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (5)$$

Donde:

Z_0 Impedancia del sistema equivalente de la secuencia cero en ohmios.

Z_1 Impedancia del sistema equivalente de la secuencia positiva en ohmios.

Z_2 Impedancia del sistema equivalente de la secuencia negativa en ohmios.

Para una falla del lado de 115kV la corriente de falla es:

$$3I_{0(115kV)} = 11,95 \text{ kA}$$

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la corriente de falla simétrica a tierra del lado de 13,8 kV del transformador es mayor que del lado de 115 kV,

por tanto el valor a utilizar para determinar el (tamaño) del conductor de puesta a tierra será:

$$3I_{o(13,8kV)} = 23,98 \text{ kA}$$

La norma de CADAFE [20] establece que el tiempo de despeje de la falla se determinará mediante el ajuste de disparo de las protecciones, siendo este no mayor a 0,5 s. En este caso el tiempo a utilizar es 0,5 s.

De los valores típicos de D_f (tabla 9) se puede observar que para una duración de falla de 0,5 s, el factor de decremento D_f es aprox. 1; así que si tomamos en cuenta la ecuación de la corriente asimétrica de falla rms I_F obtenemos que el valor sigue siendo 23,98 kA. Esta magnitud de corriente se utilizará para determinar el mínimo diámetro de los conductores de puesta a tierra.

$$I_F = (D_f) \cdot (I_f) \quad (6)$$

Tabla 9. Valores típicos de D_f [5]

Duración de la falla, t_f		Factor de decremento, D_f			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0,00833	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,10	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,20	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,30	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,40	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,50	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1,00	60	1,013	1,026	1,039	1,052

Para este proyecto se utilizará el Cobre suave a una temperatura de 30 °C, ya que este posee una conductividad mayor a 98% IACS como lo especifica la

norma CADAPE. De las dos opciones que muestra la tabla 10 comúnmente se elige el que posee mayor temperatura de fusión, debido a que el conductor debe tener la fuerza para soportar cualquier abuso mecánico o corrosivo durante la vida útil para la que se diseñó la subestación, además debe poseer una conductancia suficiente para prevenir cualquier caída de voltaje peligrosa posible durante una falla.

El tiempo corto del aumento de temperatura en un conductor de tierra o el calibre del conductor que se requiera en función de la corriente del mismo se obtiene con la ecuación (7). Esta ecuación evalúa la ampacidad de cualquier conductor para la cual la constante del material se conoce o se pueden determinar por cálculo.

Utilizando la expresión simplificada, correspondiente de la norma IEEE-80-2000 para el cálculo del calibre del conductor en Kcmil requerido dada la corriente máxima a circular y el tiempo de duración de la falla se tiene que

$$A_{\text{kcmil}} = I \cdot k_f \sqrt{t_c} \quad (7)$$

Donde:

A_{kcmil} área del conductor en kcmil.

I valor rms de la corriente de falla en kA.

k_f Constante de la tabla 10 para los materiales de varios valores de T_m (temperatura de fusión) y asumiendo como temperatura ambiente (T_a) de 30° C.

t_c Duración de la corriente en s.

Tabla 10. Constante de los materiales.[5]

Material	Conductividad (%)	T_m (°C)	Kf
Cobre destemplado con suave trazado	100	1083	7
Cobre comercial con duro trazado	97	1084	7,06
Cobre comercial con duro trazado	97	250	11,78
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	40	1084	10,45
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	30	1084	12,06
Varilla de Acero con revestimiento de Cobre	20	1084	14,64
Aluminio grado EC	61	657	12,12
Aleación de Aluminio 5005	53,5	652	12,41
Aleación de Aluminio 6201	52,5	654	12,47
Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio	200,3	657	17,2
Acero 1020	10,8	1510	15,95
Varilla de Acero con revestimiento inoxidable	9,8	1400	14,72
Varilla de Acero con capa de Zinc	8,6	419	28,96
Acero Inoxidable 304	2,4	1400	30,05

Sustituyendo los valores en la ecuación 7 tenemos:

$$A_{\text{kcmil}} = 23,98 \text{ kA} \cdot 7 \sqrt{0,5} = 118,69 \text{ kcmil}$$

$$\text{Dado que } A_{\text{mm}^2} \cdot 1,974 = \text{kcmil}$$

$$A_{\text{mm}^2} = 60,129 \text{ mm}^2$$

El diámetro del conductor es:

$$d := \sqrt{\frac{\left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2 \cdot 4}\right)}{\pi}} \quad (8)$$

$$d = 8,74 \text{ mm}$$

A partir de estos valores encontrados, se verifica en la tabla 10 las características del tipo de sección y número de hilos que debe tener el conductor a ser escogido. Según los cálculos el material a utilizar será cobre destemplado con suave trazado 2/0 AWG, sin embargo por norma de CADAFE el conductor a utilizar para una malla de puesta a tierra no debe ser menor a 4/0 AWG. Por lo tanto el tamaño del conductor de la malla de puesta a tierra para la subestación San Jaime será 4/0 AWG.

Tabla 11. Corriente admisible de los conductores de cobre[20]

Corriente admisible de los conductores de cobre				
AWG	Sección mm ²	Número de hilos	Corriente Admisible (kA) [*]	
			Conexión por soldadura ^{**}	Conexión apernada ^{***}
2/0	67,4	19	21	16
4/0	107,2	19	34	25
500 kcmil	253,4	37	80	60

* Corriente a 60 Hz durante 0,5s.

** Temperatura máxima del conductor = 500°

*** Temperatura máxima del conductor = 250°

Por otro lado, se procederá a revisar los cálculos por medio de la siguiente ecuación:

$$A_{\text{kcmil}} = \frac{(I \cdot 197,4)}{\sqrt{\frac{\text{TCAP} \cdot \ln \left[\frac{(K_o + T_m)}{K_o + T_a} \right]}{T_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}}} \quad (9)$$

Donde:

- I Valor rms de la corriente en kA.
 - T_m Temperatura máxima permisible del conductor en °C
 - T_a Temperatura ambiente en °C
 - α_o Coeficiente térmico de resistividad a 0°C en 1/ °C
 - α_r Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r en Ω -m
 - ρ_r Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r en Ω -m
 - K_o $1/ \alpha_o$ ó $(1/ \alpha_r) - t_r$ en °C
 - t_c Duración de la corriente en s
 - TCAP Capacidad térmica por unidad de volumen de la tabla 12, en $J/(\text{cm}^3 \cdot \text{°C})$
- Los valores de α_r y ρ_r están dados en la tabla 12 con la misma temperatura de referencia, 20 °C.

Tomando los valores del conductor escogido anteriormente, obtenemos que:

$$A_{\text{kcmil}} = \frac{(23,98 \cdot 197,4)}{\sqrt{\frac{(3,42) \cdot \ln \left[\frac{(234 + 500)}{234 + 30} \right]}{0,5 \cdot 0,00393 \cdot 1,72}}} \quad (11)$$

$$A_{\text{kcmil}} = 147,15$$

$$A_{mm}^2 = 74,54$$

Los valores encontrados en la ecuación simplificada son menores debido a las aproximaciones que fueron utilizadas, sin embargo, el número del conductor no varía ya que el máximo sigue siendo 4/0 AWG, esto debido a la fuerza mecánica y a los requisitos de dureza. Por tanto el diámetro a utilizar es $d = 0,013m$.

El calibre del conductor que se elige comúnmente es más grande que los que se establecen en la fusión debido a que el conductor debe tener la capacidad para soportar cualquier esfuerzo mecánico o corrosión durante la vida útil para la que se diseñó la instalación, debe tener la impedancia suficiente para prevenir cualquier caída de voltaje peligrosa posible durante una falla, en la vida útil de la instalación. Por la necesidad de limitar la temperatura del conductor, se le aplica un factor de seguridad en el cálculo del conductor para anticipar cualquier daño que pueda surgir.

Tabla 12. Constante de los materiales. [5]

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor α a 20° C (1/°C)	Ko en °C	Temperatura de fusión ^a Tm (°C)	ρ r 20°C ($\mu\Omega.cm$)	Capacidad Térmica TCAP [J/(cm ³ .°C)]
Cobre, destemplado de suave - trazado	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre, comercial de duro - trazado	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Varilla ^b de Acero con revestimiento de cobre	20	0,0078	245	1084	8,62	3,85
Aluminio de grado EC	61	0,00403	228	657	2,86	2,56
Aleación de Aluminio 5005	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,6
Aleación de Aluminio 6201	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,6
Alambre de Acero con revestimiento de acero	20,3	0,0036	258	657	8,48	3,58
Acero 1020	10,8	0,0016	605	1510	15,9	3,28
Varilla ^c de Acero con revestimiento Inoxidable	9,8	0,0016	605	1400	17,5	4,44
Varilla de Acero con capa de Zinc	8,6	0,0032	293	419	20,1	3,93
Acero Inoxidable 304	2,4	0,0013	749	1400	72	4,03

^a de los estándares ASTM

^b Varillas de Acero con revestimiento de cobre basado en 0,254mm (0,010 pulg.) de espesor del Cobre.

^c Varillas de Acero con revestimiento Inoxidable en 0,508mm (0,020 pulg.) N° 304 con espesor del Acero Inoxidable sobre el núcleo del Acero 1020.77

3.1.7.4.- Cálculo de potenciales Tolerables: E_{paso} y E_{toque}

Uno de los criterios importantes para la determinación de la configuración del sistema de puesta a tierra son los voltajes de toque y paso, debido a que durante la ocurrencia de una falla a tierra que involucre altas corrientes de cortocircuito, el potencial de las estructuras con respecto a un punto lejano a la línea puede verse incrementado, generando riesgos para las personas que se encuentren en las cercanías. La configuración de electrodos de puesta a tierra debe poseer una geometría que permita regular o controlar la distribución del campo eléctrico en la superficie del terreno para evitar grandes diferencias de potencial en la superficie.

En caso contrario la diferencia de potencial presente en el terreno a una distancia de un paso asumida como un (1) metro o la que pueda afectar a una persona que toque la estructura en el instante de la falla, puede ser perjudicial. La norma IEEE-80-2000 especifica que la corriente de 1mA se reconoce como el umbral de percepción, en donde la persona es capaz de sentir una sensación suave de hormigueo en sus manos y dedos. Las corrientes de 1 a 6 mA, se catalogan como corrientes desagradables de soportar aunque no daña la habilidad de la persona en controlar sus músculos para liberar un objeto energizado que esté sosteniendo. Las corrientes comprendidas en el rango de los 9 a 25 mA, son dolorosas y es casi imposible liberar objetos energizados sujetados con la mano y debido a las corrientes elevadas, las contracciones musculares dificultan la respiración. Cuando la corriente se encuentra en el rango de los 60 a 100mA, la fibrilación ventricular, el paro del corazón o la abstención de la respiración, podrían causar algún daño o la muerte.

El estudio de las corrientes de cortocircuito inyectada al área, la evaluación de las líneas equipotenciales que permiten determinar los potenciales de toque y paso alrededor de los electrodos, y el análisis de los voltajes permisible en una persona en función de la duración de la falla se realiza mediante cálculos

basados en la metodología expuesta en la norma ANSI/IEEE Std. 80.

Para la capa superficial de grava de 0,10 m, con resistividad 3000 $\Omega \cdot m$ y para una resistividad del primer estrato de 597 $\Omega \cdot m$, el factor de reflexión K se calcula por medio de la siguiente ecuación.

$$K := \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (10)$$

Donde:

- K Factor de reflexión entre diferentes resistividades.
- ρ Resistividad de la tierra del primer estrato $\Omega \cdot m$
- ρ_s Resistividad de la capa superficial $\Omega \cdot m$

De la ecuación (10) tenemos que $K = -0,66$, la resistividad de la roca se reduce por el valor de $C_s = 0,75$. Este valor se obtuvo a partir de la gráfica 22. El factor de reducción C_s aproximado también se puede calcular con la ecuación (11) y sustituyendo los valores en la misma se verifica que el valor encontrado es correcto.

$$C_s = 1 - 0,09 \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (11)$$

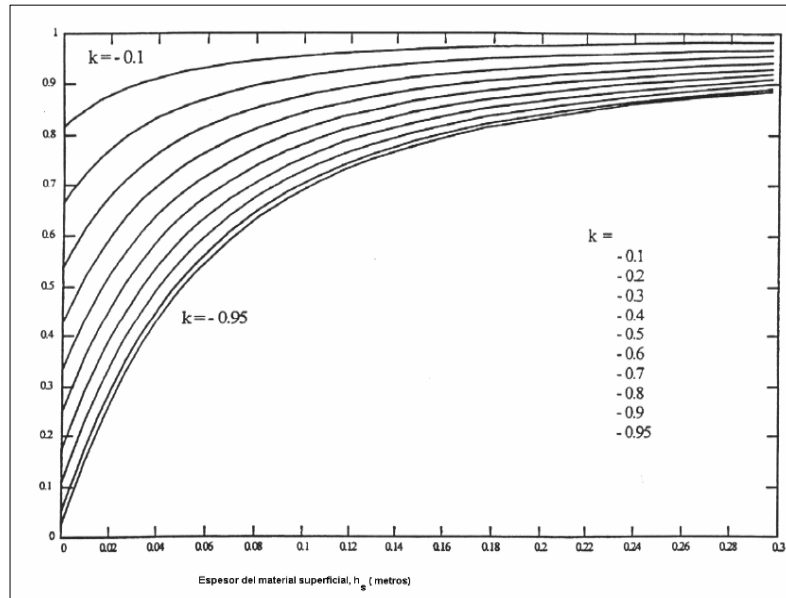


Figura 22. C_s Versus h_s [5]

Se espera que en la Subestación las personas que transiten por ella en caso de una falla tengan un peso corporal de 50 kg como mínimo, por lo que se pueden utilizar las ecuaciones (12) y (13) para calcular los voltajes de toque y de paso tolerables.

$$E_{\text{paso}50} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (12)$$

$$E_{\text{toque}50} = (1000 + 1,5C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (13)$$

Donde:

$E_{\text{paso}50}$ Voltaje de paso para un peso corporal de 50 kg en V.

$E_{\text{toque}50}$ Voltaje de toque para un peso corporal de 50 kg en V.

C_s Factor reductor de la capacidad normal.

t_s duración del golpe de corriente en s.

Sustituyendo los valores, tenemos que:

$$E_{\text{paso}50} = 2378,7 \text{ V}$$

$$E_{\text{toque}50} = 717,71 \text{ V}$$

3.1.7.5.-Diseño inicial

Suponer una instalación preliminar de una malla de 70m × 70m con los conductores separados a la misma distancia, como se muestra en la figura 23, con espacios $D = 7\text{m}$, la profundidad de entierro de la malla $h = 0,5\text{m}$ y sin jabalinas. La longitud total de los conductores enterrados $L_T = 2 \cdot 11 \cdot 70\text{m} = 1540\text{m}$.

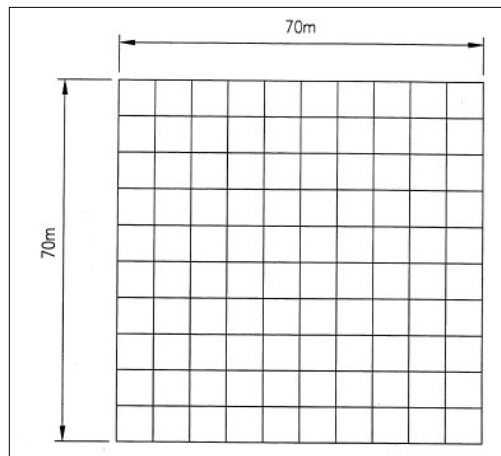


Figura 23. Malla cuadrada sin jabalinas

3.1.7.6.-Determinación de la resistencia de la malla (R_g).

Utilizando el valor encontrado de L_T y un área de la malla de $A = 4900 \text{ m}^2$ la resistencia es:

$$R_g = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (14)$$

Donde:

R_g Resistencia de la malla en ohmios.

h Profundidad de la malla en m.

L_T Longitud efectiva total del conductor del sistema de puesta a tierra, incluyendo la malla y jabalinas, en m.

Resulta: $R_g = 4,14 \Omega$

3.1.7.7.-Corriente máxima de la malla (I_G)

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \quad (15)$$

Donde:

S_f Factor de división de la corriente de falla.

I_g Valor de la corriente simétrica de malla en A.

I_0 Secuencia cero de la corriente de falla en A.

El valor equivalente de la corriente simétrica I_f , representa el valor efectivo de una corriente simétrica integrada sobre la duración total de falla, t_c , se puede determinar como una función de X/R usando el factor de reducción

$$I_G = D_f(I_g) \quad (16)$$

Donde:

I_G Corriente máxima de la malla en A.

D_f Factor de decremento de la duración completa de la falla en s.

I_g Valor rms simétrico de la corriente de la malla en A.

El factor de decremento se determinó por medio de la relación I_F / I_f dando a lugar a:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_\alpha}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_\alpha}}\right)} \quad (17)$$

Donde:

D_f Factor de decremento.

t_f Tiempo de duración de la falla en s.

T_α Valor de la constante de tiempo de la compensación CD en s.

Esta ecuación se utilizó para calcular el factor de decremento para las relaciones específicas de X/R y las duraciones de falla. La relación X/R que se utilizó, es la porción X/R del sistema en el lugar de la falla para un tipo de falla dado.

Tomando en cuenta que

$$T_\alpha = \frac{X}{\omega R} \quad (18)$$

Con $f = 60\text{Hz}$, $\omega = 2\pi f$

$$T_\alpha = \frac{X}{120 \cdot \pi \cdot R}$$

Aunque el valor de corriente 23,98 kA del lado de 13,8 kV es mayor que el valor de 11,95 kA del lado de 115 kV, se recuerda que en la determinación de la corriente máxima de la malla el devanado del transformador estrella-neutro de 13,8 kV es una fuente local de corriente de falla y no contribuye al GPR. Así, la corriente máxima de malla se fundamenta en 11,95 kA.

Tomando en cuenta el valor en el lugar de la falla de $X/R = 23,7$ podemos obtener el factor de decremento.

$$T_{\alpha} = \frac{23,7}{2\pi \cdot 60}$$

$$T_{\alpha} = 0,06$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0,0628}{0,5} \left(1 - e^{\frac{-2 \times 0,5}{0,0628}} \right)}$$

$$D_f = 1,06$$

Por otro lado, la impedancia equivalente de cable de guarda aéreo es:

$$Z_{eq-1} = D_t \cdot Z_{s-1} + \sqrt{R_{tg}(Z_{s-1})} \quad [19]$$

Donde:

Z_{eq-1} Impedancia equivalente del cable de guarda aéreo en ohmios.

Z_{s-1} Impedancia propia del cable de guarda aéreo del lado 115 kV en $\Omega/vano$

R_{tg} Impedancia de tierra remota de cada línea de transmisión del electrodo a tierra

D_t Distancia entre las torres aterradas en Km.

Con $Z_{s-1} = 1,24 + 0,55j$ y $R_{tg} = 20 \Omega$ tenemos que el valor de Z_{eq-1} .

$$Z_{eq-1} = 5,715 + 1,354j$$

La impedancia equivalente del neutro corrido es:

$$Z_{eq-f} = D_t \cdot Z_{s-f} + \sqrt{R_{dg}(Z_{s-f})} \quad (20)$$

Donde:

Z_{eq-f} Impedancia equivalente del neutro corrido en ohmios.

R_{dg} Impedancia de tierra remota de cada electrodo de distribución a tierra en Ω .

Z_{s-f} Impedancia propia del neutro corrido del lado 13,8 kV en $\Omega/vano$

Con $Z_{s-f} = 1,24 + 0,55j$, $D_t = 0,5$ Km y $R_{dg} = 25$

$$Z_{eq-f} = 6,31 + 1,48j$$

El resultado equivalente del cable de guarda aéreo y el neutro corrido es encontrado por medio del paralelo entre ambas impedancias.

Sustituyendo los valores encontrados de Z_{eq-l} y Z_{eq-f} en la ecuación de Z_{eq} tenemos:

$$Z_{eq} = \frac{1}{\left(\frac{1}{Z_{eq-l}}\right) + \left(\frac{1}{Z_{eq-f}}\right)} \quad (21)$$

$$Z_{eq} = 2,99 + 0,707j$$

El factor de división de corriente es:

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| \quad (22)$$

Donde:

S_f Factor de división de la corriente de falla.

R_g Impedancia a tierra de la subestación con una puesta a tierra remota en Ω .

Con $R_g = 4,14$

$S_f = 0,42$

En esta Subestación, se tendrán dos (2) líneas de 115 kV con cable de guarda y puesta a tierra en cada uno de los puntos de apoyo, lo cual proporciona un sistema adicional de puesta a tierra.

Un valor típico de resistencia para las líneas de alta tensión es de $3,2 \Omega$. Este valor es obtenido para una resistencia de puesta a tierra de 3Ω por punto de apoyo con vanos de 300 m. Sin embargo lo usual en Venezuela para líneas de transmisión es un valor R_{tg} igual a 20Ω .

Del lado de 13,8 kV el sistema posee neutro corrido con las mismas características del cable de guarda, lo que hace que el sistema proporcione otro sistema de puesta a tierra.

Calculamos que el factor de división para la corriente de falla con las características de este sistema es $S_f = 0,42$.

Tomando como máxima corriente de falla en el bus 115 kV, la máxima corriente de malla es $I_G = 11,95 \text{ kA} \cdot 0,42 = 5,134 \text{ kA}$.

Ahora es necesario comparar el valor de GPR para el voltaje tolerable de toque, $E_{\text{toque}50}$

$$\text{GPR} := I_G(R_g) \quad (23)$$

$$\text{GPR} = 5,134 \text{ kA} * 4,14 \Omega = 21,25 \text{ kV}$$

Comparando el valor encontrado de GPR con el voltaje tolerable de toque $E_{\text{toque}50}$ tenemos que el aumento de potencial de tierra o GPR es mayor al voltaje de toque.

Para el cálculo de la tensión de malla es necesario encontrar el factor de espaciamento (K_m) que se define por n conductores paralelos.

$$K_m = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left[\ln \left[\frac{D^2}{16h \cdot d} + \frac{[(D + 2 + h)^2]}{8D \cdot d} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{k_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi (2n - 1)} \right] \right] \quad (24)$$

Donde:

K_m Factor de espaciamento.

D Espaciamento entre conductores paralelos en m

H Profundidad de la malla en m

d Diámetro del conductor de la malla en m

k_{ii} Factor de ponderación correctivo que se ajusta por los efectos de los conductores internos en la esquina de la malla.

K_h Factor de ponderación correctivo que enfatiza el efecto de la profundidad de la malla.

n Factor geométrico compuesto por los factores n_a , n_b , n_c y n_d .

Para mallas con jabalinas a lo largo de su perímetro o para mallas con jabalinas en sus esquinas o ambos $K_{ii} = 1$.

Para mallas sin jabalinas o mallas con pocas jabalinas, ninguna de ellas se coloca en las esquinas o en el perímetro

$$K_{ii} = \frac{1}{\frac{2}{(2 \cdot n)^n}} \quad (25)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (26)$$

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

$K_h = 1,22$

3.1.7.8.-Número efectivo de conductores paralelos en una malla (n)

El valor de n es el número efectivo de conductores paralelos en una malla, puede ser aplicado para mallas rectangulares. Este representa el número de conductores paralelos en una malla rectangular equivalente.

$$n := n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (27)$$

Donde:

n Número efectivo de conductores paralelos en una malla.

n_a Factor de longitud del conductor de la malla y jabalinas.

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (28)$$

$n_b = 1$ para mallas cuadradas

$n_c = 1$ para mallas cuadradas y rectangulares

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

De otra forma

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (29)$$

$$n_c = \left(\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right)^{\frac{0,7 \cdot A}{(L_x \cdot L_y)}} \quad (30)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{(L_x)^2 + (L_y)^2}} \quad (31)$$

Donde:

- n_b Factor para mallas cuadradas.
- n_c Factor para mallas cuadradas y rectangulares.
- n_d Factor para mallas cuadradas, rectangulares y en forma de L.
- L_C Longitud total del conductor en una malla horizontal en m.
- L_p Longitud perimetral de la malla en m.
- A Área de la malla en m^2 .
- L_x Longitud máxima de la malla en la dirección x en m.
- L_y Longitud máxima de la malla en la dirección y en m.
- D_m Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla en m.

El área que abarca la malla en la subestación es de $A = 4900 m^2$. La longitud total de conductor horizontal viene dado por la longitud horizontal, 70m por la cantidad de conductores paralelos que en este caso es ocho (8).

$$L_C = 70 \cdot 11 \cdot 2 = 1540m$$

Tomando en cuenta que la malla es de forma cuadrada la longitud perimetral es cuatro (4) veces la distancia de uno de los lados; es decir $L_p = 4 \cdot 70 m = 280 m$.

El número de conductores paralelos se calculó asumiendo los valores para una malla cuadrada, es decir, $n_b = n_c = n_d = 1$. Sustituyendo los valores de L_c y L_p tenemos que $n_a = 11$.

Por lo tanto,

$$n = 11, K_{ji} = 0,57$$

A partir de estos valores podemos deducir el factor de espaciamiento (K_m)

Al suponer una instalación preliminar de una malla de 70 m × 70m con los conductores separados a la misma distancia, el espaciamiento entre los conductores paralelos es $D = 7\text{m}$ y la profundidad de la malla $h = 0,5\text{m}$. El conductor tiene un área $A = 137,88 \text{ mm}^2$. Ya que $A (\text{mm}^2) = \pi d^2/4$, el diámetro del conductor es 13,24 mm o 0,01324 m, correspondiente a 4/0AWG. Sustituyendo los valores en la ecuación podemos encontrar que $K_m = 0,85$

$$K_m := \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \left[\ln \left[\frac{7^2}{16 \cdot 0,5 \cdot 0,01324} + \frac{[(7 + 2 + 0,5)^2]}{8 \cdot 7 \cdot 0,01324} - \frac{0,5}{4 \cdot 0,01324} \right] + \frac{0,57}{1,22} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot 11 - 1)} \right] \right]$$

3.1.7.9.- Cálculo del voltaje de malla (E_m)

Los valores del voltaje de malla se obtiene como un producto del factor de espaciamiento k_m ; un factor correctivo, k_i , el cual toma en cuenta algunos de los errores que se introdujeron en las suposiciones hechas al derivar k_m ; la resistividad del suelo ρ y la corriente promedio en por unidad de la longitud efectiva del conductor del sistema de puesta a tierra debidamente enterrado (I_G/L_m).

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (32)$$

Donde:

E_m Voltaje de malla en V.

L_C Longitud total de conductor horizontal m.

L_x Máxima longitud de la malla en dirección X en m.

L_y Máxima longitud de la malla en dirección Y en m.

El factor de corrección K_i , utilizado junto con el número efectivo de conductores paralelos en una malla (n) definido anteriormente, es:

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (33)$$

Es decir $K_i = 2,272$

Para mallas sin jabalinas o con pocas jabalinas dispersas a lo largo de la malla, pero ninguna colocada en las esquinas o sobre todo el perímetro de la malla, la longitud enterrada efectiva L_M se define por la siguiente ecuación:

$$L_M = L_C + L_R \quad (34)$$

Donde:

L_M Longitud efectiva de $L_C + L_R$ para el voltaje de malla en m.

L_R Longitud total de todas las jabalinas de puesta a tierra en m.

L_C Longitud total de conductor horizontal m.

$$L_M = 1540\text{m}$$

La ecuación E_m nos queda:

$$E_m = \frac{(597 \cdot 0,85 \cdot 2,272 \cdot 5,134 \cdot 10^3)}{1540}$$

$$E_m = 3877 \text{ V}$$

El voltaje de malla es mayor que el voltaje de toque tolerable calculado anteriormente ($717,71 \text{ V} < 3877 \text{ V}$) por lo que este diseño no puede ser utilizado ya que no cumple con los parámetros de seguridad propuestos por la IEEE-80-2000.

3.1.7.10.-Calculo del voltaje de paso (E_s)

Los valores de voltaje de paso se obtienen como producto del factor geométrico, K_s ; el factor correctivo, K_i ; la resistividad del suelo, ρ ; y la corriente promedio en por unidad de la longitud del conductor del sistema de puesta a tierra enterrado (I_G/I_S).

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (35)$$

Para mallas con o sin jabalinas, la longitud enterrada efectiva L_s , es:

$$L_s = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (36)$$

Donde:

K_s Factor de espaciamiento para el voltaje de malla.

L_C Longitud total de conductor horizontal m.

L_R Longitud total de todas las jabalinas de puesta a tierra en m.

L_s Longitud efectiva de $L_v + L_R$ para voltaje de paso en m.

$$L_s = 0,75 \cdot 1540$$

$$L_s = 1155$$

Se asume que ocurre el máximo voltaje de paso a una distancia de 1 m, comenzando y extendiéndose fuera del perímetro del conductor en el ángulo que divide la parte extrema de la esquina de la malla. K_s se define como sigue para una profundidad de enterramiento de $0,25\text{m} < h < 2,5\text{m}$

$$K_s := \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (37)$$

$$K_s := \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot 0,5} + \frac{1}{7 + 0,5} + \frac{1}{7} (1 - 0,5^{11-2}) \right]$$

$$K_s = 0,40$$

Sustituyendo cada valor en la ecuación del voltaje de paso E_s nos queda:

$$E_s = \frac{(597 \cdot 0,4 \cdot 2,272 \cdot 5,134 \cdot 10^3)}{1155}$$

$$E_s = 2,449 \text{ kV}$$

Si comparamos este valor con el voltaje de paso E_{paso50} (12), tenemos que ($2378 \text{ V} < 2449 \text{ kV}$), sin embargo no cumple con las condiciones mínimas para el voltaje de toque, por lo tanto es necesario realizar otro diseño.

3.1.7.11.- Verificación de las condiciones de seguridad

$$E_m < E_{\text{toque50}} \quad (38)$$

$$E_s < E_{\text{paso50}} \quad (39)$$

De las condiciones del problema tenemos:

$$\text{Voltaje de Toque: } 717,71 \text{ V} < 3877 \text{ V}$$

$$\text{Voltaje de Paso: } 2378,7 \text{ V} < 2449 \text{ V}$$

Como el valor de potencial tolerable por el cuerpo humano V_{toque50} es menor a la elevación del potencial de malla V_m , calculados anteriormente, es necesario hacer modificaciones en el diseño planteado.

3.1.8.- Diseño para la Subestación San Jaime 115/13,8 kV

En el diseño realizado, por ser un estudio básico, no se toma en cuenta el área ocupada por la subestación, por ello procedemos a hacerlo con una malla rectangular de área de 66m × 84m.

Al escoger el espacio $D = 6\text{m}$, el patrón de la malla es $12\text{m} \times 15\text{m}$ y la longitud del conductor de la malla queda establecido como $L_T = 66 \times 15\text{ m} + 84 \times 12\text{ m} = 1998\text{ m}$ y el área igual a $A = 66\text{m} \times 84\text{m} = 5544\text{m}^2$
Sustituyendo los valores en la ecuación (20) tenemos que el valor de la resistencia de malla es:

$$R_g = 597 \cdot \left[\frac{1}{1998} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 5544}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + 0,5 \cdot \sqrt{\frac{20}{5544}}} \right) \right]$$

$$R_g = 3,832 \Omega$$

Al utilizar $I_G = 5,134\text{ kA}$ y $R_g = 3,832 \Omega$, el $GPR = (5,134 \cdot 10^3) \times (3,832) = 19,67\text{ kV}$, el cual es mayor que $E_{\text{toque}50} = 2378,7\text{ V}$.

Para el arreglo de una malla rectangular las ecuaciones del voltaje de malla se pueden usar sin ninguna modificación, sin embargo, el valor de n que se va a utilizar varía.

El cálculo para la longitud perimetral de la malla (L_C) y la longitud total del conductor en una malla horizontal (L_p) se realiza de la misma forma solo hay que modificar los datos para el nuevo diseño. Por lo tanto $L_c = 66 \times 15\text{ m} + 84 \times 12\text{ m} = 1998\text{ m}$ y $L_p = 2 \times 66\text{m} + 2 \times 84\text{m} = 300\text{ m}$.

Basándonos en los factores que se determinaron al usar la ecuación (28).

$$n_a = \frac{(2 \cdot 1998)}{300}$$

$$n_a = 13,32$$

Tomando en cuenta la ecuación (29).

$$n_b = \sqrt{\frac{300}{4 \cdot \sqrt{5544}}}$$

$$n_b = 1$$

Asumiendo que $n_c = n_d = 1$ podemos obtener el valor de $n = 13,32$.

Utilizando la ecuación (25), $K_{ii} = 0,61$ y el valor ya calculado por la ecuación (26)

$$K_h = 1,22.$$

De la ecuación (24), $K_m = 0,74$ y de la ecuación (33), $K_i = 0,664 + 0,148(n) = 2,63$ y de la ecuación (34) $L_M = 1998$.

Finalmente, E_m se calcula al usar la ecuación (32).

$$E_m = \frac{(597 \cdot 0,74 \cdot 2,63 \cdot 5,134 \cdot 10^3)}{1998}$$

$$E_m = 3,172 \text{ kV}$$

Este voltaje de malla, previamente calculado, es mayor que el voltaje de toque $E_{\text{toque50}} = 717,71 \text{ V}$ límite, por lo tanto es necesario realizar más iteraciones para encontrar el diseño adecuado.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos al realizar iteraciones con el procedimiento utilizado para calcular una malla rectangular, variando el diseño hasta encontrar el que cumpla con los rangos requeridos de voltaje de malla y voltaje de paso.

Tabla 13: Iteración para el cálculo de malla de puesta a tierra para la subestación San Jaime

D (m)	Rg (Ω)	GPR (V)	n	Km	Ki	Em (V)	Ks	Ls (m)	Es (V)	N° Jab.	Long. Jab. (m)	Área de la malla
5	3,79	19470	15,8	0,71	2,98	2780	0,44	1770	2272	0	0	85×65
4	3,8	18780	19,3	0,63	3,49	2493	0,47	2127	2359	0	0	84×64
3	3,77	18680	25,1	0,54	4,36	1958	0,52	2756	2500	0	0	84×63
4	3,73	19140	19,5	0,53	3,53	1822	0,46	2198	2398	20	7,2	84×64
3	3,68	18910	25,7	0,44	4,45	1468	0,52	2891	2433	20	7,2	84×63
3	3,76	19330	25,2	0,44	4,36	1426	0,51	2762	2495	40	7,2	84×63
3	3,46	17780	27	0,43	4,64	1285	0,52	3246	2258	40	7,2	99×63
3	2,8	14390	32	0,41	5,38	969,2	0,52	4891	1738	40	7,2	150×63
2	2,71	13950	48,9	0,3	7,89	715,5	0,61	7561	1935	14	7,2	146×68

Con este cuadro podemos ver que el diseño que cumple con las normas de seguridad tiene una separación entre conductores de 2m, área de 146m×68m extendiendo 1 m fuera del perímetro de la cerca y 59m del lado donde se encuentran las salidas de línea.

Se incorpora en este estudio el uso de 14 jabalinas de 7,2m, su distribución fue hecha de la siguiente manera:

- Se prevé la colocación de dos (02) jabalinas del Tipo Barra Copperweld (25,4 mm de diámetro especificado por CADAPE), de 7.2m. de largo para cada transformador y una (01) para cada Pararrayo 115 kV.
- Se prevé la colocación de doce (4) jabalinas del Tipo Barra Copperweld (25,4 mm de diámetro especificado por CADAPE), de 7.2m. de largo en cada uno de los vértices exteriores de la malla de tierra, los cuales se encuentran próximos a las esquinas del muro perimetral.

3.1.9.-Puesta a tierra de los equipos por norma CADAFE

3.1.9.1.- Puesta a tierra cerca perimetral, puertas y portones

La puesta a tierra de la cerca es de gran importancia debido a que, normalmente, es accesible al público en general. La cerca perimetral será puesta a tierra cada cinco postes, mientras que el alambre de púas será conectado cada 10 postes aproximadamente. Las puertas y portones serán puestos a tierra mediante cintas flexibles de cobre conectadas al poste de sujeción de la misma y a la malla de tierra.

3.1.9.2.- Puesta a tierra de Transformadores trifásico

El tanque de los transformadores trifásicos de potencia será puesto a tierra mediante al menos dos conductores bajantes a la malla, los cuales estarán conectados a caras opuestas del mismo. La puesta a tierra del neutro será efectuada por medio de un conductor independiente del tanque, la cual será dimensionada en base a la máxima corriente de cortocircuito en que pueda contribuir el transformador. Cada neutro del transformador deberá ser puesto a tierra de una forma independiente y junto a cada uno será colocado una barra de acero cobrizada de al menos 3m de longitud.

3.1.9.3.- Puesta a tierra de transformadores de corriente, tensión y condensador de acoplamiento de soporte

Cada transformador de corriente, tensión y condensador de acoplamiento será puesto a tierra mediante dos conductores bajante a la malla, uno de los cuales será conectado directamente al terminal previsto en el tanque, mientras que el otro será conectado al pie de la columna de soporte.

La conexión a tierra del neutro de los devanados secundarios de los transformadores de corriente y tensión será realizada en la bornera del armario de intemperie correspondiente.

La conexión a tierra de la pantalla del cable coaxial asociado a los condensadores de acoplamiento será realizado en ambos extremos del mismo.

3.1.9.4.- Puesta a tierra de Pararrayos en soportes y contadores de descarga

Cada conjunto pararrayos contador será puesto a tierra mediante dos conductores bajantes a la malla, uno de los cuales será conectado directamente al terminal de tierra del contador, mientras que el otro será conectado al pie de la columna soporte. Ambos conductores serán del tipo desnudos, de igual sección que el de la malla principal de tierra. El conductor de interconexión entre el descargador y el terminal activo del contador, será aislado, para un nivel de tensión superior al voltaje residual máximo garantizado por el fabricante del pararrayo.

La cinta de sujeción de tuberías y conductores será de material no ferromagnético.

Junto a cada pararrayo será colocada una barra de acero cobrizada de al menos 3m de longitud.

3.1.9.5.- Puesta a tierra de Pórticos y Torres

Todas las columnas de los pórticos serán puestas a tierra mediante un conductor de derivación de la malla, de sección adecuada. El punto de conexión estará ubicado aproximadamente a treinta centímetros (30cm) del pie de la misma. En caso de que el conductor de puesta a tierra continúe, para conectarse, a cables

de guarda u otros equipos, éste deberá ser de tipo pasante, mientras que los subsiguientes puntos de fijación estarán espaciados aproximadamente 1,5m entre sí.

3.1.9.6.- Puesta a tierra de Casa de Mando y Relés

La red de puesta a tierra de la casa de mando será conectada a la malla de tierra principal de la subestación. La conexión de dicha red será efectuada mediante al menos dos conductores ubicados preferentemente en dos puntos diagonalmente opuestos. En caso de que la casa sea de grandes dimensiones, se efectuarán conexiones a la malla cada 20m aproximadamente.

La puesta a tierra de todos los equipos y tableros ubicados dentro de las edificaciones se efectuará por medio de la red interna antes mencionada.

La puesta a tierra de todos los tomacorrientes estará provista con el terminal de tierra y su conexión correspondiente.

3.1.9.7.- Puesta a tierra de Armarios, Tableros y Cargadores de Baterías.

Para cada armario tipo exterior, tablero de mando, medición, control, señalización, alarma, telemetría, serán puestos a tierra por medio de un cable de derivación a la malla principal.

3.1.9.8.- Puesta a tierra de Cables

Las armaduras y pantallas metálicas de cables de potencia se deberán conectar entre si y a tierra según se detalla seguidamente:

- Conectores entre sí y a tierra en cada extremo del cable.

- Conectados entre sí en cada empalme y conectados a través de cada empalme.
- Conectados entre sí y al cerramiento metálico del equipo en su extremo de la carga.

La pantalla metálica en cables se deberá conectar a tierra en cada extremo y se unirá a la armadura del cable (en caso de existir). Cuando sea práctico, la pantalla de cables que tengan varios empalmes, también se conectará a tierra en cada empalme y se unirá a la armadura del cable (en caso de existir).

3.1.9.9- Puesta a tierra de Cables de Guarda

Todos los cables de guarda de las líneas áreas serán efectivamente puestos a tierra en el pórtico terminal de la subestación, mediante su conexión a un conductor bajante de sección adecuada. El conector utilizado será del tipo bimetálico, para evitar la corrosión.

Los cables de guarda que sirven de apantallamiento de la subestación propiamente dicha, deberán ser puestos a tierra a través de conductores de cobre. Los conectores utilizados deberán asegurar una óptima continuidad de la misma.

3.1.10.-Puesta a tierra de los equipos por norma IEEE std-80-2000

3.1.10.1- Puesta a tierra de pantalla de cable de control

Las pantallas de cable metálico, al no estar puestas a tierra efectivamente, pueden alcanzar voltajes peligrosos con respecto a la tierra. Esos voltajes se producen por una falla en el aislamiento, a cargas debido a la inducción electrostática y el flujo de corrientes en la pantalla, o por el aumento de voltaje durante la falla al sistema de tierra de la subestación, al cual se conectan las pantallas. Todas las conexiones de puesta a tierra se deben blindar de tal forma que proporcionen una conexión de baja resistencia permanente. El cable o

abrazadera que se use para conectar el blindaje del cable de la conexión de tierra con la tierra permanente se debe calibrar para transportar la corriente de falla disponible.

La pantalla de los cables de corriente en conductores se puede reducir al poner a tierra solamente un extremo de las protecciones, cuando la longitud del cable no es excesiva. Para cables extensos, la pantalla se debe poner a tierra en ambos extremos y en cada empalme.

Las pantallas de los cables de control blindadas se deben colocar a tierra en ambos extremos para eliminar los potenciales inducidos. Si la pantalla de cable de control se pone a tierra en puntos muy distantes, durante las fallas los gradientes de potencial en la malla de tierra podrían causar el flujo de corrientes excesivas en la pantalla. Una solución es colocar un conductor separado, en paralelo con el cable de control que conectan los dos puntos de la pantalla a tierra. La corriente entonces se desviará fuera de la pantalla. Este conductor separado comúnmente se coloca a lo largo de la parte superior de la pared interna de la zanja en la cual está el cable o sobre los conductores que se encuentran puestos a tierra directamente.

3.1.10.2- Potenciales de transferencia

Durante una falla a tierra un serio peligro puede resultar debido al potencial de transferencia entre el área de la malla de tierra de la subestación y las ubicaciones externas. Este potencial se puede transmitir por circuitos de comunicación, conductos, tuberías, cercas metálicas, cables neutros de bajo voltaje, etc. El peligro, es comúnmente por el tipo de contacto de toque. Esta diferencia de potencial pudiera igualar o exceder el GPR de la subestación durante una condición de falla.

3.1.10.2.1.- Cables neutros de bajo voltaje

El peligro está presente donde los alimentadores de bajo voltaje o circuitos secundarios sirven de puntos fuera del área de la subestación, teniendo sus neutros conectados a la tierra de la subestación. Cuando el potencial de la malla de tierra de la subestación aumenta como resultado de la circulación de corriente en una falla a tierra, todo o una gran parte de ese aumento de potencial pudiera entonces aparecer en puntos remotos como un voltaje peligroso entre esta tierra de cable neutro y la tierra adyacente; además, donde también se proveen otras conexiones a tierra, la circulación de la corriente de falla a través de ellas puede, bajo condiciones desfavorables, crear gradientes peligrosos en puntos remotos de la subestación.

Para evitar estas dificultades, el bajo voltaje del neutro se puede aislar desde la tierra a la subestación misma; siempre con precaución, sin embargo, que eso no resulte en una reducción del tiempo de limpiezas para fallas de bajo voltaje al punto donde se incrementa el peligro total en lugar de reducirse. Si el bajo voltaje del neutro se aísla a partir de la tierra de la subestación, entonces se hace necesario proteger de los peligros a la subestación debido a la inducción, por medio del cable neutro de potencial de tierra remoto. Esto implica que este neutro, dentro y cerca de la subestación, se debe tratar como un conductor vivo. Este se debe aislar desde el sistema de puesta a tierra de la subestación con un aislamiento adecuado para resistir el GPR; y se debe localizar para minimizar el peligro de estar en contacto con el personal.

3.1.10.2.2.- Equipo portátil y herramientas que se alimentan desde la subestación.

Se necesitan considerar riesgos similares en el caso de la minería, excavación o manejo de equipo manual, o herramientas portátiles, los cuales se alimentan eléctricamente desde la subestación y se usan fuera del área de la malla

de tierra donde el potencial se mantiene dentro de los límites seguros. Muchas cargas se alimentan frecuentemente por medio de líneas temporales o cables portátiles largos.

Un potencial de transferencia peligroso se puede dar entre el equipo y la tierra cercana durante una falla, si el neutro o el cable de puesta a tierra del equipo se conectan también a la puesta a tierra de la subestación. En casos como esos, es común aislar los circuitos alimentadores desde la tierra de la subestación; para poner a tierra los neutros y equipos en tierra del lugar del trabajo; y asegurarse que la corriente de falla máxima a la tierra local se limite a un valor bajo que no causaría gradientes peligrosos.

CONCLUSION

En este trabajo se diseñó el sistema de puesta a tierra unificando los criterios que tienen la norma IEEE-80-2000 y CADAPE, partiendo desde la propuesta más sencilla para no obtener un modelo sobredimensionado.

El estudio del terreno fue realizado por medio del equipo Digital Earth Testers que permite obtener la relación entre la corriente que se inyecta en el terreno y la tensión que se genera en los electrodos producto del mismo. De esta forma se van recolectando los datos hasta obtener un número considerable que permita determinar, de la forma más precisa, la resistividad del terreno. La veracidad de esta información, va a depender de la forma en que se realice la medición, ya que una toma errada puede modificar el resultado final y generar una resistividad que no pertenece al terreno medido.

La norma IEEE-80-2000 propone el método de Sunde para procesar los datos obtenidos, sin embargo hoy en día existe una serie de programas como el IPI2WIN, que de una forma más precisa determina cuál es la o las resistividades del terreno por medio de la implementación del algoritmo de filtrado que provee solución para una amplia gama de modelos que cubren todas las situaciones geológicas razonables.

Para el estudio de puesta a tierra fueron consideradas solo dos capas de terreno debido a la profundidad en la que se encuentra la malla. Según los resultados obtenidos el primer estrato se encuentra hasta una profundidad de 1,5m y la malla a una profundidad de 0,5m, lo que hace que se encuentre por debajo de este valor no influya en los resultados.

Al aplicar el método para el cálculo de la malla se tomó en consideración un área menor de terreno y una distancia entre conductores lo suficientemente

grande de forma tal que el diseño encontrado genere menores costos cumpliendo con los rangos mínimos de seguridad.

Al hacer este análisis se pudo encontrar que debido al alto valor de resistividad que posee la subestación San Jaime, es necesario plantear un modelo más complejo. La malla debe cubrir toda el área de la subestación, ya que de esta forma se puede realizar la conexión de puesta a tierra de la cerca perimetral.

Finalmente después de varias iteraciones, se encontró que el modelo que cumple con las normas de seguridad de tensión de toque y tensión de paso, es una malla de $148\text{m} \times 67\text{m}$, con una cuadrícula de 2 m^2 , dos (2) jabalinas por cada transformador, una (1) jabalina por cada pararrayo y cuatro (4) jabalinas distribuidas en las esquinas de la malla.

Este diseño además de cumplir con las normas de seguridad, utiliza la mínima cantidad de conductor requerida para esta subestación generando de esta forma un modelo confiable y de menor costo.

RECOMENDACIONES

- Al diseñar un sistema de puesta a tierra de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de baja resistencia para lograr la instalación más económica.
- El tester debe inyectar una corriente a una frecuencia que no sea 60Hz para evitar que se midan voltajes y corrientes que no se deban al equipo sino a ruidos eléctricos.
- Se deben colocar los electrodos de forma tal que tengan un buen contacto con el suelo, ya que si esto no ocurre se pueden generar señales falsas de corriente y voltaje. Si hay corrientes distintas a las que envió el aparato, éste leerá otras señales de voltaje y corriente que no son las adecuadas.
- Para reducir el tiempo de la medición es recomendable construir un sistema devanador para poder enrollar los carretes más rápido y utilizar una tabla que posea las mediciones que se van a realizar.
- En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es muy común en una práctica de lectura, eliminar los valores que estén 50% por arriba o por debajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.
- Generalmente el calibre del conductor encontrado en el cálculo genera calibres menores a 4/0 AWG, sin embargo se utiliza este valor ya que soporta holgadamente los esfuerzos mecánicos de una falla donde la protección no opere satisfactoriamente, generando a su vez un efecto de corrosión que pueden crear una mala puesta a tierra.
- Después de haber construido la malla de puesta a tierra, se puede realizar la medición de resistividad de la misma para verificar la veracidad del diseño.
- La cuadrícula del diseño no debe ser menos a 1m ya que es muy difícil cumplir con este parámetro en campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Norma: Edición (1234). Seguridad Eléctrica en la Industria y Riesgos en la Empresa, Sistemas de Puesta a Tierra: Una introducción a la seguridad. / (CADAFE) Caracas, 1992.
- [2] Ruelas, Roberto. *Teoría y diseño de sistemas de tierras según las normas NOM e IEEE*, (Tesis).--México: Universidad De la Salle Bajío.
- [3] Norma: Código (3:2-024). Guía para el diseño de malla a tierra para subestaciones. / (CADAFE) Caracas.
- [4] De la Vega, Miguel. *Problemas de ingeniería de puesta a tierra.*, (Libro).-- España: Ed. Limusa, 2002.
- [5] IEEE std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [6] Fabricantes de Plantas Eléctricas, Telergía [en línea]. < <http://www.telergia.com/> > [Consulta: 2009]
- [7] Manual de referencia: Versión (16-20). Medidor de resistencia contra tierra. / (Gossen – Metrawatt) Alemania, 2006.
- [8] Cegarra S., Sasha A. *Estudio Geológico y Geoeléctrico del yacimiento Fosilífero ORS-16 en el campo Orocual, Estado Monagas*, (Tesis).--Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2007.
- [9] Vera G., Virginia C. *Generación y Tratamiento Digital de Imágenes a Partir de Datos Geofísicos. Aplicaciones en la restitución Histórica*, (Tesis).--Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2008.

- [10] Rodríguez C., José M. *Medidas del subsuelo*, (Tesis).--Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2006.
- [11] Gasulla. M., Manuel. *Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo*. (Tesis).—Cataluña: Universidad Politécnica de Catalunya, 1999.
- [12] Técnicas Modernas para la medición de sistemas de Puesta a tierra en Zonas Urbanas, Ing. Ignacio Aguilero.
- [13] Organización educativa dedicada a formar profesionales en tecnología, Tecsup [en línea]. < www.tecsup.edu.pe/ > [Consulta: 2009]
- [14] Briceño M., Hildemaro. *Guía y Procedimientos para la medición de la resistividad aparente e interpretación de resultados*, (Tesis).--Mérida: Universidad de los Andes, 2004.
- [15] Alersio, José. *Distribución de la energía eléctrica*, (Tesis).--Chile: Universidad del BIO BIO, 2005.
- [16] Manual de referencia: IPI2WIN Guía de Usuario. / Universidad Estatal de Moskú, 2000.
- [17] Manual de referencia: Digital Earth Testers Megger Det5/4R y Det 5/4D User Guide. / Avo International Limited, 1982.
- [18] Norma: Código (3:2-012-92). Guía para realizar el estudio de suelos de terrenos para subestaciones. / (CADAFE) Caracas, 1992.
- [19] Norma: Código (3:2-025). Planos de malla de tierra en subestaciones. / (CADAFE) Caracas, 1992.

[20] Norma: Código (NS-P-360). Especificación técnica para el sistema de puesta a tierra. / (CADAFE), 1992.

[21] Norma: Código (109-92). Presentación de proyectos de subestaciones de transmisión. Sistema de puesta a tierra. / (CADAFE), 1992.

[22] ABB Power Systems, Inc., Electrical Transmissin and distribution reference book, 4th Edition, 12th printing, 1964.

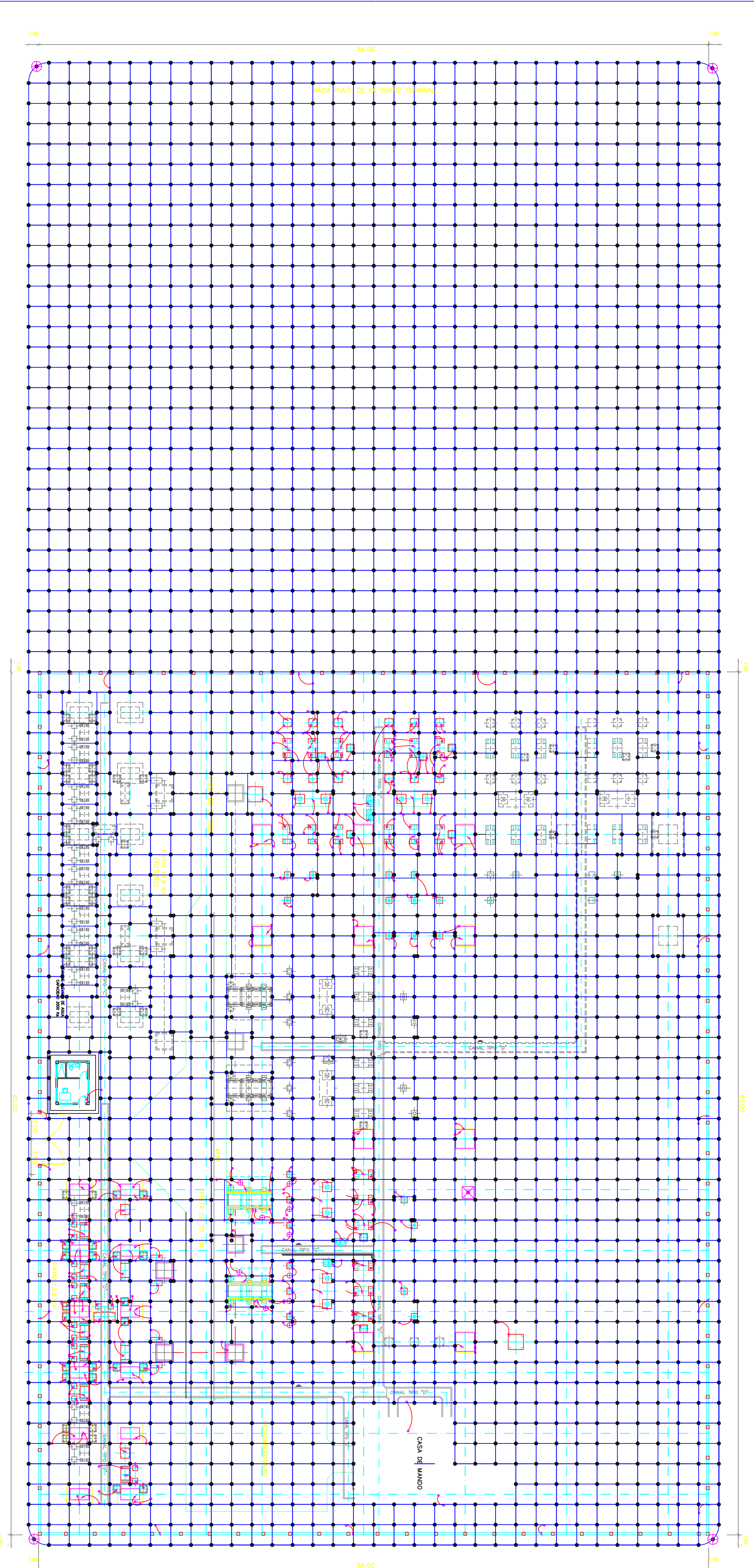
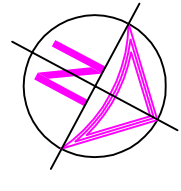
[23] IEEE std 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.

[24] Orellana S., Ernesto. *Prospección geoelectrica en corriente continua*, (Libro).--California: Editorial Paraninfo, 1982.

ANEXOS

[ANEXO 1]

**PLANOS DE MALLA DE PUESTA A TIERRA Y
CONECTORES**



LISTA DE MATERIALES		
TIPO ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD CANTIDAD
(GA1)	CONDUCTOR DE COBRE DESNUDO TRENZADO GAIBRE 4/0 AWG PARA PUESTA A TIERRA DE ESTRUCTURAS Y EQUIPOS	m 1160
(GA1)	CONDUCTOR DE COBRE DESNUDO TRENZADO GAIBRE 4/0 AWG PARA MALLA DE PUESTA A TIERRA	m 3708
(GB1)	BARRA COPPERWELD PARA P.A.T. TIPO TRANS DE POTENCIA Y PARABARROS Ø 25.4 L = 7.2 m.	PZA 10
(GB1)	BARRA COPPERWELD PARA ESQUINAS DE MALLA 1 CASA DE MANDO Ø 25.4, L = 7.2m.	PZA 4
(G1)	CONECTOR EXOTERMICO PARA CABLE 4/0 - 4/0 AWG. PARA MALLA DE PUESTA A TIERRA. TIPO CRUZ	PZA 616
(G1)	CONECTOR EXOTERMICO PARA CABLE 4/0 - 4/0 AWG. PARA MALLA DE PUESTA A TIERRA. TIPO T	PZA 336
(G12)	CONECTOR EXOTERMICO PARA CABLE 4/0 AWG. Y BARRA Ø 25.4	PZA 22
(G1)	CONECTOR EXOTERMICO PARA P.A.T. DE REL. DEL TRANSF. 4/0 AWG	PZA 2
(F)	ABRAZADERA Ø CONECTOR DE BRONCE PARA CONDUCTOR DE COBRE 4/0	PZA 54
(K22)	CONEXION PARA EMPALME DE BARRA COPPERWELD DE DE COBRE Ø 25.4"	PZA 44
(E)	GRAPA DE SUJECION PARA 1 CABLE DE COBRE A PARED.	PZA 18
(M)	CHITA FLEXIBLE DE COBRE PARA P.A.T. DE PUESTA DE ACCESO.	PZA 2
(G12)	GRAPA DE SUJECION PARA 2 CABLES DE COBRE A PARED.	PZA 20

LEYENDA

