

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**DIAGNÓSTICO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA DE LA
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA BARBACOA II" PARA 400/230 Y 34,5 KV.**

REALIZADO POR:
YULINEIDIS BELTRAN GUAQUIRIAN

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

BARCELONA, ABRIL DE 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**DIAGNOSTICO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA DE LA
SUBESTACION ELECTRICA "BARBACOA II" PARA 400/230 Y 34,5 KV.**

TESIS APROBADA POR LOS ASESORES:

Prof. Hernán Parra
(Asesor Académico)

Ing. Juan Carlos Rausseo
(Asesor Industrial)

BARCELONA, ABRIL DE 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**DIAGNOSTICO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA DE LA
SUBESTACION ELECTRICA "BARBACOA II" PARA 400/230 Y 34,5 KV.**

TESIS APROBADA POR EL DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD DE LA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

CALIFICACIÓN OBTENIDA:



Prof. **Daniel Velásquez**

(Jurado Principal)

Prof. **Verena Mercado**

(Jurado Principal)

BARCELONA, ABRIL DE 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado de la *Universidad de Oriente*:

*“Los **Trabajos de Grado** son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del **Consejo de Núcleo** respectivo, el cual participará al **Consejo Universitario**”.*

DEDICATORIA

Dedico esta tesis de Grado al ser que siempre estuvo presente en todas las situaciones de mi vida y en el que siempre confié y pedí salud para poder lograr mis metas, ese Dios que siempre me ha guiado en los caminos de mi vida y al que le debo todo lo que he logrado y de igual forma le ruego me siga ayudando para seguir alcanzando otras metas que ya me he trazado, por todo gracias a Dios.

A mis padres y en especial a mi madre, que siempre me brindó su palabra y sus consejos como aliento para seguir adelante y no desfallecer ante ninguna circunstancia.

A mis hermanos que de una u otra forma estuvieron conmigo, y que vean este logro como una motivación más para seguir adelante y no decaer en sus metas trazadas.

A mi abuela y a mi tía por tan apreciados consejos de luchar hasta el final por las metas trazadas.

Es importante también dedicar este logro a mi constancia y dedicación para darme cuenta una vez más que el ser humano es capaz de lograr cualquier objetivo en la vida, lo importante es trazarse una meta y a partir de allí hacer todo lo humanamente posible para alcanzarla.

AGRADECIMIENTO

A mi Dios, Padre todopoderoso por haberme brindado la oportunidad de lograr en feliz término tan anhelado sueño.

Gracias a todos mis compañeros de estudio y amigos de toda la vida y los que encontré en la universidad, a Johandry, Kamal, Ana Julia, José del Valle, Alexdys, María Eugenia, Eliza, Zuly, Carina, Hector, Mary, Maylor, Yun Xin, Liliana, Libia y todos aquellos que me brindaron su amistad y compañerismo, en especial a Daniel, Gina y Marinel por estar en todo momento para brindarme su apoyo incondicional. .

Gracias muy especialmente al profesor Hernán Parra por toda la colaboración prestada tanto como mi asesor, como profesor que sirvió en gran parte en la formación profesional de quien esto escribe.

Gracias a la Sra. Carmenia por siempre estar a la disposición para todo lo que necesitaba.

Gracias a Argenis por creer en mí y ser en todo momento un apoyo para seguir adelante.

Gracias a todos los profesores, desde el primero que nos impartió clases en el departamento de electricidad, el profesor Luis Suárez, hasta el profesor Hernán Parra con el que culminamos la carrera, pasando por el profesor Pedro López y el profesor Santiago Escalante, que nos enseñaron en muy particular forma la esencia de un

profesional y la ética que debe mantenerse en un profesional y al mismo tiempo la humildad que debe prevalecer en un ser humano, a todos muchas gracias.

Gracias a los Ingenieros y en especial al Ingeniero Juan Carlos Rausseo y técnicos de la subestación Barbacoa, por toda la colaboración prestada.

A todas las personas que en su momento me brindaron su apoyo para de igual manera continuar con la incansable carrera de la vida y poder de esa forma ir cumpliendo cada una de mis metas.

INDICE

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
INDICE	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN.....	xv
CAPÍTULO I.....	17
INTRODUCCIÓN	17
1.1 La Empresa	18
1.1.1 Reseña Histórica.....	18
1.1.2 Ubicación Geográfica de la Subestación Barbacoa II.	20
1.1.3 Descripción Del Sistema Eléctrico De Potencia De CADAPE (Sistema Eléctrico Oriental).....	21
1.2. Planteamiento del Problema.....	22
1.3 Objetivo del Proyecto.....	24
1.3.1 Objetivo General.....	24
1.3.2 Objetivos Específicos	25
1.4 Alcance.....	25
1.5 Justificación.....	26
CAPÍTULO II	27
2.1 Puesta a Tierra.....	27
2.1.1 Características de un buen Sistema de Puesta a Tierra	28
2.1.2 Materiales utilizados en Sistemas de Puesta a Tierra	28
2.2 Componentes de un Sistema a Puesta a Tierra.....	29
2.3 Resistencia de Sistemas de Puesta a Tierra.....	30

2.3.1 Resistencia de un Electrodo.....	30
2.3.2 Valores de Resistencia Recomendados	31
2.3.3 Medición de la Resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra.....	32
2.3.3.1 Métodos de Medición	33
2.3.3.1.1 Método de los Dos Puntos	34
2.3.3.1.2 Método de la Caída de Potencial	35
2.3.3.1.3 Método de los Tres Puntos o Triangulación.....	36
2.3.3.1.4 Medición con el uso de Pinzas Amperimétricas.....	37
2.4 Conductores de tierra	38
2.4.1 Conductor de Protección	38
2.4.2 Electrodo de Tierra.....	39
2.5 Arreglos de Sistemas de Puesta a Tierra.....	39
2.5.1 Barras.....	39
2.5.2 Platos	40
2.5.3 Mallas	41
2.5.4 Electrodo Horizontales.....	45
2.5.5 Anillos	45
2.5.6 Electrodo activo	46
2.6 Resistividad en Sistemas de Puesta a Tierra	47
2.6.1 Aspectos generales	47
2.6.2 Métodos para mejorar la Resistividad del Terreno.....	51
2.6.3 Medición de la Resistividad del Terreno	52
2.6.3.1 Método Wenner	53
2.6.3.2 Método de Schlumberger.....	54
2.6.4 Interpretación de Mediciones	55
2.6.4.1 Método Analítico del Tagg.....	57
2.7. Observaciones y Consideraciones sobre Sistemas de Conexión a Tierra Reales (SCT).....	60
2.8. Voltaje de paso, de contacto y transferido	61

2.8.1.- Voltaje de Paso.....	62
2.8.2.- Voltaje de Toque	63
2.8.3 Voltaje Transferido.....	66
2.9. Voltajes de Toque y de Paso en la Periferia (Em, Es).....	66
2.9.1. Voltaje de Toque (Em)	66
2.9.2 Voltaje de Paso (Es)	73
CAPÍTULO III.....	76
MARCO METODOLOGICO.....	76
3.1.- Tipo de Investigación.....	76
3.2.- Diseño de Investigación.....	76
3.2.1.- Enfoque Metodológico.....	76
3.2.2.- Fuente.....	76
3.3.- Población y Muestra	77
3.4.- Técnicas de Recolección de Datos	77
3.4.1.- Observación Directa.....	77
3.4.2.- Entrevista con el Personal	78
3.5 Estructura del Trabajo.....	78
CAPÍTULO IV.....	80
DIAGNÓSTICO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA.....	80
4.1.- Descripción del Sistema Eléctrico de Potencia de la S/E Barbacoa II	80
4.2.- Características de la Red de Puesta a Tierra de la S/E Barbacoa II.....	87
4.3.- Conexiones Físicas de Puesta a Tierra de los Equipos Críticos de la Instalación.....	89
4.4.- Mediciones en las Principales Conexiones de Puesta a Tierra Presentes en la Subestación Eléctrica.	97
4.4.1.- Medición de la Resistividad del Terreno.....	97
4.4.2. Resultados Obtenidos	98
4.4.3.- Resumen de resultados.....	104
4.5.- Estudio de la Malla de Tierra.....	104

4.5.1.- Norma Aplicada	105
4.5.2.- Metodología	105
4.5.3.- Criterios de Diseño.....	105
4.5.4.- Resistividad del Terreno.....	106
4.6.- Metodología de Cálculo de los parámetros que intervienen en el estudio del Sistema de Puesta a Tierra	107
4.6.1. Cálculo del Voltaje de Toque y Voltaje de Paso Tolerable.....	107
4.6.2.- Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra (Rg).....	108
4.6.3. Cálculo de la Máxima Corriente que drenará la Malla.....	109
4.6.4.- Cálculo del Voltaje de Toque y Voltaje de Paso en la Periferia.	111
4.6.5.- Cálculo del Potencial de Puesta a Tierra (GPR).....	113
4.6.6.- Análisis de Resultados	113
4.7.- Simulación de un modelo de la red de puesta a tierra de la subestación empleando la técnica computacional (ETAP), enfocado al análisis de los potenciales de toque y paso en condición actual de carga	114
4.7.1.- Sistemas de Malla a Tierra	115
4.7.2.- Resultados de la Simulación.	116
4.7.3.- Comparación de los Resultados.	116
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	118
5.1.- CONCLUSIONES.....	118
5.2.- RECOMENDACIONES.....	120
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXOS A.....	¡Error! Marcador no definido.
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación geografica poblacion Barbacoa.....	21
Figura 1.2. Sistema Eléctrico De Potencia De CADAPE.....	22
Figura 2.1 Componentes de un sistema de puesta a tierra.....	29
Figura 2.2 Esfera de influencia de un electrodo simple.....	31
Figura 2.3. (a) método de los dos puntos (b) conexión del equipo y los electrodos [3].....	34
Figura 2.4 Método de la caída de potencial.....	35
Figura 2.5 Método de los tres puntos o triangulación.....	37
Figura 2.6 Medición de resistencia sin el uso de electrodos (a) Circuito equivalente (b) Ubicación de pinzas de voltaje y corriente.....	38
Figura 2.7 Electrodo simple (barra).....	40
Figura 2.8 Plato de tierra.....	41
Figura 2.9 Malla de tierra.....	41
Figura 2.10 Coeficientes de Schwarz.....	44
Figura 2.11 Electrodo horizontal.....	45
Figura 2.12 Anillo de tierra.....	46
Figura 2.13 Eléctrodo activo o raiz eletrolítica.....	47
Figura 2.14. Variación de la resistividad con la humedad, temperatura y sales.....	50
Figura 2.15 Suelo de varios estratos o capas.....	52
Figura 2.16. (a) Funcionamiento del método Wenner (b) Disposición de los electrodos para el método Wenner.....	53
Figura 2.17 Disposición de los electrodos.....	55
Figura 2.18 Variaciones posibles de la resistividad aparente con la separación entre electrodos.....	56
Figura 2.19 Curva estándar para valores negativos de K.....	58
Figura 2.20. Curvas estándar para valores positivos.....	59
Figura 2.21. SCT por un rectángulo enterrado horizontal.....	61
Figura 2.22. Voltaje de paso, voltaje de contacto y voltaje transferido.....	62
Figura 2.23. Curvas del Factor de división de Corriente Aproximado para 25Ω	70

Figura 2.24. Curvas del Factor de división de Corriente Aproximado para 100 Ω	70
Figura 4.1. Diagrama Unifilar de la S/E Barbacoa II.....	82
Figura 4.2. Dispositivos de Protección a nivel de Alta tensión.	84
Figura 4.3. Autotransformadores.	85
Figura 4.6. Dimensiones de la Subestación Barbacoa II.....	88
Figura 4.7. Conexión exotérmica de los conductores.	88
Figura 4.6. Esquema de la Malla de Tierra de la Subestación.....	90
Figura 4.7 Conexión de Tierra de Autotransformador 1.....	95
Figura 4.8. Conexion de Tierra de Autotransformador 2.....	95
Figura 4.9. Conexión de Tierra cortada en las copas terminales a la línea 400KV de José... 96	
Figura 4.10 Conexión de Tierra de Los Seccionadores asociados a los bushing del autotransformador	96
Figura 4.11. Gráfica de las Resistencias.	99
Figura 4.12. Gráfica de las Resistividad.	100
Figura 4.13. Método Gráfico de Sunde.....	102
Figura 4.17. Curvas del Factor de división de Corriente Aproximado para 25 Ω	110

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 Valores de resistencia recomendados	32
TABLA 2.2 Valores típicos de resistividad según el tipo de suelo	48
TABLA 2.3 Factores de Decrecimiento.	71
TABLA 4.1 Características de los Autotransformadores.	85
TABLA 4.2. Verificación de la Puesta a Tierra de los Equipos conectados a 400 KV.....	91
TABLA 4.3 Verificación de la Puesta a Tierra de los Equipos conectados a 230 KV.....	92
TABLA 4.4. Valores de resistencia del terreno.....	98
TABLA 4.5. Resistividades del Terreno.	99
TABLA 4.6 Resultados de los Cálculos Matemáticos	114
TABLA 4.8 Resultados de los Cálculos con el Software ETAP 6.0.0	116
TABLA 4.9 Resultados de los Cálculos Matemáticos con el Software ETAP 6.	116

RESUMEN

En el siguiente trabajo se realizó el diagnóstico de una red de puesta a tierra, para una subestación eléctrica de niveles de tensión de 400/230 Y 34,5 KV, basándose en las normas de CADAFE y la IEEE y en una simulación del sistema con el software de Cálculo ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) en su versión 6.0.0. El objetivo de este estudio fue diagnosticar las condiciones operativas en que se encontraba el sistema de conexión a tierra de esa instalación y de acuerdo con los resultados que se obtuvieron, proponer mejoras para corregir las eventualidades y así garantizar la continuidad del Servicio Eléctrico como también la seguridad del personal de operaciones al momento de presentarse cualquier tipo de falla a tierra.

Para el diagnóstico del sistema de puesta a tierra (SPAT) se tomó como base las normas de CADAFE y la IEEE-Std 80-2000. Con la cual se obtuvieron resultados que fueron comparados con los obtenidos a través de la simulación de la malla de puesta a tierra con el software mencionado anteriormente, con el fin de establecer criterios técnicos mínimos aceptables para este estudio.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

La empresa CADAPE, a nivel de transmisión en el oriente del país, está formada por dos (2) zonas, la Zona I que se encuentra al Norte del Estado Anzoátegui, la cual se encarga de la operación y mantenimiento de 4 subestaciones eléctricas; y la Zona II, que se encuentra al Sur del Estado Anzoátegui, en donde se encargan del funcionamiento de tres (3) subestaciones, dando un total de 7 subestaciones a nivel de la zona oriental. La subestación Barbacoa II forma parte del grupo de subestaciones que se encuentran a cargo de la Zona I de transmisión.

Se busca verificar si el sistema de puesta a tierra de Barbacoa II esta apto para:

- Proveer un camino de retorno para las corrientes que puedan circular hacia el terreno bajo condiciones de falla o de operación normal, sin exceder cualquier límite de operación de los equipos que afecten adversamente la continuidad del servicio.
- Asegurar que una persona en las inmediaciones de un sistema de puesta a tierra no esté expuesta a un choque eléctrico peligroso para su vida.
- Servir de medio de control de los posibles sobrevoltaje que se puedan presentar en una instalación. Bien sean sobrevoltaje de origen externo (rayos) o de origen interno.

1.1 La Empresa

1.1.1 Reseña Histórica

En el año de 1.946, la electrificación en el país se realizaba mediante planta de generación agrupada en pequeñas compañías oficiales y privadas, dispersas en el territorio nacional. Estas plantas operaban de forma aislada y servían básicamente a los mercados con mayor densidad de población, quedando el resto del país desprovistos de los beneficios del servicio eléctrico. Las plantas oficiales eran administradas por los Concejos Municipales y los Gobiernos Estatales y su servicio no era continuo.

La situación existente y la necesidad de electrificación, motivó que el gobierno nacional creara la Corporación Venezolana de Fomento (**C.V.F.**), recomendándole entre otros, el estudio de la electrificación integral del país y asignándole como parte del patrimonio y en calidad de aporte, las inversiones existentes en las instalaciones eléctricas.

En este sentido, en el año 1951, con la colaboración de especialistas venezolanos y extranjeros, se formula y se pone en vigencia el *primer plan nacional de electrificación*, siendo la (**C.V.F.**) la encargada de iniciar su ejecución con la colaboración de técnicos especialistas venezolanos y extranjeros.

El 27 de octubre de 1958 se constituyó la Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE) como la empresa de servicios eléctricos, la misma inició sus actividades con quince empresas eléctricas que eran subsidiadas por la Corporación Venezolana de Fomento. En junio de 1959 se acordó

la fusión de esas compañías con CADAFE, quedando ésta como la empresa del estado encargada de crear uniformidad en los criterios técnicos-administrativos; que permitiesen la formulación de programas eléctricos en forma integral. Posteriormente comienza con la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica.

En los años 1979-1988, CADAFE entra en su proceso de expansión, procurando obtener la máxima cobertura, productividad y calidad del servicio eléctrico. CADAFE debía dejar de ser la gran empresa de desarrollo, para convertirse en la empresa prestadora de servicio de calidad creciente. Por tal motivo se toma la decisión de emprender el proceso de reorganización, descentralización y regionalización. Este proceso comienza con la actividad generadora a través de la optimización de sus recursos por lo que se concluyen y adelantan grandes proyectos de generación termoeléctricos e hidroeléctricos y consolidan los correspondientes sistemas de transmisión de alto nivel de tensión.

En el 2007 CADAFE se convirtió en una filial de la Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC), empresa estatal creada ese año con el fin de agrupar todas las empresas, y así cumplir con las exigencias del proceso de desarrollo económico.

La empresa CADAFE, a nivel de transmisión en el oriente del país, está formada por dos (2) zonas, la Zona I que se encuentra al Norte del Estado Anzoátegui, la cual se encarga de la operación y mantenimiento de 4 subestaciones eléctricas; y la Zona II, que se encuentra al Sur del Estado Anzoátegui, en donde se encargan del funcionamiento de tres (3) subestaciones, dando un total de 7 subestaciones a nivel de la zona oriental. La subestación Barbacoa II forma parte del grupo de subestaciones que se encuentran a cargo de la Zona I de transmisión.

Esta subestación se encuentra en la población de Barbacoa, Municipio Bolívar, Estado Anzoátegui. Actualmente tiene trece (13) años en servicios y está constituida por dos (2) patios uno de 400 y otro de 230 KV respectivamente, los cuales están enlazados por siete (7) autotransformadores monofásicos de 400/230 KV respectivamente, y estos a nivel trifásico son dos (2) quedando un transformador monofásico de reserva, cada uno de ellos tiene una capacidad de 150 MVA lo que totaliza una capacidad instalada de 900 MVA.

El patio de 400 KV esta interconectado, al sistema eléctrico nacional, mediante dos (2) líneas Barbacoa II- Tigre I y Barbacoa II- José.

En el patio de 230 KV hay cuatro (4) salidas de líneas, denominadas por Barbacoa II- Barbacoa I numero uno (1) y dos (2); Barbacoa II- Guanta II numero uno (1) y dos (2).

Los autotransformadores tienen tres (3) niveles de tensiones de 400, 230 y 34,5 KV y los servicios auxiliares como son la unidad Diesel, dos (2) bancos de batería de corriente continua y dos (2) rectificadores.

1.1.2 Ubicación Geográfica de la Subestación Barbacoa II.

La subestación está ubicada en la carretera Nacional Barcelona-Anaco. Km. 35, Población Barbacoa sector Capiricual Municipio Bolívar, Estado Anzoátegui. En la figura 1.1 se muestra la ubicación geográfica de la subestación Barbacoa II.



Figura 1.1. Ubicación geográfica población Barbacoa.
Fuente: Biblioteca de consulta Encarta 2005.

1.1.3 Descripción Del Sistema Eléctrico De Potencia De CADAPE (Sistema Eléctrico Oriental).

CADAPE, y sus empresas filiales en la región Oriental del país, está conformada por sesenta (60) instalaciones (plantas y subestaciones), en los niveles de 400, 230 y 115 kV. Con una demanda de 1.420 MW y atiende el requerimiento de energía de los Estados Anzoátegui, Bolívar, Sucre, Monagas y Delta Amacuro. En la figura 1.2 se muestra el sistema eléctrico de potencia de la empresa.

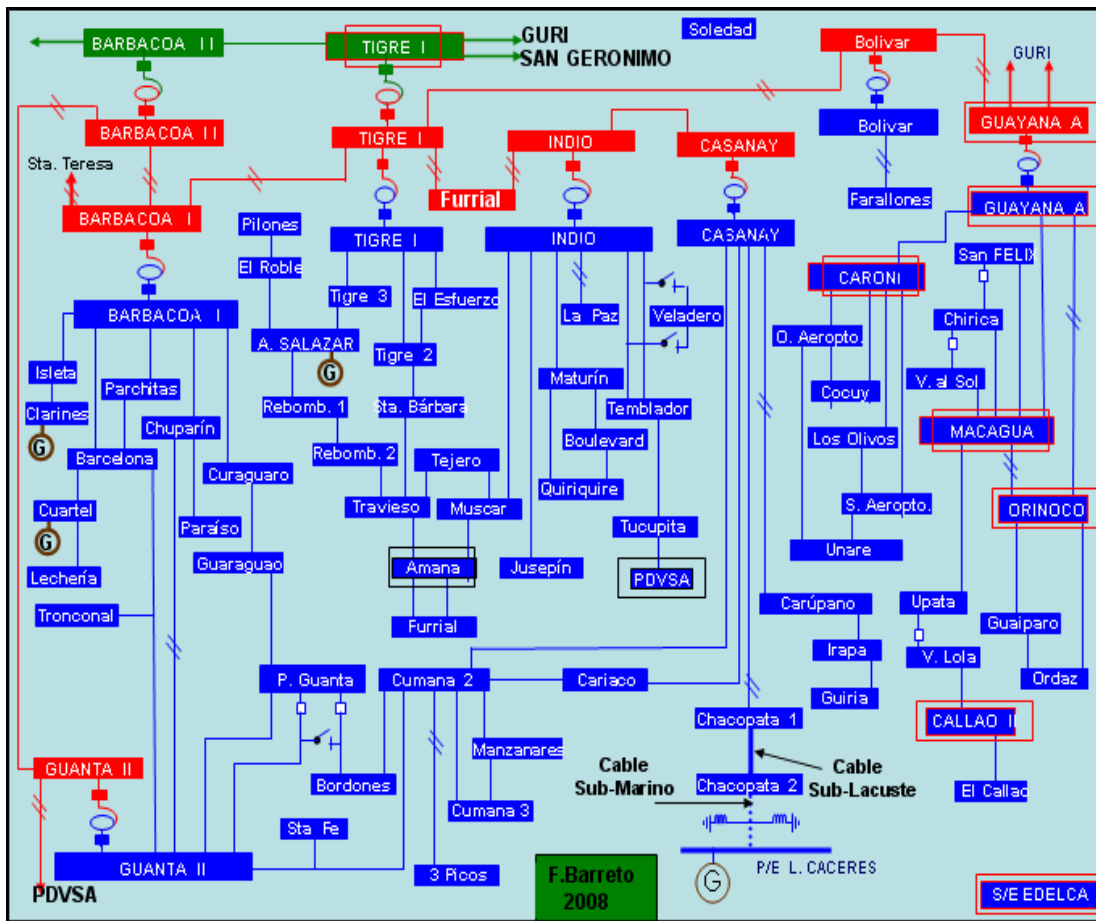


Figura 1.2. Sistema Eléctrico De Potencia De CADAFE.
Fuente: Despacho de carga S/E Barbacoa I, 2008.

1.2. Planteamiento del Problema.

En 1958 se creó la Compañía de Administración y Fomento Eléctrico (CADAFE) como parte de un esfuerzo de la Corporación Venezolana de Fomento (CVF) para racionalizar la administración y operativo de las 15 empresas dependientes del Estado que estaban repartidas en todo el país.

Durante sus primeros 30 años, CADAPE obtuvo logros importantes y desarrolló una infraestructura eléctrica en generación, transmisión y distribución que permitió alcanzar un alto grado de electrificación del territorio nacional.

La compañía anónima de Administración y Fomento Eléctrico (CADAPE), en el estado Anzoátegui, se encuentra ubicada en el sector Guanire, en la Avenida José Antonio Anzoátegui, diagonal al Instituto Venezolano del Seguro Social.

Para ofrecer una mejor distribución de la electricidad CADAPE tiene distribuida en todo el país una red de subestaciones, siendo una de estas la subestación Barbacoa II, la cual fue creada el 17 de noviembre de 1999, distribuyendo energía a cierta parte del estado Anzoátegui, a través de líneas de transmisión a otras subestaciones de la región.

La subestación Barbacoa II, es una subestación de distribución, interconexión y transformación. Se encuentra ubicada en el estado Anzoátegui, específicamente en la población de Barbacoa, carretera vieja Caracas-Tigre (Km. 26 y 27). Esta constituida por dos (2) patios uno de 400 y otro de 230 KV, los cuales están enlazados a siete (7) autotransformadores de 400/230 KV y estos a nivel trifásico son dos (2), quedando un transformador de reserva, cada una de ellos tiene una capacidad de 150 MVA la que totaliza una capacidad instalada de 900 MVA.

El aspecto primordial de un Sistema de Puesta a Tierra es la seguridad de las personas, y esto se refleja en la facilidad de detectar y aislar una falla de aislamiento que involucre elementos conductores que pueden ser tocados por personas. Desde el punto de vista de la primera falla a tierra los sistemas aislados presentan el menor riesgo para las personas en comparación a los sistemas sólidamente conectados a tierra. Sin embargo la detección y ubicación de fallas a tierra en un sistema aislado es más difícil.

La empresa CADAFE ha venido confrontando serios problemas en algunas subestaciones de la zona oriental y más en aquellas que son controladas desde Despacho de Carga, las cuales son subestaciones no atendidas, la subestación Barbacoa II es una de ellas; entre los problemas se pueden señalar: falla en equipos críticos, como transformadores de distribución, seccionadores de paso, relés de protección debido a descargas externas que repercuten en la instalación.

Entre las posibles causas de las fallas se pueden mencionar la falta de mantenimiento periódico, la existencia de corrosión en los conductores debido a las características del terreno, actos vandálicos y causas relacionadas con el sistema de puesta a tierra.

En tal sentido el objetivo de este estudio es diagnosticar las condiciones operativas en que se encuentra el sistema de conexión a tierra de esa instalación y de acuerdo con los resultados obtenidos, proponer mejoras para corregir las eventualidades y así garantizar la continuidad del Servicio Eléctrico como también la seguridad del personal de operaciones al momento de presentarse cualquier tipo de falla a tierra.

1.3 Objetivo del Proyecto.

1.3.1 Objetivo General

- Diagnosticar la red de puesta a tierra de la subestación eléctrica “Barbacoa II” para 400/230 y 34,5 KV.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Describir el Sistema Eléctrico de Potencia de la Subestación de Distribución, en términos de características técnicas de su propia configuración.
- Identificar las condiciones actuales en que se encuentra el sistema de puesta a tierra, mediante el levantamiento de información de campo.
- Describir las conexiones físicas de puesta a tierra y de los equipos críticos de la instalación.
- Efectuar mediciones en las principales conexiones de puesta a tierra presentes en la subestación eléctrica.
- Simular un modelo de la red de puesta a tierra de la subestación, empleando la técnica computacional (Etap), enfocado al análisis de los potenciales de toque y paso en condición actual de carga.

1.4 Alcance

El alcance de este trabajo es diagnosticar las condiciones operativas en que se encuentra el sistema de puesta a tierra de la Subestación Eléctrica Barbacoa II, que incluye verificar la condición física de los conductores, de los autotransformadores y las características de la malla.

1.5 Justificación

A. Seguridad:

Este estudio permitirá conocer cuan segura es la instalación para el personal, en el momento de ocurrir fallas y condiciones anormales de operación.

B. Técnica:

Este estudio le permitirá conocer a la Empresa CADAFE, si el sistema de puesta a tierra de la Subestación Barbacoa II es adecuado para soportar las condiciones anormales de falla en equipos críticos, como transformadores de distribución, seccionadores de paso, relé de potencia debido a descargas externas que repercuten en la instalación.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Puesta a Tierra

Poner a tierra un circuito o equipo significa conectar un punto de ese circuito o equipo a la masa de tierra, a través de un dispositivo propio que tenga valor de baja resistencia. La conexión es usada para establecer y mantener, lo más cercanamente posible, el potencial de tierra sobre ese circuito o equipo. La puesta a tierra se realiza para lograr los siguientes propósitos:

- Mantener una diferencia de voltaje baja entre las diferentes estructuras metálicas con lo que se busca resguardar al personal de cualquier choque eléctrico.
- Contribuir a un mejor desempeño de los sistemas de protección.
- Evitar incendios provocados por materiales volátiles o la combustión de gases al proveer un camino efectivo y seguro para la circulación de corrientes de falla y descargas atmosféricas y estáticas y así eliminar los arcos y elevadas temperaturas en los equipos eléctricos que pueden provocar tales incendios.
- Buen desempeño de los equipos. En los sistemas o redes de computación una buena puesta a tierra no sólo mantiene la seguridad del personal y provee un camino de baja impedancia para las corrientes de falla, sino que también mantiene el mismo nivel de potencial de tierra en todas las unidades del sistema, si estas están conectadas entre sí a tierra al mismo tiempo.

2.1.1 Características de un buen Sistema de Puesta a Tierra

- Buena conductividad eléctrica: Debe poseer conductores de dimensiones suficientes, que sean capaces de mantener altas corrientes de falla sin fundirse y sin deteriorarse mecánicamente.
- Buena resistencia a la corrosión: La selección del conductor, los conectores y los electrodos es vital para los sistemas de puesta a tierra, ya que éstos irán enterrados en la masa de la tierra durante muchos años.
- Mecánicamente robusto y confiable: Debe tener la suficiente robustez para estar enterrado y funcionando por todo el tiempo que dure la instalación eléctrica.

2.1.2 Materiales utilizados en Sistemas de Puesta a Tierra

- Cobre: Es el material más comúnmente utilizado en aterramientos. El conductor de cobre, además de su alta conductividad, posee la ventaja de su alta resistencia a la corrosión subterránea, pues el cobre es más catódico que cualquier otro material que probablemente sea enterrado en su vecindad.
- Acero armado con cobre (copper-clad): Es utilizado para varillas subterráneas y ocasionalmente para mallas de tierra, especialmente donde los robos son un problema.
- Aluminio: Es poco utilizado para mallas de tierra porque se puede corroer en ciertos suelos. La capa de aluminio corroído es aislante y obviamente no sirve como conductor.

- Acero: El acero puede ser utilizado para conductores de la malla de tierra y varillas; el diseño con este tipo de material requiere que se preste atención a la corrosión del mismo.

2.2 Componentes de un Sistema a Puesta a Tierra

- Conductor de puesta a tierra.
- Conector del electrodo.
- Electrodo(s) de aterramiento.
- El suelo en contacto con el electrodo.

En la figura 2.1 se pueden apreciar los componentes del sistema de puesta a tierra

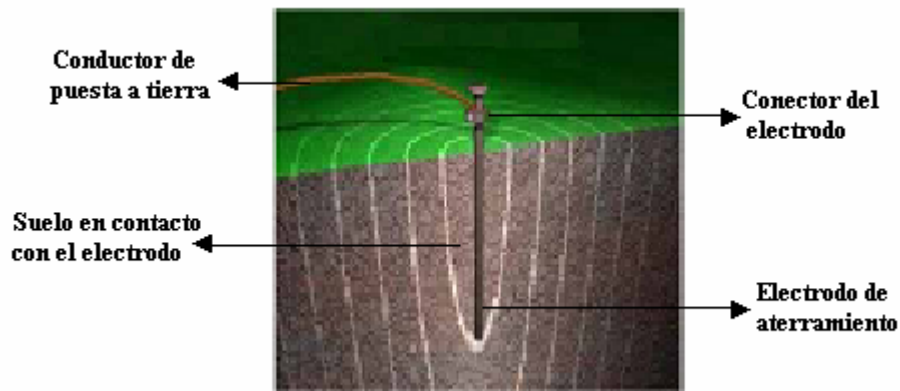


Figura 2.1 Componentes de un sistema de puesta a tierra [3]

2.3 Resistencia de Sistemas de Puesta a Tierra

2.3.1 Resistencia de un Electrodo

- La resistencia de puesta a tierra de un electrodo dispersor (toma de tierra), es la resistencia entre el electrodo y el suelo circundante; este parámetro es medido en ohms (Ω). La resistencia de un electrodo está compuesta por:
- La resistencia propia del electrodo, la cual es muy baja, ya que los electrodos son hechos de un material bastante conductivos y bajos en resistencia, como el cobre.
- La resistencia de contacto del electrodo con la tierra, que generalmente es bastante baja si el electrodo esta libre de pintura grasa u otro, y el electrodo esta firmemente enterrado.
- La resistencia del suelo, desde la superficie del electrodo hacia fuera; tiene mayor valor que las anteriores. El electrodo está rodeado por conos concéntricos, los más cercanos tienen menor área y por tanto mayor resistencia, mientras que los de mayor área contribuyen con menor resistencia, como se puede observar en la figura 2.2. La resistencia alrededor del electrodo será la suma de las resistencias en serie de las esferas concéntricas.



Figura 2.2 Esfera de influencia de un electrodo simple [3]

Para propósitos prácticos pueden omitirse valores de resistencias propios del electrodo y de contacto con la tierra, porque sus valores son muy pequeños (menos de 1 ohm) en comparación con la resistencia del suelo.

2.3.2 Valores de Resistencia Recomendados

Un sistema de puesta a tierra puede llegar a fallar si la conexión del mismo a la tierra es inadecuada y si tiene una alta resistencia. La conexión perfecta a tierra debería tener 0Ω (0 ohmios) de resistencia; en la práctica lograr esto es imposible.

Las Normas de CADAFE y la IEEE std 141-1993 recomienda los siguientes valores de resistencia:

- Para subestaciones y estaciones grandes de generación, la resistencia no debería exceder 1Ω .
- Para subestaciones pequeñas y plantas industriales, la resistencia puede ser menor a 5Ω .

Otros autores recomiendan valores surgidos de la experiencia cotidiana, sin que necesariamente obedezcan a una norma específica o a una meta obligatoria. En la tabla 2.1 se observan los valores de resistencia recomendados para un sistema de puesta a tierra.

TABLA 2.1 Valores de resistencia recomendados [3]

Finalidad del SPAT	Valor de resistencia (Ω)
Torres de transmisión	20
Protección contra estática	15
Subestaciones de poste	10
Comunicaciones	5
Subestaciones de media tensión	3
Centros de computación	2
Subestaciones de alta tensión	1
Sistemas de protección contra descargas atmosféricas	1

2.3.3 Medición de la Resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra

Existen muchas ecuaciones para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra, sin embargo en dichas ecuaciones no se toman en cuenta factores propios del medio donde está instalado el sistema, por ejemplo la resistencia del suelo varía inversamente con la temperatura del suelo y directamente con el contenido del agua.

La única manera de determinar el valor real de la resistencia de un sistema de puesta a tierra es realizando mediciones. La medición de la resistencia o impedancia de puesta a tierra así como los gradientes de potencial en la superficie de la tierra debido a corrientes de tierra es necesaria por diferentes razones, entre ellas:

- Determinar la resistencia actual de las conexiones a tierra.
- Verificar la necesidad de un nuevo sistema de puesta a tierra.
- Determinar los valores de voltaje de paso y toque y su posible aumento que resulta de una corriente de falla en el sistema.
- Diseñar protecciones para el personal y los circuitos de potencia y comunicación.
- Como parte del mantenimiento de rutina, para confirmar que el valor resistivo no ha aumentado sustancialmente respecto al valor medido originalmente o de su valor de diseño

2.3.3.1 Métodos de Medición

Existen varios métodos para realizar la medición de la resistencia o impedancia de los sistemas de puesta a tierra. Para la aplicación de todos los procedimientos se requiere el uso de dos electrodos auxiliares.

Los métodos más utilizados para realizar las mediciones son:

- • Método de los dos puntos
- • Método de los tres puntos

- • Método de la caída de potencial

2.3.3.1.1 Método de los Dos Puntos

Con este método se mide la resistencia total del electrodo bajo estudio más la resistencia de un electrodo auxiliar. La resistencia del electrodo auxiliar se supone despreciable en comparación con el electrodo bajo prueba; el valor en ohmios obtenido de la medición se tomará como la resistencia del electrodo en estudio.

Generalmente este método es utilizado para determinar la resistencia de un electrodo simple, enterrado en un área residencial donde se tiene además de un sistema de suministro de agua que utiliza tuberías metálicas sin conexiones o aislantes plásticos.

Naturalmente este método está sujeto a errores porque no siempre se conoce el recorrido de la tuberías de agua, por lo que las áreas de resistencia del electrodo en estudio y las del electrodo auxiliar podrían solaparse; dando lecturas equivocadas. En la figura 2.3 (a) y (b) se ilustra la aplicación del este método.

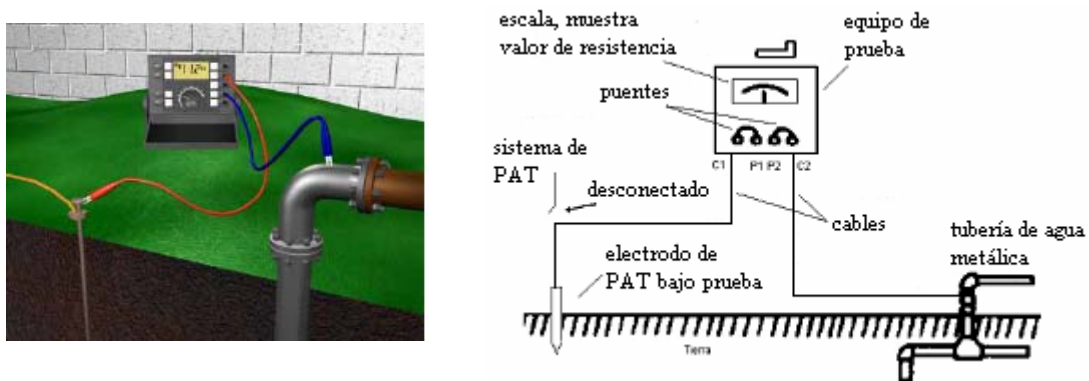


Figura 2.3. (a) método de los dos puntos (b) conexión del equipo y los electrodos [3]

2.3.3.1.2 Método de la Caída de Potencial

El método consiste en inyectar corriente a través de un electrodo de prueba denominado de corriente y medir el voltaje con la ayuda de un electrodo auxiliar. Conocido el valor de tensión y el valor de corriente se podrá obtener mediante la ley de ohm el valor de resistencia.

El electrodo de corriente, se debe colocar a una distancia sustancial del sistema de puesta a tierra, para minimizar la influencia entre electrodos. Los tres electrodos se mantienen en una línea recta y se va corriendo el electrodo de potencial para hacer sucesivas mediciones de resistencia.

Este método es recomendado para subestaciones de alta tensión, plantas industriales y estaciones de generación, donde los valores de resistencia generalmente son menores a 1Ω . En la figura 2.4 se muestra la representación del método.

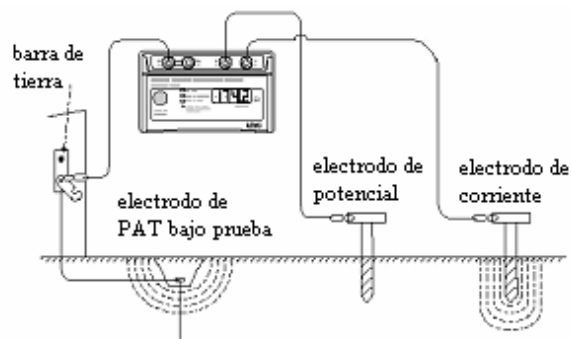


Figura 2.4 Método de la caída de potencial [3]

2.3.3.1.3 Método de los Tres Puntos o Triangulación.

Consiste en enterrar dos electrodos, con resistencias R_y y R_z respectivamente, estos dos electrodos se colocan de tal forma que conformen un triángulo con el electrodo en estudio, como se muestra en la figura 2.5. Se miden las resistencias entre cada electrodo y luego se determina la resistencia del electrodo en estudio, R_x , mediante la siguiente ecuación:

$$R_x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} \quad (2.1)$$

Donde R_1 , R_2 y R_3 quedan determinadas por las fórmulas:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_x + R_y \\ R_2 &= R_x + R_z \\ R_3 &= R_y + R_z \end{aligned} \quad (2.2)$$

Este método es apropiado para medir valores de resistencia de electrodos aislados, resistencias de las bases de las torres o puesta a tierra de pequeñas instalaciones. No es conveniente para medidas de resistencia baja como las de mallas de puesta a tierra de subestaciones grandes. En la figura 2.5 se ilustra la ubicación de los electrodos.

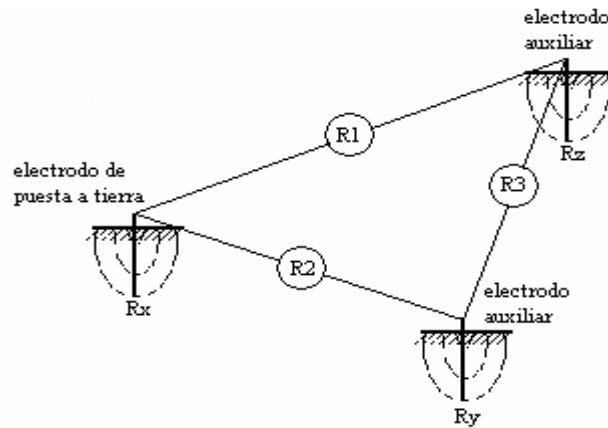


Figura 2.5 Método de los tres puntos o triangulación [3]

Cuando se realicen mediciones mediante este método se debe tratar de utilizar electrodos auxiliares que se presuman sean de resistencia similar al electrodo en estudio, para obtener mejores resultados. Igualmente los electrodos auxiliares deben ser clavados de modo tal que queden todos los electrodos lo suficientemente alejados y no se solapen las áreas de influencia de la resistencia de cada uno y evitar resultados errados.

2.3.3.1.4 Medición con el uso de Pinzas Amperimétricas

Para realizar mediciones con este método, no se requiere el uso de electrodos auxiliares. Se pueden medir puestas a tierras individuales en sistemas de puesta a tierra múltiple, mediante el uso de dos pinzas (transformadores de corriente).

La primera pinza induce un voltaje en el circuito mientras la segunda pinza mide la corriente que circula, permitiendo al equipo de medición calcular la resistencia de ese camino a tierra. También existen pinzas que pueden realizar todo el trabajo, es decir, con una sola pinza se puede lograr la generación del voltaje que induce una corriente y ésta es leída por la misma pinza.

Mediante este procedimiento sólo se mide la resistencia de un electrodo simple en paralelo con un sistema de puesta a tierra. Si el sistema de puesta a tierra no está en paralelo a tierra, entonces se puede tener un circuito abierto o estar midiendo un lazo. En la figura 2.6 se muestra el circuito para la medición con pinzas amperimétricas.

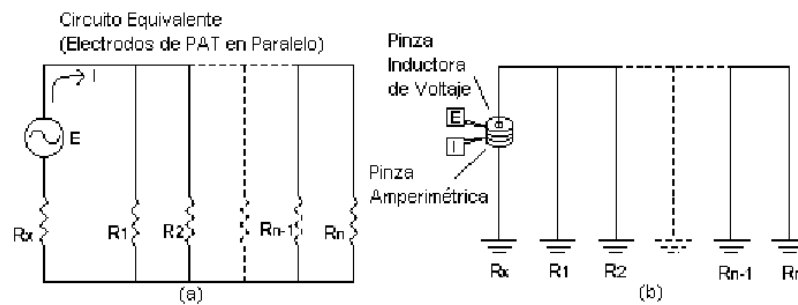


Figura 2.6 Medición de resistencia sin el uso de electrodos (a) Circuito equivalente (b) Ubicación de pinzas de voltaje y corriente [3]

2.4 Conductores de tierra

Hay dos tipos principales de conductores de tierra:

- Conductores de protección
- Electrodo de tierra

2.4.1 Conductor de Protección

Es un conductor separado instalado con cada circuito y está presente para asegurar que parte o toda la corriente de falla regrese a la fuente a través de él. Puede ser un conductor individual, la cubierta metálica exterior de un cable o la estructura de un ducto metálico.

2.4.2 Electrodo de Tierra

El electrodo de tierra es el componente del sistema de puesta a tierra que está en contacto directo con el terreno para proporcionar un medio para disipar cualquier tipo de corriente de fuga a tierra. En sistemas puestos a tierra se requerirá normalmente llevar una corriente de falla bastante grande por un corto periodo de tiempo y, en consecuencia, se necesitará tener una sección suficientemente grande como para ser capaz de llevar esta corriente en forma segura. Los electrodos deben tener propiedades mecánicas y eléctricas adecuadas para continuar funcionando de forma adecuada durante un periodo de tiempo relativamente largo. El material debe tener una buena conductividad eléctrica y no corroerse dentro de un amplio rango de condiciones del suelo. Los materiales usados incluyen cobre, acero galvanizado, acero inoxidable, entre otros.

2.5 Arreglos de Sistemas de Puesta a Tierra

Existen arreglos de los sistemas de puesta a tierra: Arreglos simples y complejos. Los simples consisten en un electrodo aislado enterrado, y los complejos consisten en un conjunto de electrodos interconectados, mallas, platos de tierra y lazos o anillos de tierra. Estos últimos son instalados generalmente en subestaciones, oficinas centrales y centro de telecomunicaciones.

2.5.1 Barras

Esta es la forma más común de electrodos, porque su costo de instalación es relativamente barato y pueden usarse para alcanzar en profundidad, suelo de baja resistividad, sólo con excavación limitada y relleno. Existen diversos tamaños, longitudes, diámetros y materiales. La barra es de cobre puro o de acero recubierto de

cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero usado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente; esto último asegura que el cobre no se deslice al enterrar la barra.

Mediante la ecuación 2.3 se puede obtener la resistencia de una barra o electrodo simple

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \left(4 \cdot \frac{L}{a} \right) - 1 \right) \quad (2.3)$$

Donde:

P: Resistividad del suelo (ohm-cm)

L: Longitud del conductor

a: Radio del electrodo

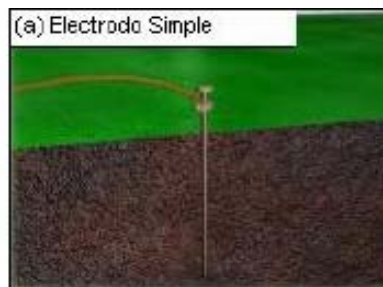


Figura 2.7 Electrodo simple (barra) [1]

2.5.2 Platos

Para propósitos de puesta a tierra se usan varios tipos de placas, pero generalmente el único que se considera debe ser sólido y de tamaño sustancial. Los platos son típicamente cuadrados y construidos de materiales como hierro fundido o de cobre, tal como se muestra en la figura 2.8. Tienen un mínimo de 12 mm de

espesor con dimensiones de 915 ó 1220 mm por lado. El empleo de platos es poco común porque la mayor parte de la corriente de paso se concentra en las aristas, que tienen una superficie total muy pequeña.

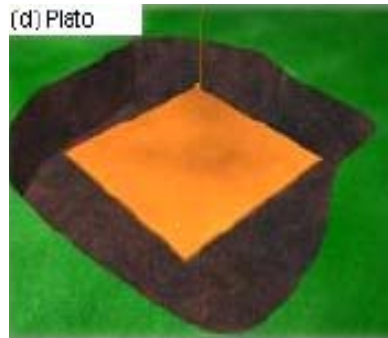


Figura 2.8 Plato de tierra [1]

2.5.3 Mallas

Es un reticulado formado por la unión de conductores horizontales, normalmente según direcciones perpendiculares y uniformemente espaciados, incluyendo eventualmente conductores verticales (barra). Se utiliza generalmente cuando el objetivo principal de la puesta a tierra es mantener un control de potenciales en la superficie del terreno, con un valor bajo de resistencia. En la figura 2.9 se aprecia la disposición de una malla de tierra.

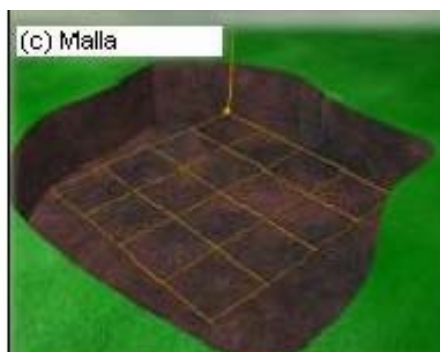


Figura 2.9 Malla de tierra [1]

Para realizar el cálculo de la resistencia para un sistema de mallas, se tienen las siguientes ecuaciones:

- Expresión de Laurent IEEE 80 año 1986

$$R = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}}} \right] \quad (2.4)$$

- Expresión de Severat IEEE 80-2000

$$R_g = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \left[1 + \frac{1}{\left(1 + h \sqrt{\frac{20}{\pi}} \right)} \right] \right] \quad (2.5)$$

Donde:

S: Área de terreno (m²)

L_T: Longitud total de conductores (m)

Expresión de Schwarz IEEE 80-2000

$$R_g = \frac{R1 \cdot R2 - Rm^2}{R1 + R2 - 2Rm} \quad (2.6)$$

Donde:

$$R1 = \frac{1}{\pi \cdot Lc} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot Lc}{a'} \right) + \frac{K1 \cdot Lc}{\sqrt{A}} - K2 \right] \quad (2.7)$$

$$R2 = \frac{\rho}{\pi \cdot Lc} \left[\ln\left(\frac{4 \cdot L_r}{b}\right) - 1 + \frac{2 \cdot K1 \cdot Lr}{\sqrt{A}} (n_R - 1)^2 \right] \quad (2.8)$$

$$Rm = \frac{\rho}{\pi \cdot Lc} \left[\ln\left(\frac{4 \cdot L_c}{L_r}\right) + \frac{K1 \cdot Lc}{\sqrt{A}} - K2 + 1 \right] \quad (2.9)$$

Donde:

R1: Resistencia de todos los conductores de la malla (ohm)

R2: Resistencia de todos los electrodos de la malla (ohm)

Rm: Resistencia mutua entre R1 y R2

ρ : Resistividad (ohm-m)

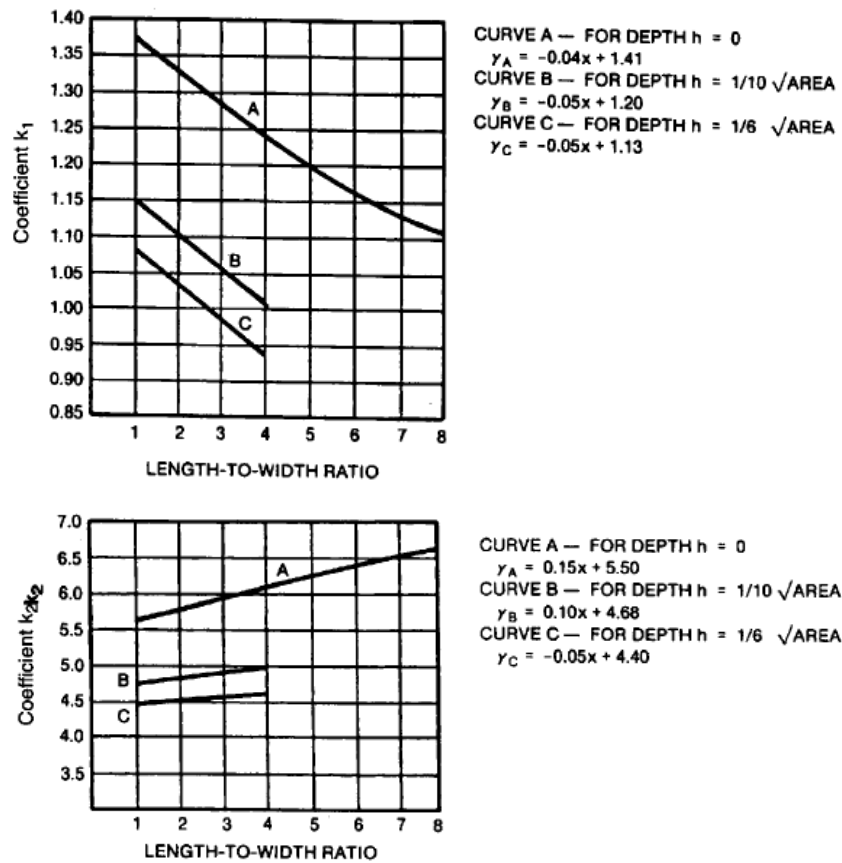
Lc: Longitud total de los conductores de la malla (m)

a: $\sqrt{a \cdot 2h}$ para conductores enterrados a una profundidad h

2^a: Diámetro del conductor

A: Área cubierta por los conductores (m²)

K1 y K2: Coeficientes de Schwarz, mostrados en la figura 2.10



—Coefficients k_1 and k_2 of Schwarz's formula:
(a) coefficient k_1 , (b) coefficient k_2

Figura 2.10 Coeficientes de Schwarz [1]

Lr: Longitud de cada electrodo (m)

2b: Diámetro del electrodo (m)

n_f : Número de electrodos

2.5.4 Electrodo Horizontales

Están hechos de cintas de cobre de alta conductividad o conductores trenzados desnudos, enterrados a cierta profundidad, generalmente 1.5 metros; son relativamente fácil de instalar, pero abarcan gran cantidad de terreno. Este tipo de electrodos son utilizados frecuentemente en líneas de transmisión, debido a que la mayoría de estas líneas se extienden en terrenos poco poblados, y son robados constantemente. En la figura 2.11 se puede apreciar el electrodo horizontal.

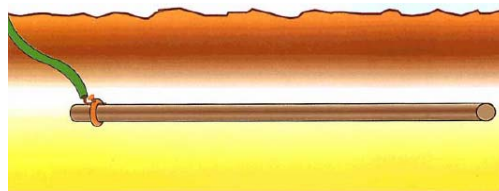


Figura 2.11 Electrodo horizontal [1]

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot L} \left[\left(\ln \left(4 \frac{L}{A} \right) + \ln \left(4 \cdot \frac{L}{S} \right) - 2 \right) + \frac{S}{2 \cdot L} - \frac{S^2}{16 \cdot L^2} + \frac{S^4}{51} \right] \quad (2.10)$$

Donde:

S/2: Profundidad (m)

2L: Longitud del conductor horizontal (m)

2.5.5 Anillos

Un anillo de tierra consiste en un conductor de cobre desnudo, de sección transversal no menor al calibre 2 AWG (por resistencia mecánica) y de longitud no menor a 6 m, enterrado a una profundidad de 800 mm y, que rodea al edificio o estructura. Estos anillos de tierras se emplean frecuentemente circundando una

fábrica o un sitio de comunicaciones, para proveer un plano equipotencial alrededor de edificios y equipos; tal como se muestra en la figura 2.12.

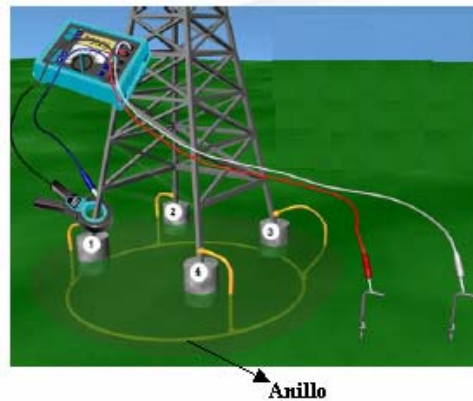


Figura 2.12 Anillo de tierra [1]

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi^2 \cdot D} \cdot \left[\text{Ln} \left(8 \frac{D}{d} \right) + \text{Ln} \left(4 \frac{D}{S} \right) \right] \quad (2.11)$$

Donde:

D: Diámetro del anillo (m)

S/2: Profundidad (m)

2.5.6 Electrodo activo

También conocido como raíz electrolítica, consiste en un tubo de cobre, parcialmente lleno de sales o sustancias conductivas, con perforaciones en los extremos superior (para ventilación) e inferior (para drenajes), y sellado ambos extremos con tapas, ver figura 2.13.

La humedad existente en el aire ingresa por las perforaciones de ventilación, entra en contacto con la sal o sustancia conductiva formando una solución

electrolítica que escurre hacia la parte inferior del tubo y fluye a través de las perforaciones de drenaje hacia el suelo circundante, mediante ósmosis. De este modo el electrolito forma raíces en el terreno que lo rodea, las cuales ayudan a mantener su impedancia en un nivel bajo.

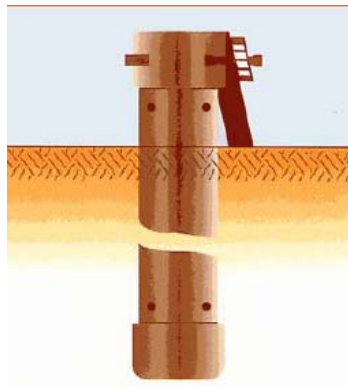


Figura 2.13 Electrodo activo o raíz electrolítica [1]

2.6 Resistividad en Sistemas de Puesta a Tierra

2.6.1 Aspectos generales

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. Este parámetro es el factor clave que determina cuanta será la resistencia del electrodo de tierra que se coloque en el suelo, y a que profundidad se deberá enterrar. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición. En la tabla 2.2 se muestran valores de resistividad típicos de algunos tipos de suelos.

TABLA 2.2 Valores típicos de resistividad según el tipo de suelo [2]

Tipo de terreno	Valores típicos de resistividad ($\Omega\text{-m}$)
Agua de mar	1-10
Terrenos vegetales húmedos	10-50
Arcillas, gravas, limos	20-60
Arenas arcillosas	80-200
Fangos, turbas	150-300
Arenas	250-500
Suelos pedregosos (poca vegetación)	300-400
Rocas	1000-10000
Granito	10000-50000

Conocer la resistividad del suelo tiene los siguientes propósitos:

- Estimación de la resistencia de puesta a tierra de una estructura o un sistema.
- Estimación de gradientes de potencial, incluyendo voltajes de toque y paso.
- Cálculo del acoplamiento inductivo entre circuitos de potencia y comunicación cercanos.

Existen factores que afectan la resistividad del suelo, los principales son la porosidad y el contenido de agua. La porosidad es un término que describe el tamaño y número de huecos dentro del material, lo cual está relacionado con su tamaño de

partícula y diámetro del poro. Varía entre 80 y 90% en el sedimento de lagos, hasta 30 y 40% en el caso de arena y arcilla no consolidada.

El contenido de agua varía estacionalmente y es probable que origine variaciones en la impedancia del sistema de tierra; un incremento provoca una reducción drástica de la resistividad, hasta alcanzar un 20% del nivel original cuando el efecto tiende a estabilizarse. Minerales y sales disueltas en el agua pueden ayudar a reducir aún más la resistividad, particularmente cuando éstas están produciéndose en forma natural y no terminan diluyéndose con el tiempo.

También la temperatura tiene una influencia importante en la resistividad del terreno y luego en el comportamiento del sistema de tierra. En la figura 2.14 se puede apreciar la variación de la resistividad con la humedad, temperatura y concentración de sales.

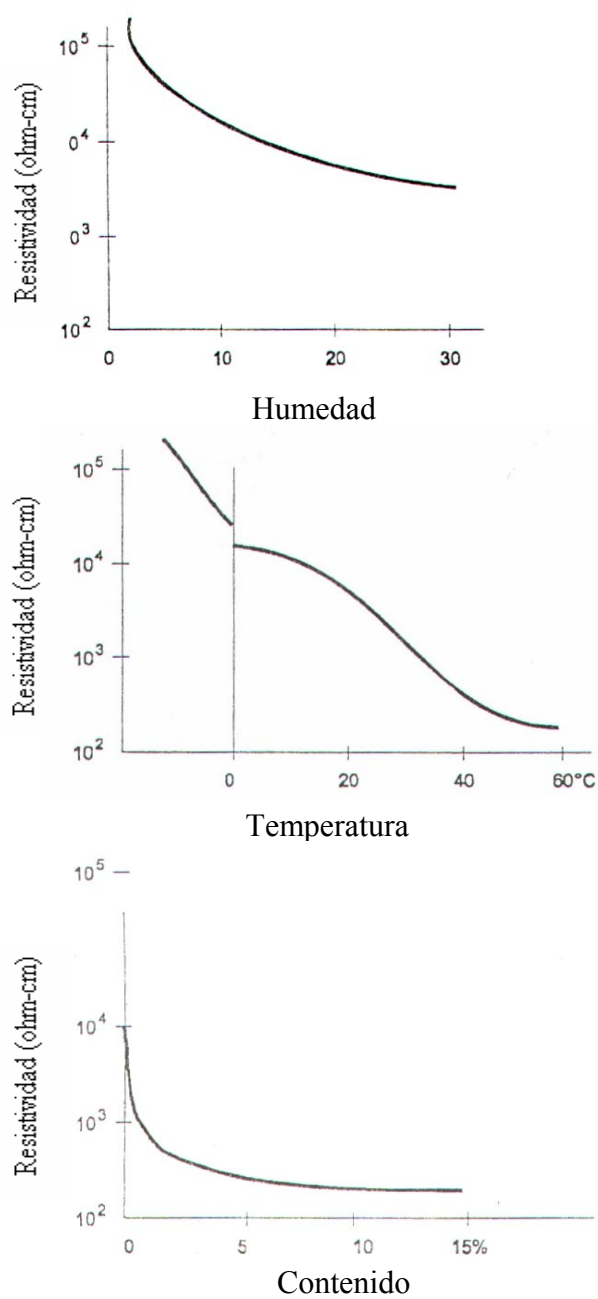


Figura 2.14. Variación de la resistividad con la humedad, temperatura y concentración de sales [2]

2.6.2 Métodos para mejorar la Resistividad del Terreno

En aquellos terrenos donde la resistividad no alcanza los valores exigidos, se hace necesario utilizar métodos no convencionales para reducir la resistividad. Anteriormente los elementos químicos utilizados fueron cloruro de sodio (sal común), sulfato de magnesio (sales de epsom), sulfato de cobre, bicarbonato de sodio (soda de lavar) y cloruro de calcio. Estos elementos se esparcían en torno a los electrodos y se disolvían agregando agua antes del relleno o se dejaba que el flujo de agua natural (lluvia) los disolviera.

Actualmente se usan otros materiales de relleno, que son no corrosivos y ayudan a retener la humedad; entre los cuales se pueden mencionar:

- Bentonita: Es una arcilla de color pardo, de formación natural, levemente alcalina, con un ph de 10.5. Puede absorber casi cinco veces su peso de agua, reteniéndola y de este modo expandirse hasta treinta veces su volumen seco. Tiene baja resistividad (aproximadamente 5 Ω -m) y no es corrosiva. Se usa a menudo como material de relleno al enterrar barras profundas porque se compacta fácilmente y se adhiere fuertemente.
- Yeso: Este material se usa como material de relleno, debido a que tiene baja solubilidad y por lo tanto no se desprende fácilmente lavándolo y su resistividad aproximada es de 5- 10 Ω -m. Es virtualmente neutro con un ph entre 6.2 y 6.9, se presenta de forma natural, de forma que su uso no provoca impactos ambientales.

- Marconita: Es un concreto conductivo en el cual un agregado carbonáceo reemplaza el agregado normal usado en la mezcla de concreto. Tiene propiedades similares a la bentonita, es decir provoca baja corrosión con ciertos metales y tiene baja resistividad.

Cuando la marconita se mezcla con concreto, su resistividad puede bajar tanto como a $0.1 \Omega\text{-m}$ y mantiene la humedad aún bajo condiciones muy secas, de modo que en climas cálidos se ha utilizado como una alternativa a la bentonita.

2.6.3 Medición de la Resistividad del Terreno

La resistividad del terreno es de importancia decisiva en el diseño de una puesta a tierra y la única forma de conocerla con exactitud es mediante medidas directas de campo. Para realizarlas se debe considerar al terreno formado por capas o estratos, como se muestra en la figura 2.15.

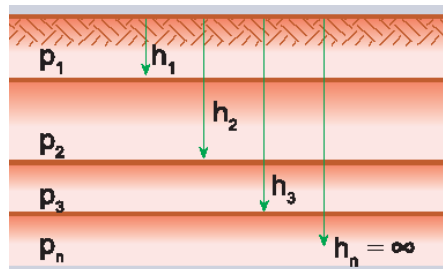


Figura 2.15 Suelo de varios estratos o capas [2]

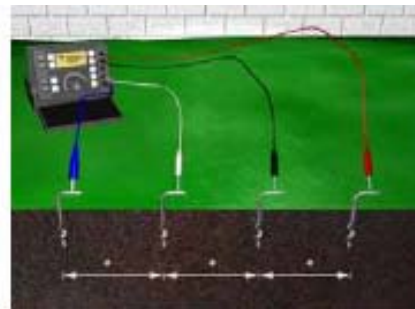
Los métodos más utilizados para realizar mediciones de resistividad son:

- Método de Wenner
- Método de Schlumberger

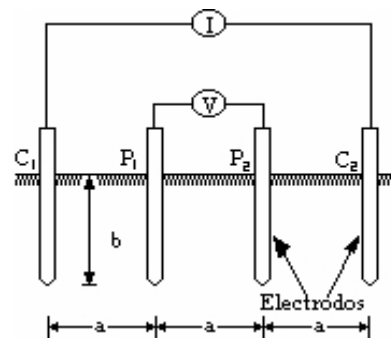
2.6.3.1 Método Wenner

Este método fue desarrollado por Frank Wenner en 1915. Consiste en medir la resistividad del suelo insertando 4 electrodos en línea recta y equidistante a una determinada distancia, como se muestra en la figura 2.16.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos de corriente (C_1 y C_2), mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos de potencial (P_1 y P_2). La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. Las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y las medidas de resistencia aparente, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.



(a)



(b)

Figura 2.16. (a) Funcionamiento del método Wenner (b) Disposición de los electrodos para el método Wenner [2]

La resistividad aparente del terreno está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot A \cdot R}{\left[1 + \left[\frac{2 \cdot A}{(A^2 + 4 \cdot B^2)^{0.5}} \right] - \frac{2 \cdot A}{(4 \cdot A^2 + 4 \cdot B^2)^{0.5}} \right]} \quad (2.12)$$

Donde:

ρ = Resistividad aparente (ohm-m)

A = Distancia entre electrodos (m)

B = Profundidad de enterrado de los electrodos (m)

R = Lectura del instrumento (ohm)

Si la distancia enterrada (B) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A). Es decir $A \gg B$, la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot R \quad (2.13)$$

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

2.6.3.2 Método de Schlumberger

Este método también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación (a) entre los electrodos centrales o de potencial (P_1 y P_2) se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores de corriente

(C_1 y C_2) a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos (na) de la separación base de los electrodos internos.

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método Wenner. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son poco inteligentes. Solamente se recomienda hacer mediciones a 90 grados para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas. La configuración de los electrodos correspondientes a este método de medición se muestra en la figura 2.17.

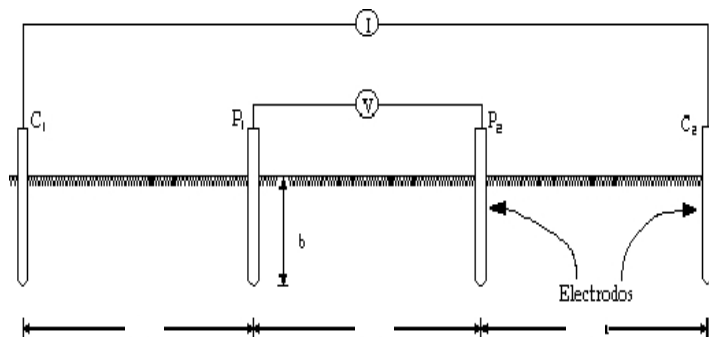


Figura 2.17 Disposición de los electrodos_[2]

2.6.4 Interpretación de Mediciones

Debido a que generalmente el suelo es de naturaleza estratificada y las medidas de resistividad no entregan un resultado definitivo sino solamente un parámetro de valor aparente, que está en función de la geometría de los circuitos de corriente y potencial utilizados, y de la profundidad del clavado de los electrodos que participan, es necesario contar con un juego de puntos de medida que deben someterse a una interpretación y seguir un procesamiento.

Cualquiera que sea el método de medición empleado, se debe realizar una gráfica en función de la resistividad aparente y la distancia de separación de los electrodos de prueba; la cual arrojará resultados de acuerdo a la formación geológica y el clima imperante. Pueden esperarse los tipos de curvas mostrados en la figura 2.18.

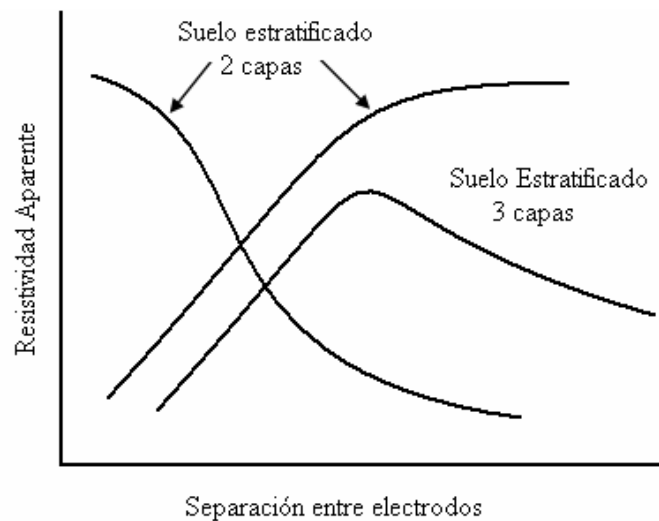


Figura 2.18 Variaciones posibles de la resistividad aparente con la separación entre electrodos [2]

Dado que las medidas de Resistividad en el Campo se realizan en medio de condiciones naturales propias del suelo y condiciones materiales, objetivas y subjetivas dependientes del operador, los puntos graficados muchas veces no siguen como es de esperarse una directriz bien definida, ya sea descendente o ascendente (suelo de Dos Estratos); las causas mas usuales de las incoherencias se explican en la siguiente forma:

- Puntos iniciales desfasados: Cuando las medidas se hacen con distancias inferiores a 1,0 m con el Método de WENNER, pueden obtenerse puntos desfasados debidos generalmente a la presencia de una capa delgada de muy

alta resistividad que cubre el estrato superficial; en tales casos se debe desestimar dicho punto.

- Puntos intermedios aberrantes: Descartando posibles deficiencias en la medida, y entendiéndose que en un suelo natural no existen objetos enterrados ni ningún tipo de canalización, las desviaciones podrán atribuirse a la presencia de humedad local subterránea (baja resistividad) o de rocas aflorantes (alta resistividad); en tales casos se reencausan dichos puntos y se anota la observación como una advertencia para la obra.

2.6.4.1 Método Analítico del Tagg

El método de Tagg brinda la solución a partir de un esquema de dos estratos, considerando que toda inyección de corriente, origina una respuesta, con la aparición de una serie infinita de imágenes que se reflejan en las interfases Estrato-Estrato (factor de Reflexión K) y Estrato-Aire ($K = 1$), definiendo una expresión analítica de convergencia, que permite determinar los parámetros del suelo a partir de la sucesión de puntos.

$$K = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (2.14)$$

Donde:

K = Factor de Reflexión, para suelo de dos estratos

ρ_1 = Resistividad del primer estrato

ρ_2 = Resistividad del segundo estrato

El factor de reflexión K puede tener valores positivos o negativos, todo depende de la tendencia de la curva de resistividad aparente versus distancia de separación de los electrodos. Si la curva tiene forma descendente (ver figura 2.17), entonces la

resistividad del primer estrato es mayor que la del segundo ($\rho_1 > \rho_2$) y el factor de reflexión K sería negativo; por otro lado si la forma de la curva es ascendente (ver figura 2.17), entonces la resistividad del segundo estrato es mayor que la del primero ($\rho_1 < \rho_2$) y el factor de reflexión K sería positivo.

En la figura 2.19 y 2.20 se muestran las curvas estándar para valores positivos y negativos de K

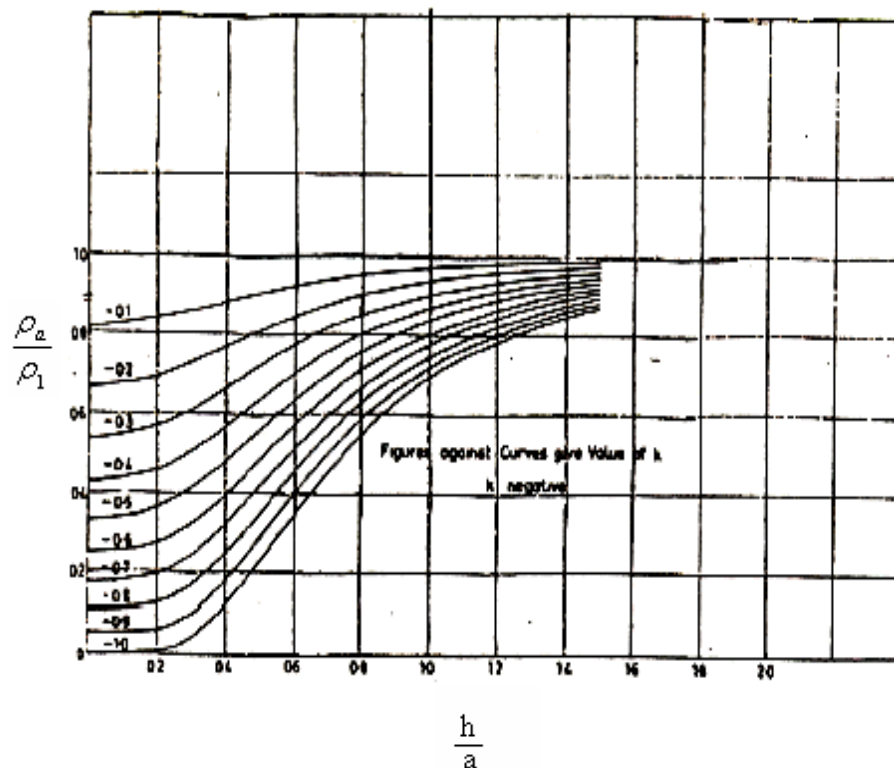


Figura 2.19 Curva estándar para valores negativos de K [5]

Es importante resaltar que para valores positivos de K, primero se debe obtener σ_a , que es la conductividad aparente del terreno.

$$\sigma_a = \frac{1}{\rho_a}$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{\rho_1}$$

Donde:

σ_a = Conductividad aparente

ρ_a = Resistividad aparente

σ_1 = Conductividad del primer estrato

ρ_1 = Resistividad del segundo estrato

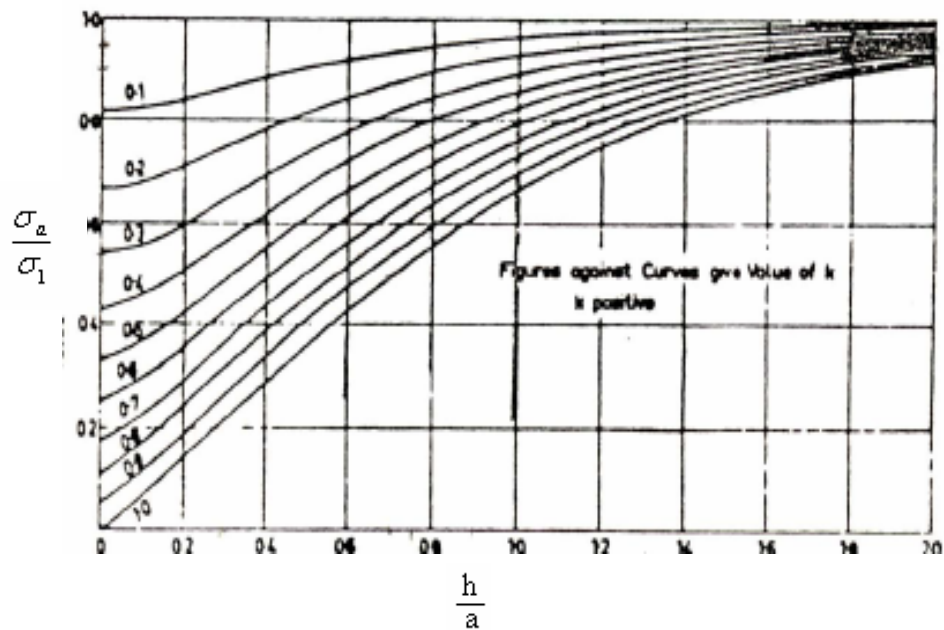


Figura 2.20. Curvas estándar para valores positivos [5]

2.7. Observaciones y Consideraciones sobre Sistemas de Conexión a Tierra Reales (SCT).

Para una mejor comprensión del concepto de resistencia a tierra se ha utilizado un SCT en forma de hemisferio en un terreno homogéneo, esto simplificó los cálculos en aras de una mejor claridad del concepto. En el caso de SCT utilizados en la práctica, la geometría dista mucho de ser hemisférica. Se utilizan barras enterradas verticalmente, conductores enterrados horizontalmente la mayoría de las veces formando mallas, y en algunos casos una combinación de mallas y barra verticales. El terreno por lo general es heterogéneo con variaciones verticales y laterales de resistividad. Ante este panorama cabe preguntarse si los conceptos obtenidos con un SCT idealizado permanecen vigentes.

Afortunadamente la respuesta es positiva. En el caso de terrenos homogéneos, aún cuando la geometría del SCT no posea simetría alguna, se puede especular sobre la existencia de un *electrodo hemisférico equivalente* que presenta un valor de resistencia a tierra igual al del SCT real. Se maneja la hipótesis que un SCT de cualquier geometría visto desde una distancia muy grande puede considerarse como un electrodo hemisférico de radio desconocido. En el caso extremo desde una distancia muy grande como un punto de inyección de corriente.

Los perfiles de voltaje fuera del SCT serán similares a los de un electrodo hemisférico equivalente. Diferencias sustanciales existen en la zona perimetral del SCT. En la zona interna de un SCT los perfiles de voltaje son más complejos debido a la influencia de los componentes del SCT. En la figura 2.21 se muestra un SCT formado por un rectángulo enterrado horizontalmente.

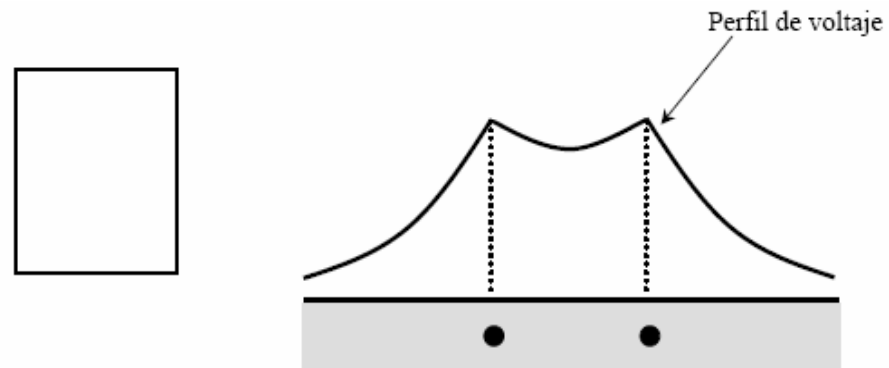


Figura 2.21. SCT por un rectángulo enterrado horizontal [5]

Es de notar que los puntos correspondientes al conductor tienen el mismo potencial. Es decir todo el perímetro del rectángulo, y los equipos conectados a él están al mismo potencial. Los perfiles de voltaje dentro y fuera del SCT son diferentes como se indica en la figura 2.21. Si existe una variación lateral de la resistividad ésta modificará la pendiente del perfil de voltaje, ya que la distribución de corrientes está afectada por los cambios de resistividad.

2.8. Voltaje de paso, de contacto y transferido

Con la ayuda del perfil de voltaje se pueden caracterizar las condiciones peligrosas asociadas a la circulación de corrientes al terreno por medio del SCT. Se han caracterizado tres condiciones peligrosas para el personal y equipo que se encuentran en las inmediaciones de un SCT por el que fluye una corriente a tierra: voltaje de paso, voltaje de contacto y voltaje transferido. En la figura 2.22 se muestran ejemplos de estas situaciones.

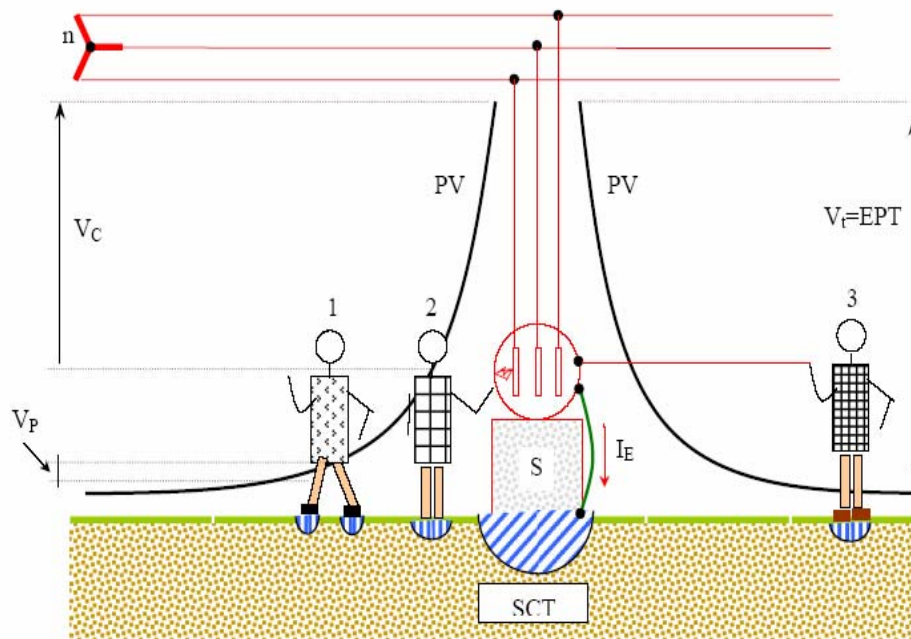


Figura 2.22. Voltaje de paso, voltaje de contacto y voltaje transferido [5]

2.8.1.- Voltaje de Paso

Es la diferencia de potencial existente entre los pies de una persona, separados 1m, cuando se encuentran sobre líneas de potencial diferentes.

Considerando el circuito equivalente de la Figura 2.22, se puede calcular:

$$V_{paso} = (R_{ch} + 2 * R_c) * I_{choque} \quad (2.17)$$

Luego la tensión de paso máxima generada por el defecto no debe producir una corriente de choque mayor a la limitada por la ecuación de Dalziel, y por tanto la tensión de paso máxima permitida será:

$$V_{\text{paso50}} = (1000 + 6 * \rho_s * c_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.18)$$

$$V_{\text{paso70}} = (1000 + 6 * \rho_s * c_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (2.19)$$

Vpaso 50: voltaje de paso máximo permisible para una persona con un peso aproximado de 50 kg.

Vpaso 70: voltaje de paso máximo permisible para una persona con un peso aproximado de 70 kg.

Luego el voltaje de paso máximo de un sistema de puesta a tierra puede calcularse como

$$V_{\text{max}(spat)} = (R_1 + R_2 + R_3) * I_F = R_T * I_F \quad (2.20)$$

Y por lo tanto es razonable imponer que:

V máximo del sistema de puesta a tierra < Vpaso máximo

2.8.2.- Voltaje de Toque

Es la diferencia de potencial entre un punto del elemento conductor, situado al alcance de la mano de una persona y un punto en el suelo situado a 1m de la base de dicho elemento.

Considerando el circuito equivalente de la Figura 2.22, se puede calcular:

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) * I_{choque} \quad (2.21)$$

Donde:

R_{ch} : Resistencia del cuerpo humano (1000 Ω).

R_c : Resistencia de contacto $\approx 3 * \rho_s * C_s$.

C_s : Factor de reducción.

ρ_s : Resistividad del material superficial (piedra picada) en Ω -m.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (2.22)$$

Donde:

ρ : Resistividad del suelo en Ω -m.

Luego considerando como corriente de choque máxima que no causa fibrilación ventricular para una persona, la definida por la ecuación de Dalziel:

$$I_{choque50} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.23)$$

$$I_{choque70} = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (2.24)$$

Donde t es el tiempo de permanencia del defecto en segundo, e I_{choque} se expresa en Amp.

$I_{\text{choque 50}}$: corriente de choque máximo permisible para una persona con un peso aproximado de 50 kg.

$I_{\text{choque 70}}$: corriente de choque máximo permisible para una persona con un peso aproximado de 70 kg.

La tensión de toque máxima generada por el defecto no debe producir una corriente de choque mayor a la limitada por dicha ecuación, y por tanto la tensión de toque máxima permitida será:

$$V_{\text{toque50}} = (1000 + 1.5 * \rho_s * c_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (2.25)$$

$$V_{\text{toque70}} = (1000 + 1.5 * \rho_s * c_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (2.26)$$

$V_{\text{toque 50}}$: voltaje de toque máximo permisible para una persona con un peso aproximado de 50 kg.

$V_{\text{toque 70}}$: voltaje de toque máximo permisible para una persona con un peso aproximado de 70 kg.

Luego la tensión máxima de un sistema de puesta a tierra puede calcularse como:

$$V_{\max(\text{spat})} = (R_1 + R_2) * I_F = R_T * I_F \quad (2.27)$$

Por lo tanto es razonable imponer que:

V máximo del sistema de puesta a tierra < V toque máxima

2.8.3 Voltaje Transferido

Esta es una forma particular del voltaje de contacto, agravado por el hecho de que la persona está en un punto distante del SCT, y no en sus inmediaciones como en los casos anteriores. La diferencia de potencial a que está sometida la persona 3 es mayor que la de los casos anteriores. En el caso extremo de una persona ubicada en un punto remoto, la diferencia de potencial a la cual estará sometida será la denominada *Elevación del Potencial de Tierra(EPT)*, conocida por sus siglas en idioma inglés *GPR(Ground Potential Rise)*. El potencial EPT de un SCT es el potencial que adquiere respecto a un punto remoto, cuando circula por él una corriente de determinado valor hacia el terreno.

2.9. Voltajes de Toque y de Paso en la Periferia (Em, Es)

2.9.1. Voltaje de Toque (Em)

El voltaje de toque en la periferia considerado es la diferencia de potencial en voltios, que se produce en el centro de una retícula de la esquina de la malla de puesta a tierra. Esta consideración se remite al hecho de que en las esquinas de la malla es

donde se producen los gradientes de potencial más peligrosos. El voltaje de toque en la periferia se determina según la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{K_m * K_i * \rho * I_G}{L} \quad (2.28)$$

Donde:

Km: Factor de espaciamiento para el voltaje de toque.

Ki: Factor de corrección de irregularidad.

ρ : Resistividad del suelo.

IG: Corriente máxima drenada por la malla.

L: Longitud total del conductor

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * \left[\text{Ln} \left(\frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D + 2 * h)^2}{8 * D * d} - \frac{h}{4 * d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} * \text{Ln} \left(\frac{8}{\pi * (2 * n - 1)} \right) \right] \quad (2.29)$$

Donde:

h: Profundidad de enterramiento.

d: Diámetro del conductor.

D: Valor de espaciamiento entre conductores enterrados paralelos (reticulado).

n: Numero de conductores paralelos.

Kii: Correctivo que pondera el factor que se adapta para los efectos de conductores interiores sobre la malla de esquina, método simplificado.

Kh: Correctivo que pondera el factor que enfatiza los efectos de la profundidad de cuadrícula método simplificado

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad (2.30)$$

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p} \quad (2.31)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}} \quad (2.32)$$

$$n_c = n_d = 1$$

Donde:

nc: 1 para mallas cuadradas y rectangulares

nb: 1 para mallas cuadradas, rectangulares y en L

Lc: Longitud total del conductor de la malla

Lp: Longitud del perímetro de la malla

A: Es el area ocupada por la malla en m²

Para mallas con barras en las esquinas y a lo largo del perímetro, como también a lo largo del perímetro y a través del área de la malla.

Kii: 1

Para mallas sin barras, pocas barras en las esquinas y perímetro:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}} \quad (2.33)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (2.34)$$

h_0 : 1m (profundidad de referencia de la malla).

El factor de corrección de irregularidad (K_i), toma en cuenta la no uniformidad del flujo de corriente en las diferentes partes de la malla.

Su presencia es necesaria en vista de que el desarrollo del modelo matemático compuesto por "n" conductores no se toma en cuenta completamente los efectos de la geometrías de la malla, esto es para dos grupos de conductores paralelos que son perpendiculares entre si y están conectados en los puntos de intersección.

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n \quad (2.35)$$

Luego, la corriente seleccionada para el diseño de la malla (I_G) se obtiene de la siguiente fórmula:

$$I_G = I_0 * S_f * D_f * C_P \quad (2.36)$$

Donde:

I_0 : Corriente máxima de falla monofásica en amperios.

S_f : Factor de reducción o de división de la corriente de falla a tierra.

D_f : Factor de corrección o decrecimiento que toma en cuenta el efecto de la corriente DC desplazada, es una componente de falla simétrica.

C_p : Factor de corrección para tomar en cuenta el crecimiento futuro del sistema.

El factor de división de corriente (S_f) se puede obtener de las siguientes figuras 2.23 y 2.24 según la IEEE-80 2000, en ellas se muestran las curvas del factor de división de corriente que se toma dependiendo de la resistencia de tierra, la cantidad de líneas de transmisión y distribución que se tengan.

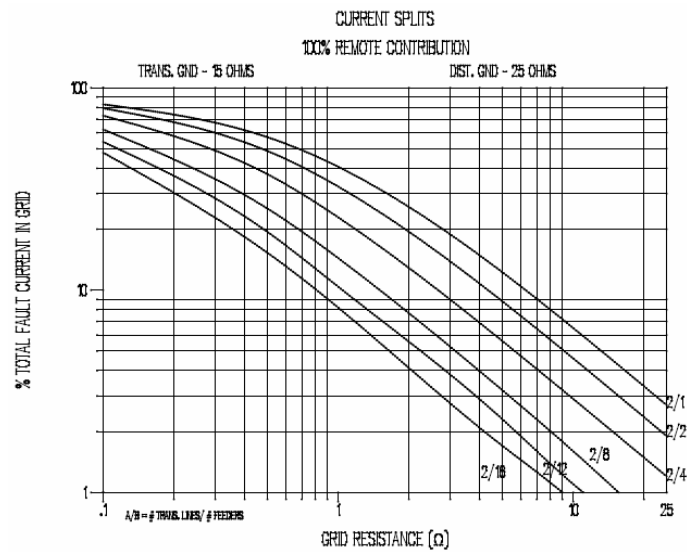


Figura 2.23. Curvas del Factor de división de Corriente Aproximado para 25 Ω [7]

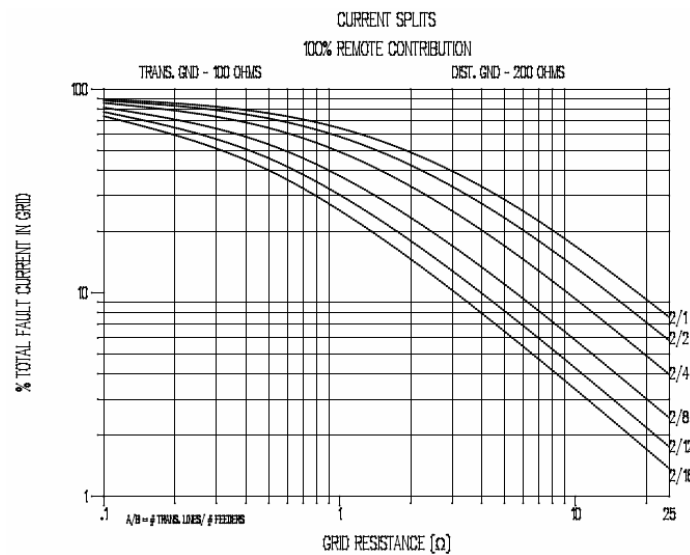


Figura 2.24. Curvas del Factor de división de Corriente Aproximado para 100 Ω [7]

El factor de decremento (D_f) que toma en cuenta el efecto del desplazamiento de la corriente directa y la atenuación de las componentes transitorias de corriente alterna y directa de la corriente de falla.

Se determina de la siguiente ecuación:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{T_f} \left(1 - e^{-\frac{2T_f}{T_a}} \right)} \quad (2.37)$$

Para ser más práctico los valores de D_f se obtienen de la tabla 2.3 que muestra los distintos factores de decrecimiento, de acuerdo con el tiempo que dure la falla.

TABLA 2.3 Factores de Decrecimiento.[7]

Duración de falla Tf (seg)	60 Hz CICLOS	FACTOR DE DECREMENTO D_f			
		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
0.1	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.2	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.3	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.4	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.5	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068

Para el factor de seguridad por crecimiento de la subestación (C_p) resulta prudente tomar un margen adecuado para estimar los aumentos futuros de las corrientes de falla por aumento de la capacidad del sistema eléctrico o por interconexiones posteriores.

Para mallas con pocas barras de puesta a tierra en el perímetro y esquinas:

$$L = L_C + L_R \quad (2.38)$$

Donde:

LC: Longitud total del conductor de la malla.

LR: Es la longitud total de los electrodos en m.

Para mallas con barras de puesta a tierra predominantes en el perímetro y en las esquinas:

$$L = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] * L_R \quad (2.39)$$

Donde:

Lr: Es la longitud de cada electrodo en m.

Lx: Máxima dirección del conductor de la malla en x.

Ly: Máxima dirección del conductor de la malla en y.

2.9.2 Voltaje de Paso (Es)

Dentro de la malla, los voltajes pueden disminuirse (en un valor) para cualquier valor deseado, disminuyendo los intervalos de retículas de la malla. Ellos pueden hacerse cero en la teoría limitándolo al caso de una sola placa.

La situación es diferente en la zona inmediatamente externa de la periferia de la malla, donde el problema puede existir aun teóricamente para una placa sólida. Afortunadamente, una subestación puede diseñarse para eliminar la posibilidad de contacto de toque más allá de la periferia del sistema de puesta a tierra y las limitaciones sobre potenciales de paso son menos exigentes.

El voltaje de paso en la periferia se determina según la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{K_s * K_i * \rho * I_G}{L_s} \quad (2.40)$$

Donde:

KS: Factor de esparcimiento para el voltaje de paso que toma en consideración el espaciamiento y la profundidad de enterramiento de los conductores de la malla.

Ki: Factor de corrección de irregularidad.

ρ : Resistividad del suelo.

IG: Corriente máxima drenada por la malla.

LS: Longitud total del conductor.

En vista de que el voltaje de paso disminuye rápidamente con el crecimiento de la profundidad, se han derivado expresiones diferentes para el cálculo de (KS) dependiendo de la profundidad de enterramiento h . Por lo que, para una profundidad usual comprendida entre $0.25 < h < 2.5$ en metros se tiene que:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (2.41)$$

Y para $h < 0.25$ tenemos que:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} W \right] \quad (2.42)$$

Donde:

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \dots \dots \dots + \frac{1}{N+1} \quad (2.43)$$

Y si $N \geq 6$ entonces:

$$W = \frac{1}{2 * (N - 1)} + \ln(N - 1) - 0.423 \quad (2.44)$$

La longitud del conductor, para el voltaje de paso, se calcula por la siguiente ecuación:

$$L_S = 0.75 * L_C + 0.85 * L_R \quad (2.45)$$

Donde:

L_C : Longitud total del conductor de la malla en m.

L_R : Es la longitud total de los electrodos en m.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLOGICO

Este capítulo trata de la metodología aplicada para alcanzar el cumplimiento de los objetivos propuestos. Se identifica el tipo de investigación realizada, diseño, población y muestra, así como las técnicas de recolección de datos utilizadas.

3.1.- Tipo de Investigación

Esta investigación es de tipo proyectiva también conocida como proyecto factible, ya que consistió en Diagnosticar la red de puesta a tierra de la subestación eléctrica “Barbacoa II”, Para 400/230 y 34,5 KV.

3.2.- Diseño de Investigación

3.2.1.- Enfoque Metodológico

El trabajo desarrollado consiste en una investigación de tipo no experimental de campo y longitudinal de tendencia ya que se persigue la medición de un sistema de puesta a tierra en un proceso donde existen variables definidas en el contexto empresarial, laboral y productivo de la empresa CADAFE.

3.2.2.- Fuente

La fuente de esta investigación es documental y de campo. Contempla la recopilación de información, examinar la bibliografía relacionada con el tema (textos,

manuales, revistas, normas) y la información obtenida por las inspecciones y mediciones de campo.

3.3.- Población y Muestra

La población a estudiar esta compuesta por las subestaciones eléctricas de CADAFE a nivel oriental y la muestra escogida para este estudio es la subestación Barbacoa II.

3.4.- Técnicas de Recolección de Datos

En la realización de este trabajo se reviso y acumulo una serie de datos concernientes al sistema de puesta a Tierra de la subestación barbacoa II de la empresa CADAFE. La información recolectada fue teórica y práctica siendo útil para cumplir con los objetivos planteados. Las técnicas empleadas para la recolección de datos son:

- Observación Directa.
- Entrevista con el Personal.

3.4.1.- Observación Directa

Esta técnica permitió visualizar y discernir la información proveniente del sistema estudiado. También fue de gran utilidad para determinar las condiciones físicas en que se encuentra actualmente el sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica Barbacoa II.

3.4.2.- Entrevista con el Personal

Técnica con la cual se obtuvo información de parte del personal encargado de la subestación, fue muy útil ya que la información aportada por los técnicos permitió conocer en detalle las fallas operativas de mayor frecuencia, así como las condiciones de funcionamiento y operación del sistema de puesta a Tierra de la subestación Barbacoa II.

3.5 Estructura del Trabajo

Este trabajo se encuentra estructurado por cuatro (4) capítulos que describen la metodología y los pasos para realizar el proyecto.

El Capítulo 1, especifica una breve descripción de la Empresa CADAFE y de su sistema eléctrico de potencia.

El Capítulo 2, se definen los fundamentos teóricos más resaltantes de puesta a tierra utilizados en el diagnóstico de la Subestación Barbacoa II.

El capítulo 3, se hace la descripción de la metodología utilizada para la realización de este trabajo

En el capítulo 4, se muestra el procedimiento llevado a cabo para diagnosticar el sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica, a través de los cálculos matemáticos con base en la norma de CADAFE y la IEEE 80 – 2000 y la comparación hecha de estos resultados con los obtenidos a través de la simulación del

sistema con el programa ETAP en su versión 6.0.0 y así lograr los criterios técnicos mínimos aceptables para este diagnóstico.

CAPÍTULO IV

DIAGNÓSTICO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA

4.1.- Descripción del Sistema Eléctrico de Potencia de la S/E Barbacoa II

Para efectos de este trabajo la descripción del Sistema Eléctrico se basara en las instalaciones de la S/E Barbacoa II ubicada a 5Km de la población de Barbacoa al sur del Estado Anzoátegui.

Para el análisis del Sistema Eléctrico, fue necesario lo siguiente:

- Visitas a las instalaciones eléctricas.
- Revisión de planos de construcción, Diagramas unifilares.
- Registro fotográfico del Sistema eléctrico.
- Revisión de Dossier, artículos técnicos, especificaciones de proyectos, estudios anteriores.
- Consulta a operadores, supervisores sobre el funcionamiento y configuración del Sistema Eléctrico.

La Subestación Eléctrica de Barbacoa II en 400/230 KV, es una subestación tipo Nodal 400T, ya que se interconecta con otras subestaciones a través de líneas de transmisión formando una red en anillos. Abarca un área aproximada de 111370m². Las especificaciones técnicas normalizadas son:

1. Nivel de 400KV

- Dos barras con capacidad para 2600 A.
- Máximo número de tramos 400KV: 10.

- Máximo número de llegada de autotransformadores de 400KV: 6.
- Máximo número de salidas de líneas de 400KV: 6.
- Mando Disyuntor: Local-Remoto y por telemando.
- Mando seccionadores: Local-Remoto.

2. Nivel de 230KV

- 2 (dos) Barras con capacidad para 2600 A.
- Máximo número de tramos 230KV: 9.
- Máximo número de llegadas de autotransformadores a barra de 230KV: 6.
- Máximo número de salidas de líneas de 230 KV: 10.
- Mando Disyuntor: Local-Remoto, y por telemando.
- Mando Seccionadores. Local-Remoto.

La instalación tiene un esquema de operación en configuración Disyuntor y medio en 400KV y barra simple seccionada en 230KV acopladas a siete (7) autotransformadores monofásicos de 150 MVA, a niveles de voltaje 400/230KV. En la figura 4.1 se muestra el esquemático de la S/E de Barbacoa II a nivel de 400/230KV.

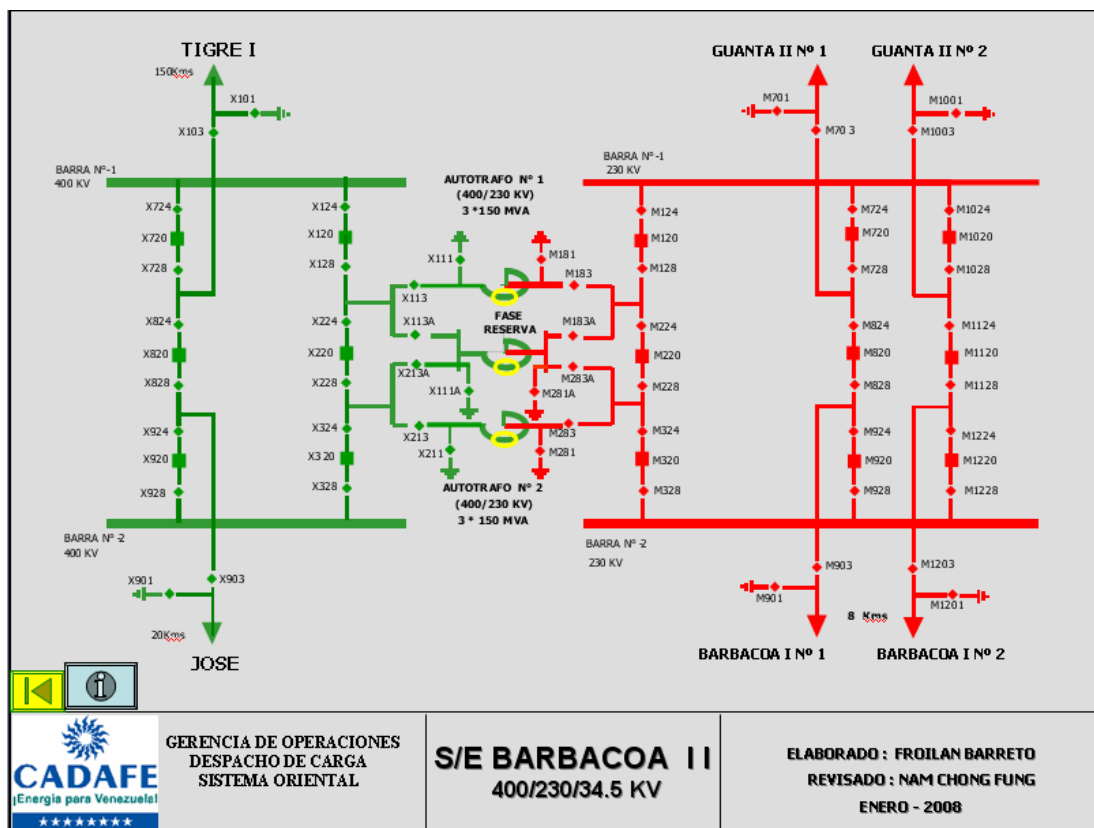


Figura 4.1. Diagrama Unifilar de la S/E Barbacoa II.

Fuente: Despacho de Carga. CORPOELEC.

La S/E es alimentada a través de una (01) línea doble Terna de 400KV desde la subestación El Tigre a 150Km. Cada circuito posee dos (2) conductores por fase de calibre 1500 MCM con capacidad de corriente 2500 A.

La Subestación está conformada por dos (2) patios: **el patio de 400 KV**, el cual tiene un área de 17 m², y está conformado por dos bahías:

- **Bahía 1:** contiene las líneas a 400 KV Barbacoa II – Tigre I y Barbacoa II – Jose.

- **Bahía 2:** correspondiente a los lados de alta tensión de los tres (03) Autotransformadores 400/230/34.5 KV, 450 MVA.

El patio de 230KV tiene un área de 16 m², y está conformado por tres bahías:

- **Bahía 3:** asociada a los lados de baja tensión de los Autotransformadores.
- **Bahía 4:** integrada por la línea DT 230 KV Barbacoa II – Barbacoa I.
- **Bahía 5:** conformada por la línea DT 230 KV Barbacoa II – Guanta II.

Las líneas derivadas del circuito Tigre #1 van acopladas a un centro de Distribución de Potencia, como se observa en la figura 4.2, compuesto por un grupo de celdas donde se acoplan un sistema de barras de seccionamiento de alta tensión con las siguientes características: 400 KV, 3 fases, 60 Hz, con capacidad de cortocircuito de 1125 A.

El Centro de Distribución de Potencia de alta tensión está compuesto por (3) tres salidas (3 Φ) distribuidas de la siguiente manera:

- Dos (2) circuitos acoplados a dispositivos de protección (disyuntores, seccionadores y pararrayos), los cuales están conectados al nivel de alta tensión de los autotransformadores.
- Un (1) circuito acoplado a dispositivos de protección (disyuntores, seccionadores y pararrayos), el cual se interconecta con una (1) línea doble Terna de 400KV que suministra energía a JOSE a 20KM de la Subestación.



Figura 4.2. Dispositivos de Protección a nivel de Alta tensión.
Fuente: Yulineidis Beltrán.

Para llevar a cabo la distribución de la energía eléctrica, la Subestación requiere de siete (7) autotransformadores a niveles de 400/230KV. Los equipos son transformadores de potencia tipo sub-estación de 150MVA, de los cuales seis (6) transformadores cumplen con la función de reducir el nivel de voltaje de los circuitos de 400KV, a un nivel de 230KV. Y un autotransformador de reserva, usado para realizar jornadas de mantenimiento del sistema eléctrico. En la tabla 4.1 se muestra las características de los autotransformadores.

TABLA 4.1 Características de los Autotransformadores.

NORMA	IEC-76		
NUMERO DE FASES	1		
FRECUENCIA	60 Hz		
CONSTRUCCIÓN	COLUMNAS		
ENFRIAMIENTO	ONAN	ONAF	OFAF
POTENCIA NOMINAL	AT: 150 MVA	BT: 150 MVA	TERCIARIO: 25 MVA
VOLTAJE NOMINAL	400/ $\sqrt{3}$ KV	230/ $\sqrt{3}$ KV	34,5 KV
CORRIENTE NOMINAL	650 A	1132 A	727 A

Fuente: Yulineidis Beltrán.



Figura 4.3. Autotransformadores.

Fuente: Yulineidis Beltrán.

Del lado de baja tensión de los autotransformadores se acoplan Dos (2) circuitos (3 Φ) de 1100 MCM a un sistema de barras de seccionamiento de alta tensión con las siguientes características: 230KV, 3 fases, 60Hz; distribuidos de la siguiente manera:

- Un (1) circuito doble Terna a 230KV acoplado a dispositivos de protección (disyuntores, seccionadores y pararrayos), el cual suministra energía a la Subestación Barbacoa I a 8 Km.
- Un (1) circuito doble terna a 230KV acoplado a dispositivos de protección (disyuntores, seccionadores y pararrayos), el cual suministra energía a la Subestación de Guanta II a 20 Km.
- Un (1) circuito doble terna de 34,5KV proveniente del devanado terciario de los autotransformadores, es acoplado a dispositivos de protección (disyuntores, seccionadores y pararrayos), el cual se interconecta a los bushings de los transformadores de los servicios auxiliares de corriente alterna.

La alimentación de los dos transformadores de 25 MVA cada uno, a niveles de voltaje de 34.500/208 V para los servicios auxiliares de corriente alterna, suministran de energía a los equipos acoplados a las casetas de control, sistema contra incendios, cargadores de batería, batería diesel, dispositivos PLC, UPS, aires acondicionados.

4.2.- Características de la Red de Puesta a Tierra de la S/E Barbacoa II

La inspección visual se realizó, primeramente para poder verificar el estado actual de toda la estructura de la S/E, sala de mando, poste, cerca perimetral y cualquier equipo que se encuentre dentro el área de la misma. En la figura 4.4 se muestra un plano de distribución de áreas de la subestación.

La red de puesta a tierra de la S/E Barbacoa II, es de tipo rectangular conformada por retículas rectangulares de 14x12m, unidas mediante conexión de soldadura tipo exotérmica. Ver figura 4.6.

Las dimensiones de la malla son 370 m de largo, y 301 metros de ancho, conformando un área de 111370m². La longitud total de la malla es de 16.104 m aproximadamente. En la figura 4.4 se muestran las dimensiones de la subestación Barbacoa II.

La malla de tierra está constituida por 24 conductores paralelos al eje "X" espaciados a 14m y 24 conductores paralelos al eje "Y" espaciados a 12m. Los conductores utilizados son de cobre desnudo, trenzado tipo "B", de calibre 4/0 AWG de sección transversal de 141,02 mm², para un nivel de cortocircuito de 12,1 KA directamente enterrados en el suelo. Ver figura 4.5.

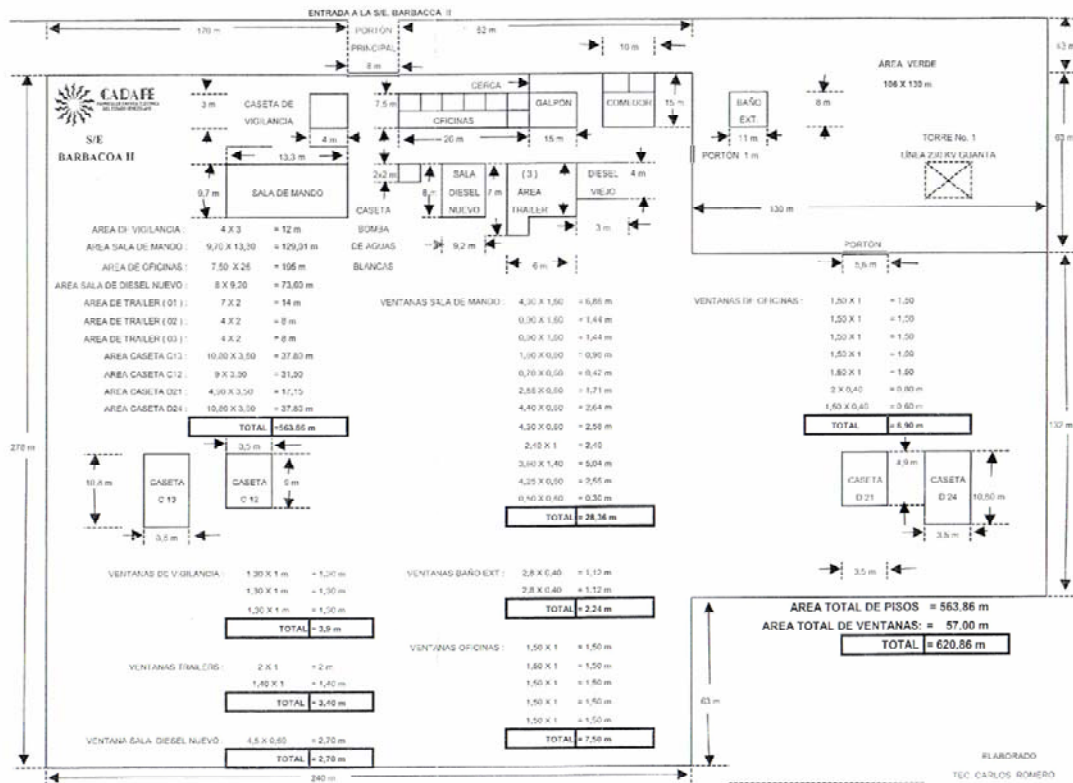


Figura 4.6. Dimensiones de la Subestación Barbacoa II.

Fuente: CADAFE.



Figura 4.7. Conexión exotérmica de los conductores.

Fuente: Yulineidis Beltrán.

La profundidad de los electrodos es de 0.5 m, para un total de 150 barras de cobre (Cu) de 5/8" de 2,44 m cada uno, ubicadas a lo largo del área de la malla con longitud de 1350 m.

El área de la S/E, está cubierta por una capa de 15cm de espesor de piedra caliza, cuya resistividad es de $5000\Omega\cdot\text{m}$.

Un conductor de cobre desnudo bordea toda la parte externa de la subestación, desde la cerca perimetral a una distancia de un (1) metro de la misma, el cual se interconecta a la malla principal de puesta tierra al menos en dos puntos.

4.3.- Conexiones Físicas de Puesta a Tierra de los Equipos Críticos de la Instalación

Para determinar la puesta a tierra de los diversos equipos de los patios de la subestación Barbacoa II se procedió a verificar la continuidad galvánica de la malla a tierra. Para lograr este objetivo se realizaron visitas al área para verificar las conexiones a tierra presente en la cerca perimetral de la subestación, para realizar las mediciones se utilizó un multímetro analógico Simpson. El objetivo principal de esta medición, fue el de verificar que los valores de continuidad galvánica entre los equipos y la malla de puesta a tierra de la subestación, se encuentren por debajo de los estándares establecidos por la IEEE Std 81-1983, la cual establece que el valor máximo permitido para este tipo de instalación es de $0,05\Omega$. En las tablas 4.2 y 4.3 se especifican las conexiones a tierra de los dispositivos de protección en la subestación de acuerdo a las mediciones realizadas..

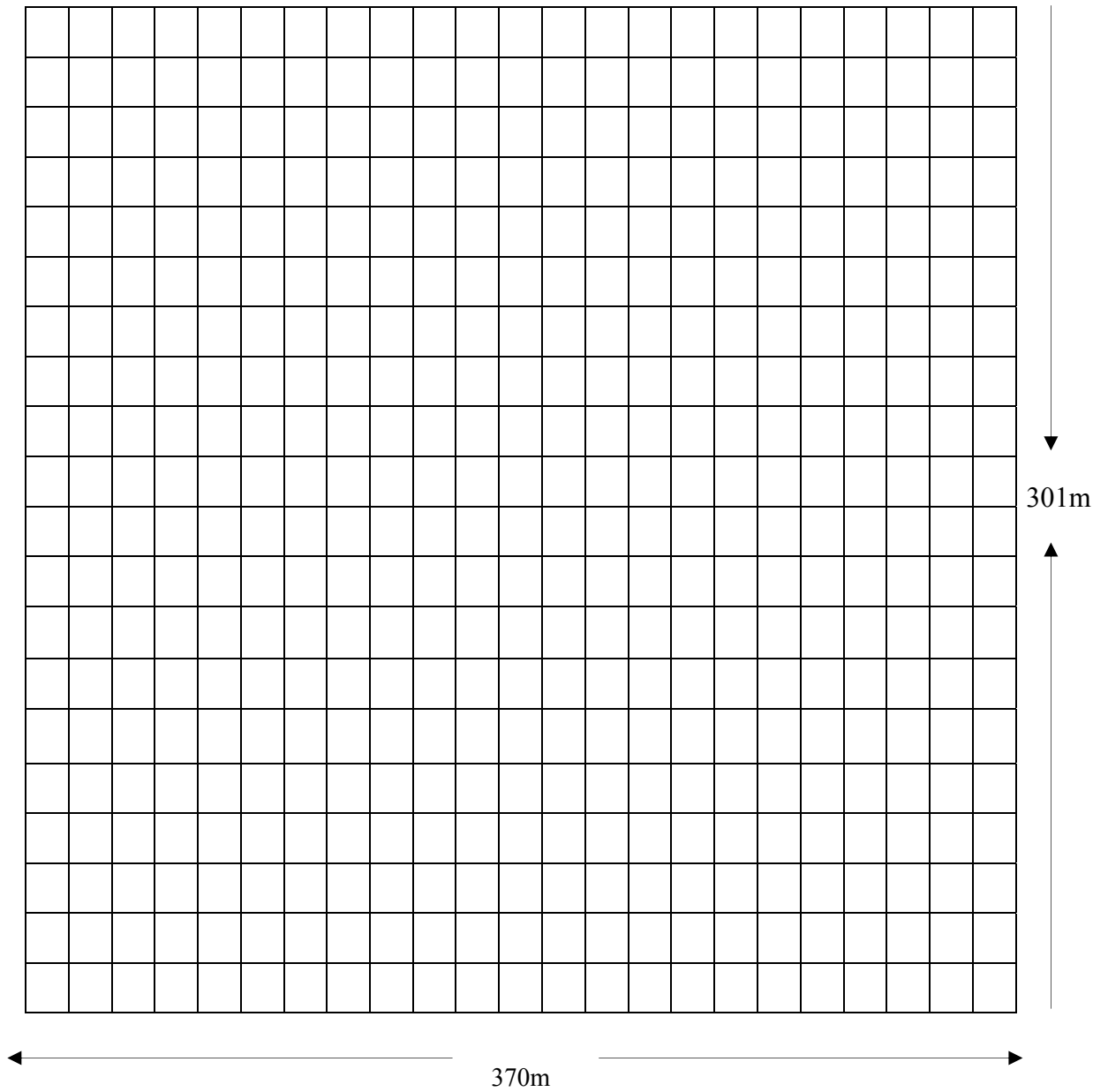


Figura 4.6. Esquema de la Malla de Tierra de la Subestación.
Fuente: Yulineidis Beltrán.

TABLA 4.2. Verificación de la Puesta a Tierra de los Equipos conectados al de Patio 400 KV.

Equipo	Especificación	Conexión
Seccionador de Tierra	X701	TPAT
Seccionador de Línea	X703	TPAT
Seccionador	X724	TPAT
Disyuntor	X720	TPAT
Seccionador	X728	Deficiente
Seccionador	X824	TAPT
Disyuntor	X820	TAPT
Seccionador	X828	Deficiente
Disyuntor	X920	Deficiente
Seccionador	X924	Deficiente
Seccionador	X928	Deficiente
Seccionador de Línea	X903	Sin Puesta a Tierra
Seccionador de Tierra	X901	Sin Puesta a Tierra
Seccionador	X124	TPAT
Disyuntor	X120	TPAT
Seccionador	X128	TPAT
Seccionador	X224	TPAT
Disyuntor	X220	TPAT
Seccionador	X228	TPAT
Seccionador	X324	TPAT
Disyuntor	X320	TPAT
Seccionador	X328	TPAT
Seccionador	X211	TPAT
Seccionador	X213A	TPAT
Equipo	Especificación	Conexión

Seccionador	X211	TPAT
Seccionador	X213A	TPAT
Seccionador	X113A	TPAT
Seccionador	X113	TPAT
Seccionador	X111	TPAT

Fuente: Yulineidis Beltrán.

TPAT: totalmente puesto a tierra.

Los pararrayos asociados al circuito Jose a nivel de 400KV están sólidamente puestos a tierra.

- Los pórticos asociados al circuito Tigre I a nivel de 400KV no poseen puesta a tierra.
- Los Pararrayos y Transformadores de Potencial del patio no poseen puesta a tierra.

TABLA 4.3 Verificación de la Puesta a Tierra de los Equipos conectados al de Patio 230 KV.

Equipo	Especificación	Condición
Seccionador de Tierra	M1001	TPAT
Seccionador de Línea	M1003	TPAT
Seccionador	M1024	TPAT
Disyuntor	M1020	TPAT
Seccionador	M1028	TPAT
Seccionador	M1124	TPAT
Disyuntor	M1120	TPAT
Seccionador	M1128	Sin puesta a tierra
Equipo	Especificación	Condición

Seccionador	M1224	Sin puesta a tierra
Disyuntor	M1220	TPAT
Seccionador	M1228	TPAT
Seccionador	M1203	TPAT
Seccionador	M1201	TPAT
Seccionador de Tierra	M701	TPAT
Seccionador de Línea	M703	TPAT
Seccionador	M724	TPAT
Disyuntor	M720	TPAT
Seccionador	M728	TPAT
Seccionador	M824	TPAT o
Disyuntor	M820	TPAT
Seccionador	M828	TPAT
Seccionador	M924	TPAT
Disyuntor	M920	TPAT
Seccionador	M928	TPAT
Seccionador de Línea	M903	TPAT
Seccionador de Tierra	M901	Sin puesta a tierra
Seccionador	M124	TPAT
Disyuntor	M120	TPAT
Seccionador	M128	TPAT
Seccionador	M224	TPAT
Disyuntor	M220	TPAT
Seccionador	M228	TPAT
Seccionador	M324	TPAT
Disyuntor	M320	TPAT
Equipo	Especificación	Condición

Seccionador	M328	TPAT
Seccionador	M281	TPAT
Seccionador	M281A	TPAT
Seccionador	M283A	TPAT
Seccionador	M183A	TPAT
Seccionador	M183	TPAT
Seccionador	M181	TPAT

Fuente: Yulineidis Beltrán.

- Los Transformadores de Corriente de todos los tramos de este patio tienen su puesta a tierra.
- Los Transformadores de Potencial de todos los tramos de este patio poseen su puesta a tierra.
- Los Pararrayos asociados al patio están conectados a tierra.
- Los pórticos asociados al patio de 230KV tienen sus puestas a tierra .

Cabe destacar que en las tablas 4.2 y 4.3 se especifican las condiciones de los dispositivos de protección en cuanto a puesta tierra, donde se puede observar que la mayoría de los dispositivos tiene protección a tierra asociada a la malla. No obstante algunos de los equipos presentan la condición de deficiente y no conectado a tierra , que se refiere a que el conductor esta conectado al equipo pero no sirve y conexión a tierra está cortado, o en el peor de los casos extraviado.

Es importante señalar que los equipos críticos, como es el caso de los autotransformadores tienen conexión a tierra por medio de conductor de cobre, calibre 2/0 AWG conectado directamente al borne de la cuba de los transformadores.

En las figuras 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran la conexión a tierra de los equipos críticos.

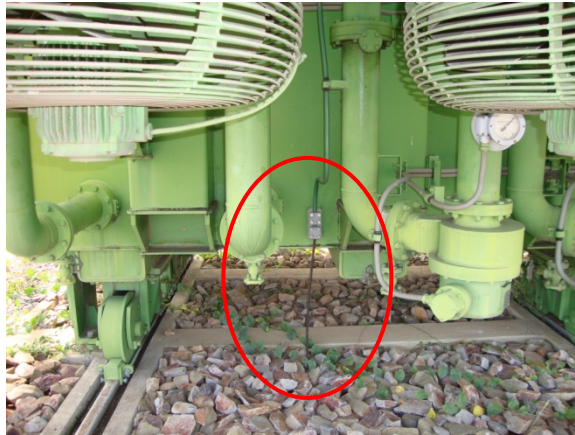


Figura 4.7 Conexión de Tierra de Autotransformador 1
Fuente: Yulineidis Beltrán.



Figura 4.8. Conexión de Tierra de Autotransformador 2
Fuente: Yulineidis Beltrán.



Figura 4.9. Conexión de Tierra cortada en las copas terminales asociadas a la línea 400KV de José

Fuente: Yulineidis Beltrán.



Figura 4.10 Conexión de Tierra de Los Seccionadores asociados a los bushing del autotransformador

Fuente: Yulineidis Beltrán.

4.4.- Mediciones en las Principales Conexiones de Puesta a Tierra Presentes en la Subestación Eléctrica.

4.4.1.- Medición de la Resistividad del Terreno

Para este proyecto se empleo el método de los cuatro puntos en su configuración Wenner, ya que presenta las siguientes ventajas:

- Proporciona resultados bastante precisos.
- Permite utilizar instrumentos de menor sensibilidad que los utilizados en otras configuraciones, porque a medida que se alejan los electrodos de corriente también lo hacen los de potencial, con lo que se mantiene la proporción V/I .

Las mediciones en los puntos se ejecutaron en 2 direcciones distintas, esto para lograr una mayor precisión en los resultados para determinar la resistividad de suelo, tomando siete (7) lecturas por punto; a 1, 3, 5, 6, 8, 10 y 15 m de profundidad.

Las mediciones de resistividad del terreno se realizaron en un área fuera de la subestación y se asume que el valor medido es el mismo que en la subestación. Adicional se tomaron en cuenta las siguientes condiciones:

Los electrodos de exploración deben tener un buen contacto con el terreno.

- Verificar el punto de contacto de la bornera de los instrumentos y la toma de los electrodos.
-

- Verificar los conductores gastados para evitar puntos de degradación del aislamiento.
- La resistencia de los electrodos auxiliares y conductores deben ser tal que no influyan en las mediciones.

4.4.2. Resultados Obtenidos

Los diferentes valores de resistencia en el área fuera de la subestación y las respectivas resistividades aparentes se muestran en las tablas 4.4 y 4.5 respectivamente. Dichos valores serán usados para la elaboración de la gráfica de resistividad aparente.

TABLA 4.4. Valores de resistencia del terreno.

Distancia entre electrodos	Trayectoria 1	Trayectoria 2
D (m)	R (Ω)	R (Ω)
1	204,56	220,88
3	59,11	58,10
5	30,10	29,37
6	22,08	22,39
8	15,19	15,05
10	10,38	9,8
15	6,31	6,3

Fuente: Yulineidis Beltrán.

De la tabla 4.4 se obtiene las gráficas para las dos (2) trayectorias, la cual se muestra en la figura 4.11:

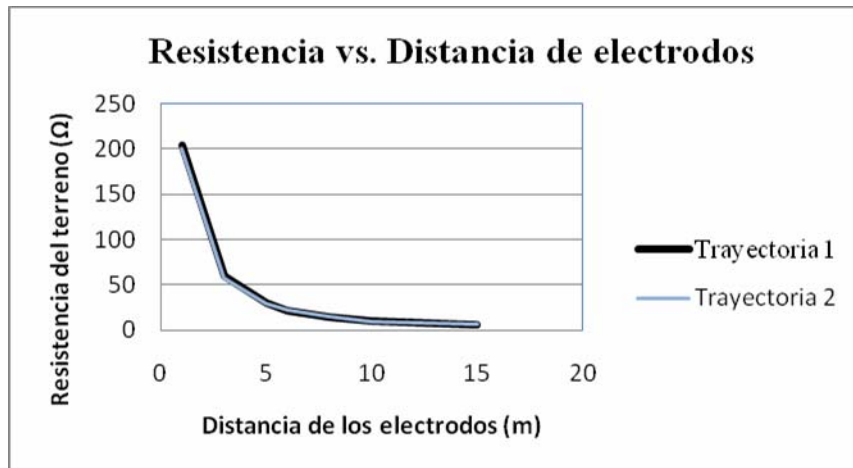


Figura 4.11. Gráfica de las Resistencias.

Fuente: Yulineidis Beltrán.

Con la ecuación 2.13, la cual se muestra en el capítulo II; $\rho = 2\pi aR$, se obtienen las resistividades aparentes para cada trayectoria y son mostradas en la tabla 4.5:

TABLA 4.5. Resistividades del Terreno.

Distancia entre electrodos	Trayectoria 1	Trayectoria 2
D (m)	ρ (Ω-m)	ρ (Ω-m)
1	1285,30	1262,15
3	1114,16	1095,19
5	946,72	922,82
6	832,62	844,32
8	763,75	756,45
10	652,15	615,75
15	594,36	597,76

Fuente: Yulineidis Beltrán.

En la figura 4.12 se obtiene las (2 trayectorias) gráficas de resistividad Vs distancia entre electrodos, obtenidas de la tabla 4.5.

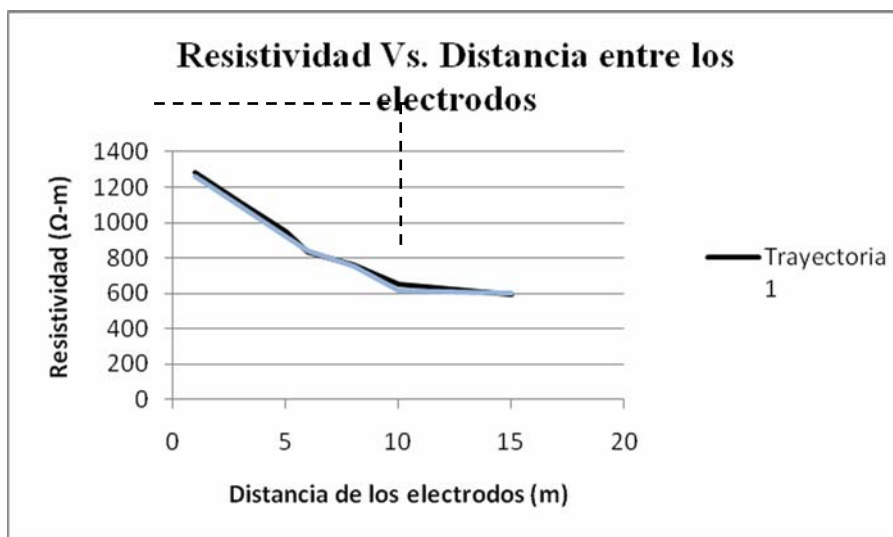


Figura 4.12. Gráfica de las Resistividad.
Fuente: Yulineidis Beltrán.

La modelación de dos capas se efectuó según la metodología gráfica definida por la norma IEEE 80-2000. El procedimiento es el siguiente:

- a) Graficar resistividad aparente vs distancias de los electrodos
- b) Estimar los valores de ρ_1 y ρ_2 de la gráfica de resistividad aparente. ρ_1 va a ser la resistividad para espaciamientos pequeños y ρ_2 la resistividad para espaciamientos mayores.
- c) Determinar ρ_2 / ρ_1 y seleccionar una curva sobre la gráfica mostrada en la figura 4.12. Si la curva no está en la figura se debe trazar una nueva curva sobre la gráfica.

- d) Determinar el valor apropiado sobre el eje de las Y de ρ_a / ρ_1 e interceptarlo con la curva ρ_2 / ρ_1 de la figura 4.13. (figura 21 de la IEEE 80-2000).
- e) Leer el valor de a/h sobre el eje X.
- f) El valor seleccionado de ρ_a / ρ_1 en el apartado d.- se multiplica por ρ_1 y se obtiene ρ_a que se lleva a la gráfica de resistividad aparente y se obtiene el valor de a .
- g) Se despeja el valor de h del obtenido en el apartado e.- y ese valor de h va a ser el espesor de la primera capa.

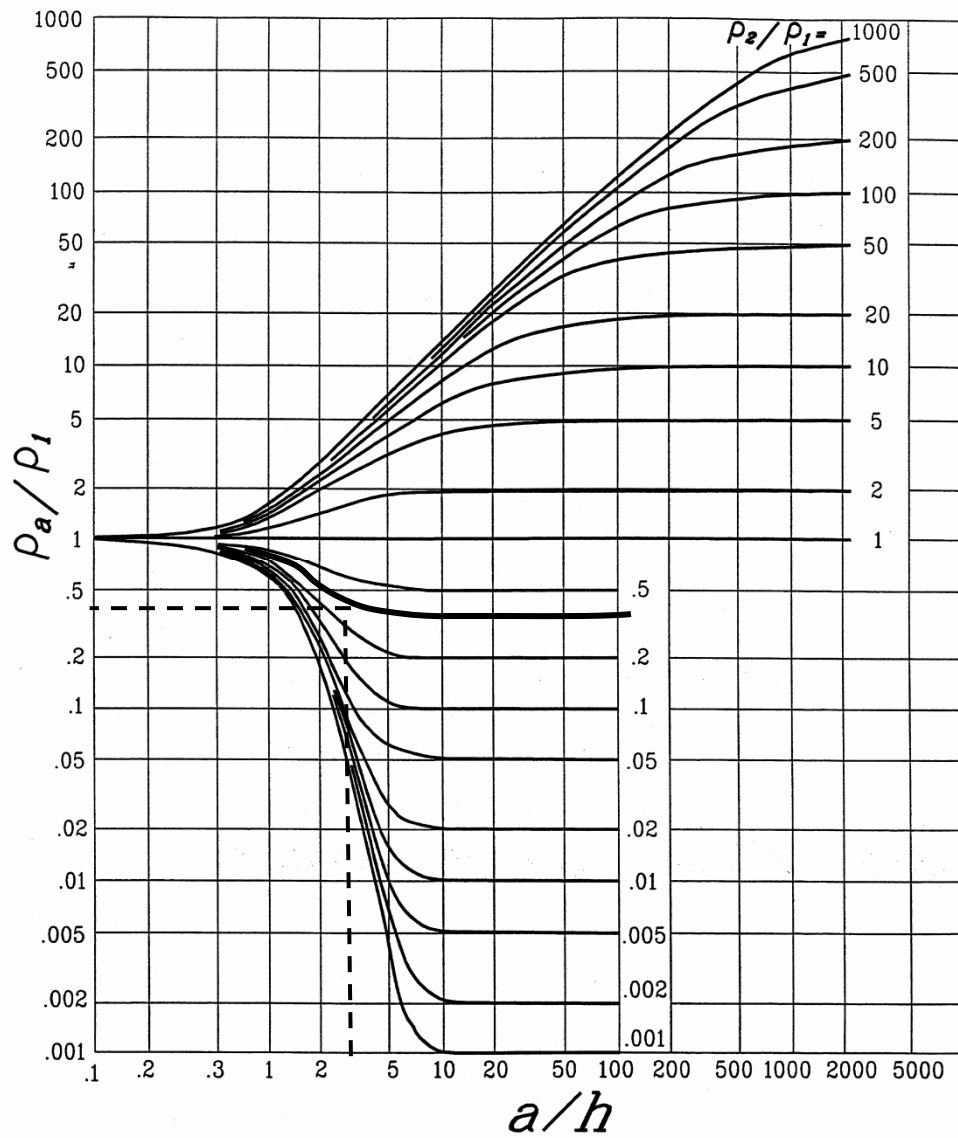


Figura 4.13. Método Gráfico de Sunde.
Fuente: IEEE 80-2000.

Para este trabajo se tienen las siguientes consideraciones:

De la gráfica mostrada en la figura 4.12, de resistividad aparente se obtiene:

$$\rho_1 = 1285,30 \Omega\text{-m}$$

$$\rho_2 = 594,36 \Omega\text{-m}$$

Siguiendo el procedimiento de la norma IEEE 80-2000:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{594,36 \Omega\text{-m}}{1285,30 \Omega\text{-m}} = 0,46$$

De la Figura 4.13 se obtiene que,

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0,47 ; \text{ de manera que } \rho_a = 0,47 * \rho_1 = 604,091 \Omega\text{-m};$$

Ubicando el valor de $\rho_a = 604,091 \Omega\text{-m}$, en la gráfica de resistividad aparente figura 4.12 e interceptando dicho valor con la trayectoria 1, la cual representa la peor condición que se debe considerar en el análisis de dos capas. Se obtiene un valor de $a = 10$.

De la figura 4.13 se obtiene $a/h = 4$.

Como $a / h = 4$;

Y con $a = 10$, despejando el valor de h se tiene,

$$h = \frac{10}{4} = 2,5m$$

Para el cálculo de la resistividad de la capa inferior, continuando con el procedimiento de la IEEE 80-2000 se tiene:

$$\frac{\rho_2}{\rho_a} = 0,47$$

Despejando el valor de ρ_2 se obtiene:

$$\rho_2 = 283,93 \Omega\text{-m};$$

4.4.3.- Resumen de resultados

De lo anterior y teniendo en cuenta la Norma IEEE 80-2000. Se muestran los siguientes resultados:

- Resistividad de la capa superficial

$$\rho_1 = 604,091 \Omega\text{-m};$$

- Resistividad de la capa inferior

$$\rho_2 = 283,93 \Omega\text{-m};$$

- Espesor h de la capa superficial

$$h = 2,5 \text{ m}$$

4.5.- Estudio de la Malla de Tierra

Esta sección se enfoca en el procedimiento llevado a cabo en el estudio de un sistema de puesta a tierra a través de los cálculos matemáticos y del software de cálculo del programa ETAP en su versión 6.0.0, tomando como base la norma de la IEEE 80 – 2000 y los criterios técnicos mínimos aceptables para el diseño.

4.5.1.- Norma Aplicada

Para la elaboración de los cálculos del Sistema de Puesta a Tierra se consideró la siguiente norma:

- IEEE-Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Brown Book.

4.5.2.- Metodología

El diseño del sistema de puesta a tierra, de la subestación eléctrica Barbacoa II está basado en los cálculos matemáticos siguiendo la norma IEEE - Std 80 – 2000, para luego comparar estos resultados con los obtenidos a través de la simulación realizada de este sistema con el software de cálculo del programa ETAP 6.0.0.

4.5.3.- Criterios de Diseño

Se tomaron como criterios para el diseño los aspectos siguientes:

- Configuración de la malla: red de tipo rectangular conformada por retículas.
- La unión de las retículas se efectuó mediante conexión de tipo exotérmica.
- El conductor usado es de cobre desnudo con calibre mínimo 4/0 AWG directamente enterrado en el suelo.
- Profundidad de la instalación del conductor para la malla es de 0,5 m.

- La red de tierra será recubierta con una capa de 0,15 m de espesor de piedra caliza limpia. Resistividad superficial de la piedra caliza: 5000(Ω -m).
- Tiempo máximo de operación de las protecciones: 1 seg.
- Peso promedio de persona afectada: 70 kg.
- La resistencia de la malla no debe superar a 1 Ω ($R_g \leq 1 \Omega$).
- El conductor del perímetro de la malla debe incluir la cerca de la subestación eléctrica paralelo a ella y colocarlo a una distancia de 1 m.

4.5.4.- Resistividad del Terreno

Para la elaboración de este estudio se realizó una medición de la resistividad del terreno por el método de los cuatro puntos utilizando la configuración Wenner y obteniéndose los siguientes valores:

- Resistividad de la capa superficial

$$\rho_1 = 604,091 \Omega\text{-m};$$

- Resistividad de la capa inferior

$$\rho_2 = 277,882 \Omega\text{-m};$$

- Espesor h de la capa superficial

$$h = 2,5 \text{ m};$$

4.6.- Metodología de Cálculo de los parámetros que intervienen en el estudio del Sistema de Puesta a Tierra

4.6.1. Cálculo del Voltaje de Toque y Voltaje de Paso Tolerable

Las tensiones de paso y de toque están definidas por las siguientes ecuaciones 2.26 y 2.19, que corresponde a una persona de 70 kg.

$$V_{toque70} = (1000 + 1.5 * \rho_s * c_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t}}$$

$$V_{paso70} = (1000 + 6 * \rho_s * c_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t}}$$

Donde:

ρ_s : Resistividad de la capa superficial de terreno (5000 Ω -m).

C_s : Factor de reducción.

t: Tiempo de despeje de la falla, (1 seg.).

ρ : Resistividad del terreno, (604,091 Ω -m).

h_s : Espesor de la capa superficial (0,5 m).

El valor de (C_s) se calculó con la siguiente ecuación:

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

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{609,091}{5000} \right)}{2(0,20) + 0,09}$$

Cs=0,797;

Entonces:

$$V_{toque70} = (1000 + 1,5(5000)(0,797)) * \frac{0.157}{\sqrt{1}}$$

V_{toque70 tolerable} = 1095,47 V;

$$V_{paso70} = (1000 + 6(5000)(0,797)) * \frac{0.157}{\sqrt{1}}$$

$$V_{paso70 tolerable} = 3910,87 \text{ V;}$$

4.6.2.- Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra (R_g)

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra se realizó mediante la expresión de Severat IEEE 80-2000:

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

Donde (L_T) = L_C + L_R = (24*370 + 24*301) = 16104 m;

Entonces:

$$R_g = 604,091 \left[\frac{1}{16104} + \frac{1}{\sqrt{20 * 111370}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0,5 * \sqrt{\frac{20}{111370}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0,844 \Omega;$$

4.6.3. Cálculo de la Máxima Corriente que drenará la Malla

El cálculo de la corriente máxima drenada por la malla (I_G) se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$I_G = I_0 * S_f * D_f * C_P$$

La corriente I_0 se tomó de las características de la malla de la subestación, donde $I_0 = 12,1 \text{KA}$.

El factor de División de corriente se tomó con base de la figura 2.23 perteneciente a las Curvas del Factor de división de Corriente Aproximado para $0,84 \Omega$. Se consideró un sistema 2/5 (2 líneas de transmisión, y 5 líneas de distribución). Se obtiene un factor de división de 30% (ver figura 4.17).

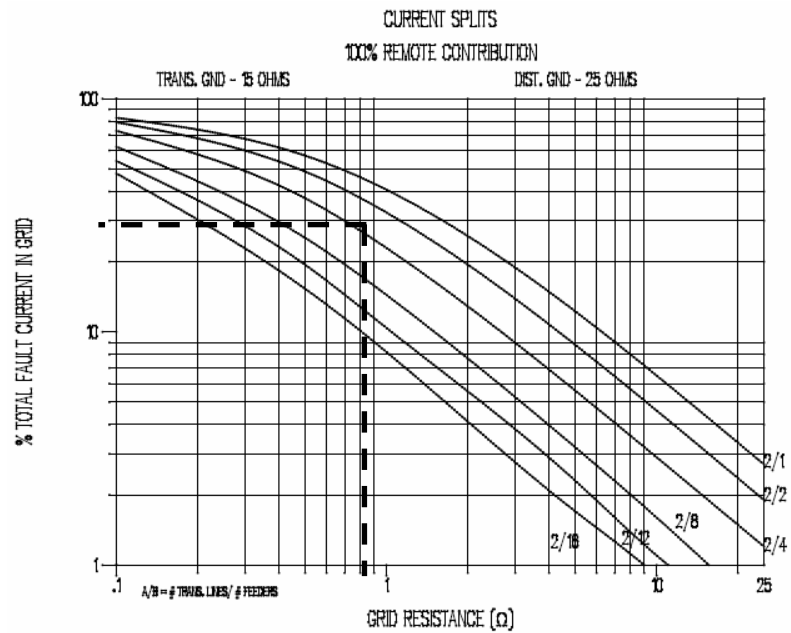


Figura 4.17. Curvas del Factor de división de Corriente Aproximado para 25 Ω.[7]

El factor de decrecimiento (D_f) se tomó con base de la tabla 2.5 (norma IEEE-Std 80-2000). Los valores utilizados corresponden a un tiempo de despeje de falla de 1 segundo y una relación $X/R=10$ (datos suministrados por CADAPE), por lo que el D_f es 1,013.

Y con el factor de Proyección de Crecimiento de la Subestación $C_p=1$.

Entonces I_G será:

$$I_G = 12,1KA * 0,30 * 1,013 * 1 = 3678A$$

4.6.4.- Cálculo del Voltaje de Toque y Voltaje de Paso en la Periferia.

Los valores de tensión de toque y de paso en caso de falla están dados por las siguientes ecuaciones:

$$E_m = \frac{K_m * K_i * \rho * I_G}{L}$$

$$E_s = \frac{K_s * K_i * \rho * I_G}{L_s}$$

Los valores de (K_m) y (K_s) se obtuvieron de las ecuaciones siguientes:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * \left[\text{Ln} \left(\frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D + 2 * h)^2}{8 * D * d} - \frac{h}{4 * d} \right) + \frac{K_{ji}}{K_h} * \text{Ln} \left(\frac{8}{\pi * (2 * n - 1)} \right) \right]$$

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

Donde:

h: Profundidad de la instalación del conductor para la malla (0,5 m).

d: Diámetro del conductor (13,41 mm).

D: Valor de espaciamiento entre conductores enterrados paralelos de la malla (14 m).

Donde el valor de n viene dado por la ecuación:

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d$$

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p} = \frac{2(16104)}{1350} = 23,858$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{16104}{4(\sqrt{111370})}} = 1,006$$

$$n = 23,858 * 1.006 * 1 * 1 = 24,0011 \approx 24$$

Para K_{ii} se consideró un valor de 1, ya que el diseño de la malla tiene electrodos en las esquinas.

K_h se calcula mediante la ecuación:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1}} = 1,225$$

Entonces:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0,5} + \frac{1}{14 + 0,5} + \frac{1}{10} (1 - 0,5^{24-2}) \right] = 0,372$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * \left[\ln \left(\frac{14^2}{16 * 0,5 * 13,41^{-3}} + \frac{(14 + 2 * 0,5)^2}{8 * 14 * 13,41^{-3}} - \frac{0,5}{4 * 13,41^{-3}} \right) + \frac{1}{1,225} * \ln \left(\frac{8}{\pi * (2 * 24 - 1)} \right) \right]$$

$$\mathbf{K_m=0,828;}$$

K_i se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K_i = 0,644 + 0,148 * n = 0,644 + 0,148 * 24 = 4,196 .$$

Entonces E_s y E_m serán:

$$E_m = \frac{K_m * K_i * \rho * I_G}{L} = \frac{0,828 * 4,196 * 604,091 * 3678}{16104} = 479,342V$$

$$E_s = \frac{K_s * K_i * \rho * I_G}{L_s} = \frac{0,372 * 4,196 * 604,091 * 3678}{075 * 16104} = 287,14V$$

4.6.5.- Cálculo del Potencial de Puesta a Tierra (GPR).

El cálculo del Potencial de Puesta a tierra se calcula mediante la siguiente ecuación y los valores obtenidos de I_G y R_g en los puntos:

$$GPR = I_G * R_g = 3678 * 0,844 = 3104,23 V;$$

4.6.6.- Análisis de Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que los valores de voltaje toque y voltaje de paso calculados están por debajo de los valores tolerables por lo que se concluye que estos cumplen con los requisitos técnicos establecidos por CADAFE y por las norma IEEE - Std 80 – 2000.

El valor de resistencia obtenido para la malla de puesta a tierra es menor a 1Ω , por lo que se concluye que esta cumple con los requisitos técnicos establecidos en la norma.

TABLA 4.6 Resultados de los Cálculos Matemáticos

Voltaje de toque tolerable	Voltaje de toque en la periferia	Voltaje de paso tolerable	Voltaje de paso en la periferia	Resistencia de malla	Resistencia limite
1095,47 V	479,342 V	3910,87 V	287,14 V	0,844 Ω	1 Ω

Fuente: Yulineidis Beltrán.

4.7.- Simulación de un modelo de la red de puesta a tierra de la subestación empleando la técnica computacional (ETAP), enfocado al análisis de los potenciales de toque y paso en condición actual de carga

ETAP ® (Programa de Análisis de eventos Eléctricos Transitorios), es la plataforma más completa de análisis para el diseño, simulación control, optimización, y automatización de la generación, transmisión, distribución, y sistemas de potencia industriales.

El programa ofrece una variedad de soluciones totalmente integradas en un software incluyendo arcos luminosos, flujo de cargas, análisis de cortocircuitos, coordinación de relés, estabilidad transitoria, otros. Su funcionalidad modular, se puede adaptar para satisfacer las necesidades de cualquier empresa, desde pequeños hasta grandes sistemas eléctricos de potencia.

El programa se utilizó para la creación, y continua inserción de cada uno de los elementos individuales que conforman la red de puesta a tierra de la subestación, desde la configuración de la red, hasta las características de los conductores, y electrodos involucrados en el sistema de protección.

4.7.1.- Sistemas de Malla a Tierra

Se simuló el estudio de la malla de puesta a tierra con el software de cálculo ETAP 6.0.0, a manera de comparación, siguiendo la norma IEEE-Std 80-2000.

En la tabla 4.6 se muestran los datos de entrada del sistema.

TABLA 4.7 Datos de Entrada.

Frecuencia (Hz)	60
Peso del trabajador (Kg)	70
Corriente de cortocircuito (KA)	12,1
Factor de división de corriente (%) (Sf)	20
Factor de Proyección de Crecimiento del Sistema Eléctrico (%) (Cf)	100
Duración de la falla (Seg)	1
Resistividad del material superficial (Ω-m)	5000
Espesor del material superficial (m)	0,15
Resistividad de la Capa Superficial (Ω-m)	604,091
Resistividad de la Capa Inferior (Ω-m)	283,93
Forma de la malla	Rectangular
Diámetro del conductor(mm)	13.41
Profundidad de la malla(m)	0,5
Longitud máxima de la malla en dirección x (m)	370
Longitud máxima de la malla en dirección y (m)	301
Número de conductores paralelos en dirección x	24
Número de conductores paralelos en dirección y	24
Calibre del conductor(AWG)	4/0
Barra copperweld	5/8''

Fuente: Yulineidis Beltrán.

4.7.2.- Resultados de la Simulación.

En la tabla siguiente se muestran los resultados más relevantes de la simulación. En el anexo A, se muestran los resultados completos de la simulación.

TABLA 4.8 Resultados de los Cálculos con el Software ETAP 6.0.0

Voltaje de toque tolerable	Voltaje de toque en la periferia	Voltaje de paso tolerable	Voltaje de paso en la periferia	Resistencia de malla	Resistencia limite
1094,8 V	480,6 V	3908,2 V	276,3 V	0,852 Ω	1 Ω

Fuente: Yulineidis Beltrán.

4.7.3.- Comparación de los Resultados.

TABLA 4.9 Resultados de los Cálculos Matemáticos con el Software ETAP 6.

	Cálculo manual	Cálculo con ETAP
Voltaje de toque tolerable	1095,47 V	1094,8 V
Voltaje de toque calculado	479,342 V	480,6 V
Voltaje de paso tolerable	3910,87 V	3908,2 V
Voltaje de paso calculado	287,14 V	276,3 V
Factor de corrección (Ki)	4,196	4,205
Factor de esparcimiento para voltaje de toque (Km)	0,828	0,862
Factor de esparcimiento para voltaje de paso(Ks)	0,372	0,369
Kii	1	1
Resistencia de malla (Rg)	0,844 Ω	0,852 Ω
Potencial de puesta a tierra (GPR)	3104,23 V	3108,1 V

Fuente: Yulineidis Beltrán.

En los resultados obtenidos se nota una pequeña diferencia que se debe a los decimales en los cálculos matemáticos.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que los valores de voltaje toque y voltaje de paso calculado están por debajo de los valores tolerables por lo que se concluye que estos cumplen con los requisitos técnicos establecidos por las normas de CADAFE, y la IEEE-Std 80-2000.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1.- CONCLUSIONES.

El aspecto primordial de un sistema de puesta a tierra es la seguridad de las personas, y esto se refleja en la facilidad de detectar y aislar una falla que involucre elementos conductores que puedan ser tocados por personas.

De lo anteriormente expresado, se pueden derivar una serie de conclusiones que se indican a continuación:

- Una vez analizado los resultados se puede concluir que en la S/E Barbacoa II existe un eficiente sistema de puesta a tierra, ya que los parámetros de diseño se encuentran dentro de los límites establecidos por la Norma IEEE 80-2000.
- Las fallas ocurridas en los transformadores de distribución no están vinculados a la conexión a tierra, si no que son causadas por otros factores. No obstante las fallas ocurridas en los seccionadores y copas terminales se deben en parte a la falta de conexión a tierra ya que los conductores fueron sustraídos por actos vandálicos.
- El estudio realizado en la Subestación Barbacoa II, permitió conocer el estado actual del sistema de puesta a tierra, la seguridad que proporciona tanto al personal como a los equipos presentes en las mismas. Por lo que se puede concluir que la malla de puesta a tierra, se encuentra en condiciones satisfactorias para su funcionamiento, ya que el valor de resistencia obtenido cumplen con las normas exigidas por la Norma IEEE Std-80-2000, lo que indica que la misma puede operar sin riesgo.
- La medición de continuidad galvánica resultó satisfactoria, lo que indica que existe una buena continuidad entre los puntos de conexión que conforman la malla de puesta a tierra con los equipos conectados.

- El valor teórico de la resistencia de la malla a tierra da un valor por debajo de 1Ω , lo que indica un buen funcionamiento de la malla de tierra, garantizando así la disipación de algunas corrientes de fallas en la S/E. Además los voltajes de toque y paso en la periferia son menores en comparación con los valores tolerable obtenidos tanto por el método matemático, como por el método del programa digital ETAP.
- Aún cuando los resultados obtenidos de las tensiones de toque y paso se encuentran dentro del rango establecido por la norma, es estrictamente necesario la reposición de las puestas a tierras sustraídas, ya que los equipos permanecerían vulnerables a posibles descargas eléctricas y representan un riesgo para el personal que labora en la subestación.
- Al realizarse jornadas de mantenimiento periódico se puede conocer las condiciones en la que se encuentra los conductores vinculados al sistema de puesta a tierra, y así garantizar el buen funcionamiento del mismo.
- Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de puesta a tierra de la Subestación Barbacoa II se encuentra en condiciones optimas para el correcto funcionamiento de los equipos, por tal motivo algún tipo de modificación o arreglo no mejoraría su comportamiento pero si los costos operacionales

5.2.- RECOMENDACIONES

Con las recomendaciones solo se pretende transmitir un mejor entendimiento de las dificultades en las mediciones de campo, así como su interpretación:

- Debe evitarse, en la medida que sea posible, la medición de resistencia y resistividad en subestaciones y áreas donde existan líneas de transmisión, ya que provocaría lecturas erróneas por la inducción de corrientes externas en las mediciones.
- Efectuar mediciones de resistencia y resistividad en diferentes direcciones, para garantizar que los resultados obtenidos sean óptimos para el diseño de una malla de tierra.
- Realizar jornadas periódicas de mantenimiento a las conexiones de tierra existentes en la subestación, con la finalidad de tener un registro confiable de las condiciones de los conductores con el paso del tiempo, y así garantizar la seguridad de la instalación.
- Realizar mediciones galvánicas a los equipos críticos con el propósito de verificar el buen funcionamiento de la conexión a tierra de los equipos.
- Realizar el reemplazo inmediato de los conductores extraviados y deficientes vinculados a la puesta a tierra de la Subestación, para disminuir los índices de disparos y fallas de las copas terminales y los seccionadores.
- Conectar a tierra las estructuras, pórticos y dispositivos de protección que conforman el patio de 400KV de la subestación, los cuales están propensos a fallas que pueden ocasionar daños en las líneas de transmisión, autotransformadores y otros equipos críticos.
- Es importante que las puestas a tierra de lo equipos existentes en la subestación sean revisado periódicamente, sobre todo las puestas a tierra de los equipos aledaños a la cerca perimetral de la subestación, con el fin de

verificar que no hayan sido extraídos para evitar que estén expuestos a fuertes descargas eléctricas y para así ejercer un buen funcionamiento.

- Utilizar conductores Cooper-clad (acero armado con cobre) u otros materiales no atractivos al vandalismo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Lancruz, Y.** [2000]. “Análisis del Sistema de Puesta a Tierra y Protección de los Equipos de Comunicación Asociados al Despacho de Carga Oriental CADAPE”. Barcelona, Venezuela.
- [2] **Peña, J.** [2006]. “Evaluación de los Sistemas de Puesta a Tierra y Protección contra Descargas Atmosféricas en el sistema eléctrico de un Taladro de Perforación de Petróleo”. Barcelona, Venezuela.
- [3] **Hernández, C.** [1986]. “Evaluación de los Sistemas de Puesta a Tierra de las subestaciones SEMDA”. Barcelona, Venezuela.
- [4] **Giral, Y.** [2006]. “Estudio del Sistema de Puesta a Tierra de la Subestación Barbacoa I. 230/115/34.5”. Barcelona, Venezuela.
- [5] **Rojas, J.** [2006]. “Estudios de las Condiciones Operativas Actuales de las Líneas de Transmisión de 230 KV. Barbacoa I-Santa Teresa I y II”. Barcelona, Venezuela.
- [6] **Cedeño, L y Cabrera, A.** [1991]. “Evaluación de las Puestas a Tierra de las Subestaciones en el Sistema Oriental”. Barcelona, Venezuela.
- [7] **España, H.** [2009]. “Diseño de Sistema de Puestas a Tierra de una Subestación Eléctrica de Punto de Roció, Pirital Estado Monagas”. Barcelona, Venezuela.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	DIGNOSTICO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACION “BARBACOA II” PARA 400/230 Y 34,5 KV.
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
BELTRAN G. YULINEIDIS	CVLAC: 16.489.798 E MAIL: yulineidis01@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

sistema de puesta a tierra,
 malla,
 conductores,
 subestación,
 voltaje,
 etap,

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería Y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Eléctrica

RESUMEN (ABSTRACT):

En el siguiente trabajo se realizó el diagnóstico de una red de puesta a tierra, para una subestación eléctrica de niveles de tensión de 400/230 Y 34,5 KV, basándose en las normas de CADAPE y la IEEE y en una simulación del sistema con el software de Cálculo ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) en su versión 6.0.0. El objetivo de este estudio fue diagnosticar las condiciones operativas en que se encontraba el sistema de conexión a tierra de esa instalación y de acuerdo con los resultados que se obtuvieron, proponer mejoras para corregir las eventualidades y así garantizar la continuidad del Servicio Eléctrico como también la seguridad del personal de operaciones al momento de presentarse cualquier tipo de falla a tierra. Para el diagnóstico del sistema de puesta a tierra (SPAT) se tomó como base las normas de CADAPE y la IEEE-Std 80-2000. Con la cual se obtuvieron resultados que fueron comparados con los obtenidos a través de la simulación de la malla de puesta a tierra con el software mencionado anteriormente, con el fin de establecer criterios técnicos mínimos aceptables para este estudio.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
RAUSSEO. JUAN C.	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	7.565.013			
	E_MAIL	juancr@Gmail.com			
	E_MAIL				
PARRA. HERNÁN.	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	4.362.464			
	E_MAIL	hpconsultores@gmail.com			
	E_MAIL				
VELAQUEZ. DANIEL J.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	16.522.343			
	E_MAIL	Daniel.velasquez.m@cantv.net			
	E_MAIL				
MERCADO VERENA.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	10.763.332			
	E_MAIL	Verena.mercado@gmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	04	12
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Diagnostico_Puesta a tierra_RPLC.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F
G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v
w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: CADAFE. ZONA I BARBACOA(OPCIONAL)

TEMPORAL: 6 meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre-grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Electricidad

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente - Núcleo de Anzoátegui

