

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



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LAS
SUBESTACIONES ELÉCTRICAS MORICHAL, TEMBLADOR Y JOBO
NORTE 115/34,5 kV DE PDVSA - DISTRITO MORICHAL, ESTADO
MONAGAS”**

**Realizado por:
MARÍA JOSÉ BETANCOURT AGUIAR**

Trabajo de grado presentado ante la ilustre Universidad de Oriente como
requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Puerto La Cruz, Julio de 2010.

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



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LAS
SUBESTACIONES ELÉCTRICAS MORICHAL, TEMBLADOR Y JOBO
NORTE 115/34,5 kV DE PDVSA - DISTRITO MORICHAL, ESTADO
MONAGAS”**

Realizado por:

MARÍA JOSÉ BETANCOURT AGUIAR

Revisado y Aprobado por:

Prof. Hernán Parra

Asesor Académico

Ing. Luís Pérez

Asesor Industrial

Trabajo de grado presentado ante la ilustre Universidad de Oriente como
requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Puerto la Cruz, Julio de 2010.

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



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LAS
SUBESTACIONES ELÉCTRICAS MORICHAL, TEMBLADOR Y JOBO
NORTE 115/34,5 kV DE PDVSA - DISTRITO MORICHAL, ESTADO
MONAGAS”**

JURADO CALIFICADOR

El Jurado Hace Constar que Asignó a esta Tesis la Calificación de:

**Prof. Hernán Parra
Asesor Académico**

Ing. Adriana Méndez

Jurado Principal

Ing. Verena Mercado

Jurado Principal

Puerto la Cruz, Julio de 2010.

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participara al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

Ante todo a Papá Dios y a La Virgencita del Valle, por guiar siempre mi camino, y darme fortaleza en cada momento para poder lograr esta meta.

Con todo mi corazón a mis padres, María Aguiar y Freddy Betancourt, este es el fruto de todo su esfuerzo y sacrificio. Ustedes son mi ejemplo a seguir y mi mayor orgullo. Los amo inmensamente padres, vaya para ustedes este logro tan importante en mi vida.

Con todo mi amor a mi abuela Benigna (ñaña) quien más que mi abuela es mi madre, apoyo, cómplice y pilar fundamental en mi vida. Te amo mucho.

A mi abuelo José por su incondicional apoyo y valiosos consejos, los cuales siempre tengo presentes.

A los hermanos que la universidad me regalo, Diana Cedeño, Víctor Velásquez, Diana Salgado, Esteban Hernández y Valeria Ríos, ustedes hicieron de mi paso por la universidad una etapa realmente maravillosa y siempre serán parte de mi corazón.

María José Betancourt Aguiar

AGRADECIMIENTOS

A Dios y La Virgen del Valle, por ser luz y guía en todos los momentos de mi vida, por nunca dejarme desfallecer cuando la meta se hacía cuesta arriba.

A mis amados padres María y Freddy, gracias por todo su esfuerzo para convertirme en la persona que soy hoy en día. No existen palabras para expresar lo mucho que los amo. Gracias por confiar en mí y brindarme siempre palabras de aliento y fortaleza.

A mis adorados abuelos Benigna y José, nunca me cansare de agradecerles tanto amor y apoyo, gracias por mantener siempre abiertas para mí las puertas de su casa y de su corazón. Gracias a ustedes este sueño se hizo posible, los amo.

A mis Tíos Delia, Gloria, José Rafael, Jesús, Manuel, Leída, Ramona, Leida, Fernando y Manuel Rivas, por brindarme en todo momento palabras de aliento y afecto.

A mi hermano y primos, espero ser un buen ejemplo a seguir para ustedes y verlos alcanzar esta meta que hoy celebro.

A la ilustre Universidad de Oriente, La Casa más Alta, específicamente al Departamento de Electricidad, a todo el cuerpo docente que lo conforma y de manera muy especial al Profesor Santiago Escalante, “jefe” gracias por tanta dedicación y esmero al impartir sus conocimientos tanto en el aula de clase como fuera de ella, por ser más que educador un padre, amigo y ejemplo a seguir como profesional y como persona.

Vaya un especial agradecimiento a mi tutor académico Profesor Hernán Parra, por su guía, paciencia, dedicación y valiosa colaboración para poder realizar con éxito este trabajo de grado, así como también por tantos consejos y conocimientos brindados, siempre será un gran ejemplo a seguir.

A los profesores Luís Parraguéz, Verena Mercado y Luís Méndez (aunque ya no estés en el departamento), por ser excelentes educadores, siempre dispuestos a ayudar cuando los necesite, gracias por todo su apoyo.

A mis hermanos Diana Cedeño, Diana Salgado, Víctor Velásquez, Esteban Hernández y Valeria Ríos, quienes más que mis amigos son la familia que la vida me dio. Cada uno de ustedes deja una huella imborrable en mi corazón. Espero que este sea el primero de muchos logros que celebremos juntos.

De manera muy especial a mis amigos: Rafael García, Zoraima Sulbaran, Sulima Bruzual, Karen Achibal, Yanais Barrios, Luís Millán, Cesar Salazar y Jonathan Jennings. Gracias a ustedes este paso por la universidad ha sido la mejor experiencia.

Valla un especial agradecimiento al personal de Servicios Eléctricos de PDVSA Distrito Morichal y muy especialmente al equipo del departamento de Protecciones Eléctricas, Jonathan Velásquez, Ángel Rojas, Francisco Romero, Jenner Pitre, Víctor Figueroa y Rainier Reinoso, por su valiosa colaboración, sin ustedes no habría sido posible realizar con éxito este trabajo de grado, de verdad muchas gracias muchachos. Por último y no menos importante a mi Tutor Industrial Ing. Luís Pérez por todo su apoyo y dedicación durante mis pasantías, a todos muchas gracias.

María José Betancourt Aguiar

RESUMEN

Este estudio abarca una breve descripción de las subestaciones Eléctricas Morichal, Temblador y Jobo Norte. Para la evaluación del Sistema de Puesta a Tierra de dichas subestaciones fue necesario realizar mediciones en campo, tales como resistividad de suelo y resistencia de la malla de tierra, esto con la finalidad de determinar si el valor de resistencia de la malla de tierra cumple o no con lo establecido en la norma IEEE Std. 80-2000. Así mismo se llevaron a cabo mediciones de continuidad eléctrica entre los principales equipos y estructuras de las subestaciones y su conexión a la malla de tierra, a propósito de verificar que dichos equipos se encuentren correctamente colocados a la malla de tierra y que el valor de resistencia que ofrecen las uniones entre ellos no excedan el valor establecido por la norma. Por otra parte se realizaron simulaciones del sistema de puesta a tierra de dichas subestaciones mediante la herramienta computacional ETAP.

INDICE GENERAL

RESOLUCIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
RESUMEN.....	VIII
INDICE GENERAL.....	IX
INDICE DE TABLAS.....	XIII
INDICE DE FIGURA.....	XV
CAPITULO I.....	20
EL PROBLEMA.....	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.2 OBJETIVOS.....	22
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	22
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	22
CAPITULO II.....	23
LA EMPRESA.....	23
2.1 PETRÓLEOS DE VENEZUELA	23
2.2 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA	25
2.3 GERENCIA DE SERVICIOS ELÉCTRICAS DISTRITO MORICHAL	26
2.4 OBJETIVOS ESTRATÉGICOS.....	26
2.5 ESTRUCTURA ORGANIZATIVA	28
CAPITULO III.....	29
MARCO TEÓRICO.....	29
3.1 ANTECEDENTES.....	29
3.2 BASES TEÓRICAS	31

3.3	OBJETIVOS DE LA PUESTA A TIERRA	32
3.4	COMPONENTES DEL SISTEMA DE TIERRA	33
3.4.1	<i>Terreno</i>	33
3.4.2	<i>Electrodos</i>	33
3.4.3	<i>Uniones de la Red</i>	34
3.4.4	<i>Espaciamiento de los conductores [D]</i>	34
3.4.5	<i>La profundidad de la red</i>	35
3.4.6	<i>Corriente de falla [I_g]</i>	35
3.4.7	<i>Tiempo de liberación de la falla [T_f]:</i>	36
3.5	GUÍAS Y CRITERIOS PARA EL DISEÑO, INSTALACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	36
3.6	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES QUE DEBE PRESENTAR UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. 37	
3.7	POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.....	38
3.7.1	<i>Efecto de la frecuencia</i>	38
3.7.2	<i>El efecto de la duración y la magnitud</i>	39
3.7.3	<i>Resistencia del cuerpo humano.</i>	40
3.8	CIRCUITOS EQUIVALENTES ACCIDENTALES (ACTUALIZACIÓN STD 80 DEL IEEE 2000) 41	
3.8.1	<i>Potencial de paso tolerable</i>	46
3.8.2	<i>Potencial de contacto tolerable</i>	47
3.9	ARREGLOS O TIPOS DE PUESTA A TIERRA	48
3.9.1	<i>Electrodos de Tierra</i>	49
3.9.2	<i>Electrodos de Profundidad.</i>	50
3.9.3	<i>Las Mallas</i>	52
3.10	CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	54
3.10.1	<i>Fórmula de Schwarz.</i>	55
3.11	PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES	58
3.12	VARIACIONES DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	59
3.13	MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE SUELOS Y RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES	66
3.13.1	<i>Métodos de Medición de Resistividad Del Suelo</i>	67
3.13.1.1	<i>Método Wenner ó de los Cuatro Electrodos</i>	67

3.13.1.2	Resistividad aparente del suelo	71
3.13.1.3	Interpretación de las mediciones de las de resistividad	73
3.13.1.4	Método Empírico de Interpretación	75
3.13.1.5	Método Analítico de Interpretación	76
3.13.2	<i>Medición de resistencia de puesta a tierra de subestaciones....</i>	78
3.13.2.1	Método de la Caída de potencial	78
3.13.2.2	Factores que influyen en la medición	80
3.14	LA PIEDRA PICADA EN EL ÁREA DE LA SUBESTACIÓN	81
CAPÍTULO IV	.....	83
DESCRIPCIÓN DE LAS SUBESTACIONES	.....	83
4.1	SUBESTACIÓN MORICHAL	84
4.2	SUBESTACIÓN JOBO NORTE	86
4.3	SUBESTACIÓN TEMBLADOR	87
CAPITULO V	.....	89
MEDICIONES EN CAMPO	.....	89
5.1	MEDICIONES DE CAMPO EN LA SUBESTACIÓN MORICHAL	90
5.1.1	<i>Medición de la Resistividad Aparente del Suelo</i>	90
5.1.2	<i>Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra</i>	94
5.1.3	<i>Mediciones de Continuidad</i>	96
5.2	MEDICIONES DE CAMPO EN LA SUBESTACIÓN JOBO NORTE.....	98
5.2.1	<i>Medición de la Resistividad Aparente del Suelo</i>	98
5.2.2	<i>Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra</i>	103
5.2.3	<i>Mediciones de Continuidad</i>	105
5.3	MEDICIONES DE CAMPO EN LA SUBESTACIÓN TEMBLADOR	106
5.3.1	<i>Medición de la Resistividad Aparente del Suelo</i>	106
5.3.2	<i>Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra</i>	110
5.3.3	<i>Mediciones de Continuidad</i>	112
CAPITULO VI	.....	113
PARAMETROS DE LAS MALLAS DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE SIMULACIONES	.....	113
6.1	SUBESTACIÓN MORICHAL.....	113

6.1.1	<i>Resultados Obtenidos</i>	114
6.2	SUBESTACIÓN JOBO NORTE.....	123
6.2.1	<i>Resultados Obtenidos</i>	123
6.3	SUBESTACIÓN TEMBLADOR	129
6.3.1	<i>Resultados Obtenidos</i>	130
CAPITULO VII	.....	136
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	.....	136
7.1	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DE SUELOS Y RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA.....	137
7.1.1	<i>Subestación Morichal</i>	137
7.1.2	<i>Subestación Jobo Norte</i>	139
7.1.3	<i>Subestación Temblador</i>	142
7.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE CONTINUIDAD	144
7.2.1	<i>Subestación Morichal</i>	144
7.2.2	<i>Subestación Jobo Norte</i>	145
7.2.3	<i>Subestación Temblador</i>	145
CAPITULO VIII	.....	147
PROPUESTAS DE MEJORAS		147
8.1	PROPUESTA N° 1, HINCAMIENTO PROFUNDO.....	147
8.2	PROPUESTA N° 2, BARRAS QUÍMICAS.....	149
8.3	PROPUESTA N° 3, DISMINUCIÓN DEL RETICULADO DE LA MALLA	150
8.3.1	<i>Subestación Morichal</i>	150
8.3.2	<i>Subestación Jobo Norte</i>	151
8.3.3	<i>Subestación Temblador</i>	152
CONCLUSIONES		154
BIBLIOGRAFÍA		156
ANEXOS		157

INDICE DE TABLAS

TABLA 3.1	CALIBRE DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA.	54
TABLA 3.2	VALORES CALCULADOS DE LA EXPRESIÓN DE LAURENT.....	55
TABLA 3.3	VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDAD DE SUELOS.	61
TABLA 3.4	PORCENTAJE DE POROSIDAD SEGÚN EL TIPO DE FORMACIÓN Y LA RELACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO Y LA RESISTIVIDAD DEL AGUA.	63
TABLA 5.1.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E MORICHAL PERFIL 1.....	91
TABLA 5.2.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E MORICHAL PERFIL 2.....	91
TABLA 5.3.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E MORICHAL PERFIL 3.....	92
TABLA 5.4.	PERFILES DE MEDICIÓN DE S/E MORICHAL.....	92
TABLA 5.5.	MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA EN LA S/E MORICHAL.....	95
TABLA 5.6.	MEDICIONES DE CONTINUIDAD EN LA SUBESTACIÓN 3.....	96
TABLA 5.7.	MEDICIONES DE CONTINUIDAD EN LA SUBESTACIÓN 15.....	97
TABLA 5.8.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E JOBO NORTE PERFIL 1.....	99
TABLA 5.9.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E JOBO NORTE PERFIL 2.....	99
TABLA 5.10.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E JOBO NORTE PERFIL 3.....	99
TABLA 5.11.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E JOBO NORTE PERFIL 4.....	100
TABLA 5.12.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E JOBO NORTE PERFIL 5.....	100
TABLA 5.13.	PERFILES DE MEDICIÓN DE S/E JOBO NORTE.....	101
TABLA 5.14.	MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA EN LA S/E JOBO NORTE.....	104
TABLA 5.15.	MEDICIONES DE CONTINUIDAD EN S/E JOBO NORTE.....	105
TABLA 5.16.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E TEMBLADOR PERFIL 1.....	107

TABLA 5.17.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E TEMBLADOR PERFIL 2.	107
TABLA 5.18.	RESISTIVIDAD DEL SUELO S/E TEMBLADOR PERFIL 3.	108
TABLA 5.19.	PERFILES DE MEDICIÓN DE S/E TEMBLADOR.	108
TABLA 5.20.	MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE MALLA DE TIERRA EN LA S/E TEMBLADOR	111
TABLA 7.1.	RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA S/E MORICHAL.....	138
TABLA 7.2.	POTENCIALES DE TOQUE Y PASO DE LA S/E MORICHAL.....	139
TABLA 7.3.	RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA S/E JOBO NORTE.....	140
TABLA 7.4.	POTENCIALES DE TOQUE Y PASO DE LA S/E JOBO NORTE.....	141
TABLA 7.5.	RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA S/E TEMBLADOR.....	143
TABLA 7.6.	POTENCIALES DE TOQUE Y PASO DE LA S/E TEMBLADOR.....	143
TABLA 7.7.	VALORES CRÍTICOS ARROJADOS EN MEDICIÓN DE CONTINUIDAD EN LA S/E JOBO NORTE.....	145
TABLA 7.8.	VALORES CRÍTICOS ARROJADOS EN MEDICIÓN DE CONTINUIDAD EN LA S/E TEMBLADOR.....	145

INDICE DE FIGURA

FIGURA 2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE PDVSA DIVISIÓN ORIENTE FUENTE: PDVSA INTRANET.....	24
FIGURA 2.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE PDVSA DISTRITO MORICHAL	24
FIGURA 2.3. ORGANIGRAMA DE LA GERENCIA DE SERVICIOS ELÉCTRICOS MORICHAL	28
FIGURA 3.1. EXPOSICIÓN A LA TENSIÓN DE CONTACTO.....	42
FIGURA 3.2. IMPEDANCIA DEL CIRCUITO PARA LA TENSIÓN DE CONTACTO....	43
FIGURA 3.3. CIRCUITO DE LA TENSIÓN DE CONTACTO.....	43
FIGURA 3.4. EXPOSICIÓN A LA TENSIÓN DE PASO.....	44
FIGURA 3.5. CIRCUITO DE LA TENSIÓN DE PASO	44
FIGURA 3.6. C_s VS. H_s	46
FIGURA 3.7. POTENCIALES.....	48
FIGURA 3.8. SITUACIÓN TÍPICA DE POTENCIAL TRANSFERIDO	48
FIGURA 3.9. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA: A) BARRA O JABALINA; B) ARREGLO DE ELECTRODOS EN PARALELO; C) MALLA; D) PLATO.	49
FIGURA 3.10. MALLA DE TIERRA	54
FIGURA 3.11. COEFICIENTES K_1 Y K_2	58
FIGURA 3.12. ARREGLO BÁSICO PARA A MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD.....	60
FIGURA 3.13. VARIACIÓN DEL VALOR DE LA RESISTIVIDAD CON EL TIPO DE SUELO.	62
FIGURA 3.14. PARÁMETROS QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD.....	65
FIGURA 3.15. MÉTODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS.....	68

FIGURA 3.16. DIRECCIONES Y LONGITUDES RECOMENDADAS PARA LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD.....	70
FIGURA 3.17. DIRECCIONES Y LONGITUDES DE ACUERDO AL PREDIO DISPONIBLE RECOMENDADAS PARA LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD.....	70
FIGURA 3.18. TENDENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	73
FIGURA 3.19. SUELO DE DOS CAPAS	74
FIGURA 3.20. MÉTODO EMPÍRICO DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	76
FIGURA 3.21. RESULTADOS POR COMPUTADORA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.	77
FIGURA 3.22. ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LOS ELECTRODOS PARA MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.	79
FIGURA 3.23. PERFIL ESPERADO DEL VALOR DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.	80
FIGURA 5.1. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LA S/E MORICHAL.....	90
FIGURA 5.2. TENDENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LA SUBESTACIÓN MORICHAL.....	93
FIGURA 5.3. UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA DE LA S/E MORICHAL	94
FIGURA 5.4. PERFIL DEL VALOR DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL.	95
FIGURA 5.5. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LA S/E JOBO NORTE	98
FIGURA 5.6. TENDENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LA SUBESTACIÓN JOBO NORTE.....	102
FIGURA 5.7. UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA DE LA S/E JOBO NORTE	103

FIGURA 5.8. PERFIL DEL VALOR DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA S/E JOBO NORTE.....	104
FIGURA 5.9. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LA S/E TEMBLADOR.....	106
FIGURA 5.10. TENDENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LA SUBESTACIÓN TEMBLADOR.....	109
FIGURA 5.11. UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA DE LA S/E TEMBLADOR	110
FIGURA 5.12. PERFIL DEL VALOR DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN TEMBLADOR.....	111
FIGURA 6.1. MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA S/E MORICHAL MOSTRADA EN LA SIMULACIÓN.....	114
FIGURA 6.2. IMAGEN EN 3D DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL.....	115
FIGURA 6.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS BARRAS Y LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN LA S/E MORICHAL.....	116
FIGURA 6.4. RESUMEN DE ALERTAS S/E MORICHAL CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD MEDIDO	116
FIGURA 6.5. PERFIL DEL POTENCIAL DE PASO DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL, CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD MEDIDO.....	117
FIGURA 6.6. PERFIL DEL POTENCIAL DE TOQUE DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL, CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD MEDIDO.....	117
FIGURA 6.7. PERFIL DEL POTENCIAL ABSOLUTO DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL, CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD MEDIDO.....	118
FIGURA 6.8. RESUMEN DE ALERTAS DE LA S/E MORICHAL, CONSIDERANDO EL VALOR DE RESISTIVIDAD ESTABLECIDO EN EL PLANO.....	119

FIGURA 6.9. PERFIL DEL POTENCIAL DE PASO DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL, CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD ESTABLECIDO EN EL PLANO.....	120
FIGURA 6.10. PERFIL DEL POTENCIAL DE TOQUE DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL, CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD ESTABLECIDO EN EL PLANO.....	120
FIGURA 6.11. PERFIL DEL POTENCIAL ABSOLUTO DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL, CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD ESTABLECIDO EN EL PLANO.....	121
FIGURA 6.12. RESUMEN DE ALERTAS S/E MORICHAL CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD CALCULADA.....	122
FIGURA 6.13. MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA S/E JOBO NORTE MOSTRADA EN LA SIMULACIÓN.....	124
FIGURA 6.14. IMAGEN EN 3D DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN JOBO NORTE.....	125
FIGURA 6.15. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS BARRAS Y LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO DE LA S/E JOBO NORTE.....	125
FIGURA 6.16. RESUMEN DE ALERTAS DE LA S/E JOBO NORTE.....	126
FIGURA 6.17. PERFIL DEL POTENCIAL DE PASO DE LA SUBESTACIÓN JOBO NORTE	127
FIGURA 6.18. PERFIL DEL POTENCIAL DE TOQUE DE LA SUBESTACIÓN JOBO NORTE	127
FIGURA 6.19. PERFIL DEL POTENCIAL ABSOLUTO DE LA SUBESTACIÓN JOBO NORTE	128
FIGURA 6.20. RESUMEN DE ALERTAS S/E JOBO NORTE CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD CALCULADA.....	129
FIGURA 6.21. MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA S/E TEMBLADOR MOSTRADA EN LA SIMULACIÓN.....	130
FIGURA 6.22. IMAGEN EN 3D DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN TEMBLADOR.....	131

FIGURA 6.23. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS BARRAS Y LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO DE LA S/E TEMBLADOR	132
FIGURA 6.24. RESUMEN DE ALERTAS DE LA S/E TEMBLADOR	132
FIGURA 6.25. PERFIL DEL POTENCIAL DE PASO DE LA SUBESTACIÓN TEMBLADOR	133
FIGURA 6.26. PERFIL DEL POTENCIAL DE TOQUE DE LA SUBESTACIÓN TEMBLADOR	133
FIGURA 6.27. PERFIL DEL POTENCIAL ABSOLUTO DE LA SUBESTACIÓN TEMBLADOR	134
FIGURA 6.28. RESUMEN DE ALERTAS S/E TEMBLADOR CONSIDERANDO VALOR DE RESISTIVIDAD CALCULADA	135
FIGURA 7.1. TENDENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO DE LA SUBESTACIÓN MORICHAL.....	137
FIGURA 7.2. TENDENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO DE LA SUBESTACIÓN JOBO NORTE.....	140
FIGURA 7.3. TENDENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO DE LA SUBESTACIÓN TEMBLADOR.....	142

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Debido a la importancia de las subestaciones dentro del sistema eléctrico del Distrito Morichal, resulta necesario realizar constantemente revisiones, mantenimientos y reparaciones para garantizar que éstas operen de manera eficiente, manteniendo siempre como premisa la seguridad, tanto de los equipos como del personal. Así pues, uno de los factores de mayor relevancia en términos de seguridad dentro de las subestaciones eléctricas es el Sistema de Puesta a Tierra (SPT). Éste sirve principalmente para protección de las personas que se encuentran dentro de las subestaciones como en sus alrededores, mantener a un mismo potencial los equipos y para aumentar la sensibilidad de las protecciones.

El servicio eléctrico en el Distrito se realiza a través de dos circuitos o ternas en 115kV, provenientes de la subestación Palital (EDELCA), de donde se alimentan las subestaciones eléctricas Morichal, Jobo Norte, Cerro Negro, Temblador y Petromonagas. La configuración en anillo de la red a la cual están conectadas les permite suministrar el flujo eléctrico de forma continua hacia las diferentes estaciones de flujo, instalaciones petroleras, pozos de prueba, edificaciones principales del campo petrolero, entre otras, en niveles de 34.5, 13.8, 4.16, 2.4, y 0.48 kV.

El SPT de las subestaciones eléctricas Morichal, Temblador y Jobo Norte data de aproximadamente 28 años atrás, aunado a esto el cambio en la configuración de alimentación del sistema eléctrico del Distrito, la falta de revisión periódica, la interconexión con otros sistemas, la incorporación de

nuevas cargas y equipos entre otras, hace necesario llevar a cabo una evaluación que permita conocer en que condiciones se encuentra el sistema de puesta a tierra de estas tres subestaciones.

Para cumplir con este propósito es necesario realizar mediciones de campo, tales como resistividad de suelos y resistencia de la malla de tierra en cada una de las subestaciones, a fin de verificar si dichos sistemas cumplen o no con los criterios para los cuales fueron diseñados, tomando como base el estándar 80 de la norma IEEE. Esta evaluación permitirá ofrecer propuestas que ayuden a mejorar estos SPT, con la finalidad de lograr un mayor índice de seguridad dentro de las subestaciones, tanto para el personal que constantemente está en contacto con ellas como para los equipos.

Actualmente, no existen registros sobre anteriores evaluaciones al SPT de las subestaciones Morichal, Temblador y Jobo Norte, por lo cual este proyecto servirá como referencia para posteriores análisis del sistema de puesta a tierra de otras subestaciones del Distrito Morichal. Este estudio resulta de importancia, ya que permitirá determinar las condiciones reales en las cuales se encuentra actualmente la malla de tierra de cada una de las subestaciones bajo análisis, y así tomar las medidas que se consideren necesarias para aumentar la confiabilidad del sistema de puesta a tierra de estas instalaciones eléctricas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el sistema de puesta a tierra de las subestaciones eléctricas Morichal, Temblador y Jobo Norte de 115/34.5 kV pertenecientes a PDVSA Distrito Morichal.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Obtener el perfil de resistividad del suelo y el valor de resistencia de la malla de tierra de las subestaciones eléctricas Morichal, Temblador y Jobo Norte.
2. Obtener valores de continuidad entre los equipos y su conexión a la malla de tierra en cada una de las subestaciones.
3. Simular el diseño original del sistema de puesta a tierra de las subestaciones, mediante la herramienta computacional Electrical Transient Analysis Program (ETAP).
4. Realizar comparaciones entre los resultados arrojados por las simulaciones y los valores obtenidos en las mediciones, tomando como base la norma IEEE.
5. Proponer mejoras para el sistema de puesta a tierra de las subestaciones eléctricas especificadas, con base en los criterios establecidos en el Std. IEEE 80-2000.

CAPITULO II

LA EMPRESA

2.1 Petróleos de Venezuela

Petróleos de Venezuela S.A. es la corporación estatal de la República Bolivariana de Venezuela que se encarga de la exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos, de manera eficiente, rentable, segura, transparente y comprometida con la protección ambiental.

La empresa PDVSA tiene su sede principal en la ciudad de Caracas y está presente en todos los estados petroleros a lo largo de la geografía nacional como lo son Falcón, Zulia, Lara, Barinas, Apure, Guárico, Anzoátegui y Monagas.

PDVSA tiene divididos sus trabajos en distrito operacionales que están liderizados por una gerencia distrital, estructurados organizativamente en unidades básicas de producción y procesos.

El área operativa de PDVSA Oriente está conformada por cinco distritos operacionales: Refinación (Puerto la Cruz), Anaco, Norte (Punta de Mata y Maturín), Sur (San Tomé) y Morichal.

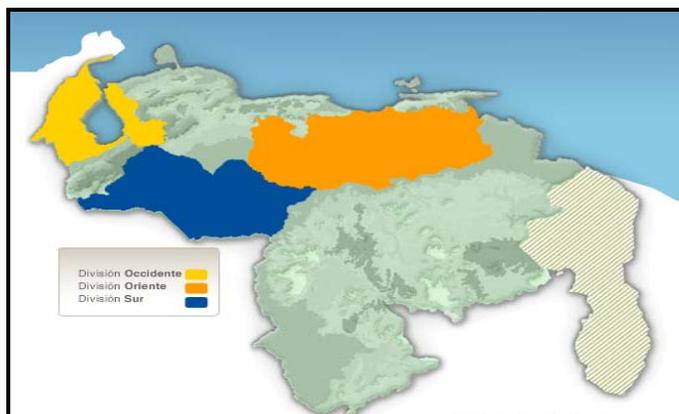


Figura 2.1. Ubicación Geográfica de PDVSA División Oriente
Fuente: PDVSA Intranet

El Distrito Morichal, pertenece a la División Oriente, se encuentra ubicada al suroeste del Estado Monagas, en los Municipios Libertador, Uracoa y Sotillo. Está conformado por dos Unidades de Explotación: Pesado y Extra pesado.

Posee una superficie de 1.550 Km², con un total de 559 pozos activos distribuidos en 9 campos.

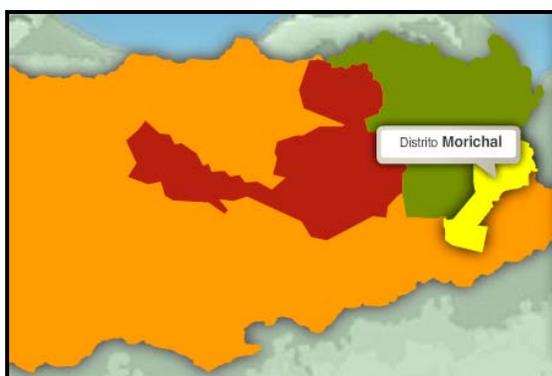


Figura 2.2. Ubicación Geográfica de PDVSA Distrito Morichal
Fuente: PDVSA Intranet

2.2 Reseña Histórica De La Empresa

El 14 de diciembre de 1922 comenzaron las actividades petroleras en Venezuela, a partir de este momento este mineral es descubierto en el norte del estado Anzoátegui y en el área del lago de Maracaibo. En el año 1923 en el estado Delaware (USA), se forma la Venezuela OIL COMPANY S.A. para desarrollar actividades petroleras en el país bajo la denominación de GULF OIL COMPANY.

Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) fue creada en 1976 a través de la nacionalización del petróleo y desde entonces se ha convertido en una de las corporaciones más importantes del mundo.

A mediados de la década de los sesenta se realiza la búsqueda de crudos pesados en la faja petrolífera del Orinoco. En el año 1982 se da inicio a la creación del criogénico de Oriente, que comienza sus actividades en 1985.

Para el año 1988 se realizó un proceso de transformación de la industria petrolera con el fin de reducir costos y conformar así una sola empresa denominada PDVSA Petróleo y Gas, que cuenta con las divisiones operacionales: PDVSA Exploración, Producción y Mejoramiento, que se encarga de explorar, explotar y producir crudo y gas y PDVSA Manufactura y Mercadeo, encargada del negocio de refinación y venta al mercado interno y/o externo. Ambas divisiones son apoyadas por la división PDVSA servicios que le da aportes a las actividades medulares del negocio.

2.3 Gerencia de Servicios Eléctricas Distrito Morichal

Misión

El Departamento de Servicios Eléctricos Morichal, tiene como Misión Ser la Organización responsable de Planificar, Operar y Mantener, en forma eficiente la Transmisión y Distribución de la energía y velar por la confiabilidad del Sistema Eléctrico, para contribuir con la continuidad operacional de las Instalaciones Petroleras, con visión del entorno, en sintonía con los Lineamientos Corporativos.

Visión

El Departamento de Servicios Eléctricos Morichal, tiene como visión Ser la Gerencia Líder que permita dar respuesta oportuna, eficiente y segura a los requerimientos de energía eléctrica a todos los procesos operativos de la Industria Petrolera Venezolana cumpliendo los niveles mas elevados de regulación, estándares de calidad y confiabilidad, fortaleciendo el Desarrollo de la Nación, aplicando las Nuevas Tecnologías y adelantos de Investigación.

2.4 Objetivos Estratégicos

1. Maximizar la disponibilidad del Sistema Eléctrico a fin de minimizar la producción diferida de Petróleo, Gas y Productos manufacturados, por fallas eléctricas.

2. Velar por la operatividad y seguridad de las instalaciones eléctricas.

3. Establecer sinergia con las empresas de energía eléctrica para disponer de un suministro continuo y confiable de electricidad; para optimizar esfuerzos, experticias en mantenimiento y operación de sistemas eléctricos.

4. Administrar oportunamente, con sentido de responsabilidad de los recursos y con la calidad necesaria, la energía eléctrica, los planes de inversiones y los servicios de acuerdo a los requerimientos y necesidades de la División.

5. Preservar la disponibilidad y la durabilidad de los equipos e instalaciones eléctricas, cumpliendo estándares clase mundial.

6. Intensificar el uso y manejo de los sistemas informáticos: Simulación de sistemas eléctricos, administrativos y operativos; para soportar los procesos de toma de decisiones sin afectar la continuidad operacional.

7. Planificar, optimizar y desarrollar la infraestructura eléctrica adaptada a las exigencias del plan de negocios de la División, los lineamientos Corporativos y con visión Nación (Plan Siembra del Petróleo, MEP).

8. Desarrollar las competencias técnicas, genéricas, gerenciales, habilitantes, operacionales, de seguridad, ambientales y administrativas del personal.

9. Fortalecer la actitud proactiva, innovadora y con alto sentido de pertenencia a la misión de Servicios Eléctricos, bajo valores éticos y morales de la corporación.

10. Apalancar el desarrollo socioeconómico endógeno mediante el fortalecimiento e incentivo a la autonomía y soberanía tecnológica.

11. Promocionar la eficiencia energética, el Desarrollo Tecnológico y el aprovechamiento de los recursos naturales y las energías renovables.

2.5 Estructura Organizativa

En los esquemas mostrados a continuación se observa la estructura organizativa actual de la gerencia de servicios eléctricos Morichal.

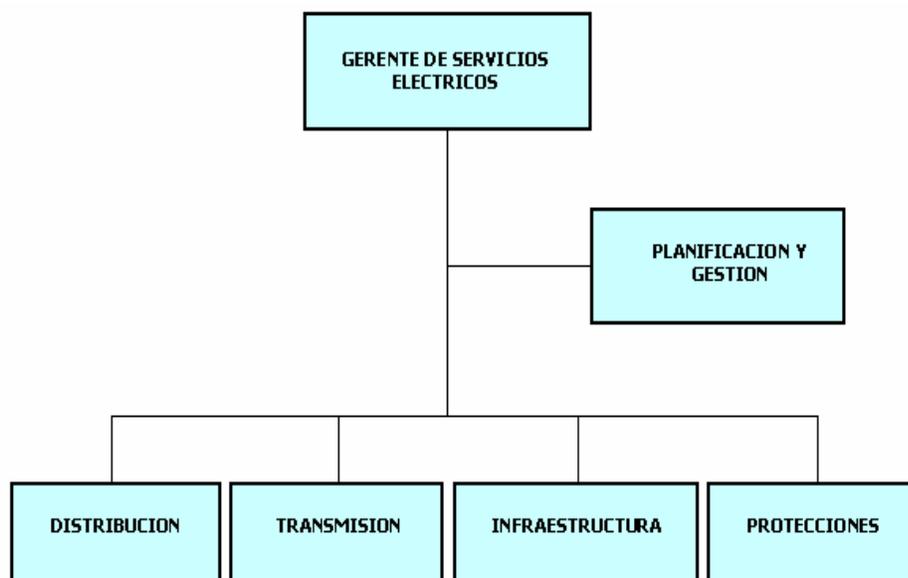


Figura 2.3. Organigrama de la Gerencia de Servicios Eléctricos Morichal

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

A continuación se muestran de manera resumida algunos trabajos relacionados con el tema en estudio:

En Julio del año 2008, Herrera María E. llevo a cabo un trabajo de grado titulado “Sistema de Puesta a Tierra de una Central de Generación de Energía Eléctrica con grupos de Electrógenos de baja tensión y Ajuste de Protecciones”. En este proyecto se realizo el diseño del sistema de puesta a tierra y ajuste de los relés de protección de una central de generación de energía eléctrica con grupos electrógenos de baja tensión ubicados en una planta automotriz, basándose en las normas IEEE y en simulaciones del sistema mediante el software ETAP. Para el diseño del sistema de puesta a tierra se tomo como base la norma IEEE 80-2000, los resultados obtenidos fueron comparados con los arrojados a través de las simulaciones.

Para Agosto del año 2007, Arias Aparicio José Damián, desarrollo un trabajo de grado titulado “Diseño de Puesta a Tierra para Protección Contra Sobretensiones de una Subestación de 15MVA a los niveles de 13,8/4,16 KV”. En este proyecto se describe de manera general la subestación y específicamente los equipos de mayor importancia dentro de la misma, de igual manera se hace un estudio de resistividad del suelo mediante modelación de dos capas. Se presenta un estudio de corto circuito realizado mediante la herramienta computacional ETAP y finalmente se realiza el diseño de la malla de tierra, basado en la aplicación de la norma IEEE 80 2000.

En Marzo de 2006, Peña José V. llevó a cabo un trabajo de grado nombrado “Evaluación de los Sistemas de Puesta a Tierra y Protección Contra Descargas Atmosféricas en el Sistema Eléctrico de un Taladro de Perforación de Petróleo”. Esta evaluación se basó en la ejecución de mediciones en campo, tales como mediciones de resistividad en terrenos aledaños, así como también en la medición de la resistencia de la malla de tierra. En cuanto a la evaluación de las protecciones contra descargas atmosféricas, esta se realizó mediante el método Electrogeométrico de la IEEE “GUIDE FOR DIRECT LIGHTNING STROKE SHIELDING OF SUBSTATIONS” y la norma NFPA 780 a fin de verificar si los equipos se encontraban dentro de la zona de protección establecida por el método.

En Agosto del año 2005, Hernández Velásquez Carlos Eduardo, realizó un trabajo de grado titulado “Evaluación de los sistemas de puesta a tierra de las subestaciones de distribución de SEMDA” el desarrollo de este proyecto se enfocó en la evaluación de la puesta a tierra de las subestaciones eléctricas de distribución de SEMDA, a través de las cuales se distribuye energía eléctrica a todo el Estado Monagas y parte del Estado Delta Amacuro. Este estudio abarca una breve descripción de los sistemas de puesta a tierra de dichas subestaciones, de igual forma se especifican las pruebas realizadas, con el objeto de determinar cuáles fueron las subestaciones que resultaron más críticas y de esta manera rediseñar su sistema de puesta a tierra con la utilización de los estándares IEEE. Adicionalmente se determinaron las zonas con mayor probabilidad de descargas atmosféricas, mediante la utilización de la Carta Ceraunica de Venezuela.

Por último en Octubre del año 2003, Golindano Wilmer J. realizó un trabajo de grado titulado “Evaluación de los Sistemas de Puesta a Tierra y Sistemas de Protección contra Descargas Atmosféricas en las Subestaciones

de PDVSA Anaco”. Para la realización de este trabajo se llevaron a cabo mediciones de resistividad del suelo y mediciones de resistencia de la malla de tierra en cada una de las subestaciones bajo análisis. Igualmente se realizaron simulaciones del sistema de puesta a tierra de dichas subestaciones mediante la herramienta computacional ETAP. La evaluación de la protección que ofrecen las Puntas Franklin, Cables de Guarda, entre otros, se realizó mediante el método Electrogeométrico de la IEEE “GUIDE FOR DIRECT LIGHTNING STROKE SHIELDING OF SUBSTATIONS” y la norma NFPA 780 a fin de verificar si los equipos se encontraban dentro de la zona de protección establecida por el método.

3.2 Bases Teóricas

La operación de todo equipo de supervisión y protección requiere un único y universal sistema de referencia, el cual nos garantice su operación dentro de rangos preestablecidos independientemente de la zona, área o tecnología involucrada. Por convención internacional este sistema universal de referencia y sumidero de todo fenómeno electromagnético o electrostático no deseado, es el Sistema de Puesta a Tierra, por ser el único medio de interconexión y referencia con todo fenómeno electrostático que se produzca dentro de una instalación eléctrica.

La definición de puesta a tierra comprende toda conexión directa, sin fusibles ni interrupción alguna, de sección suficiente entre partes de una instalación y un electrodo o grupo de ellos enterrados en el suelo, con el objeto de que en el conjunto de instalaciones no exista diferencia de potencial apreciable, que presenten una condición de riesgo al factor humano o a la operación de los distintos componentes del sistema, asegurando el permitir el paso de todas aquellas corrientes (de falla u origen atmosférico)

fuera del sistema, sin causar daño alguno garantizando la operación de las protecciones.

El tratamiento para el sistema de puesta a tierra en subestaciones eléctricas es similar cuando ellas están ubicadas ya sea en un sistema de distribución, de transmisión o de generación de energía eléctrica. Generalmente el objetivo primario para este tipo de instalaciones lo constituye el aspecto de seguridad, debido a las elevadas corrientes que pueden generarse ante una eventual falla del sistema. (Thielen, 2007)

3.3 Objetivos de la Puesta A Tierra

Se pueden resumir los objetivos que se persiguen con una conexión a tierra tanto de un sistema eléctrico como de los equipos, en:

- Drenar o derivar a la tierra las corrientes de falla y acumulación de cargas electrostáticas.
- Minimizar el gradiente de potencial a tierra y sus tensiones asociadas, tales como tensión de toque y paso.
- Completar la protección externa contra descargas atmosféricas del edificio o instalación, ofreciéndole un trayecto inmediato y efectivo a la intensidad de corriente del rayo.
- Mantener un potencial de referencia para la adecuada operación de instrumentos y equipos.

- Cumplir los requerimientos exigidos por los fabricantes de los equipos y normas internacionales o especificaciones de las empresas especializadas (Ojeda, N. 2008)

3.4 Componentes del Sistema de Tierra

La función principal de los sistemas de conexión a tierra es proporcionar una trayectoria adecuada a las corrientes que se originan cuando se presenta una falla a tierra en la subestación eléctrica. Para lograr este objetivo el sistema de conexión a tierra está constituido por una red de electrodos unidos sólidamente y enterrados a una profundidad conveniente. Los componentes que influyen directamente sobre el diseño del sistema de conexión a tierra son:

3.4.1 Terreno

El terreno en el que se instala el sistema de conexión a tierra tiene un papel importante en el funcionamiento del sistema debido a las siguientes razones:

- Actúa como un elemento disipador de toda la energía producida durante una falla a tierra.
- Sirve como protección y sostén a los demás componentes del sistema.
- La resistividad del terreno es uno de los parámetros de diseño más importantes.

3.4.2 Electrodo

El sistema de conexión a tierra generalmente está formado por un conjunto de electrodos horizontales (red de tierra) y verticales (varillas de

tierra), siendo en la mayoría de los casos los elementos horizontales los que constituyen el principal elemento de control de gradientes de potencial. Los elementos verticales pueden ser útiles cuando se presentan variaciones importantes de la resistividad del terreno, ya que estos se pueden enterrar a una profundidad mayor donde es posible encontrar una resistividad menor y poca variación de esta.

La red de tierra consiste en un conductor continuo que rodea la mayor área posible de equipos. Dentro de la red se disponen conductores en líneas paralelas en ambos sentidos y de acuerdo a la distribución de los equipos principales. En los puntos de cruce los conductores deben unirse sólidamente. Las varillas de tierra deben colocarse en las esquinas de la red y en las regiones donde de acuerdo a la importancia de los equipos se requiera.

3.4.3 Uniones de la Red

Las uniones mecánicas, soldadas, a compresión, etc., entre los conductores de la red aseguran el adecuado control de potenciales en la superficie, también contribuyen a formar trayectorias múltiples para la corriente de falla, limitando las diferencias de tensión en la propia. Todos los puntos deben evaluarse en términos de continuidad, capacidad térmica, rigidez mecánica y confiabilidad.

3.4.4 Espaciamiento de los conductores [D]

El espaciamiento típico de los conductores varía de 3 a 15 m, aunque un espaciamiento óptimo en el control de los gradientes de potencial se encuentra entre 3 a 7 m, la relación de los lados de una malla generalmente

es de 1:1 y hasta 1:3, a menos que un análisis (asistido por computadora) garantice valores más extremos.

3.4.5 La profundidad de la red

Valores típicos para la profundidad de la red varían de 0,5 m hasta 1,3 m, pero para lograr un óptimo control de los gradientes de potencial deberán considerarse profundidades de 0,3 a 0,8 m.

3.4.6 Corriente de falla [I_g]

Es indispensable entender que el comportamiento de un sistema de conexión a tierra es proporcional a la magnitud de la corriente de falla que entra al suelo a través de la red de tierras; sin embargo, no se debe aceptar que toda la corriente de falla a tierra se inyecta al suelo, ya que si existe una trayectoria de retorno entre el punto de falla y la fuente a través de los hilos de guarda, una cantidad importante de corriente regresa a la fuente, reduciendo la magnitud de dicha corriente.

En términos generales la magnitud de la corriente de falla? es menor que la corriente de falla de una fase a tierra calculada por medio de un estudio de cortocircuito (vale la pena señalar, que en ningún caso debe tomarse el valor correspondiente al de falla trifásica, ya que es diferente). Sin embargo, debido a que el procedimiento para determinar la máxima corriente de falla propuesto por la guía 80 del IEEE, no es un procedimiento sencillo y práctico, se recomienda utilizar un factor de decremento de 0,8 para subestaciones generadoras y de distribución y un factor de 0,65 para subestaciones de transmisión.

3.4.7 Tiempo de liberación de la falla [T_f]:

El tiempo de liberación de la falla y el de duración de shock eléctrico están íntimamente relacionados. La selección de t_f debe reflejar el tiempo de liberación de falla de los dispositivos de protección de la subestación. En la práctica, se consideran valores típicos dentro de un rango de 0,25-1,0 segundos; aunque para el caso de un análisis preliminar se puede usar un valor de 0,5 segundos con buenos resultados. (Velásquez, R. 2005)

3.5 Guías y Criterios para el Diseño, Instalación y Evaluación de un Sistema de Puesta a Tierra

Existen guía, recomendaciones y criterios de cálculo para diseñar una red de puesta a tierra y la puesta a tierra de equipos. Estos criterios varían en su objetivo y van desde obtener un pre-determinado valor de resistencia de conexión a tierra hasta la obtención de una superficie equipotencial. Estas guías o recomendaciones pueden encontrarse en normas reconocidas internacionalmente, como las siguientes:

- IEEE Std 80 IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding.
- IEEE Std 81 IEEE Guide for measuring Herat resistivity. Ground Impedance and Earth surface potentials of a ground System.
- IEEE Std 142-1982 IEEE recommended practice for grounding of Industrial and commercial power systems.
- IEEE Std 1100-1992 IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding sensitive electronic equipment.
- ANSI C2-1993 National Electrical Safety Code.
- COVENIN 200 Código Eléctrico Nacional.
- IEEE Std 1100-1992 IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding sensitive electronic equipment.

- Neta International Electrical Testing Association for use by Electrical Power Distribution System Engineers.

Estas guías o recomendaciones han sido elaboradas con la experiencia adquirida durante muchos años y se han validado con el beneficio obtenido a través de una correcta operación de los equipos eléctricos y electrónicos sensibles y en la minimización del riesgo de electrocución para las personas y animales. (Velásquez, R. 2005)

3.6 Características Principales que debe Presentar un Sistema de Puesta a Tierra.

Un adecuado **SPAT** debe cumplir con una serie de especificaciones fundamentales como:

- Conducir a tierra las corrientes de fallas sin provocar gradientes de potencial peligrosos sobre la superficie del terreno. Además, debe ser capaz de conducir estas corrientes durante el mayor tiempo posible, sin calentamiento de sus partes.

- Tener una impedancia lo más baja posible, considerando el aspecto económico-técnico. El valor de la resistencia del SPAT varía de acuerdo con el sistema, la instalación o equipo. Por ejemplo; para el caso de una Subestación Eléctrica este valor puede variar de uno (1) a cinco (5) Ω según la norma IEEE std. 80. Si consideramos las líneas de transmisión el valor debe ser como máximo de 20 Ω , esto para líneas de CADAFE como para las líneas de EDELCA, sin importar el nivel de tensión. En el caso de edificaciones con niveles de tensión por debajo de los 1000 V, el Código Eléctrico Nacional establece como valor de referencia 25 Ω , pero para una

Caseta de Telecomunicaciones las empresas han establecido valores por debajo de los cinco (5) Ω .

- Los electrodos y conductores de puesta a tierra deben ser resistentes a los ataques corrosivos, tanto del terreno como de la atmósfera.

- Tener durante todas las épocas del año un valor de resistencia que garantice la detección de fallas a tierra y pronta operación de los dispositivos de protección.

- Su costo debe ser lo más bajo posible. (Ojeda, N. 2008)

3.7 Potenciales Tolerables Por el Cuerpo Humano

En el momento que el cuerpo humano se pone en contacto con alguna superficie o parte metálica con un nivel de tensión o potencial distinto de cero, circulará a través del mismo una corriente eléctrica, los efectos de la corriente que circula a través de las partes vitales del cuerpo humano depende de la duración, magnitud y frecuencia de la misma. Al exponerse, la consecuencia más peligrosa es la fibrilación ventricular, que consiste en la restricción inmediata de la circulación sanguínea.

3.7.1 Efecto de la frecuencia

Los seres humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica, en las frecuencias de 50 ó 60 Hz. Las corrientes, cerca de 0.1 amperio pueden ser mortales. Investigaciones indican que el cuerpo humano puede soportar una corriente un poco mayor a 25 Hz y en corriente directa 5 veces más grande.

3.7.2 El efecto de la duración y la magnitud

Los efectos fisiológicos de la corriente eléctrica establecidos en orden de incremento de la magnitud de corriente son: el umbral de percepción, contracción muscular, insensibilidad, fibrilación del corazón, obstrucción del nervio respiratorio y quemaduras.

La corriente de 1mA se reconoce generalmente por el umbral de percepción; que es la magnitud de corriente en la cual una persona es capaz de sentir una sensación suave de hormigueo en sus manos o dedos, causado por la corriente que circula por su cuerpo en ese momento.

Las corrientes de 1 a 6 mA, se catalogan a menudo como corrientes de soltura (liberación) aun cuando son desagradables de soportar, generalmente no dañan la habilidad de una persona en controlar sus músculos para liberar un objeto energizado que este sosteniendo.

Corrientes comprendidas en el rango de los 9 a 25 mA, son dolorosas y resulta casi imposible liberar objetos energizados sujetados con la mano. Debido a las corrientes elevadas, las contracciones musculares dificultan la respiración.

Este efecto no es permanente y desaparece cuando se interrumpe el flujo de corriente, a menos que la contracción sea muy severa y obstruya la respiración por minutos en lugar de segundos será necesario aplicar la resucitación artificial. Cuando el valor de la corriente se encuentre en el rango de los 60 a 100 mA, la fibrilación ventricular, el paro del corazón o la abstención de respiración, podría causar alguno daño o la muerte.

Al enfatizar la importancia del umbral de la fibrilación las corrientes pueden mantenerse por debajo de este valor mediante un cuidadoso diseño en el sistema de puesta a tierra.

La corriente de magnitud I_B y rango de duración 0.03 a 3 segundos que no produce fibrilación, está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo y se describe en la siguiente ecuación:

$$(I_B)^2 t_s = S_B \quad (3.1)$$

Donde:

I_B = Magnitud rms de la corriente que fluye por el cuerpo.

t_s = Duración de flujo de corriente en segundo.

S_B = Constante empírica relacionada con la energía tolerada por un cierto porcentaje de una población dada.

3.7.3 Resistencia del cuerpo humano.

Para la corriente directa y para la corriente alterna, el cuerpo humano puede representarse mediante una resistencia. Esta resistencia está medida entre extremidades, esto es, entre una mano y ambos pies o entre un pie y otro en cualquiera de los dos casos el valor de esta resistencia es difícil de establecer.

Debido a los diversos factores involucrados, los valores exactos son difíciles de establecer. Para muchos de los cálculos se considera que la resistencia del tejido interno del cuerpo, sin incluir la piel, es aproximadamente de 300 Ω , mientras que si la piel es considerada el valor

puede oscilar entre 500 y 3000 Ω . Adicionalmente, se indica que los valores de resistencia de contacto del zapato y/o de la mano son despreciables.

Un valor de 1000 Ω es recomendado para los cálculos, definiendo la resistencia del cuerpo como:

$$R_B = 1000 \Omega$$

Para altos voltajes y corrientes (arriba de 1kV y 5 A) la resistencia disminuye por daño o perforación de la piel en el punto de contacto. (Barahona, C. 2003)

3.8 Circuitos Equivalentes Accidentales (Actualización std 80 del IEEE 2000)

Usando el valor de la corriente tolerable por el cuerpo establecido anteriormente y las constantes apropiadas del circuito, es posible obtener el voltaje tolerable entre dos puntos críticos de contacto. (Velásquez, R. 2005)

Para el análisis del circuito equivalente se aplicara la siguiente notación, esto se ilustra en la figura 3.1:

I_b =corriente en el cuerpo (el cuerpo es parte del circuito accidental) [A]

R_A =Resistencia efectiva total del circuito accidental [Ω]

V_A =La tensión efectiva en el circuito accidental (paso o contacto) [V]

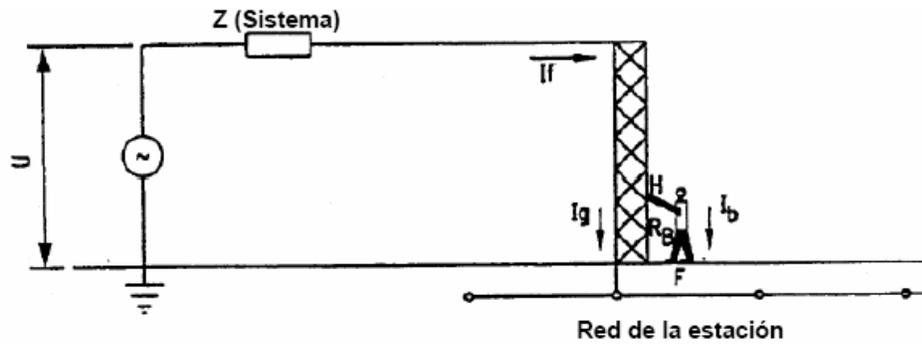


Figura 3.1. Exposición a la Tensión de Contacto

Fuente: Velásquez, R. 2005

La tensión efectiva total tolerable del circuito accidental es aquella que producirá el flujo de corriente en el cuerpo.

La figura 3.1 muestra la corriente de falla I_f , la cual será descargada a tierra a través del sistema de tierras de la subestación y hay una persona tocando la estructura metálica H . Varias impedancias son mostradas en el circuito de la figura 3.2. El terminal H es un punto en el sistema que está al mismo potencial de la red. La corriente I_b fluye desde H , a través del cuerpo de la persona a tierra en F . el teorema de Thevenin permite representar estas dos terminales (H , F), en la red como la mostrada en la figura 3.1 y el circuito eléctrico mostrado en la figura 3.2

La tensión de Thevenin V_{Th} , es la tensión entre las terminales H y F cuando una persona no está presente en este punto. La impedancia de Thevenin Z_{Th} , es la impedancia del sistema visto desde los puntos H y F , con una fuente de tensión del sistema cortocircuitada. La corriente I_b a través del cuerpo de una persona, la cual está en la situación mencionada y haciendo contacto en la posición H y F , está dada por:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (3.2)$$

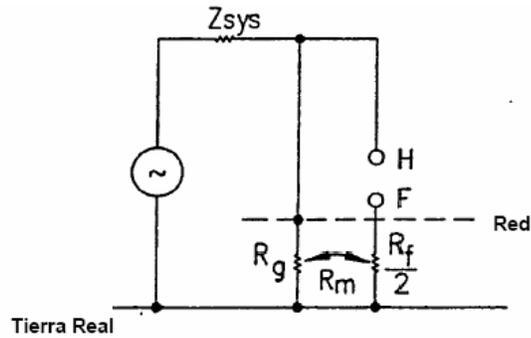


Figura 3.2. Impedancia del Circuito para la Tensión de Contacto.

Fuente: Velásquez, R. 2005

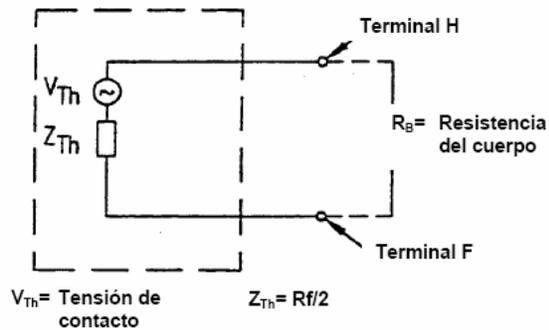


Figura 3.3. Circuito de la Tensión de Contacto.

Fuente: Velásquez, R. 2005

Donde R_B es la resistencia del cuerpo humano en Ω .

La figura 3.4 muestra la corriente de falla I_f , la cual será descargada a tierra a través del sistema de puesta a tierra de la subestación. La corriente I_b , fluye desde un pie $F1$ a través del cuerpo de una persona a $F2$. Las terminales $F1$ y $F2$ son las áreas sobre la superficie de la tierra en donde los

pies están haciendo contacto con la tierra respectivamente. La tensión de Thevenin V_{th} es la tensión entre las terminales F1 y F2 cuando la persona no está presente en este punto. La impedancia de Thevenin Z_{th} es la impedancia del sistema, visto desde los puntos F1 y F2, con una fuente de tensión del sistema cortocircuitada.

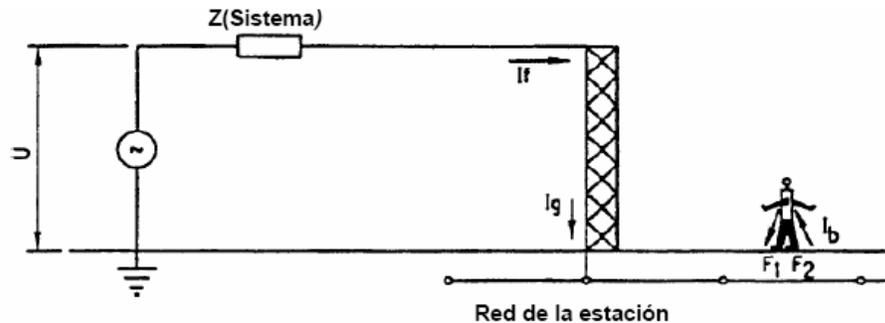


Figura 3.4. Exposición a la Tensión de Paso.

Fuente: Velásquez, R. 2005

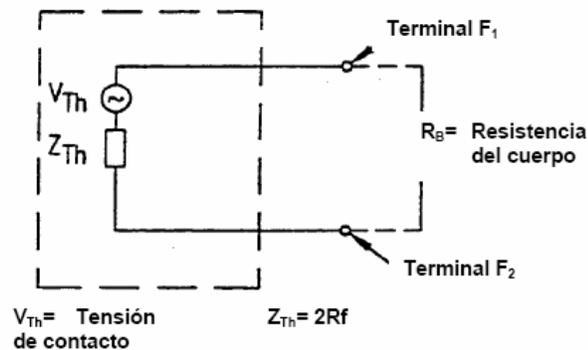


Figura 3.5. Circuito de la Tensión de Paso

Fuente: Velásquez, R. 2005

La impedancia equivalente de Thevenin Z_{th} se calcula a través de cualquiera de los métodos conocidos.

Para la tensión de contacto del circuito accidental

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2} \quad (3.3)$$

Para la tensión de paso y contacto del circuito accidental

$$Z_{Th} = 2R_f \quad (3.4)$$

Donde R_f es la resistencia de un pie en Ω

Para propósito de análisis de circuitos, el pie del cuerpo humano se considera como una palca metálica conductiva circular y la resistencia de contacto se supone despreciable. La resistencia a tierra de un disco metálico de radio b (m) sobre la superficie de un terreno homogéneo, la resistividad ρ en $\Omega\text{-m}$ está dado por Laurent, siendo esta:

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (3.5)$$

Tradicionalmente, el disco metálico representando al pie es tomado como una placa circular con un radio de 0.08 m. Con solo una ligera aproximación, la ecuación para Z_{th} puede ser representada en forma numérica y expresada en términos de ρ como sigue:

Para la tensión de contacto en el circuito accidental:

$$Z_{Th} = 1.5\rho \quad (3.6)$$

Para la tensión de paso en el circuito accidental:

$$Z_{Th} = 6.0\rho \quad (3.7)$$

Así pues, la tensión total equivalente permisible (tensión de contacto y tensión de paso) es la siguiente:

$$E_{\text{contacto}} = I_B (R_B + 1.5\rho) \quad (3.8)$$

$$E_{\text{paso}} = I_B (R_B + 6.0\rho) \quad (3.9)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (3.10)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (3.11)$$

EFEECTO DEL ESPESOR DEL MATERIAL DE LA SUPERFICIE.

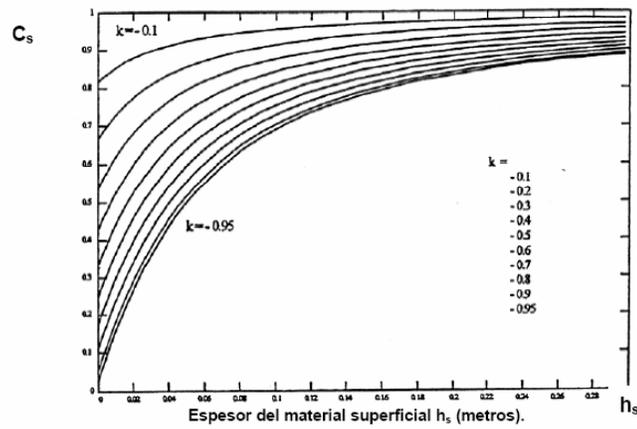


Figura 3.6. C_s vs. h_s

Fuente: Velásquez, R. 2005

3.8.1 Potencial de paso tolerable

Se calcula a partir de las ecuaciones y circuito equivalente estudiado anteriormente

$$E_{\text{paso}(50)} = (1000 + 6C_s\rho_s)0.116/\sqrt{t_s} \quad (3.12)$$

$$E_{\text{punto}(70)} = (1000 + 6C_s \rho_s) 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (3.13)$$

3.8.2 Potencial de contacto tolerable

Se calcula a partir de las ecuaciones y circuito equivalente estudiados anteriormente:

$$E_{\text{contacto}(50)} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (3.14)$$

$$E_{\text{contacto}(70)} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (3.15)$$

Donde:

$C_s = 1$ para cuando no existe una capa superficial en la subestación, de lo contrario se determina a partir de la Fig. 3.6

ρ_s = resistividad del material de la superficie en Ωm

t_s = duración de la corriente en segundos.

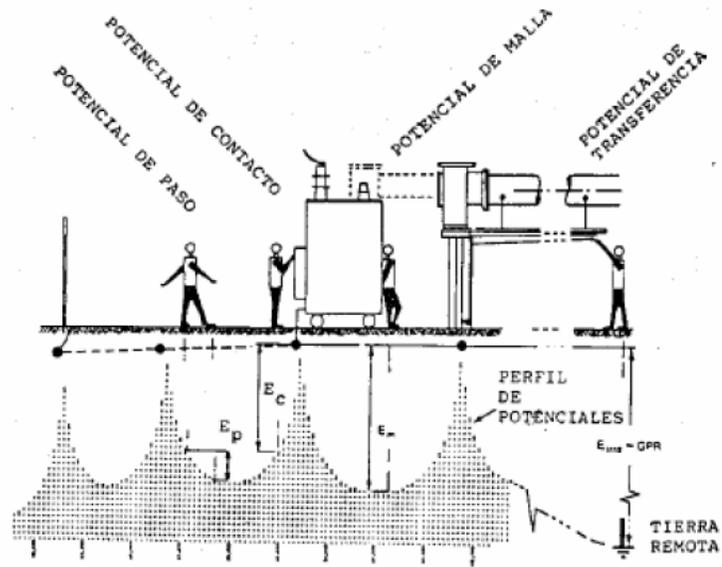


Figura 3.7. Potenciales

Fuente: Velásquez, R. 2005

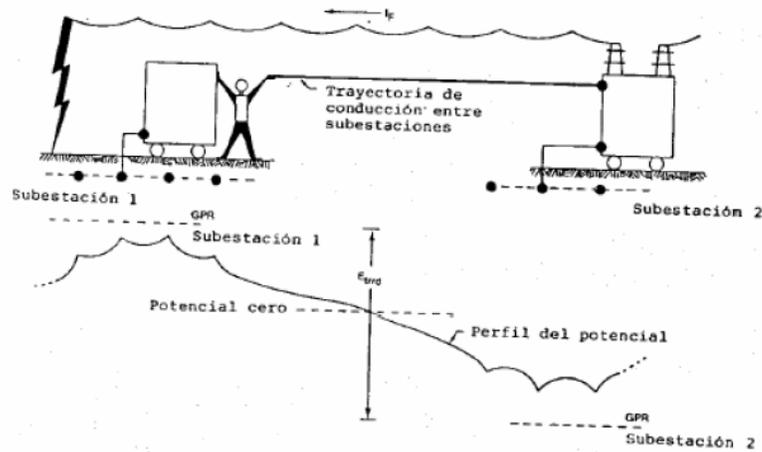


Figura 3.8. Situación Típica de Potencial Transferido

Fuente: Velásquez, R. 2005

3.9 Arreglos o Tipos de Puesta a Tierra

Existen dos tipos de sistemas de puesta a tierra: simples y complejos. Los simples consisten en un electrodo aislado enterrado. Este sistema es más utilizado y se puede encontrar en sitios residenciales. Los sistemas complejos consisten en un conjunto de electrodos interconectados, mallas, platos de tierra y lazos o anillos de tierra. Estos últimos son instalados normalmente en subestaciones, oficinas centrales y centros de telecomunicaciones.

En la figura 3.9 se muestran los tipos de arreglos para un sistema de puesta a tierra.

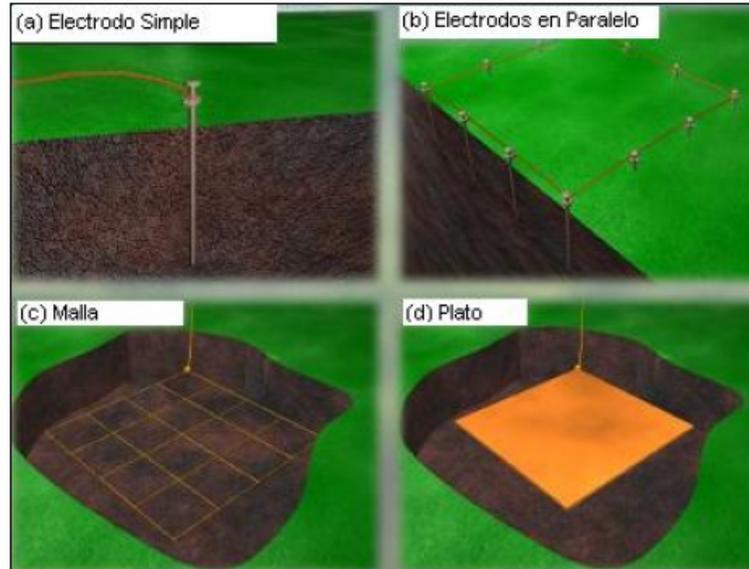


Figura 3.9. Electroodos de Puesta a Tierra: a) Barra o Jabalina; b) Arreglo de Electroodos en Paralelo; c) Malla; d) Plato.

Fuente: www.LEM.com

3.9.1 Electroodos de Tierra

Básicamente, todos los electrodos de tierra pueden ser divididos en dos grupos. El primer grupo también llamados electrodos auxiliares, comprende sistemas de tuberías metálicas bajo tierra, bases metálicas de la estructura

de edificios, cimientos de acero y otras estructuras metálicas enterradas instaladas para propósitos distintos a la puesta a tierra. El segundo grupo denominados también electrodos primarios comprende electrodos específicamente diseñados para la puesta a tierra.

Los electrodos hechos con fines de puesta a tierra pueden ser subdivididos en varillas, barras de acero reforzado bajo concreto, tiras o cables enterrados, mallas, platos enterrados. El tipo de electrodo seleccionado dependerá del tipo de suelo y de la profundidad disponible.

3.9.2 Electrodos de Profundidad.

Para tratar de cumplir con todas las características que deben tener un sistema de PAT se presenta la alternativa de jabalinas o barras autoempalmante. Con las barras autoempalmante se pueden realizar hincamientos de profundidad, alcanzando profundidades de 20, 30 hasta 40 m.

Como ventaja de los hincamientos de profundidad se tiene que:

1.- El valor de la resistencia de la PAT, tanto estático como dinámico, es inferior a los contrapesos superficiales.

2.- Las tensiones de toque y paso, así como el gradiente de potencial son muy inferiores a las PAT superficiales.

3.- En casi todos los terrenos el valor de PAT disminuye con la profundidad, y la adherencia con el medio terrestre garantiza una inmediata dispersión de la corriente de fuga o de falla.

4.- No usurpan terrenos ajenos y representan la única alternativa en aquellos sitios donde el terreno es escaso o simplemente no existe.

5.- La profundidad que se alcance depende de las características del terreno y el valor deseado de resistencia de la PAT.

Para la elaboración de las barras autoempalmantes, se somete la barra a un proceso de mecanizado en sus extremos, que consiste en el moldeado por desprendimiento de viruta, este acabado asegura:

- La perfecta continuidad eléctrica durante toda la vida útil de la barra, y que se obtenga un acoplamiento suficientemente resistente desde el punto de vista mecánico.
- La conducción de la misma capacidad de corriente independientemente del número de barras utilizadas en el hincamiento.
- La no penetración de la humedad en la unión y por ende la formación de cualquier tipo de óxido metálico.

Con este tipo de mecanizado el hincamiento de profundidad obtiene las siguientes características:

Las barras son unidas o soldadas en frío durante el proceso de instalación.

La soldadura en frío garantiza la ausencia total de puntos calientes durante el proceso de conducción a tierra, hasta 400 kA. Como resultado obtenemos una sola jabalina de profundidad variable, (5, 10, 20 m o más).

Permite la medición del valor de resistencia inmediatamente después de cada empalme.

El empalme asegura un sistema 100 % rígido, de manera que el hincamiento no pueda ser retirado con facilidad.

El material de las barras autoempalmante va a depender directamente de las propiedades del terreno donde se ejecutará el hincamiento. Las barras poseen un núcleo de acero ya sea del tipo SAE 1010 ó 1020 hasta 1045.

En la actualidad se pueden clasificar las barras autoempalmantes de acuerdo al proceso anticorrosivo al que son sometidas, y entre las cuales se encuentran los principales tipos:

- Barras Cobrizadas: El núcleo de acero, de forma cilíndrica es cubierto por una capa de cobre de 99,9%, la cual es adherida por deposición electrolítica, uniéndose de forma permanente y comportándose como un sólo metal. El espesor del cobrizado puede ir desde 250 hasta 400 micras, y de las cuales podemos encontrar:

- Barras Copperweld: cobre 99,9% de 350 micras de espesor.
- Barras Copperclad: cobre 99,9% de 400 micras de espesor.
- Barras de Acero Inoxidable: Especificadas para ambientes severos y de alta corrosión. (Velásquez, R. 2005)

3.9.3 Las Mallas

La malla de tierra consta de una red de conductores generalmente de 4/0 AWG, enterrados a una profundidad que usualmente varía de 0,30 a 1,0 m, colocados paralela y perpendicularmente con un espaciamiento

adecuado a la resistividad del terreno y espaciados entre 3 a 7m preferentemente formando retículas cuadradas. (Suarez, L. 2007)

El cable que forma el perímetro exterior de la malla debe ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo eléctrico de la subestación o planta generadora. Con ello, se evitan altas concentraciones de corriente y gradientes de potencial en el área y terminales cercanas.

En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente con soldadura exotérmica entre sí y en los puntos donde se conectan los equipos que pudieran presentar falla o, en las esquinas de la malla, los conductores deben conectarse a electrodos de varilla o tubo de 2,4 m de longitud mínima, clavados verticalmente. La relación entre los lados de la malla usualmente va desde 1:1 a 1:3. Normalmente, las interconexiones en los cruces tienen un efecto relativamente pequeño en bajar la resistencia de la malla, su principal función es asegurar un adecuado control en el potencial de la superficie. Estas interconexiones también se usan para proporcionar múltiples pasos para la corriente de falla, minimizando las caídas de voltaje en la misma malla.

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

Los conectores empleados en la malla del sistema de tierras de una subestación deben ser de tipo de compresión o soldables. (Suarez, L. 2007)

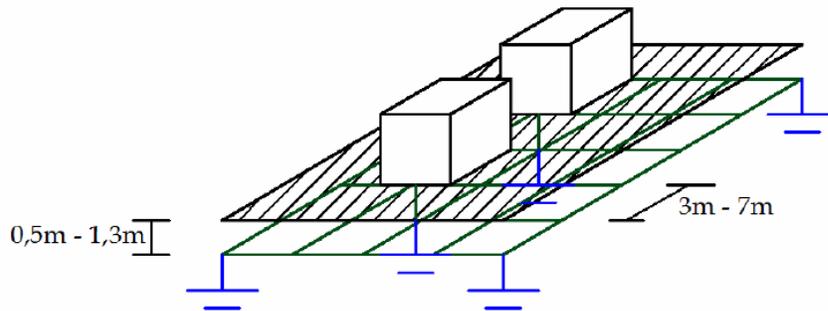


Figura 3.10. Malla de Tierra

Fuente: Suarez, L. 2007

El conductor de puesta a tierra debe ser correctamente dimensionado. El CEN establece las secciones mínimas que deben adoptarse, estas se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Calibre del conductor de puesta a tierra.

Fuente: Ojeda, N. 2008

Calibre del mayor conductor de entrada a la acometida o calibre equivalente de conductores paralelos		Calibre del conductor al electrodo de puesta a tierra	
Cobre	Aluminio o Aluminio recubierto de cobre	Cobre	Aluminio o Aluminio recubierto de cobre
2 o <	1/0 o <	8	6
1 o 1/0	2/0 o 3/0	6	4
2/0 o 3/0	4/0 o 250MCM	4	2
de 3/0 a 350MCM	de 250MCM a 500MCM	2	1/0
de 350MCM a 600MCM	de 500MCM a 900MCM	1/0	3/0
de 600MCM a 1100MCM	de 900MCM a 1750MCM	2/0	4/0
> de 1100MCM	> de 1750MCM	3/0	250MCM

3.10 Calculo de la resistencia de puesta a tierra

El valor teórico dependerá del área o dimensiones del terreno donde se colocará el sistema. (Ojeda, N. 2008)

Este cálculo se puede realizar según la ecuación de Laurent:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{\frac{S}{\pi}}} \right] \quad (3.16)$$

Donde:

S=Área del terreno en [m²]

L_T=Longitud total de los conductores en [m²]

Tabla 3.2 Valores calculados de la expresión de Laurent.

Fuente: Ojeda, N. 2008

ρ	L_T	S	R_g
(Ω.m)	(m)	(m ²)	(Ω)
300	12	3 x 3	69,31
300	16	4 x 4	51,98
300	20	5 x 5	41,59
300	24	6 x 6	34,66
300	40	10 x 10	20,79
300	80	20 x 20	10,40
300	200	50 x 50	4,16
300	400	100 x 100	2,08

3.10.1 Fórmula de Schwarz.

Es un conjunto de formulas para determinar la resistencia total de un sistema de puesta tierra en un suelo homogéneo que contenga una malla horizontal y electrodos tipo barras]. La ecuación de Schwarz toma en cuenta

la resistencia asociada a la malla de puesta a tierra R_1 , y la resistencia del conjunto de barras R_2 ; adicionalmente usa otro factor el cual es la resistencia mutua R_m , que toma en cuenta el efecto entre los valores calculados. (Ojeda, N. 2008)

Schwarz utilizó las fórmulas introducidas por Sunde y Rundenberg para combinar la resistencia de la malla, las barras y su mutua, y obtener la resistencia total del sistema R_g .

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (3.17)$$

Donde

R_g = Valor de resistencia total del sistema [Ω].

R_1 = Valor de resistencia de la malla [Ω].

R_2 = Valor de resistencia del conjunto de barras [Ω].

R_m = Valor de resistencia mutua entre R_1 y R_2 [Ω].

Resistencia a tierra de la malla:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (3.18)$$

Donde

ρ = Resistividad del suelo [Ωm]

L_c = Longitud total de todos los conductores conectados en la malla [m].

a' = $a.2h$ para conductores enterrados a una profundidad h [m].

$2a$ = Diámetro del conductor [m]

A = Area de la malla [m²]

k_1, k_2 = Coeficientes

- Resistencia a tierra de las barras:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n_R \cdot L_r} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (3.19)$$

Donde

ρ = Resistividad del suelo [Ωm]

LR = Longitud total de todas las barras [m].

L_r = Longitud de la barra [m].

$2b$ = Diámetro de la barra [m]

nR = Número de barras ubicadas en el Area de la malla

k_1, k_2 = Coeficientes

- Resistencia mutua entre la malla y el grupo de barras:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\text{Ln} \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (3.20)$$

En la figura 3.11 se muestran las gráficas que aparecen K_1 y k_2 en la fórmula de Schwarz:

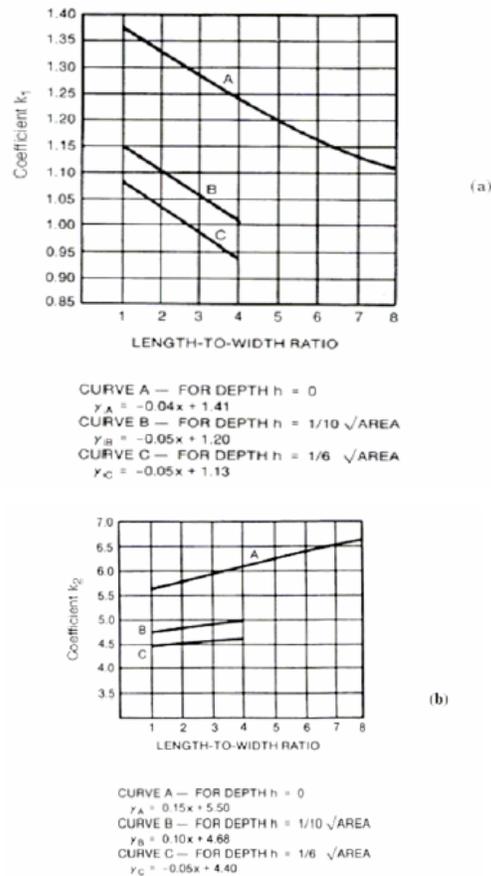


Figure 25—Coefficients k_1 and k_2 of Schwarz's formula:
 (a) coefficient k_1 , (b) coefficient k_2

Figura 3.11. Coeficientes K1 y K2.

Fuente: Ojeda, N. 2008

3.11 Puesta a Tierra en Subestaciones

Para cada uno de los circuitos primarios que entra a una subestación, debe existir un conductor de tierra. Todos los conductores de tierra de los circuitos secundarios deben tener un punto de unión en común cerca del transformador. A este punto común son conectados los conductores puestos a tierra, la carcasa del transformador, y cualquier parte de metal de la estructura o sistema de tuberías si está disponible

El sistema de puesta a tierra de una subestación debe estar formado por una malla de conductores enterrados horizontalmente, complementado por un número de varillas de tierra verticales conectadas a la malla.

La puesta a tierra en subestaciones está directamente vinculada a la capacidad de la misma, y a los niveles de tensión de toque y contacto que se puedan generar en estas. Si la magnitud de las corrientes disipadas a tierra es alta, raramente es posible instalar una malla con resistencia tan baja como para asegurar que las subidas en el potencial de tierra no generen gradientes en la superficie inseguros para el contacto humano, por lo que es indispensable también enterrar algunas varillas. Por ello en subestaciones el arreglo combinado de malla y varillas de tierra es la opción más recomendada. En algunos casos pueden hacerse excepciones, y solo enterrar una varilla de tierra en la subestación cuando la corriente que puede circular por tierra es mucho menor a la que circula por el conductor de retorno de las corrientes de falla y si las tensiones de toque y paso generadas en dicha subestación, no superan las máximas permitidas.

Otro aspecto importante es colocar a tierra los elementos no energizados que pudiesen estar cerca de equipos energizados, esto con la finalidad de evitar que se produzcan tensiones de toque y paso. (Suarez, L. 2007)

3.12 Variaciones de la Resistividad del Terreno

La resistencia eléctrica del suelo en la vecindad de los elementos que integran los sistemas de puesta a tierra, constituye uno de los parámetros más críticos en su operación. Esto se debe a la gran influencia de la resistividad del terreno sobre el valor de la resistencia de puesta a tierra y en

consecuencia, sobre las variaciones del potencial del suelo en la vecindad de las instalaciones al momento de circular la corriente anómala o indeseable.

Las características del terreno cercano a un sistema de Puesta a Tierra determinan el valor de la resistencia de dicho sistema, estas características se asocian al término resistividad (ρ).

La resistividad eléctrica o resistencia específica del suelo, es la resistencia de un volumen que tenga un área con sección transversal y longitud unitarias. (Ojeda, N. 2008)

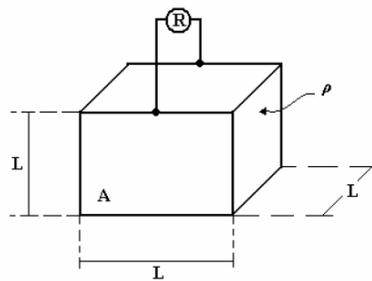


Figura 3.12. Arreglo básico para a medición de resistividad.

Fuente: Ojeda, N. 2008

De la ecuación

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (21)$$

$$\rho = R \frac{A}{L} = \text{ohms} \frac{\text{long} \times \text{long}}{\text{long}} = \text{ohms} \cdot \text{long} \quad (22)$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno en ohm-metros (Ωm)

R = Resistencia en (Ω)

A = Área de la sección transversal en m^2

L = longitud en m

La resistividad del terreno, para propósitos de diseño y evaluación de los sistemas de puesta a tierra, debe ser determinada a partir de mediciones en campo, las que requieren una interpretación adecuada. Considerando que la resistividad del terreno varía significativamente tanto en el sentido lateral como en la profundidad, los valores que se miden en campo para una condición particular, se designan como “resistividad aparente” y son característicos de cada sitio del área bajo estudio. (Velásquez, R. 2005)

El suelo en sí es un sistema muy complejo de elementos minerales muy finos como las arcillas o el limo, medianos como la arena y gruesos a muy gruesos como la grava y piedras. Estos elementos minerales dentro de las capas superficiales se encuentran mezclados con la materia orgánica compuesta por los desechos de plantas, animales y millones de microorganismos vivos.

Si se compara con los metales (el cobre o el aluminio) la conductividad eléctrica del suelo es baja. La conducción eléctrica de los suelos es sumamente compleja y se ve afectada por elementos como: el tipo de suelo, el contenido de humedad, la temperatura y la compactación.

Tabla 3.3 Valores Típicos de Resistividad de suelos.

Fuente: Ojeda, N. 2008

Descripcion del suelo	Resistividad Promedio (Ohm*cm)
Grava bien nivelada, mezcla arena-grava, poco o nada finas.	60.000 - 100.000
Grava mal nivelada, mezcla arena-grava, poco o nada finas.	100.000 - 250.000
Grava o roca arcillosa, grava mal nivelada, mezcla grava-arcilla.	20.000 - 40.000
Arenas cienagosas, mezcla arena-cieno mal nivelada.	10.000 - 50.000
Arena arcillosa, mezcla arena-arcilla mal nivelada.	5.000 - 20.000
Arenas finas cienagosas o arcillosas con poca plasticidad.	3.000 - 8.000
Suelos cienagosos o arenosos finos, cieno elastico.	8.000 - 30.000
Arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas cienagosas, arcillas magras.	2.500 - 6.000
Arcillas inorganicas de alta plasticidad.	1.000 - 5.500

La resistividad del suelo varía considerablemente de acuerdo a su naturaleza. En un terreno se puede encontrar cualquier tipo de combinaciones de estratos con características diferentes, tanto en sentido horizontal como vertical. De tal forma que el suelo bajo la superficie de la tierra no es un medio homogéneo y se compone de distintas capa, cada una de las cuales con un valor distinto de resistividad, así como la temperatura y humedad. (Ojeda, N. 2008)

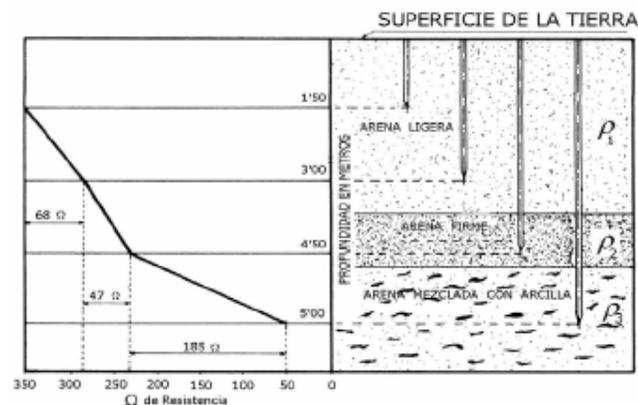


Figura 3.13. Variación del valor de la resistividad con el tipo de suelo.

Fuente: Ojeda, N. 2008

También el tipo de terreno determinará el grado de porosidad y la conductividad del agua que los llena, lo cual es un factor importante ya que la conducción del suelo es de carácter electroquímico. En la tabla 3.4 se muestra el porcentaje de porosidad según el tipo de suelo.

Tabla 3.4 Porcentaje de porosidad según el tipo de formación y la relación entre la resistividad del terreno y la resistividad del agua.

Fuente: Ojeda, N. 2008

Formación	Porosidad	$\rho_{\text{terreno}} / \rho_{\text{agua}}$
Rocas ígneas y metamórficas	0,5 – 2	100
Limos densos y rocas areniscas	3 – 4	50 – 100
Arcillas	8 – 15	20 – 40
Arcillas, limos porosos, dolomitas	15 – 40	3 – 20
Gravas, terrenos arenosos y arcillosos	40 – 75	1,5 – 4
Turbas	80 - 90	1 – 1,5

Un suelo altamente poroso filtrará fácilmente las sales que contiene y no permite almacenar el agua después de un período de lluvias.

La clasificación y valores indicados en las tablas anteriores son estimados, estos pueden utilizarse con cierto criterio en casos de imposibilidad total para conocer la resistividad del terreno mediante mediciones en sitio.

El contenido de humedad es el factor determinante en el valor de la resistividad, debido a que la cantidad de sales disueltas en el agua proporcionan los electrolitos necesarios para la conducción de la corriente a

través del suelo, por lo que la resistividad es proporcional a la concentración y tipos de sales contenidas en la tierra.

Un suelo con cero contenido de humedad es casi un aislante perfecto. Afortunadamente esta condición sólo se encuentra en áreas desérticas con períodos de sequía severa. La cantidad de agua en el suelo depende del tamaño de las partículas y de su compactación. Sin embargo como se muestra en la figura 3.14, curva 2, la resistividad se afecta muy poco una vez que el contenido de humedad excede el 22%.

La curva 3 de la figura 3.14 muestra la variación típica de la resistividad del suelo, con respecto a la temperatura para un terreno arcilloso que contenga 15.2% de humedad por peso. El efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo puede considerarse despreciable para temperaturas arriba del punto de congelación. A 0 °C el agua en el suelo se empieza a congelar y la resistividad se incrementa rápidamente.

La composición y la cantidad de sales solubles, ácidos o álcalis presentes en el suelo, pueden afectar considerablemente su resistividad. La curva 1 de la figura 3.14, ilustra el efecto típico de la sal común (cloruro de sodio), sobre la resistividad del suelo al contener 30% de humedad por peso.

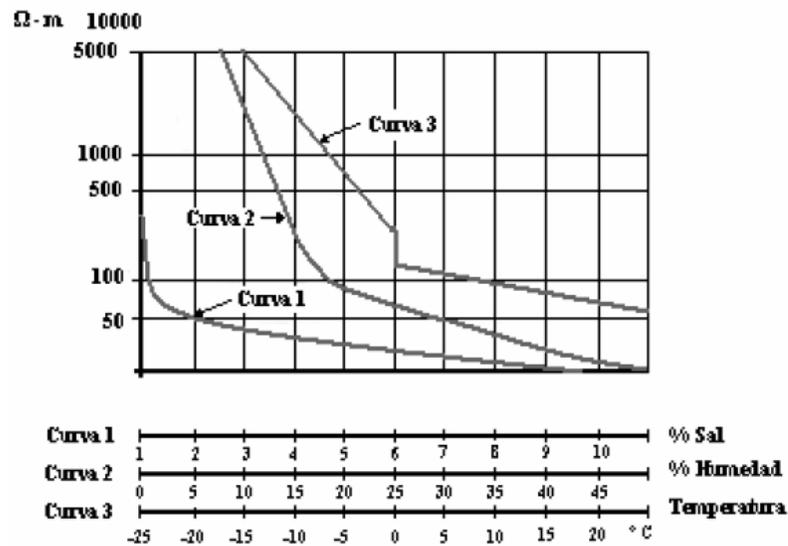


Figura 3.14. Parámetros que afectan la resistividad.

Fuente: Velásquez, R. 2005

Otro elemento que afecta en forma importante la resistividad del terreno está formado por la no homogeneidad del suelo, lo que explica el hecho de tener valores diferentes de resistividad en direcciones diferentes sobre la superficie y a diferentes profundidades sobre la misma dirección.

A partir de este planteamiento resulta claro que la representación de la resistividad del suelo para un análisis riguroso de la circulación es complicada, debido a la multiplicidad de situaciones que determinan la composición y el comportamiento del suelo como conductor. Sin embargo el conocimiento de la composición del suelo y su representación mediante un modelo característico de su comportamiento ante la circulación de corriente transitoria, resulta de gran utilidad para establecer las condiciones de operación de los sistemas de protección contra tormentas eléctricas como parte integral de su trayectoria. (Ojeda, N. 2008)

3.13 Medición de Resistividad de Suelos y Resistencia de Puesta a Tierra en Subestaciones

La resistividad es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado, pero igualmente se puede considerar como la facilidad de paso. Su unidad métrica es ohm/m.

Existen dos parámetros importantes a la hora de diseñar o realizar mantenimiento de un sistema de puesta a tierra: Resistividad del suelo y Resistencia del Sistema de Puesta a Tierra (electrodo, malla, etc).

La medición de resistividad es útil para 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.
- Diseño del sistema de protección catódica.

La medición de 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 cambios en el sistema de Puesta a Tierra actual. Se verifica si es posible o no incorporar nuevos equipos o utilizar el mismo sistema de puesta a tierra para protección contra descargas atmosféricas y otros.
- Determinar los valores de los voltajes de toque y paso 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. (Aguilleiro, I.)

3.13.1 Métodos de Medición de Resistividad Del Suelo

Considerando las limitaciones que plantea la clasificación de la resistividad del terreno a partir de aproximaciones genéricas, se han desarrollado procedimientos para caracterizar la conductividad del terreno con el propósito de evaluar en forma más adecuada la oposición a la circulación de la corriente eléctrica a través del suelo.

3.13.1.1 Método Wenner ó de los Cuatro Electrodo

Entre los métodos planteados destaca por su simplicidad y eficacia el de Frank Wenner, el cual es también conocido como método de los cuatro electrodos.

El procedimiento de medición bajo el método Wenner utiliza cuatro electrodos auxiliares enterrados sobre una línea recta y a una distancia uniforme entre ellos, una fuente de corriente, conectada entre los electrodos externos, inyecta una corriente a tierra. El flujo de esta corriente a tierra produce una variación del potencial en el terreno, dando como resultado, que sobre la posición de los electrodos internos exista una diferencia de potencial diferente de cero, debido a la corriente inyectada por la fuente del instrumento de prueba. La relación entre la diferencia de potencial de los electrodos internos y la corriente inyectada corresponde con la resistividad del suelo.

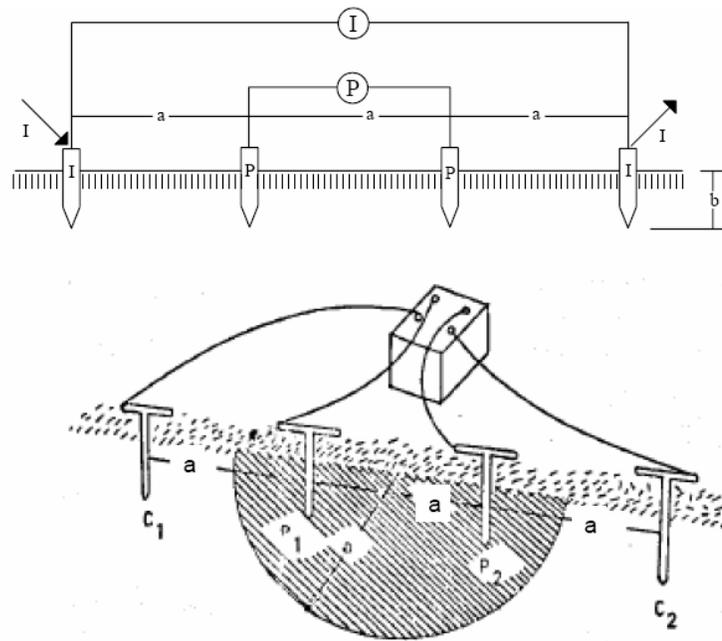


Figura 3.15. Método de los cuatro electrodos

Fuente: Ojeda, N. 2008

En forma práctica el método se puede resumir en lo siguiente:

- Seleccionar un eje de referencia en el suelo para efectuar las mediciones.
- Colocar los cuatro electrodos auxiliares como se muestra en la figura 3.15
- Inyectar una corriente a través de los electrodos externos.
- Medir y obtener la relación entre la diferencia de potencial de los dos electrodos interiores y la corriente inyectada a través de los electrodos exteriores.
- Repetir el procedimiento para distancias diferentes entre electrodos de prueba.

Para este arreglo y procedimiento de medición, la resistividad del terreno está dada por:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{za}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} = \frac{4\pi aR}{n} \quad (3.23)$$

Donde:

a = distancia entre los electrodos (m)

b = profundidad de los electrodos (m)

R = resistencia resultante del cociente V/I (Ω)

ρ = resistividad del terreno (Ωm)

Para condiciones prácticas donde se mantiene la desigualdad $b < a/20$, la distancia entre electrodos auxiliares es mucho mayor que la profundidad a la que se entierran, por lo que la ecuación anterior puede simplificarse de la siguiente manera:

$$\rho = 2\pi aR \quad (3.24)$$

Para $b = a/5$, el denominador de la formula es igual a 1.8763, lo que implica un error menos del 5% para el cálculo de la resistividad. El valor de la resistencia resultante del cociente de V e I, usualmente se obtiene directamente en los instrumentos utilizados para este tipo de mediciones. El método se complementa al realizar varias mediciones para diferentes distancias entre electrodos.

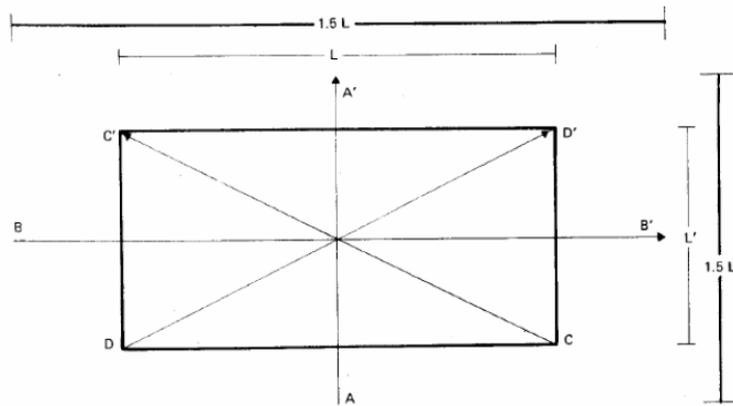


Figura 3.16. Direcciones y longitudes recomendadas para las mediciones de Resistividad.

Fuente: Velásquez, R. 2005

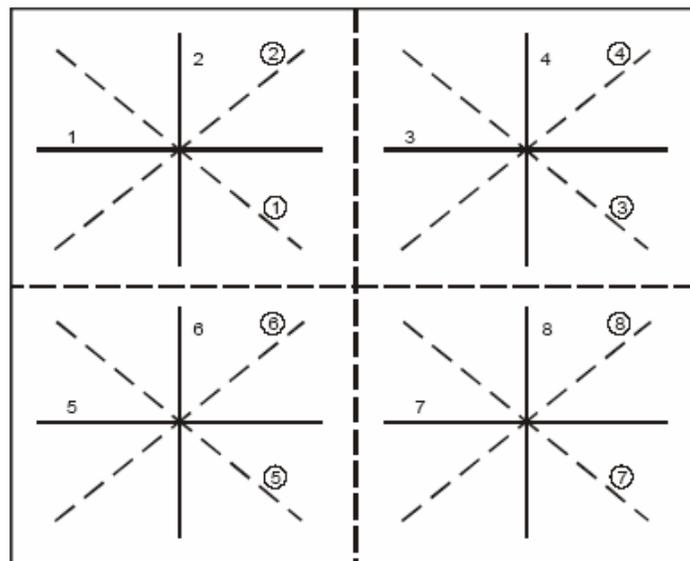


Figura 3.17. Direcciones y longitudes de acuerdo al predio disponible recomendadas para las mediciones de Resistividad.

Fuente: Velásquez, R. 2005

Para la configuración del método Wenner el arreglo usual de los electrodos es C-P-P-C; donde (C) representa el electrodo de corriente y (P) al electrodo de potencial. Los electrodos (P) y (C) pueden intercambiarse sin alterar el valor de la resistencia medida.

El Sr. E. W. Carpenter, sugiere que se pueden realizar tres mediciones con cuatro electrodos y de estas, se calcula la resistividad. En un suelo completamente homogéneo estos valores son los mismos y diferirán para un suelo no homogéneo.

Los arreglos posibles para los electrodos son:

ARREGLOS	FÓRMULA DE LA RESISTIVIDAD
C P P C P C C P 1 -----	$\rho_1 = 2 \pi a R_1$
C C P P P P C C 2 -----	$\rho_2 = 6 \pi a R_2$
C P C P P C P C 3 -----	$\rho_3 = 3 \pi a R_3$

Al llevar a cabo una serie de lecturas con diferentes espaciamientos de los electrodos, se encuentran valores distintos de resistividades que al graficarse en papel logarítmico, indican la presencia de las capas distintas de suelo o de roca, su resistividad respectiva y la profundidad de la capa más cerca de la superficie. (Velásquez, R. 2005)

3.13.1.2 Resistividad aparente del suelo.

La interpretación de las mediciones de la resistividad del terreno obtenidas en campo constituye uno de los problemas más importantes dentro de los conocimientos de los sistemas de puesta a tierra. En la práctica es poco usual una recta horizontal como curva de resistividad del suelo en función de la separación entre electrodos, debido a la presencia de diferentes materiales que constituyen las capas para diferentes profundidades, cada una de ellas con valores diferentes de resistividad y con variaciones laterales. Con base en este comportamiento físico de las características del

terreno, es común en la práctica utilizar, para representar la variación de la resistividad con la distancia entre electrodos de prueba, el concepto de resistividad aparente del suelo, teniendo como resultado, una curva de la resistividad en función de la separación entre electrodos de prueba.

La representación, para propósitos de análisis de los resultados de las mediciones de resistividad del terreno, considerando los casos típicos encontrados, conduce a adoptar modelos conocidos como de resistividad homogénea y de resistividad heterogénea. (Velásquez, R. 2005)

Resistividad Homogénea: si la curva de la resistividad aparente presenta variaciones dentro de una banda de <10% podemos considerar que tenemos un suelo homogéneo, como ejemplo tenemos la curva 1 de la figura 3.18.

Resistividad Heterogénea: para el caso de un suelo donde las variaciones de la resistividad con la profundidad son sensiblemente mayores, las mediciones con el método Wenner, mediante la curva de resistencia aparente permite establecer claramente estas variaciones, como se muestra en las curvas 2 y 3 de la figura 3.18

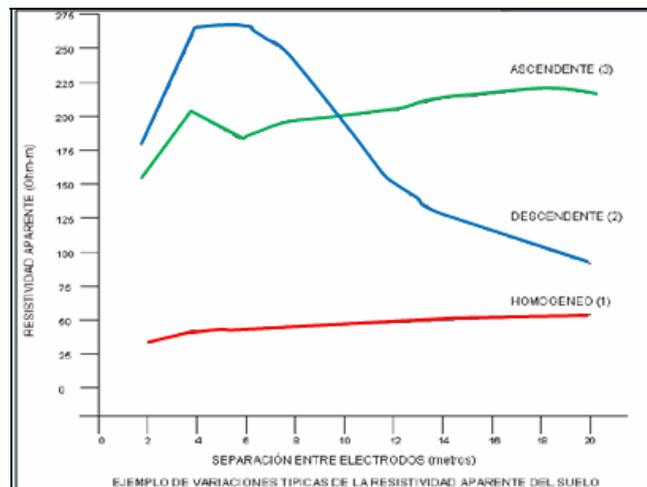


Figura 3.18. Tendencia de la Resistividad del Suelo.

Fuente: Velásquez, R. 2005

3.13.1.3 Interpretación de las mediciones de las de resistividad.

Para los sitios donde se efectúan mediciones de la resistividad del terreno, usualmente se acumula una serie de resultados correspondientes a diferentes distancias entre electrodos. La representación gráfica de estos valores reporta resultados como los mostrados en la figura 3.18, con el fin de lograr utilizar esta información, es necesario realizar la interpretación de las mediciones. Para esta interpretación existen diversos métodos, los cuales se pueden clasificar en métodos empíricos y métodos analíticos.

La interpretación de los resultados, independientemente de la metodología empleada, conduce a la representación de la conductividad del terreno mediante un modelo homogéneo o un modelo heterogéneo. El modelo homogéneo se utiliza cuando es posible definir a través de un valor medio único las variaciones de resistividad con la separación entre electrodos. El modelo heterogéneo se utiliza cuando las variaciones de la resistividad con la separación ente electrodos no permite adoptar un valor medio único.

Los modelos heterogéneos más conocidos son: los de Thapar y Gross, quienes propusieron un modelo con variaciones exponenciales (ascendentes y descendentes) de la resistividad con la profundidad; y el de Tagg, quien propuso un modelo integrado por dos capas paralelas a la superficie del suelo con valores de resistividad uniforme para cada una de ellas.

En la práctica actual el modelo más utilizado es el de las dos capas propuesto por Tagg. Está integrado por dos capas horizontales de resistividad uniforme ρ_1 y ρ_2 , la primera de ellas delimitada por la superficie del suelo y con una profundidad h a partir de la superficie del suelo, y la segunda que se inicia a partir de la profundidad h , tendrá una profundidad ilimitada. En forma práctica la interpretación de las mediciones consiste en determinar los valores característicos de las dos capas y la profundidad de la primera de ellas.



Figura 3.19. Suelo de dos capas

Fuente: Velásquez, R. 2005

Los cambios abruptos de la resistividad en la frontera de ambas capas puede describirse por medio de un factor de reflexión "K", definido mediante:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3.25)$$

Donde:

ρ_1 = es la resistividad de la capa superior en $\Omega\text{-m}$

ρ_2 = es la resistividad de la capa inferior en $\Omega\text{-m}$

Este factor de reflexión varía entre los límites de -1 y +1. Un suelo con cambios extremos en los valores de resistividad, tendrá asociado un factor de reflexión cercano a la unidad. Mientras que un suelo con valores de resistividad similares, tendrá asociado un factor de reflexión cercano al cero. Para un suelo con valores de resistividad crecientes con la profundidad (curva 3 Fig. 3.18), le corresponde un factor de reflexión positivo (+K); mientras que un suelo con valores de resistividad decrecientes con la profundidad (curva 2 Fig. 3.18), le corresponde un factor de reflexión negativo (-K). (Velásquez, R. 2005)

3.13.1.4 Método Empírico de Interpretación

Para la mayoría de los problemas de circulación de corriente a través del suelo, la representación matemática que permite una interpretación adecuada de las mediciones de la resistividad del suelo, está constituida por el método de las dos capas horizontales de la resistividad uniforme. Los métodos empíricos buscan determinar las características de las dos capas a partir de la apariencia de la curva de resistividad aparente (definición del punto de inflexión o cambio aparente). Bajo este criterio, la profundidad de la primera capa se define como la distancia entre electrodos para la que se establece el punto de inflexión. Con relación a las resistividades de ambas capas, estas se asocian con los valores estables antes y después del punto de inflexión. Este criterio se ilustra con un ejemplo en la Fig. 3.20. (Velásquez, R. 2005)

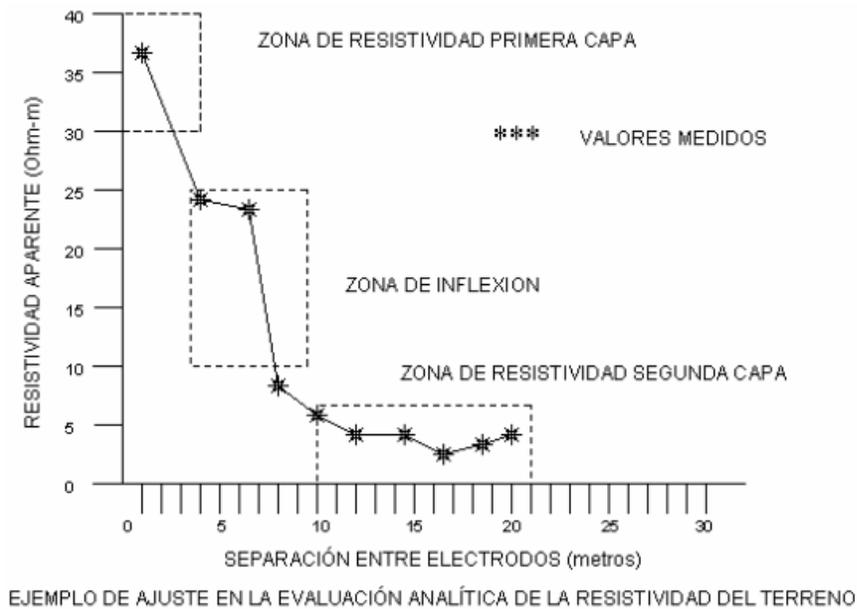


Figura 3.20. Método Empírico de la Resistividad del Suelo.

Fuente: Velásquez, R. 2005

3.13.1.5 Método Analítico de Interpretación

Los métodos analíticos a partir de los modelos propuestos por Thapar y Gross y por Tagg, mediante un análisis numérico determinan los parámetros que permiten que la función matemática que describe el modelo, se aproxime a la curva de resistividad aparente medida en campo. Se adopta el modelo de las dos capas propuesto por Tagg, la expresión analítica es la siguiente:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right] \quad (3.26)$$

Donde, además de las cantidades ya definidas, n es un número entero y a es la distancia entre electrodos de la curva de resistividad aparente.

Una vez adoptado el modelo representativo de la conductividad del suelo, se procede a evaluar los parámetros del modelo para lograr que la

función correspondiente se ajuste lo más posible a la curva de resistividad. El proceso de ajustes se realiza con procedimientos numéricos diversos, los que generalmente utilizan programas de cómputo que determinan los parámetros característicos del modelo, a partir de las mediciones de resistividad obtenidas en campo con el método de Wenner o de los cuatro electrodos. (Velásquez, R. 2005)

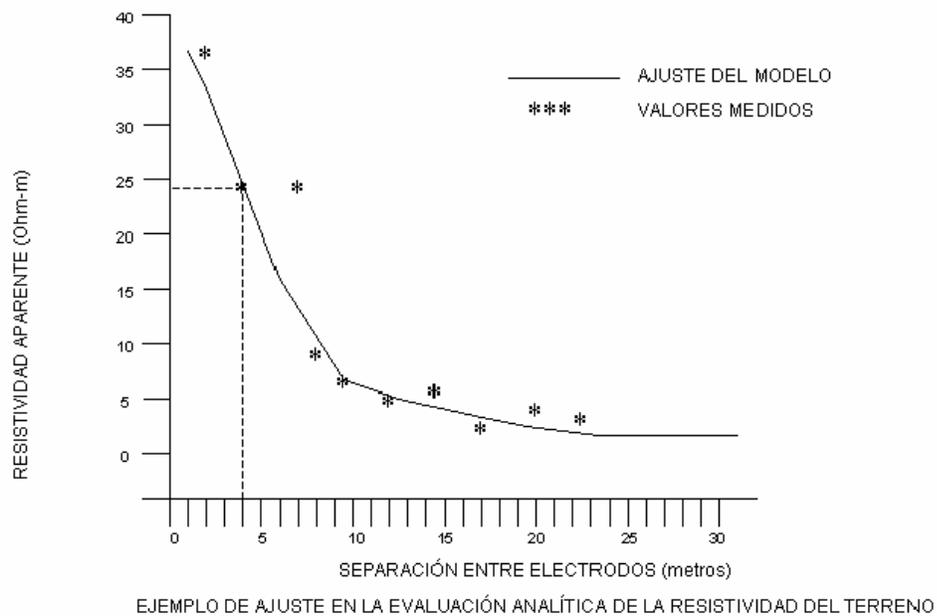


Figura 3.21. Resultados por computadora de la resistividad del suelo.
Fuente: Velásquez, R. 2005

Los resultados que se obtienen con estos programas son:

- Resistividad de la primera capa.
- Resistividad de la segunda capa.
- Profundidad de la primera capa.
- Curva ajustada de la resistividad aparente.

3.13.2 Medición de resistencia de puesta a tierra de subestaciones

La función primordial de una malla de tierra es la de proteger a las personas de voltajes peligrosos y eliminar la interferencia sobre circuitos de control y comunicación dentro de las vecindades de la subestación. Durante el cálculo de una malla de tierra se hacen una serie de asunciones y se dejan de tomar en cuenta factores como: la influencia de objetos metálicos cercanos al área de influencia de la subestación, por tanto, resulta de suma importancia verificar mediante mediciones la exactitud de los cálculos efectuados.

De lo anteriormente expuesto surge la necesidad de utilizar métodos de medición con resultados suficientemente exactos para permitir tomar decisiones rápidas y acertadas sobre las acciones a tomar, uno de los métodos más utilizados para este fin es el Método de Caída de Potencial. (Velásquez, R. 2005)

3.13.2.1 Método de la Caída de potencial

Para la medición de la Resistencia de Puesta a Tierra se adoptó el Método Clásico de Caída de Potencial, método sumamente frecuente y de práctica común para dicha medida, recomendado en el estándar ANSI/IEEE Std. 81. El mismo consiste esencialmente en inyectar una corriente por un electrodo "C" y medir tensión a través de un electrodo de potencial "P". La figura 3.22 muestra el esquema de medición bajo el método de caída de potencial. Los electrodos deberán ser dispuestos de la siguiente forma: la ubicación del electrodo de corriente (C) estará en función de las dimensiones del sistema de tierra a medir, de forma tal que se considera en el infinito. Un criterio empírico presupone una distancia mínima de partida igual a 5 veces la diagonal mayor del sistema a medir. La distancia del electrodo de potencial

(P) estará en función de la ubicación del electrodo de corriente, si se tiene en cuenta la interacción mutua malla-electrodo de potencial-electrodo de corriente, su ubicación más factible desde el punto de vista teórico es 0,62 la distancia del electrodo de corriente. (Velásquez, R. 2005)

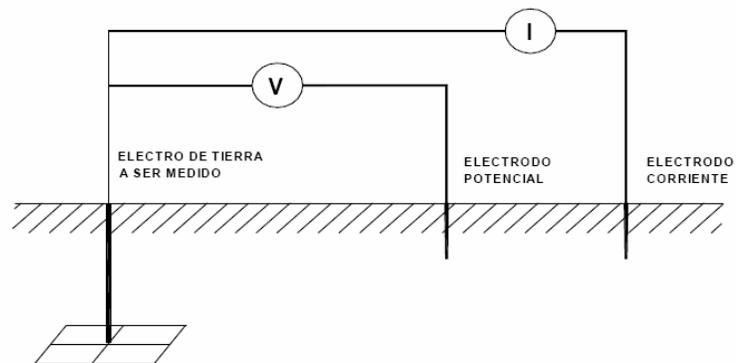


Figura 3.22. Esquema de Conexión de los Electrodos para Medición de Resistencia de Puesta a Tierra.

Fuente: Velásquez R, 2005

Con el electrodo de potencial (P) se realiza un barrido a lo largo de la distancia entre la malla de tierra y el electrodo de corriente. Se deberá establecer un intervalo de barrido del perfil, es decir, establecer una distancia a la cual se realizarán cada una de las mediciones (Voltaje y corriente) con lo cual se construye el perfil de la resistencia de puesta a tierra, a partir de estos valores.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.27)$$

El perfil descrito anteriormente se graficará y se considerará o seleccionará como valor de resistencia de puesta a tierra de la malla (R_t), aquella porción de la curva donde se observe una tendencia plana, tomando como rango de variación el $\pm 10\%$ del valor obtenido. La región plana se

espera que deba estar ubicada alrededor del 62% de la distancia entre la malla de tierra y la fuente de corriente.

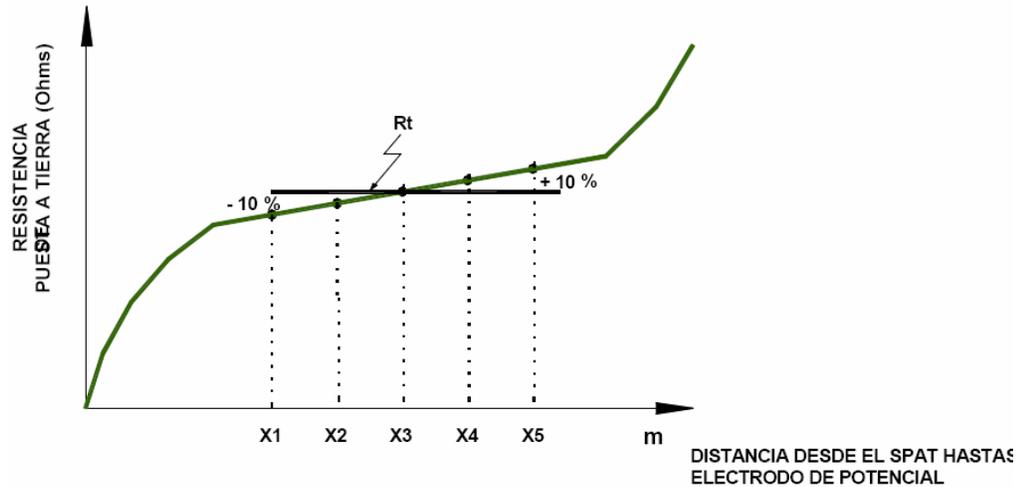


Figura 3.23. Perfil Esperado del Valor de Resistencia de Puesta a Tierra.

Fuente: Velásquez, R. 2005

3.13.2.2 Factores que influyen en la medición

Las mediciones deben realizarse, de ser posible con los cables de guarda de todas las líneas que entran a la subestación conectados, determinándose de esta forma el equivalente Thevenin del sistema, esto a fin de realizar medidas que concuerden con el comportamiento del sistema en condiciones reales.

Es importante realizar las medidas con formas de onda y frecuencia no muy alejadas de la alterna a 60 Hz, ya que en caso contrario se ven afectadas por el cambio de la componente reactiva de la impedancia de puesta a tierra y del factor de dispersión de las líneas (con el que se determina el porcentaje de corriente de falla que circula por la malla).

El electrodo auxiliar de corriente debe estar lo suficientemente alejado, como para estar fuera el área de influencia de la subestación (conectado a la tierra remota) y el electrodo de potencial se debe alejar hasta que se obtengan valores estables de resistencia. (Velásquez, R. 2005)

3.14 La piedra picada en el área de la subestación

Por lo general encontraremos una capa de piedra picada extendida en toda el área de una subestación, la cual estará encima de la malla de puesta a tierra. Dependiendo de las dimensiones de la subestación el espesor de la capa puede variar entre 0,08 y 0,15 m.

La finalidad de la capa de piedra picada es incrementar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de una persona dentro del área de la subestación. También mejora la resistencia mecánica de la superficie para el traslado de equipos y vehículos dentro de la subestación.

El área cubierta por la capa de piedra picada es de suficientes dimensiones para asumir que los pies se encuentran en contacto con un material de resistividad uniforme en la dirección lateral. Sin embargo, la poca profundidad de la capa comparada con el radio equivalente del pie excluye el supuesto de una resistividad uniforme en la dirección vertical para el cálculo de las resistencias propias y mutuas de los pies.

Si el suelo subyacente posee una resistividad más baja que la capa de piedra, solamente una pequeñas cantidad de corriente de la malla ascenderá a la delgada capa de piedra y la caída de tensión en la superficie estará muy cerca del valor sin piedra picada. Con estas condiciones la corriente por el cuerpo será considerablemente pequeña.

Un caso típico muestra que la resistencia efectiva de una capa de 0,25 m de piedra caliza (húmeda) puede tener un valor de resistividad de 5000 Ω -m, el cual será aproximadamente equivalente al 75 % de su valor nominal si la resistividad del suelo es 250 Ω m. (Ojeda, N. 2008)

4.1 Subestación Morichal

La subestación Morichal es una de las principales subestaciones del Distrito Morichal. Está conformada por dos subestaciones: S/E 15 de 115 kV y S/E 3 de 34,5 kV. Estas son subestaciones no atendidas, tipo intemperie, perfil bajo, con aislamiento tipo porcelana, la disposición física de los equipos en alta tensión, es sobre estructuras modulares cuadradas denominadas Bahías o Pórticos. La S/E Morichal forman una configuración en anillo con las subestaciones Temblador y Jobo Norte.

Presenta una configuración de barras interruptor y medio, esta permite realizar mantenimiento a cualquier interruptor, sin necesidad de que quede fuera de servicio la línea o el transformador asociado. Esta S/E cuenta con una sala de control y una sala de batería.

La S/E 15, se alimenta de dos líneas, provenientes una de la subestación Cerro Negro y otra de la subestación O.C.N con niveles de tensión de 115 kV. Está conformada por dos transformadores de 22/25/29 MVA, 115/34,5 kV en configuración delta estrella. La subestación cuenta con dos líneas de salida para alimentar a la subestación Jobo Norte y a la subestación Temblador. Así mismo, desde la S/E 15 sale una línea de 36 km que alimenta a la S/E Temblador CADAPE, a través de la S/E Temblador PDVSA. En la figura 4.2 se muestra el diagrama unifilar de la subestación 15.

La S/E 3 se alimenta de manera subterránea de la S/E 15 mediante el transformador de 115/34,5 kV 22/25/29 MVA. Esta subestación estaba conformada inicialmente por dos transformadores de 15 MVA, 34,5/13,8kV, sin embargo actualmente uno de ellos se encuentra fuera de servicio. Alimenta a todo el campo residencial de morichal, la planta COMOR y

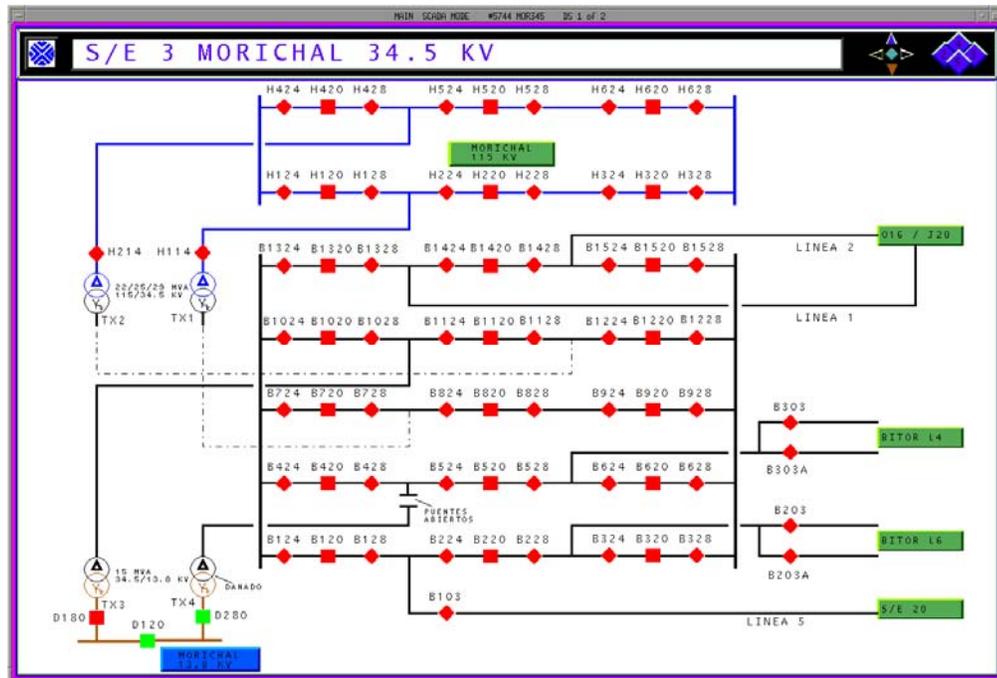


Figura 4.3. Diagrama Unifilar S/E Morichal 34,5 kV

4.2 Subestación Jobo Norte

La subestación Jobo Norte está constituida por dos transformadores de 20 MVA, 115/34,5 kV en configuración delta estrella. Esta subestación se alimenta de la S/E 15, dispone de una línea de salida para alimentar la subestación Temblador en niveles de tensión de 115 kV.

Cuenta con dos bancos de transformadores para servicios auxiliares de 34,5/0,208 kV. Así mismo, alimenta a S/E 10, CTO Amoven 1 y CTO Amoven 2 en 34,5 kV. Dentro de esta subestación se encuentran dos líneas de salida destinadas para reserva.

Esta es una subestación no atendida, tipo intemperie, perfil bajo, con aislamiento tipo porcelana, la disposición física de los equipos en alta tensión es sobre estructuras modulares cuadradas denominadas Bahías o Pórticos. Presentan una configuración de doble barra seccionada.

Desde el punto de vista físico la subestación se encuentra conformada por cuatro áreas separadas y bien definidas, un patio de alta tensión para 115kV y otro para 34,5kV, una casa de control y una sala de baterías. En la figura 4.4 se muestra el diagrama unifilar de esta subestación.

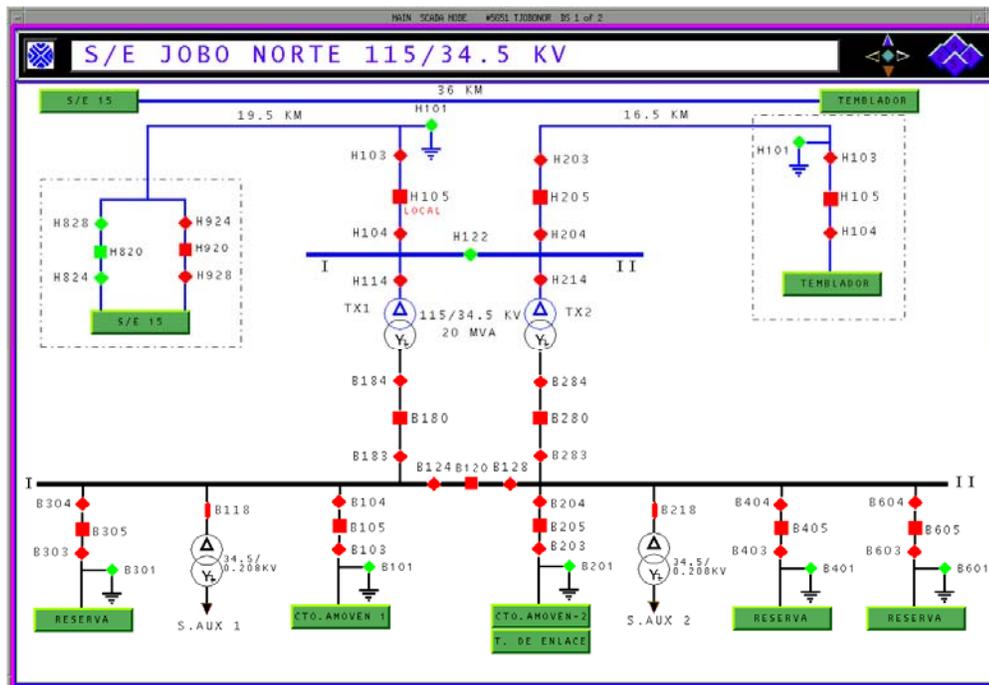


Figura 4.4. Diagrama Unifilar S/E Jobo Norte

4.3 Subestación Temblador

La subestación Temblador se alimenta de una línea de 115 kV proveniente de la subestación Jobo Norte. Está enlazada con las subestaciones Morichal y Temblador CADAFE en 115 KV mediante una configuración en anillo. Originalmente estaba constituida por dos transformadores de 20/30 MVA, 115/34,5 kV ambos en conexión Delta Estrella, sin embargo, actualmente uno de estos transformadores se encuentra fuera de servicio.

CAPITULO V

MEDICIONES EN CAMPO

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos luego de realizar las mediciones de Resistividad del Suelo y Resistencia de la Malla de Puesta a Tierra en las subestaciones eléctrica Morichal, Temblador y Jobo Norte.

Para la realización de las mediciones de resistividad del suelo y resistencia de la malla de tierra se utilizó el equipo de medición ISA T-3000, perteneciente a PDVSA Distrito Morichal, cuyo certificado de calibración se observa en el anexo B.

Con la finalidad de medir la resistividad aparente del suelo en cada una de las subestaciones, fue necesario hacer circular una corriente a través del mismo, esto se logró mediante el método de los Cuatro Electrodo o Método Wenner, descrito detalladamente en el capítulo III. El objetivo de estas mediciones es conocer los valores reales de la resistividad específica de los terrenos adyacentes a las subestaciones.

Mientras que para las mediciones de Resistencia de la Malla de Tierra de las subestaciones se empleo el Método de Caída de Potencial o Método de los Tres (3) Electrodo, descrito detalladamente en el Capítulo III. El objetivo de estas mediciones es conocer el valor actual de la resistencia de la malla de puesta a tierra de cada una de las subestaciones, a fin de verificar si los valores se encuentran dentro del rango permitido según la norma IEEE Std. 80.

De igual manera se realizaron mediciones de continuidad eléctrica entre los principales equipo de las subestaciones y su respectiva conexión a tierra,

con la finalidad de verificar si estos se encuentran correctamente conectados a la malla.

5.1 Mediciones de Campo en la Subestación Morichal

5.1.1 Medición de la Resistividad Aparente del Suelo

Las mediciones de resistividad del suelo se realizaron en los terrenos aledaños a la subestación Morichal, alejado de ésta una distancia mínima de aproximadamente 10m. Se realizaron tres (3) perfiles de medición tal como se muestra en la figura 5.1:

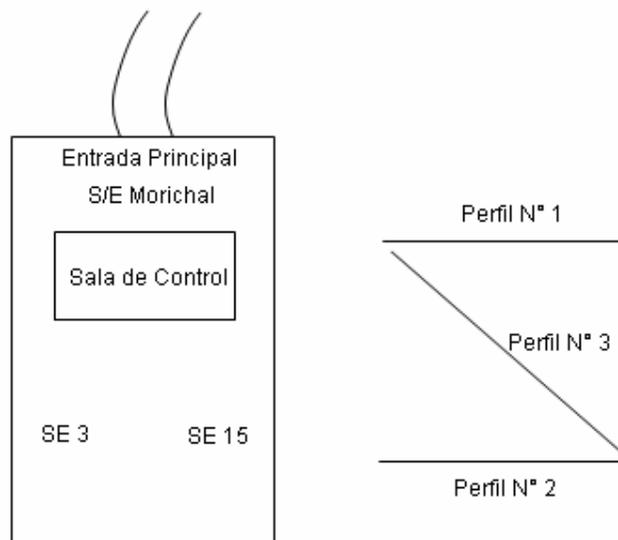


Figura 5.1. Ubicación de los puntos de medición de resistividad del suelo en la S/E Morichal

➤ Condiciones Ambientales

- Día: 04 / 05 / 2010
- Hora: 9:30pm

- Temperatura: 31 °C aproximadamente
- Condiciones del Terreno: Seco

➤ **Resultados Obtenidos**

Tabla 5.1. Resistividad del suelo S/E Morichal Perfil 1.

	Resistividad del suelo S/E Morichal				
	Perfil N° 1				
	10	8	6	4	2
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	8	6	4	2
Voltaje de salida del equipo (V)	99.4	98.8	99	98.7	99
Corriente Inyectada (mA)	4	4	4	3	3
Voltaje Medido (V)	0.264	0.42	0.524	0.994	1.649
Resistencia (Ω)	54.31	89.7	120.2	296.6	452
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	3403	4444	4560	7410	5478

Tabla 5.2. Resistividad del suelo S/E Morichal Perfil 2.

	Resistividad del suelo S/E Morichal		
	Perfil N° 2		
	10	8	6
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	8	6
Voltaje de salida del equipo (V)	98.8	99	100.3
Corriente Inyectada (mA)	7	9	10
Voltaje Medido (V)	0.564	0.736	0.856
Resistencia (Ω)	77.74	77.08	79.36
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	4860	3863	2991

Para el perfil N°2 solo se pudieron realizar mediciones con separación entre los electrodos de 10, 8 y 6m debido a que el terreno presentada obstáculos para el hincamiento de los electrodos.

Tabla 5.3. Resistividad del suelo S/E Morichal Perfil 3.

	Resistividad del suelo S/E Morichal		
	Perfil N° 3		
Distancia de separacion entre electrodos (m)	12	8	4
Voltaje de salida del equipo (V)	98.6	99.1	98.7
Corriente Inyectada (mA)	6	4	2
Voltaje Medido (V)	0.358	0.408	0.754
Resistencia (Ω)	56.5	94.91	256.8
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	4273	4747	6443

Tabla 5.4. Perfiles de medición de S/E Morichal.

	Resistividad del suelo S/E Morichal					
	Perfiles de medicion					
Separacion entre electrodos (m)	2	4	6	8	10	12
Resistividad Perfil N° 1	5478	7410	4560	4444	3403	—
Resistividad Perfil N° 3	—	—	2991	3863	4860	—
Resistividad Perfil N° 5	—	6443	—	4747	—	4273
Promedio	5478	6926.5	3775.5	4351.33	4134.5	4273

Una vez obtenidos los valores de resistividad correspondientes a cada perfil de medición, y promediados según la separación entre electrodos, se hace necesario interpretar de manera adecuada estos resultados, con este fin se utilizó el Método Analítico de Interpretación descrito en el capítulo III, con la ayuda de la herramienta computacional CYMGrd 6.3.

Los resultados arrojados por el simulador CYMGrd 6.3 son mostrados en la figura 5.2:

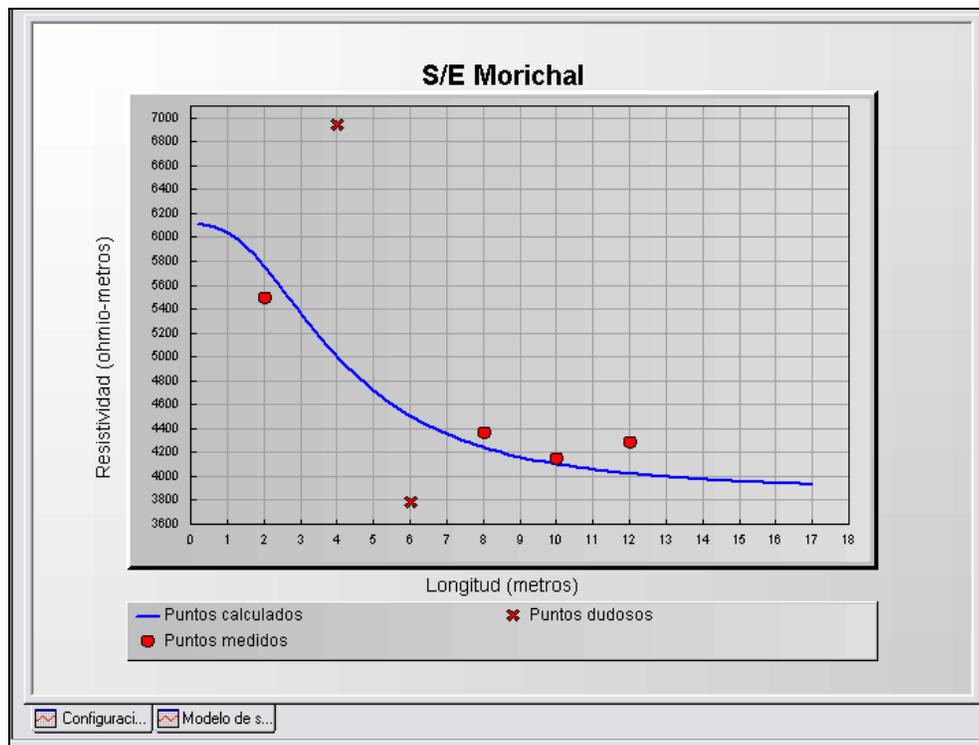


Figura 5.2. Tendencia de la Resistividad del suelo en la Subestación Morichal

Resultados arrojados por simulador CYMGrd

Espesor de la Capa superior	2.39m
Resistividad de la capa superficial	6107.83ohm-m
Resistividad de la capa inferior	3848.81ohm-m

5.1.2 Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra

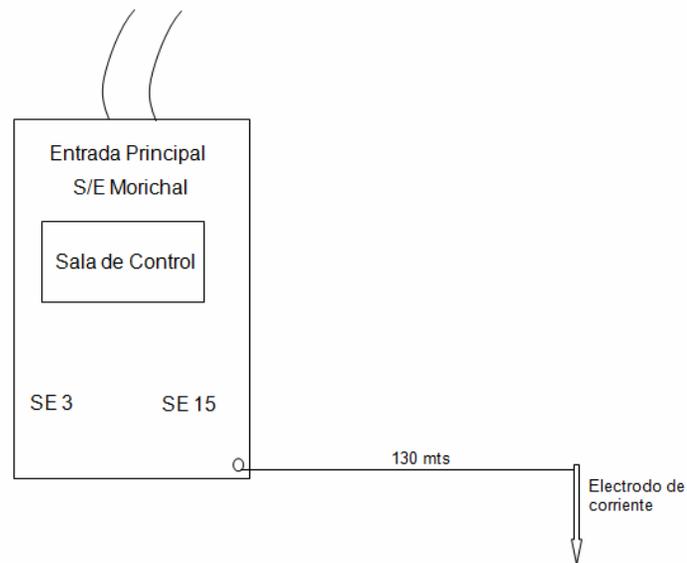


Figura 5.3. Ubicación de puntos de medición de Resistencia de la Malla de Tierra de la S/E Morichal

➤ Condiciones Ambientales

- Día: 05 / 05 / 2010
- Hora: 1:30pm
- Temperatura: 33 °C aproximadamente
- Condiciones del Terreno: Seco

➤ Resultados Obtenidos

Tabla 5.5. Medición de resistencia de la malla de tierra en la S/E Morichal.

PUNTO	DISTANCIA DEL ELECTRODO DE POTENCIAL [m]	DISTANCIA DEL ELECTRODO DE CORRIENTE [m]	VOLTAJE MEDIDO (V)	Corriente Inyectada (mA)	RESISTENCIA MEDIDA [Ohm]
1	21	130	0,143	22	6,7
2	24	130	0,151	22	6,9
3	27	130	0,156	22	7,1
4	30	130	0,146	22	6,6
5	33,00	130	0,161	22	7,4
6	36	130	0,167	22	7,6
7	40	130	0,16	22	7,7
8	43	130	0,16	22	7,8
9	46	130	0,169	22	8
10	49	130	0,198	22	8,7
11	52	130	0,208	22	9,1
12	55	130	0,239	22	10,5

Región
Plana
de la Curva

En los resultados obtenidos, correspondientes a la región plana de la curva, se observa una variación de 1.3%. El valor de resistencia de la malla de puesta a tierra corresponde a 7.7Ω

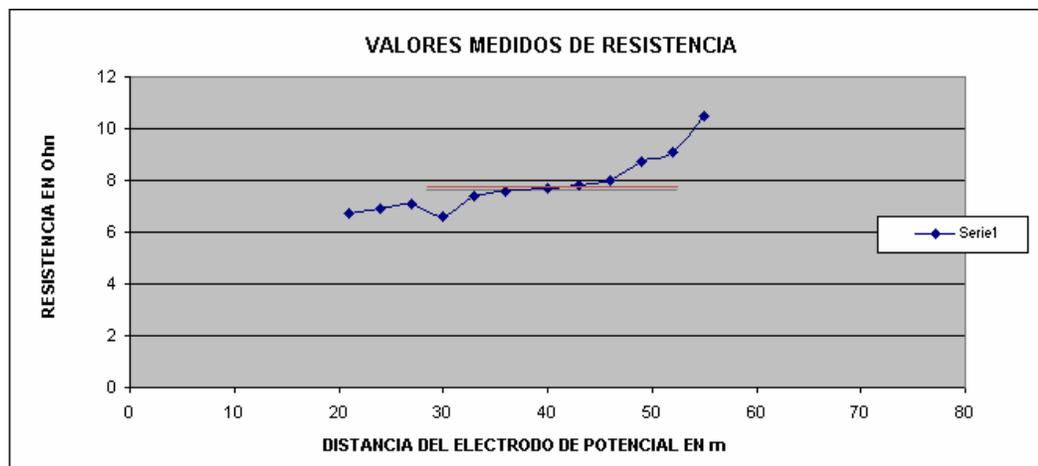


Figura 5.4. Perfil del Valor de Resistencia de Puesta a Tierra de la Subestación Morichal.

5.1.3 Mediciones de Continuidad

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en las mediciones de continuidad realizadas en la subestación Morichal.

- Subestación 3:

Tabla 5.6. Mediciones de continuidad en la Subestación 3.

Mediciones de Continuidad S/E Morichal				
N°	Lugar	Equipo	Valor Obtenido [Ω]	Valor Adecuado Según Norma NETA [Ω]
1	Subestación 3	Interruptor B - 1320	0,179	0,5
2	Subestación 3	Interruptor B - 1420	0,111	0,5
3	Subestación 3	Interruptor B - 1520	0,109	0,5
4	Subestación 3	Portico	0,121	0,5
5	Subestación 3	Interruptor B - 1020	0,084	0,5
6	Subestación 3	Seccionador B - 1028	0,059	0,5
7	Subestación 3	Seccionador B - 1024	0,11	0,5
8	Subestación 3	Interruptor B - 1120	0,122	0,5
9	Subestación 3	Seccionador B - 1124	0,051	0,5
10	Subestación 3	Seccionador B - 1128	0,083	0,5
11	Subestación 3	Seccionador B - 1224	0,08	0,5
12	Subestación 3	Interruptor B - 1220	0,09	0,5
13	Subestación 3	Seccionador B - 1228	0,094	0,5
14	Subestación 3	Interruptor B - 220	12	0,5
15	Subestación 3	Seccionador B - 224	0,054	0,5

- Subestación 15:

Tabla 5.7. Mediciones de continuidad en la Subestación 15.

Mediciones de Continuidad S/E Morichal				
N°	Lugar	Equipo	Valor Obtenido [Ω]	Valor Adecuado Según Norma NETA [Ω]
1	Subestación 15	Interruptor H - 720	0,102	0,5
2			0,073	
3	Subestación 15	TC asociado a Interruptor H - 720	Fase A 0,095	0,5
4			Fase B 0,039	
5			Fase C 0,075	
6	Subestación 15	Portico	0,054	0,5
7	Subestación 15	Seccionador H - 728	0,056	0,5
8	Subestación 15	Interruptor B - 1220	0,109	0,5
9	Subestación 15	Seccionador H - 1228	0,11	0,5
10	Subestación 15	Seccionador H - 101	0,056	0,5
11	Subestación 15	Interruptor H - 230	0,129	0,5
12	Subestación 15	Interruptor H - 220	0,103	0,5
13	Subestación 15	TC asociado a Interruptor H - 120	Fase A 0,035	0,5
14			Fase B 0,047	
15			Fase C 0,033	
16	Subestación 15	TX 2	0,17	0,5
17			0,082	

5.2 Mediciones de Campo en la Subestación Jobo Norte

5.2.1 Medición de la Resistividad Aparente del Suelo

Las mediciones de resistividad del suelo se realizaron en los terrenos aledaños a la subestación Jobo Norte, alejado de ésta una distancia mínima de aproximadamente 10 m. Se realizaron cinco (5) perfiles de medición, tal como se muestra en la figura:

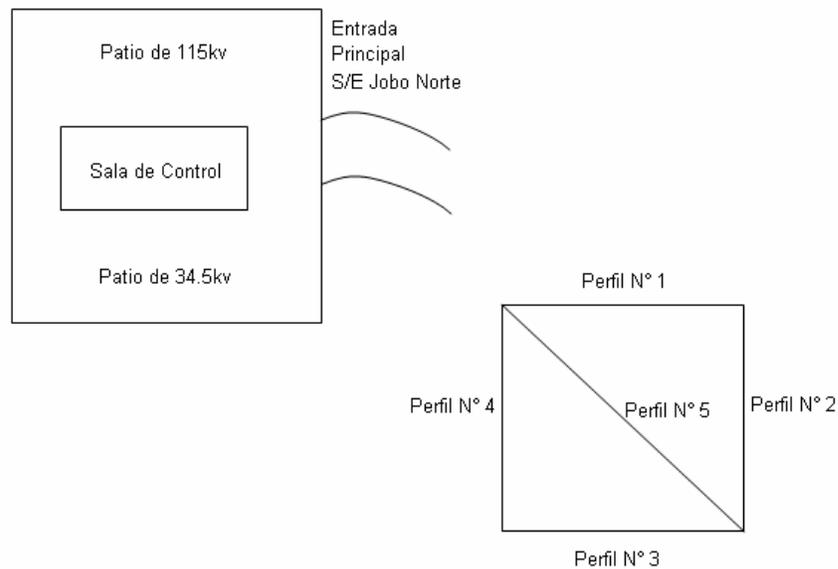


Figura 5.5. Ubicación de los puntos de medición de resistividad del suelo en la S/E Jobo Norte

➤ Condiciones Ambientales

- Día: 04 / 05 / 2010
- Hora: 9:30pm
- Temperatura: 31 °C aproximadamente
- Condiciones del Terreno: Seco

➤ **Resultados Obtenidos**

Tabla 5.8. Resistividad del suelo S/E Jobo Norte Perfil 1.

	Resistividad del suelo S/E Jobo Norte				
	Perfil N° 1				
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	8	6	4	2
Voltaje de salida del equipo (V)	81.2	81.7	82.1	82.5	82.5
Corriente Inyectada (mA)	4	7	3	3	4
Voltaje Medido (V)	0.463	0.656	0.552	0.299	1.033
Resistencia (Ω)	103.4	86.79	141	92.2	229
Resistividad (Ω *m)	6499	4362	5320	2340	2879

Tabla 5.9. Resistividad del suelo S/E Jobo Norte Perfil 2.

	Resistividad del suelo S/E Jobo Norte				
	Perfil N° 2				
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	8	6	4	2
Voltaje de salida del equipo (V)	81.1	81.2	81.4	81.5	81.8
Corriente Inyectada (mA)	5	6	5	4	5
Voltaje Medido (V)	0.295	0.667	0.621	0.778	1.376
Resistencia (Ω)	52.76	109	119.7	159.3	253.9
Resistividad (Ω *m)	3400	5460	4530	4012	3190

Tabla 5.10. Resistividad del suelo S/E Jobo Norte Perfil 3.

	Resistividad del suelo S/E Jobo Norte				
	Perfil N° 3				
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	8	6	4	2
Voltaje de salida del equipo (V)	81.9	82.1	81.9	81.8	82.1
Corriente Inyectada (mA)	4	3	4	4	4
Voltaje Medido (V)	0.253	0.236	0.332	0.437	1.078
Resistencia (Ω)	54.27	70	70.7	106.1	250
Resistividad (Ω *m)	3390	3499	2955	2700	3129

Tabla 5.11. Resistividad del suelo S/E Jobo Norte Perfil 4.

	Resistividad del suelo S/E Jobo Norte				
	Perfil N° 4				
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	8	6	4	2
Voltaje de salida del equipo (V)	81.5	81.8	81.8	82.1	81.9
Corriente Inyectada (mA)	4	4	3	3	3
Voltaje Medido (V)	0.187	0.11	0.239	0.244	0.48
Resistencia (Ω)	44.5	27.45	77.36	72.67	139
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	2797	1470	2916	1810	1756

Tabla 5.12. Resistividad del suelo S/E Jobo Norte Perfil 5.

	Resistividad del suelo S/E Jobo Norte	
	Perfil N° 5	
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	6
Voltaje de salida del equipo (V)	81.6	81.7
Corriente Inyectada (mA)	3	3
Voltaje Medido (V)	0.121	0.13
Resistencia (Ω)	38.7	40.9
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	2375	1519

Tabla 5.13. Perfiles de medición de S/E Jobo Norte.

		Resistividad del suelo S/E Jobo Norte				
		Perfiles de medicion				
Separacion entre electrodos (m)		2	4	6	8	10
Resistividad Perfil N° 1		2879	2340	5320	4362	6499
Resistividad Perfil N° 2		3190	4012	4530	5460	3400
Resistividad Perfil N° 3		3129	2700	2955	3499	3390
Resistividad Perfil N° 4		1756	1810	2916	1470	2797
Resistividad Perfil N° 5		—	—	1519	—	2375
Promedio		2738.5	2715.5	3448	3697.75	3692.2

Una vez obtenidos los valores de resistividad correspondientes a cada perfil de medición, y promediados según la separación entre electrodos, se hace necesario interpretar de manera adecuada estos resultados, con este fin se utilizó el Método Analítico de Interpretación descrito en el capítulo III, con la ayuda de la herramienta computacional CYMGrd 6.3.

Los resultados arrojados por el simulador CYMGrd 6.3 son mostrados en la figura 5.6:

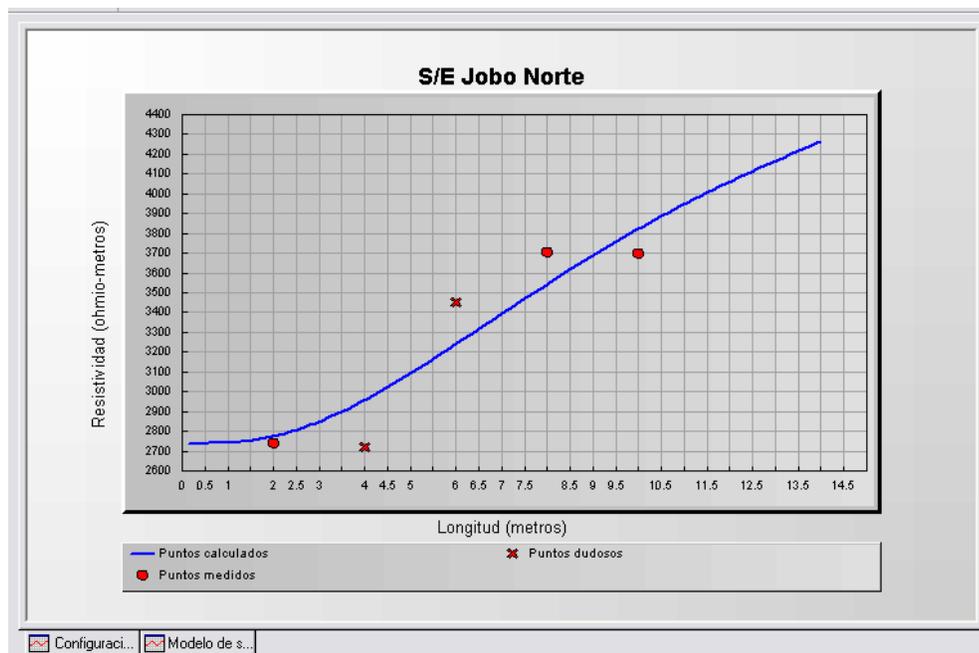


Figura 5.6. Tendencia de la Resistividad del suelo en la Subestación Jobo Norte

Resultados arrojados por simulador CYMGrd

Espesor de la capa superior	5.23m
Resistividad de la capa superior	2738.49ohm-m
Resistividad de la capa inferior	5684.01ohm-m

5.2.2 Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra

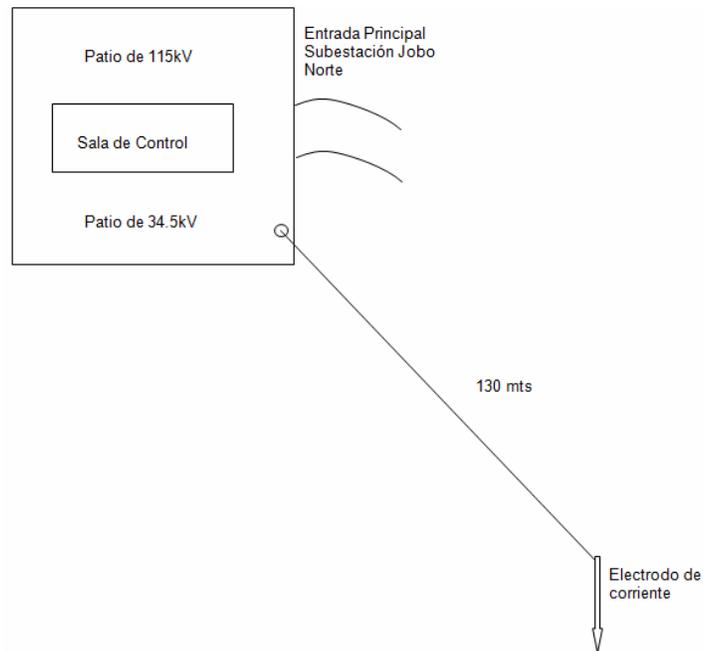


Figura 5.7. Ubicación de puntos de medición de Resistencia de la Malla de Tierra de la S/E Jobo Norte

➤ Condiciones Ambientales

- Día: 06 / 05 / 2010
- Hora: 2:30pm
- Temperatura: 33 °C aproximadamente
- Condiciones del Terreno: Seco

➤ Resultados Obtenidos

Tabla 5.14. Medición de resistencia de la malla de tierra en la S/E Jobo Norte.

PUNTO	DISTANCIA DEL ELECTRODO DE POTENCIAL [m]	DISTANCIA DEL ELECTRODO DE CORRIENTE [m]	VOLTAJE MEDIDO [V]	RESISTENCIA MEDIDA [Ohm]
1	13	13	0,107	6,5
2	16	16	0,107	6,6
3	19	19	0,107	6,7
4	22	22	0,108	6,8
5	25	25	0,106	7
6	28	28	0,11	7,2
7	31	31	0,108	7,2
8	34	34	0,108	7,3
9	37	37	0,106	7,2
10	40	40	0,107	7,3
11	43	43	0,122	8,2

} Región Plana de la Curva

En los resultados obtenidos, correspondientes a la región plana de la curva, se observa una variación de 1.37%. El valor de resistencia de la malla de puesta a tierra corresponde a 7.24Ω

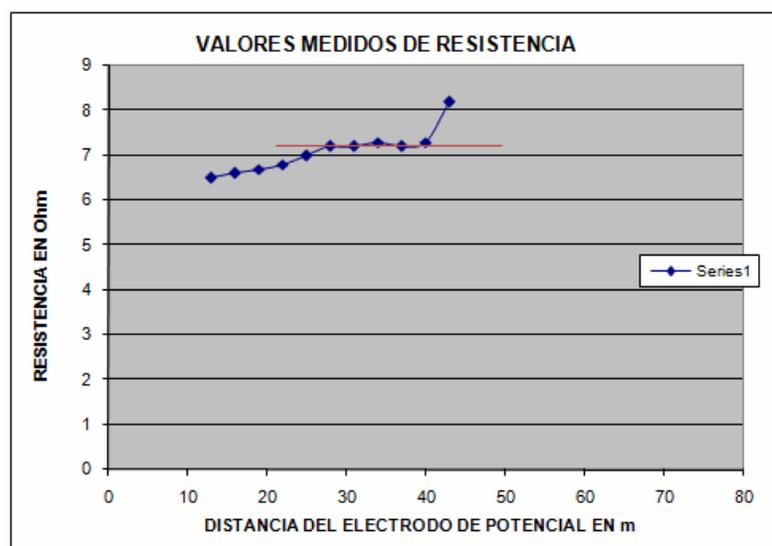


Figura 5.8. Perfil del Valor de Resistencia de Puesta a Tierra de la S/E Jobo Norte

5.2.3 Mediciones de Continuidad

En la tabla 5.15 se muestran los resultados obtenidos en las mediciones de continuidad realizadas en la subestación Jobo Norte.

Tabla 5.15. Mediciones de continuidad en S/E Jobo Norte.

Mediciones de Continuidad S/E Jobo Norte				
N°	Lugar	Equipo	Valor Obtenido [Ω]	Valor Adecuado Según Norma NETA [Ω]
1	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 104	0,846	0,5
2	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 103	0,034	0,5
3	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 205	0,06	0,5
4	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 204	0,04	0,5
5	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 280	0,048	0,5
6	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 284	0,084	0,5
7	Patio de 115Kv	Seccionador H - 203	306,7	0,5
8	Patio de 115Kv	Interruptor H - 205	0,03	0,5
9	Patio de 115Kv	Seccionador H - 204	336,7	0,5
10			45,27	
11	Patio de 115Kv	Seccionador H - 214	241,5	0,5
12	Patio de 115Kv	Tx - 2	0,049	0,5
13			0,067	
14	Patio de 115Kv	Seccionador H - 122	0,072	0,5
15	Patio de 115Kv	Interruptor H - 114	14,08	0,5
16	Patio de 115Kv	Interruptor H - 104	0,846	0,5
17	Patio de 115Kv	Interruptor H - 103	171,5	0,5

5.3 Mediciones de Campo en la Subestación Temblador

5.3.1 Medición de la Resistividad Aparente del Suelo

Las mediciones de resistividad del suelo se realizaron en los terrenos aledaños a la subestación Temblador, alejado de ésta una distancia mínima de aproximadamente 10 m. Se realizaron tres (3) perfiles de medición, tal como se muestra en la figura:

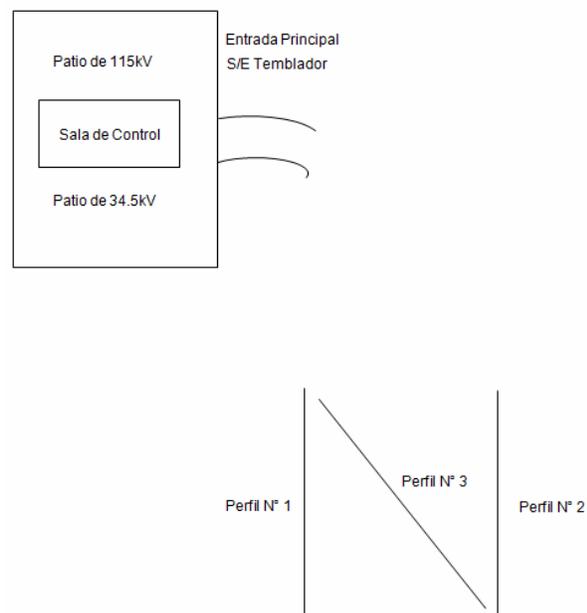


Figura 5.9. Ubicación de los puntos de medición de resistividad del suelo en la S/E Temblador

➤ Condiciones Ambientales

- Día: 03 / 06 / 2010
- Hora: 9:30pm
- Temperatura: 31 °C aproximadamente.
- Condiciones del Terreno: Seco.

➤ **Resultados Obtenidos**

Tabla 5.16. Resistividad del suelo S/E Temblador Perfil 1.

	Resistividad del suelo S/E Temblador				
	Perfil N° 1				
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	8	6	4	2
Voltaje de salida del equipo (V)	83.5	83.5	83.2	83.4	83.5
Corriente Inyectada (mA)	15	8	15	24	76
Voltaje Medido (V)	0.521	0.267	0.638	1.219	4.07
Resistencia (Ω)	35.47	30.75	40.2	49.45	53.1
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	2172	1529	1514	1243	668.4

Tabla 5.17. Resistividad del suelo S/E Temblador Perfil 2.

	Resistividad del suelo S/E Temblador				
	Perfil N° 2				
Distancia de separacion entre electrodos (m)	10	8	6	4	2
Voltaje de salida del equipo (V)	82.8	83.1	83.5	83.1	83.8
Corriente Inyectada (mA)	10	10	9	9	6
Voltaje Medido (V)	0.209	0.176	0.257	0.413	1.364
Resistencia (Ω)	19.38	16.24	25.8	47.14	207.1
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	1202	823.7	976	1207	2602

Tabla 5.18. Resistividad del suelo S/E Temblador Perfil 3.

	Resistividad del suelo S/E Temblador		
	Perfil N° 3		
Distancia de separacion entre electrodos (m)	6	4	2
Voltaje de salida del equipo (V)	83.6	83.2	82.8
Corriente Inyectada (mA)	4	4	6
Voltaje Medido (V)	0.117	0.263	1.165
Resistencia (Ω)	23.79	55.14	180.8

Tabla 5.19. Perfiles de medición de S/E Temblador.

	Resistividad del suelo S/E Temblador				
	Perfiles de medicion				
Separacion entre electrodos (m)	2	4	6	8	10
Resistividad Perfil N° 1	668.4	1243	1514	1529	2172
Resistividad Perfil N° 2	2602	1207	976	823.7	1202
Resistividad Perfil N° 3	2272	1389	902.8	—	—
Promedio	1847.46	1279.66	1130.93	1176.35	1687

Una vez obtenidos los valores de resistividad correspondientes a cada perfil de medición, y promediados según la separación entre electrodos, se hace necesario interpretar de manera adecuada estos resultados, con este fin se utilizó el Método Analítico de Interpretación descrito en el capítulo III, con la ayuda de la herramienta computacional CYMGrd 6.3.

Los resultados arrojados por el simulador CYMGrd 6.3 son mostrados en la figura 5.10:

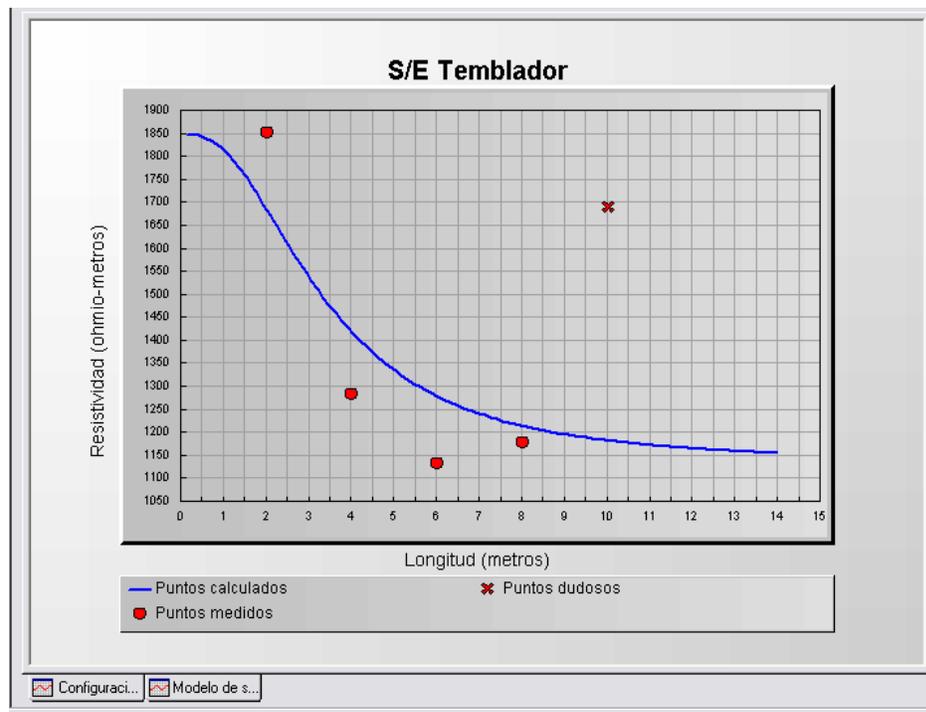


Figura 5.10. Tendencia de la Resistividad del suelo en la Subestación Temblador

Resultados arrojados por simulador CYMGrd

Espesor de la capa superior	2m
Resistividad de la capa superior	1847.5ohm-m
Resistividad de la capa inferior	1127.29ohm-m

5.3.2 Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra

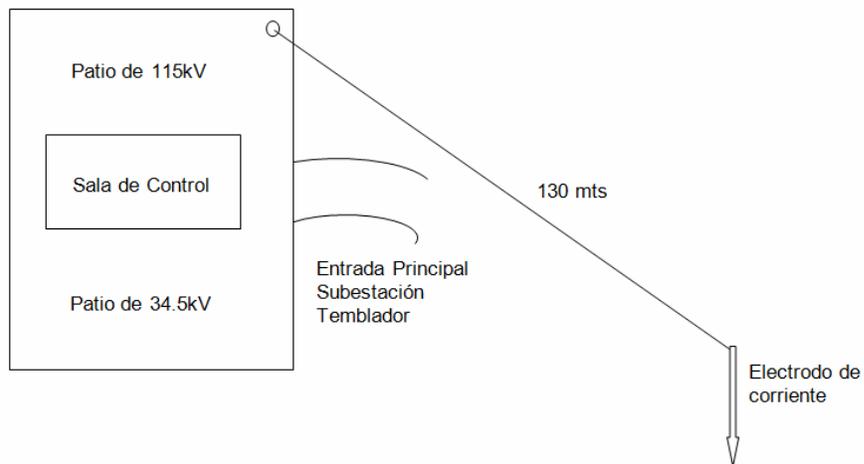


Figura 5.11. Ubicación de puntos de medición de Resistencia de la Malla de Tierra de la S/E Temblador

➤ Condiciones Ambientales

- Día: 03 / 07 / 2010
- Hora: 10:00pm
- Temperatura: 31 °C aproximadamente
- Condiciones del Terreno: Seco

➤ Resultados Obtenidos

Tabla 5.20. Medición de resistencia de malla de tierra en la S/E Temblador

PUNTO	DISTANCIA DEL ELECTRDO DE POTENCIAL [m]	DISTANCIA DEL ELECTRDO DE CORRIENTE [m]	VOLTAJE MEDIDO (V)	Corriente Inyectada (mA)	RESISTENCIA MEDIDA [Ohm]
1	27	130	0.144	61	2.36
2	30	130	0.175	61	2.84
3	33	130	0.196	61	3.21
4	36	130	0.2	60	3.3
5	39	130	0.244	61	3.99
6	42	130	0.269	61	4.37
7	45	130	0.285	61	4.61
8	48	130	0.281	62	4.61
9	51	130	0.292	62	4.69
10	54	130	0.341	61	5.55
11	57	130	0.375	61	6.1

Región
Plana de la
Curva

En los resultados obtenidos, correspondientes a la región plana de la curva, se observa una variación aproximada de 2%. El valor de resistencia de la malla de puesta a tierra corresponde a 4.57Ω

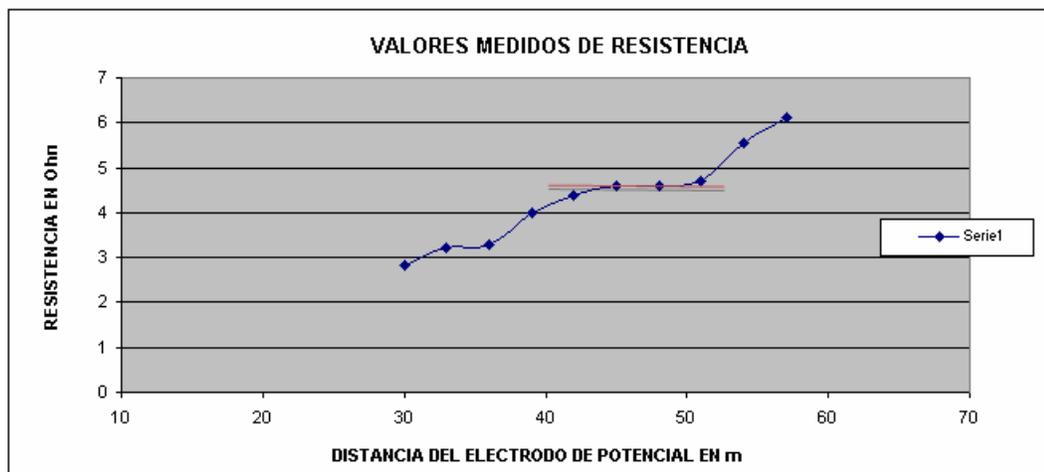


Figura 5.12. Perfil del Valor de Resistencia de Puesta a Tierra de la Subestación Temblador

5.3.3 Mediciones de Continuidad

En la tabla 5.21 se muestran los resultados obtenidos en las mediciones de continuidad realizadas en la subestación Temblador.

Tabla 5.21 Mediciones de continuidad en la S/E Temblador.

Mediciones de Continuidad S/E Temblador				
N°	Lugar	Equipo	Valor Obtenido [Ω]	Valor Adecuado Según Norma NETA [Ω]
1	Patio de 34.5kV	Portico	0.129	0.5
			0.057	0.5
2	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 805	0.067	0.5
3	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 405	0.077	0.5
4	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 205	56.91	0.5
5	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 120	0.061	0.5
6	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 105	0.071	0.5
7	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 305	0.099	0.5
8	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 705	0.075	0.5
9	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 180	0.079	0.5
10	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 405	0.025	0.5
11	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 803	0.336	0.5
12	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 804	0.353	0.5
13	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 404	0.548	0.5
14	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 604	No se obtuvo medida	0.5
15	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 104	0.74	0.5
16	Patio de 34.5kV	Tx	0.067	0.5
			0.058	0.5
17	Patio de 115kV	Portico Principal	0.79	0.5
18	Patio de 115kV	Seccionador H - 124	0.233	0.5
19	Patio de 115kV	Seccionador H - 104	45.31	0.5
20	Patio de 115kV	Interruptor H - 120	0.153	0.5
21	Patio de 115kV	Interruptor H - 105	0.134	0.5
22	Patio de 115kV	Interruptor H - 205	0.311	0.5
23	Patio de 115kV	Interruptor H - 305	0.478	0.5
24	Patio de 115kV	Interruptor H - 301	0.053	0.5
25	Patio de 115kV	Interruptor H - 101	0.085	0.5
26	Patio de 115kV	Tx	0.044	0.5
	Patio de 115kV		0.033	0.5

CAPITULO VI

PARAMETROS DE LAS MALLAS DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE SIMULACIONES

El objetivo principal de este capítulo es obtener mediante simulaciones los aspectos más relevantes del diseño original del sistema de puesta a tierra de la subestaciones Morichal, Temblador y Jobo Norte, a través de los datos proporcionados en los planos (Ver Anexo A).

Estas simulaciones permiten obtener un punto de comparación con los parámetros existentes actualmente en el sistema de puesta a tierra de las subestaciones eléctricas mencionadas.

Para esto se utilizó el software ETAP v.5.0.3, mediante el Método de Elementos Finitos; este programa tiene la capacidad de simular el comportamiento de la malla de puesta a tierra una vez recolectada toda la información básica de resistividad de los suelos y construcción de la malla.

Para realizar estas simulaciones se consideró como valor de resistividad del suelo el obtenido en las mediciones, debido a que en los planos de la malla de tierra de las subestaciones no se encuentran especificados estos valores.

6.1 Subestación Morichal.

Para estas simulaciones se consideraron las siguientes características:

- Una persona con peso corporal de 50 Kg

- Corriente de Corto Circuito I_{cc} : 3.34kA
- Tiempo de duración de la falla t_s : 0.5 seg
- Temperatura ambiental: 40 °C

6.1.1 Resultados Obtenidos

En la figura 6.1 se puede apreciar una representación gráfica de la malla de tierra de la subestación Morichal, donde se observa la forma de la malla y la disposición de las barras de cobre enterradas en el suelo.

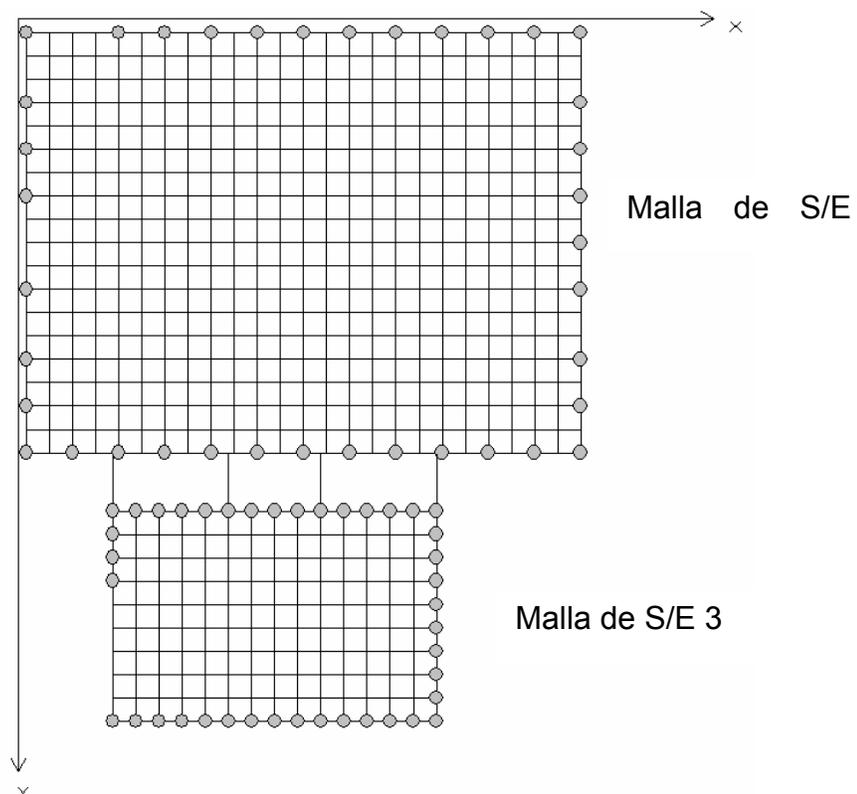


Figura 6.1. Malla de puesta a tierra de la S/E Morichal mostrada en la simulación.

Malla de tierra de la subestación 15:

- Cuenta con un área aproximada de: 72 x 89 m

- Reticulado: 4 x 4
- Conductor de tierra: 4/0 Cu AWG
- Profundidad: 0.6 m
- Barras enterradas: Electrodo de Copperweld Φ 5/8" x 8'

Malla de la subestación 3

- Cuenta con un área aproximada de: 56 x 36 m
- Reticulado: 4 x 4
- Conductor de tierra: 4/0 Cu AWG
- Profundidad: 0.6 m
- Barras enterradas: Electrodo de Copperweld de Φ 3/4" x 10'

Para mayor información sobre la conformación física de la malla ver Anexo A.

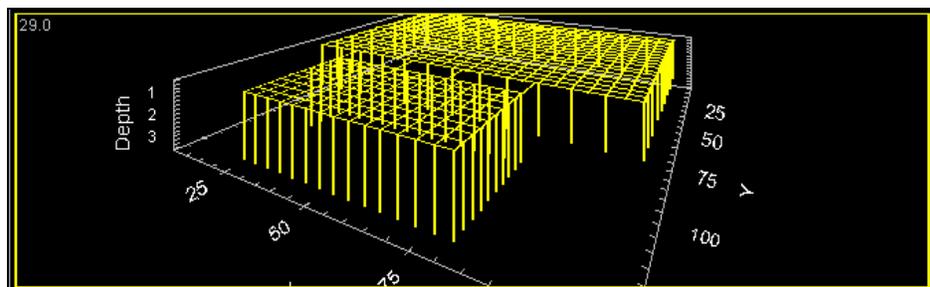


Figura 6.2. Imagen en 3D de la malla de puesta a tierra de la subestación Morichal.

De las mediciones mostradas en el capítulo V se tomaron los siguientes valores de resistividad para la simulación:

- Resistividad asumida de la capa de piedra picada ps: 4500 Ω m
- Resistividad de la primera capa del terreno ρ_1 : 6346.6 Ω m
- Resistividad de la segunda capa del terreno ρ_2 : 3518.79 Ω m

- Profundidad de la primera capa del terreno: 2.21 m

La figura 6.3 muestra una representación gráfica del perfil de resistividad del terreno.

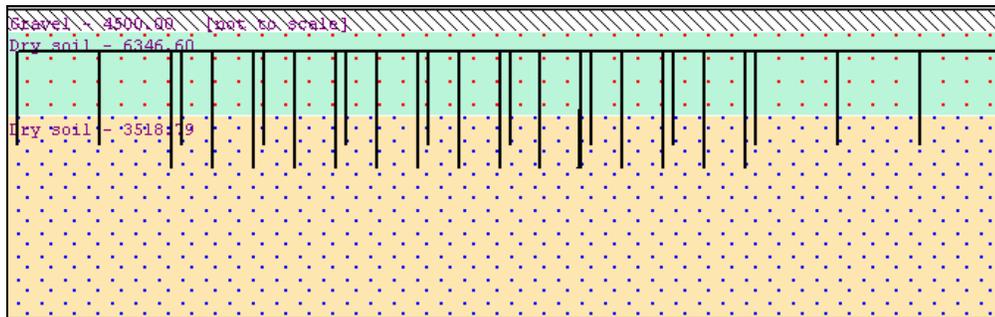


Figura 6.3. Representación gráfica de la disposición de las barras y la resistividad del terreno en la S/E Morichal

Finalmente el simulador dio como resultado los siguientes valores de salida, tal como se puede apreciar en la figura 6.4:

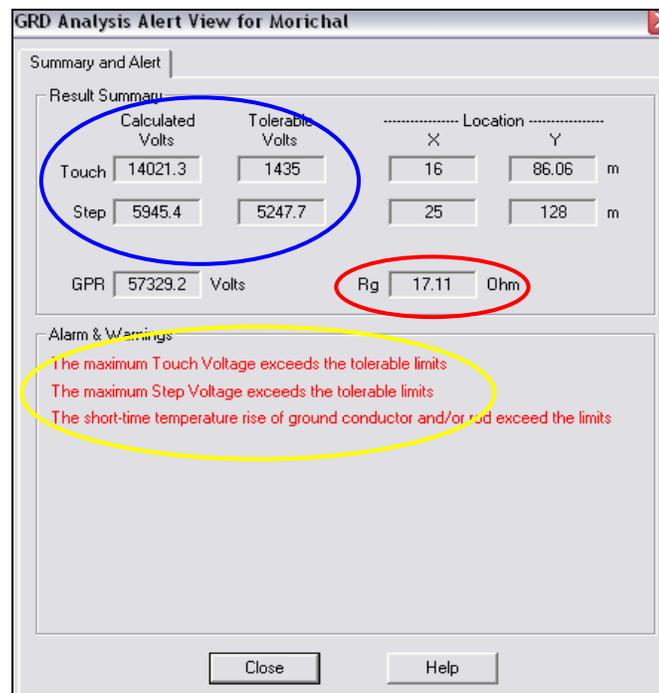


Figura 6.4. Resumen de alertas S/E Morichal considerando valor de resistividad medido

La resistencia de la malla $R_g = 17.11 \text{ ohm}$

Gradiente de Potencial de la malla $GPR = 57329.2V$

Voltaje de paso = 5945.4 V

Voltaje de toque = 14021.3 V

Así mismo, en las figuras 6.5, 6.6 y 6.7 se muestra una representación en 3D de la ubicación de los potenciales existentes en la malla.

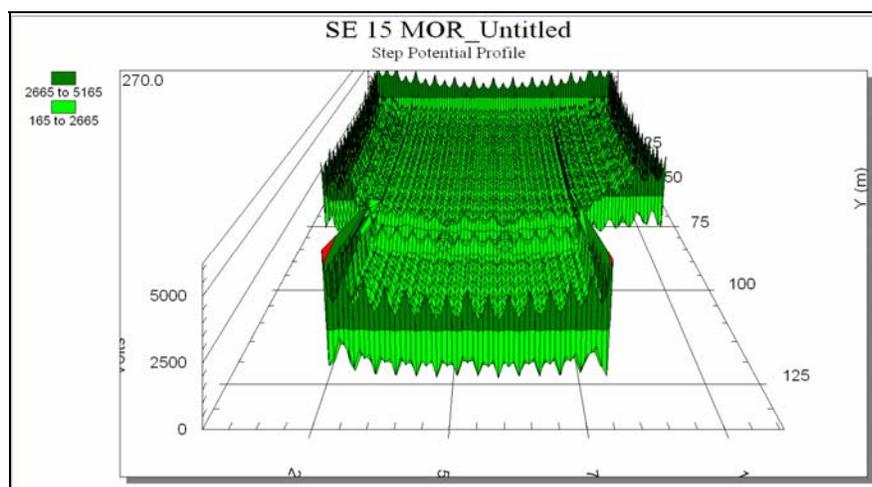


Figura 6.5. Perfil del potencial de paso de la subestación Morichal, considerando valor de resistividad medido.

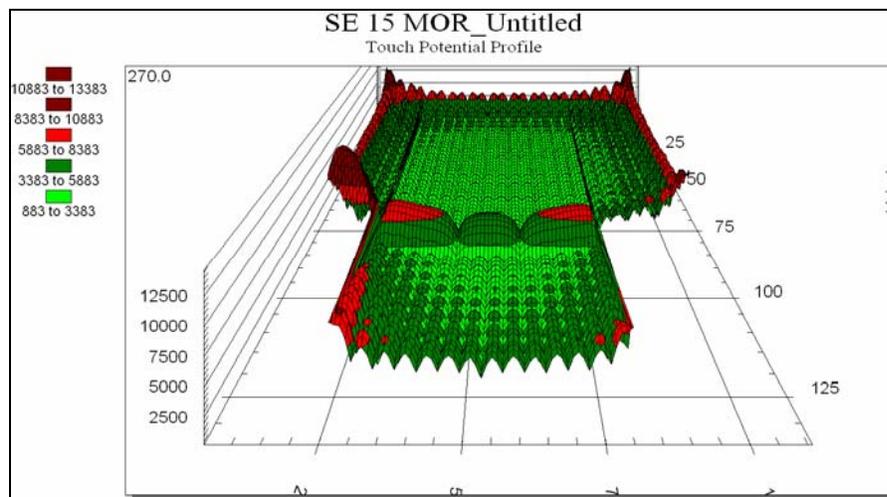


Figura 6.6. Perfil del potencial de toque de la subestación Morichal, considerando valor de resistividad medido.

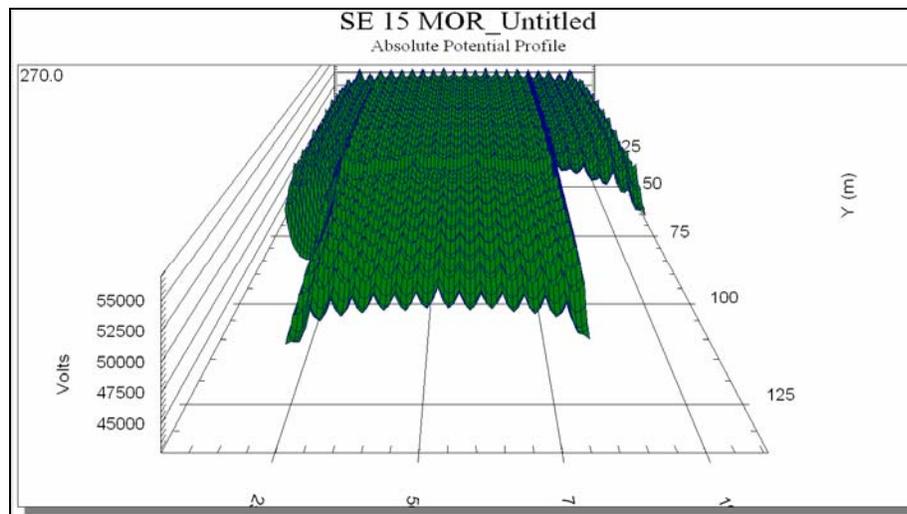


Figura 6.7. Perfil del potencial absoluto de la subestación Morichal, considerando valor de resistividad medido.

De acuerdo a estos resultados, se hace notable que los potenciales tanto de toque como de paso, se encuentran ubicados en la periferia de la malla de tierra de la subestación.

Por otra parte, en los planos de la subestación morichal se especifica que al momento de realizar la instalación de la malla de puesta a tierra, la contratista considero una resistividad de $\rho_1 = 1800 \Omega\text{-m}$. Esta variación en los valores de resistividad del suelo posiblemente se debe a una previa preparación del terreno al momento de colocar la malla de tierra, lo cual genera que los terrenos aledaños a la subestación no posean la misma resistividad que el terreno bajo el cual se encuentra instalada la malla.

Así pues, tomando en cuenta el valor de resistividad establecido en el plano, se realizo una nueva simulación del sistema de puesta a tierra de esta subestación donde se obtuvieron los siguientes resultados:

La resistencia de la malla $R_g = 6.83 \Omega$

Gradiente de Potencial de la malla $GPR = 22900.2 \text{ V}$

Voltaje de paso = 2213.5 V

Voltaje de toque = 3446.6 V

Estos resultados se pueden visualizar a través de la figura 6.9.

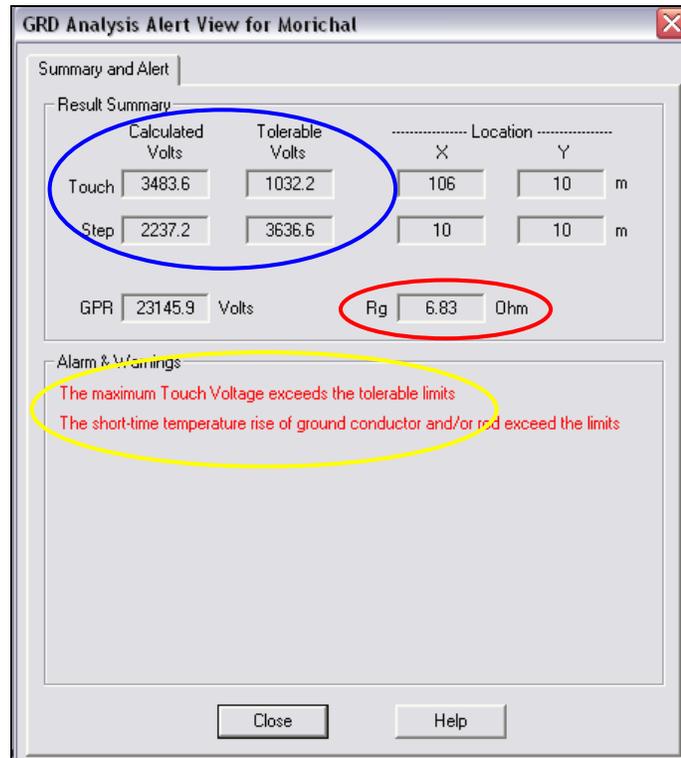


Figura 6.8. Resumen de Alertas de la S/E Morichal, considerando el valor de resistividad establecido en el plano.

Seguidamente en las figuras 7.9, 7.10 y 7.11 se muestran una representación en 3D de la ubicación de los potenciales existentes en la malla de tierra.

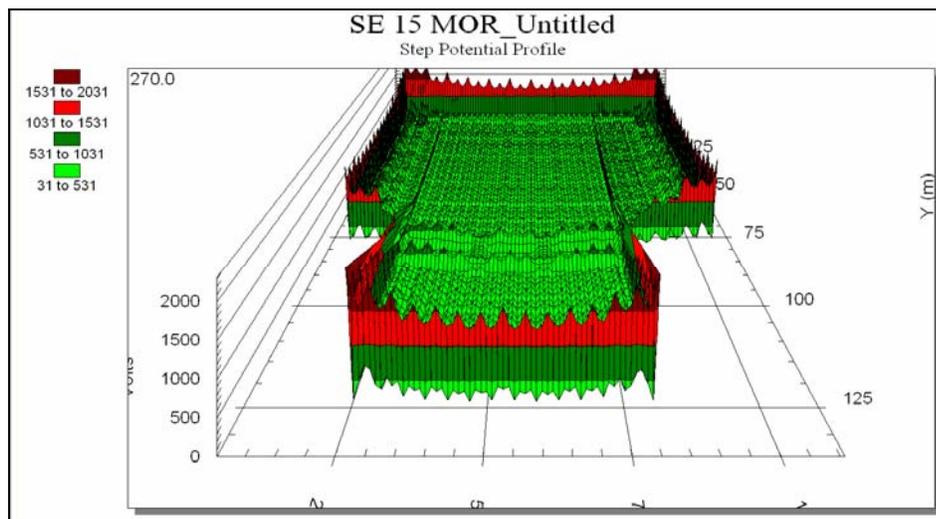


Figura 6.9. Perfil del potencial de paso de la subestación Morichal, considerando valor de resistividad establecido en el plano.

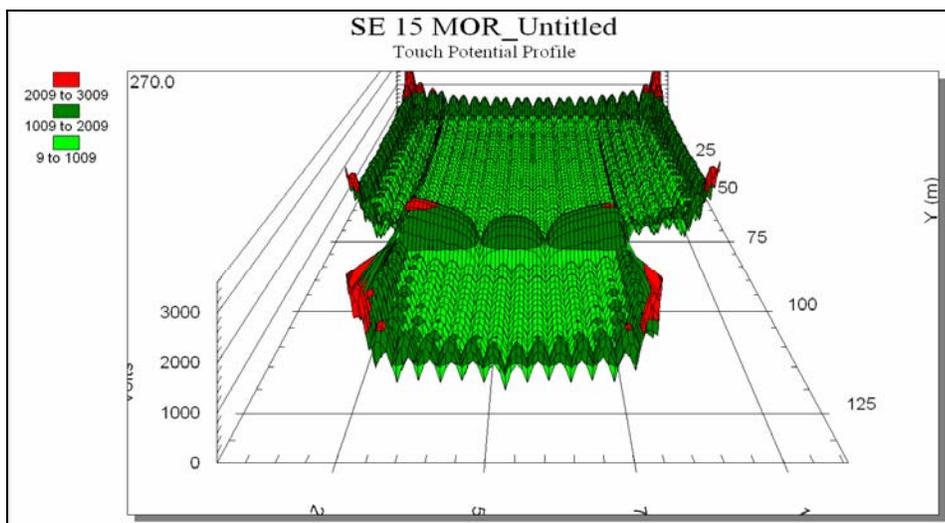


Figura 6.10. Perfil del potencial de toque de la subestación Morichal, considerando valor de resistividad establecido en el plano.

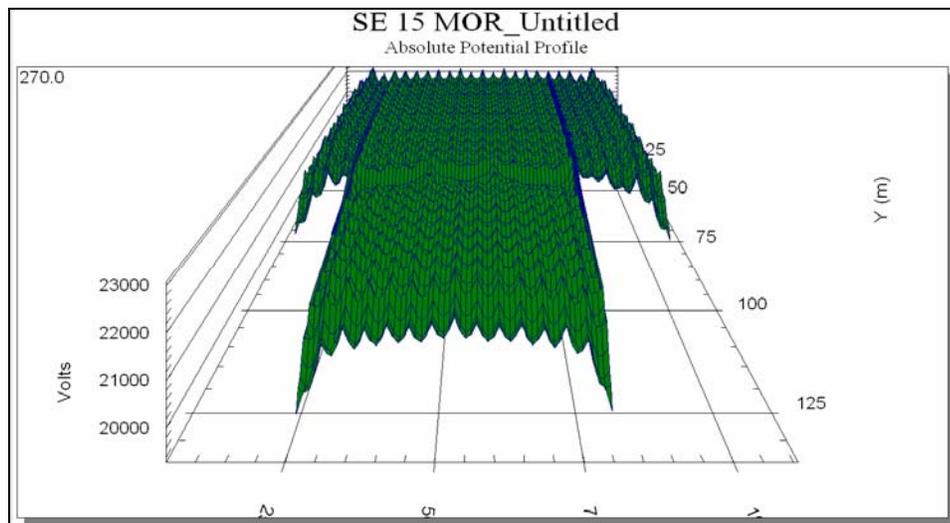


Figura 6.11. Perfil del potencial absoluto de la subestación Morichal, considerando valor de resistividad establecido en el plano.

De acuerdo a estos resultados, se hace notable que los potenciales tanto de toque como de paso, se encuentran ubicados en la periferia de la malla de tierra de la subestación.

En vista de la gran variación que existe entre los valores de resistividad medidos y el que especifica el plano, resulta necesario calcular mediante la ecuación 6.1 el valor de resistividad aparente del área de la S/E.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \times \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (6.1)$$

Donde:

- R_g = Resistencia total de la malla de la subestación [Ω]
- ρ = resistividad aparente [Ω -m]
- A = Área de la subestación m^2

Despejando se obtiene:

$$\rho = 4 * Rg * \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (6.2)$$

Así pues el valor de resistividad del suelo obtenido mediante la ecuación 6.2 es: $\rho = 1390\Omega\text{-m}$

Realizando una nueva simulación, tomando en cuenta esta resistividad se tienen los resultados mostrados en la figura 6.12:

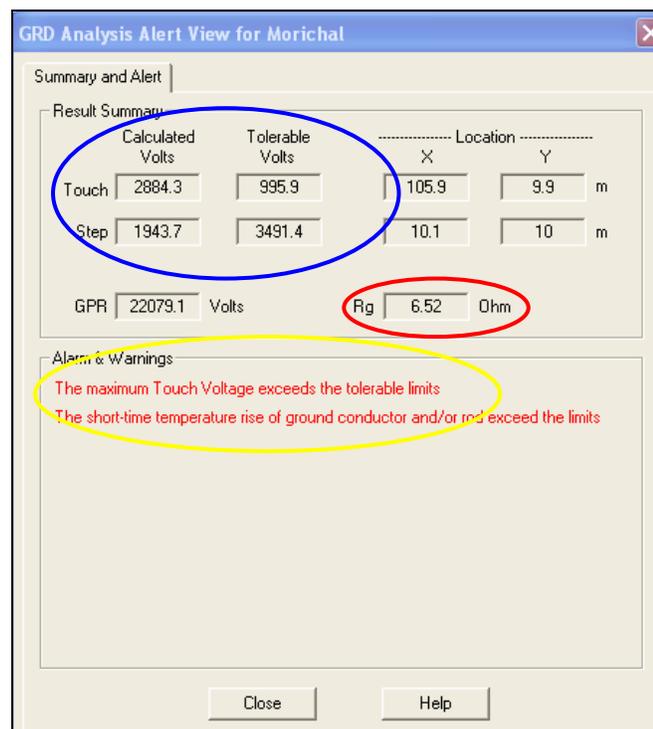


Figura 6.12. Resumen de alertas S/E Morichal considerando valor de resistividad calculada

La resistencia de la malla $Rg = 6.52 \Omega$

Gradiente de Potencial de la malla $GPR = 22079.1 V$

Voltaje de paso = 1943,7 V

Voltaje de toque = 2882,3 V

6.2 Subestación Jobo Norte

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada para la subestación Jobo Norte.

Para esta simulación se consideraron las siguientes características:

- Una persona con peso corporal de 50 Kg
- Corriente de Cortocircuito I_{cc} : 2.34kA
- Tiempo de duración de la falla t_s : 0.5 seg
- Temperatura ambiental: 40°C

6.2.1 Resultados Obtenidos

En la figura 6.13 se puede apreciar una representación gráfica de la malla de tierra de la subestación Jobo Norte, donde se observa la forma de malla y la disposición de las barras de cobre enterradas en el suelo.

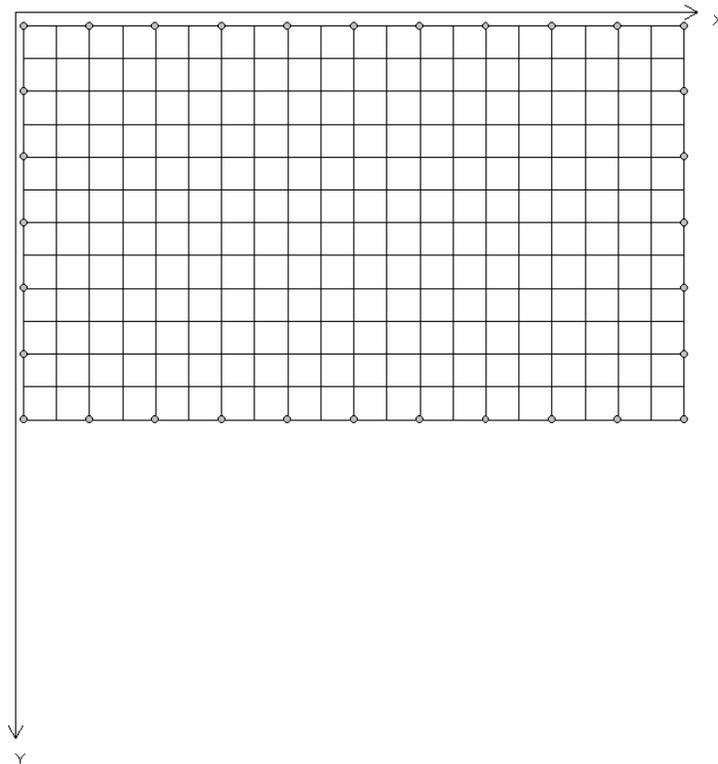


Figura 6.13. Malla de puesta a tierra de la S/E Jobo Norte mostrada en la simulación.

La malla de la subestación Jobo Norte cuenta con:

- Área aproximada de: 65.5 x 99.5 m
- Reticulado: 3.5 x 3.5
- Conductor de tierra: 4/0 Cu AWG
- Profundidad: 0.6 m
- Barras enterradas: Electrodo de Copperweld de Φ 5/8" x 8'

Para mayor información sobre la conformación física de la malla ver Anexo A.

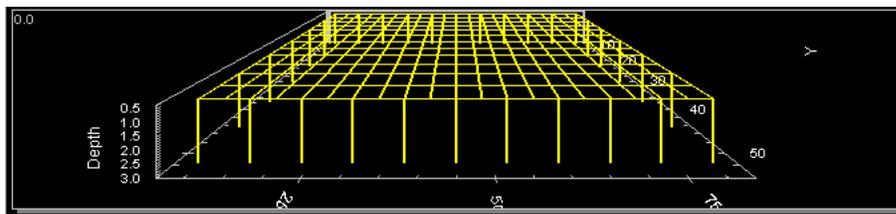


Figura 6.14. Imagen en 3D de la malla de puesta a tierra de la subestación Jobo Norte.

De las mediciones mostradas en el capítulo V se tomaron los siguientes valores de resistividad para la simulación:

- Resistividad asumida de la capa de piedra picada ρ_s : 4500 Ωm
- Resistividad de la primera capa del terreno ρ_1 : 2738.49 Ωm
- Resistividad de la segunda capa del terreno ρ_2 : 5684.01 Ωm
- Profundidad de la primera capa del terreno: 5.23m

La figura 6.15 muestra una representación grafica del perfil de resistividad del terreno.

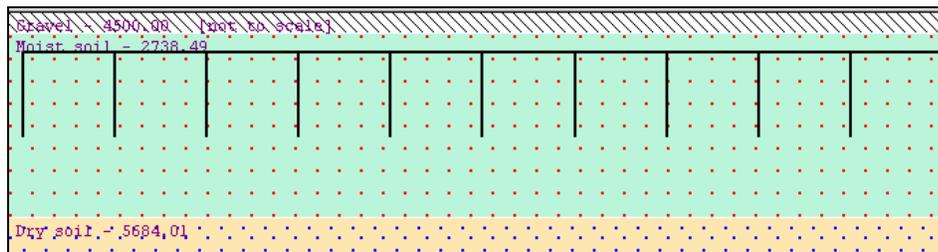


Figura 6.15. Representación gráfica de la disposición de las barras y la resistividad del terreno de la S/E Jobo Norte

Finalmente el simulador da como resultado los siguientes valores de salida, tal como se muestra en la figura 6.15

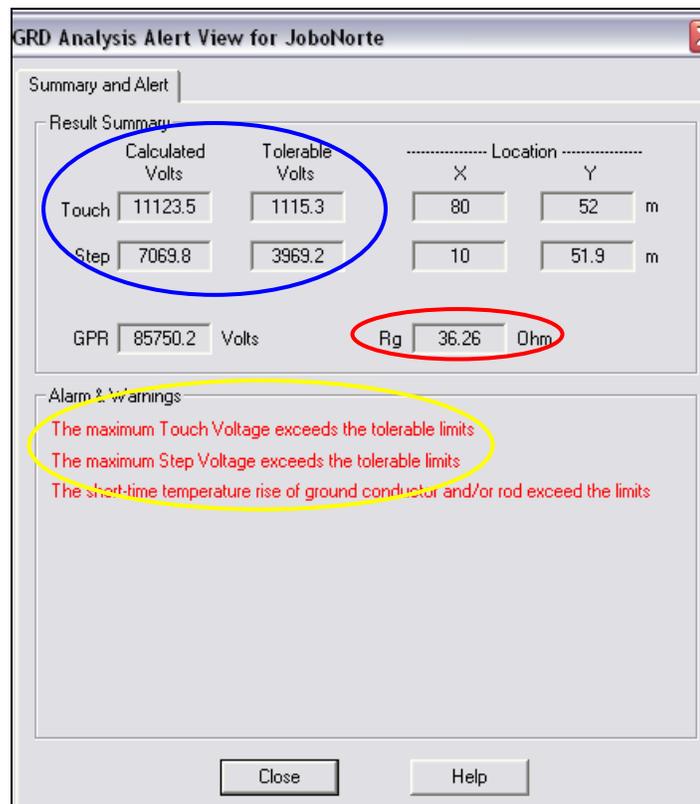


Figura 6.16. Resumen de alertas de la S/E Jobo Norte

La resistencia de la malla $R_g = 36.32$ ohm

Gradiente de Potencial de la malla GPR = 85263.6V

Voltaje de paso = 7126.7 V

Voltaje de toque = 11077 V

Así mismo, en las figuras 6.17, 6.18 y 6.19 se muestra una representación en 3D de la ubicación de los potenciales existentes en la malla.

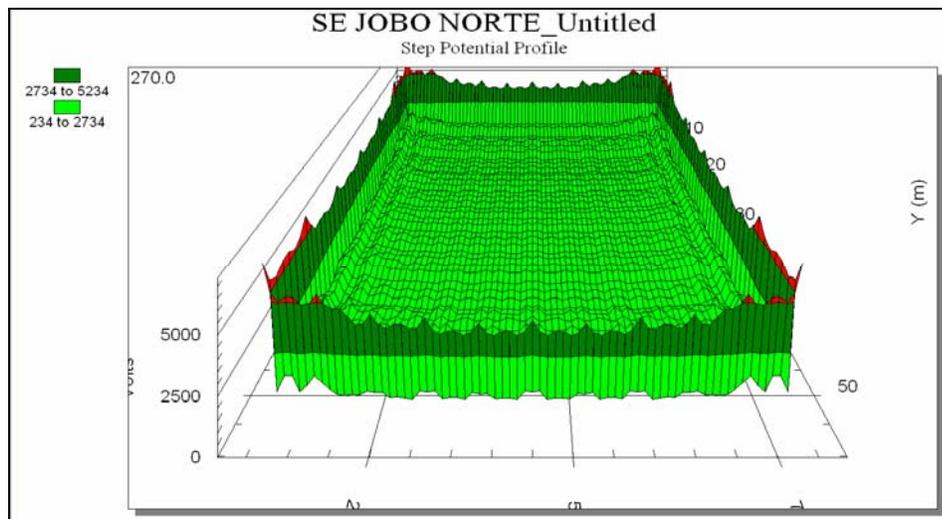


Figura 6.17. Perfil del potencial de paso de la subestación Jobo Norte

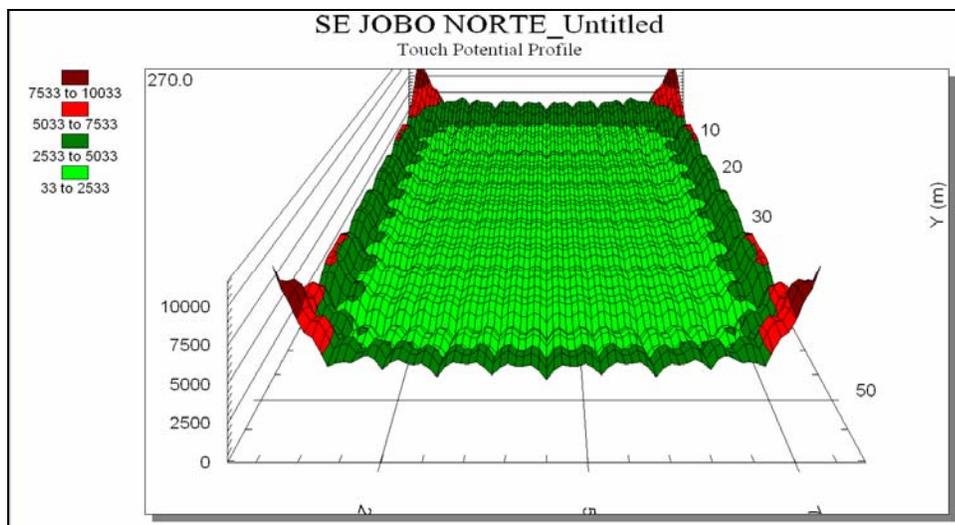


Figura 6.18. Perfil del potencial de toque de la subestación Jobo Norte

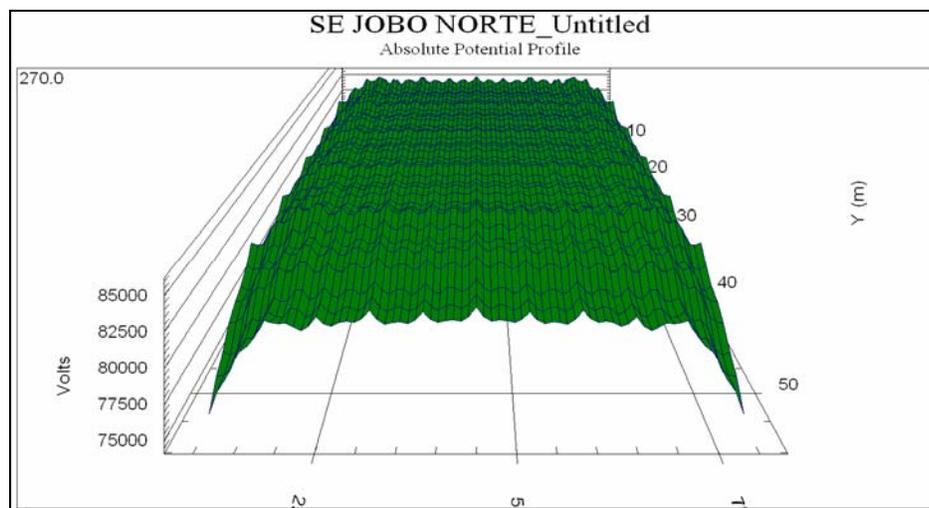


Figura 6.19. Perfil del potencial absoluto de la subestación Jobo Norte

De acuerdo a estos resultados, se hace notable que los potenciales tanto de toque como de paso, se encuentran ubicados en la periferia de la malla de tierra de la subestación.

En vista de que los valores obtenidos hasta ahora en las simulaciones arrojan resultados de resistencia de la malla de tierra con una gran variación con respecto a los valores obtenidos a través de las mediciones, resulta necesario calcular mediante ecuación 6.1 el valor de resistividad aparente del área de la S/E.

De esta manera el valor calculado de resistividad del área de la subestación es $\rho = 1275,32 \Omega\cdot m$.

Realizando una nueva simulación, tomando en cuenta esta resistividad se tienen los resultados mostrados en la tabla 6.20:

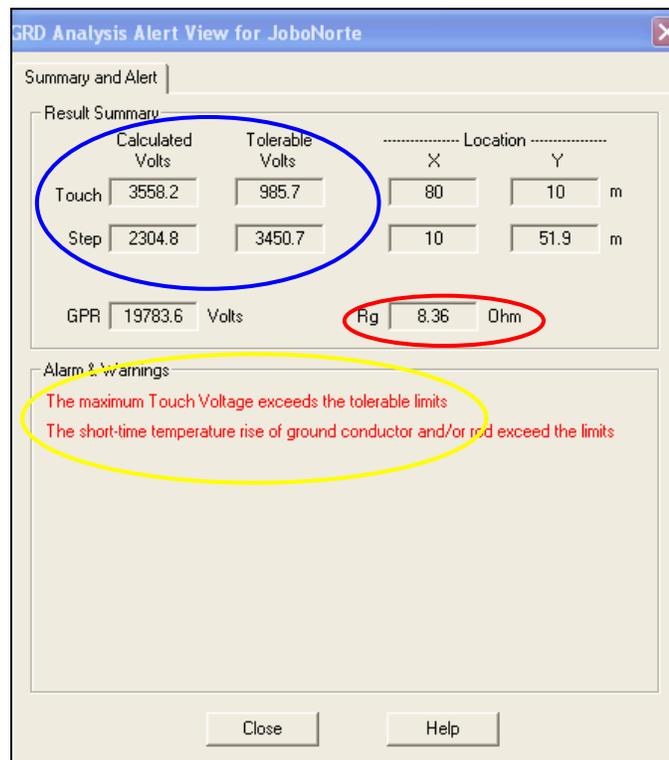


Figura 6.20. Resumen de alertas S/E Jobo Norte considerando valor de resistividad calculada

La resistencia de la malla $R_g = 8.36$ ohm

Gradiente de Potencial de la malla GPR = 19782.6V

Voltaje de paso = 2304.8 V

Voltaje de toque = 3558.2 V

6.3 Subestación Temblador

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada para la subestación Temblador.

Para esta simulación se consideraron las siguientes características:

- Una persona con peso corporal de 50Kg

- Corriente de Cortocircuito I_{cc} : 1.85kA
- Tiempo de despeje de falla t_s : 0.5 seg
- Temperatura ambiental: 40°C

6.3.1 Resultados Obtenidos

En la figura 6.21 se puede apreciar una representación gráfica de la malla de tierra de la subestación Temblador, donde se observa la forma de la malla y la disposición de las barras de cobre enterradas en el suelo.

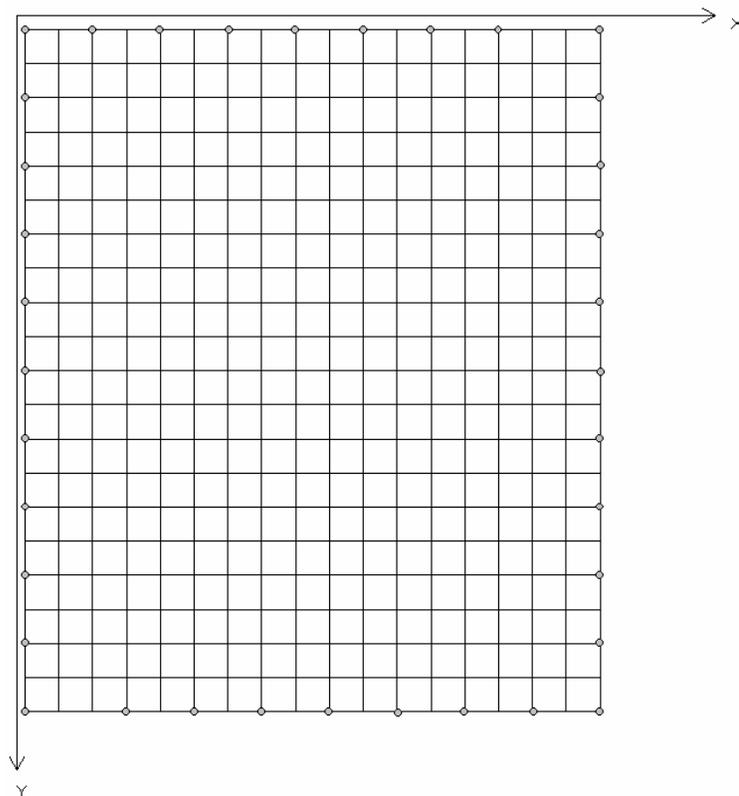


Figura 6.21. Malla de puesta a tierra de la S/E Temblador mostrada en la simulación.

La malla de la subestación Temblador cuenta con:

- Área aproximada de: 91.5 x 76.5 m

- Reticulado: 3.5 x 3.5
- Conductor de tierra: 4/0 Cu AWG
- Profundidad: 0.6 m
- Barras enterradas: Electrodo de Copperweld de Φ 5/8" x 8'

Para mayor información sobre la conformación física de la malla ver Anexo A.

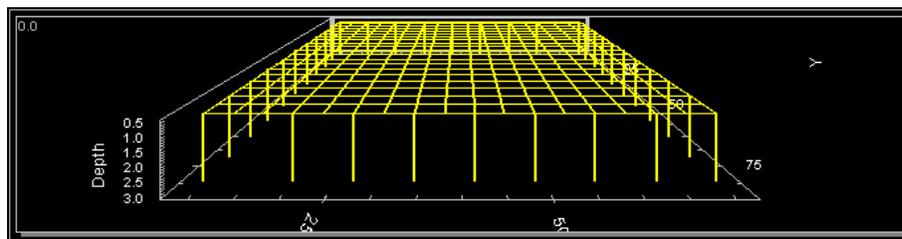


Figura 6.22. Imagen en 3D de la malla de puesta a tierra de la subestación Temblador

De las mediciones mostradas en el capítulo V se tomaron los siguientes valores para la simulación:

- Resistividad asumida de la capa de piedra picada ρ_s : 4500 Ωm
- Resistividad de la primera capa del terreno ρ_1 : 1847.5 Ωm
- Resistividad de la segunda capa del terreno ρ_2 : 1127.9 Ωm
- Profundidad de la primera capa del terreno: 2m

La figura 6.23 muestra una representación gráfica del perfil de resistividad del terreno.

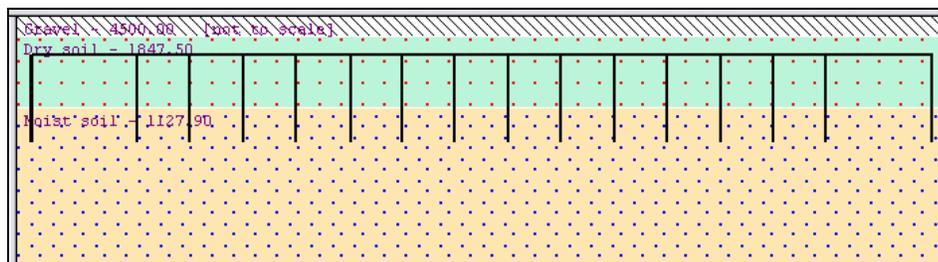


Figura 6.23. Representación gráfica de la disposición de las barras y la resistividad del terreno de la S/E Temblador

Finalmente el simulador da como resultado los siguientes valores de salida, mostrados en la figura 6.24:

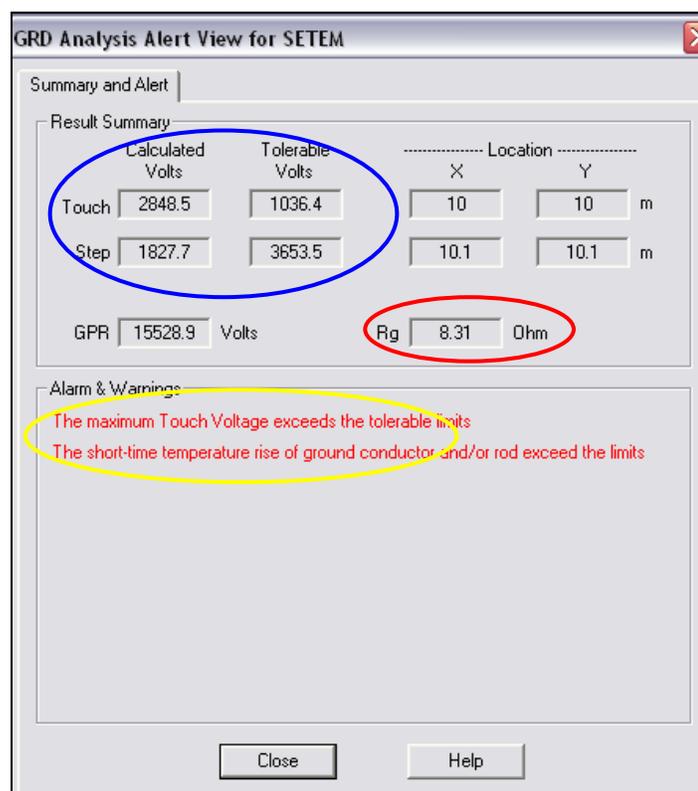


Figura 6.24. Resumen de alertas de la S/E Temblador

La resistencia de la malla $R_g = 8.33\Omega$

Gradiente de Potencial de la malla GPR = 15457.5V

Voltaje de paso = 2007.5 V

Voltaje de toque = 2821.8 V

Así mismo, en las figuras 6.25, 6.26 y 6.27 se muestra una representación en 3D de la ubicación de los potenciales existentes en la malla.

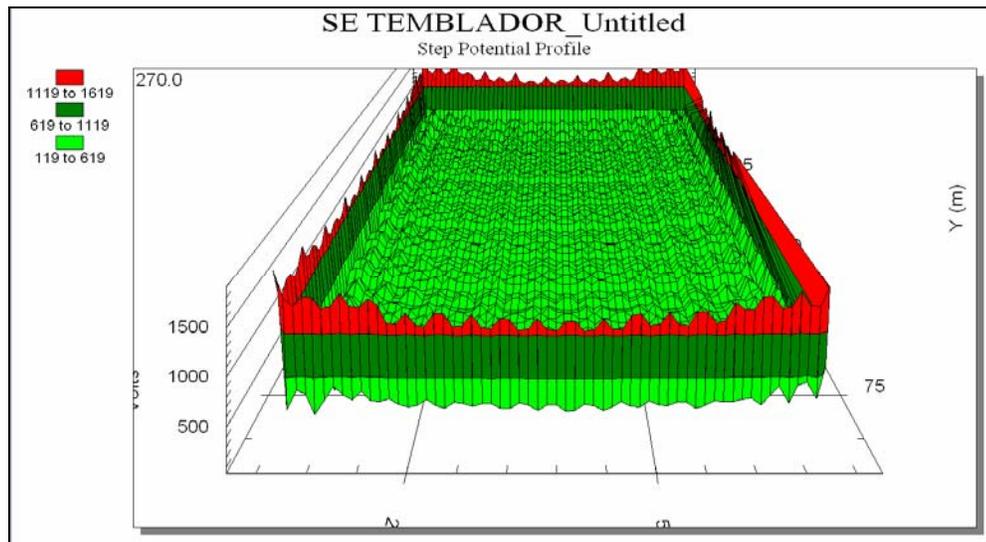


Figura 6.25. Perfil del potencial de paso de la subestación Temblador

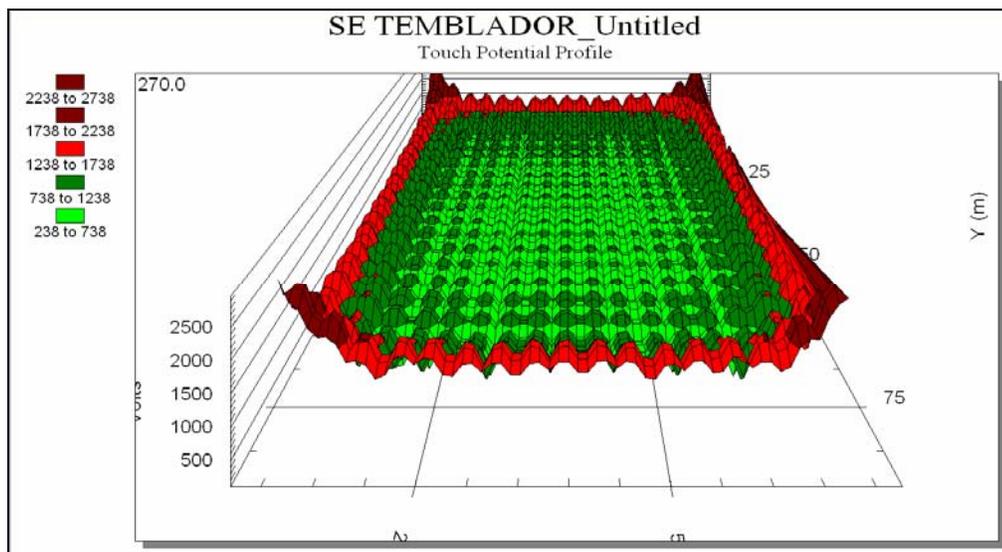


Figura 6.26. Perfil del potencial de toque de la subestación Temblador

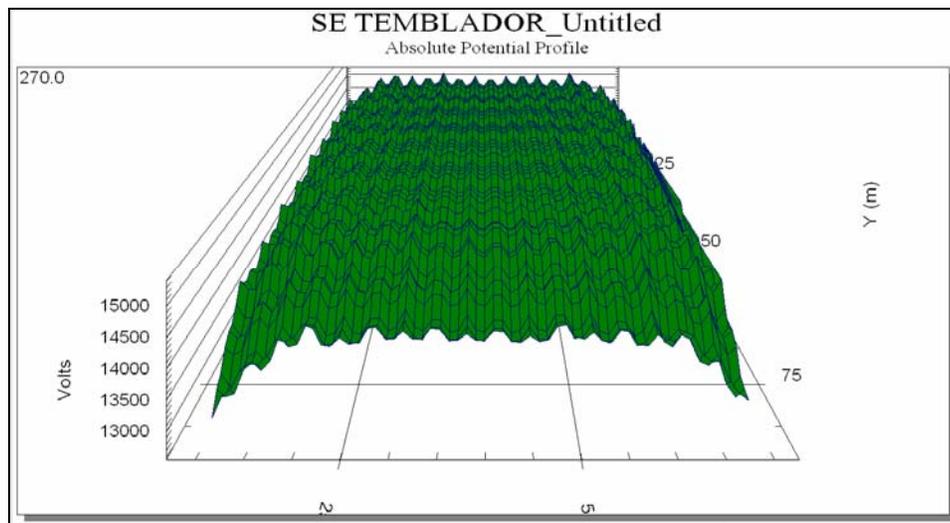


Figura 6.27. Perfil del potencial absoluto de la subestación Temblador

De acuerdo a estos resultados, se hace notable que los potenciales tanto de toque como de paso, se encuentran ubicados en la periferia de la malla de tierra de la subestación.

En vista de que los valores obtenidos hasta ahora en las simulaciones arrojan resultados de resistencia de la malla de tierra con una gran variación con respecto a los valores obtenidos a través de las mediciones, resulta necesario calcular mediante ecuación 6.1 el valor de resistividad aparente del área de la S/E.

De esta manera el valor calculado de resistividad del área de la subestación es $\rho = 862,87 \Omega\text{-m}$.

Realizando una nueva simulación, tomando en cuenta esta resistividad se tienen los resultados mostrados en la tabla 6.28:

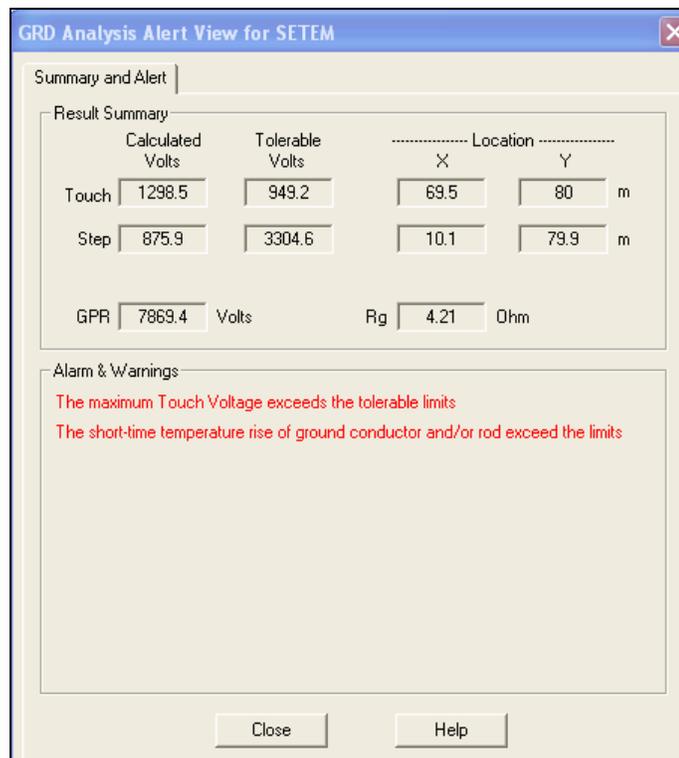


Figura 6.28. Resumen de alertas S/E Temblador considerando valor de resistividad calculada

La resistencia de la malla $R_g = 4.21\Omega$

Gradiente de Potencial de la malla GPR = 7869.4 V

Voltaje de paso = 875,9 V

Voltaje de toque = 1298,5 V

CAPITULO VII

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El propósito de este capítulo es analizar los resultados obtenidos tanto en las mediciones de campo como en las simulaciones, realizadas en las subestaciones eléctricas Morichal, Temblador y Jobo Norte.

Para analizar los resultados obtenidos en las mediciones de resistencia de la malla de tierra de las subestaciones, se tomo como base el Std. 80 de la norma IEEE, el cual establece en su capítulo 14 que para obtener un buen sistema de puesta a tierra, el valor de resistencia de la malla de una subestación debe estar en un rango comprendido entre 1 y 5 Ω .

14.1 Usual requirements

A good grounding system provides a low resistance to remote earth in order to minimize the GPR. For most transmission and other large substations, the ground resistance is usually about 1 Ω or less. In smaller distribution substations, the usually acceptable range is from 1 Ω to 5 Ω , depending on the local conditions.

Así mismo se realizaron comparaciones entre los datos arrojados por las simulaciones y los valores obtenidos en las mediciones.

Por otra parte, para el análisis de las mediciones de continuidad mostradas en el capítulo V, se tomó como base lo establecido en la norma NETA MTS 2001, la cual establece que el valor de continuidad entre los equipos y su conexión a tierra no debe exceder de 0,5 Ω .

7.1 Análisis de los resultados obtenidos en las mediciones de resistividad de suelos y resistencia de la malla de tierra

7.1.1 Subestación Morichal

En la figura 7.1 se puede apreciar que las mediciones de resistividad realizadas en los terrenos adyacentes a la subestación Morichal demuestran que se trata de un terreno Heterogéneo, con tendencia descendente, lo cual indica que la resistividad de la primera capa del terreno es mayor que la resistividad de la segunda capa del mismo. El conocimiento de este parámetro resulta de gran importancia al momento de establecer las posibles recomendaciones al Sistema de Puesta Tierra (SPT).

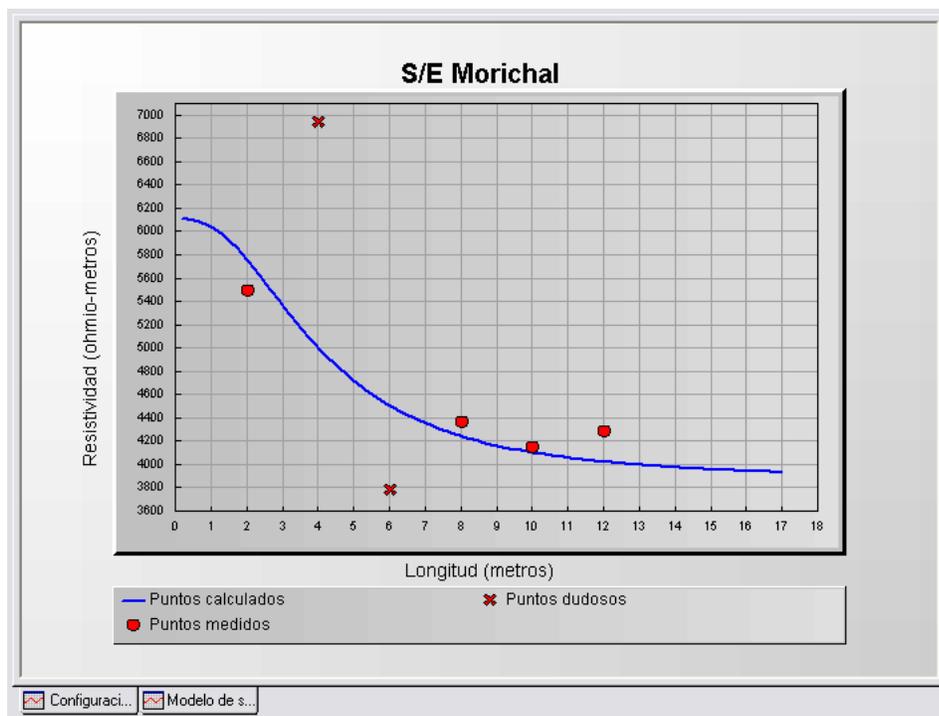


Figura 7.1. Tendencia de la Resistividad del suelo de la Subestación Morichal

Así mismo, en la tabla 7.1 se presenta de manera resumida tanto el valor de resistencia de la malla de tierra de la subestación medido en campo,

como los valores arrojados por las simulaciones considerando la resistividad del suelo medida en campo y la especificada en el plano, cotejando así ambos resultados con el valor establecido por la norma.

Tabla 7.1. Resistencia de la malla de tierra S/E Morichal

Resistencia de la Malla de Tierra				
Valor medido en campo [Ω]	Valor obtenido en simulación, considerando resistividad medida [Ω]	Valor obtenido en simulación, considerando resistividad especificada en plano [Ω]	Valor obtenido en simulación, considerando resistividad calculada [Ω]	Valor establecido por la norma IEEE [Ω]
7,7	17.11	6.83	6.52	5

Se puede apreciar que el valor medido de resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación Morichal no cumple con el valor de 5ohm establecido por la norma IEEE Std. 80, en consecuencia, si se llegase a presentar una falla en la subestación, el paso de la corriente de falla hacia la malla de tierra se dificultaría, lo cual podría ocasionar daños tanto a los equipos como al personal. Igualmente, se ratifica la gran influencia que tiene la resistividad del terreno en el valor de resistencia de la malla, al observar la variación que existe entre los valores medidos y los arrojados en las simulaciones. Esto debido a que posiblemente el terreno bajo el cual se dispuso la malla fue tratado previa instalación de la malla y en consecuencia la resistividad de los terrenos aledaños a la subestación no es la misma resistividad de los terrenos bajo los cuales está colocada la malla.

En vista de esto se decidió calcular un valor de resistividad del suelo basados en el Std. 80 de la norma IEEE, cuyo resultado es un valor más cercano al real.

En cuanto a los potenciales existentes en la malla de tierra de esta subestación se obtuvo lo siguiente:

Tabla 7.2. Potenciales de Toque y Paso de la S/E Morichal

	Potencial de Toque y Paso			
	Valor Maximo de Potencial de Paso obtenido mediante simulación [V]	Valor Maximo de potencial de paso tolerable por el cuerpo humano [V]	Valor Maximo de Potencial de Toque obtenido mediante simulación [V]	Valor Maximo de potencial de paso tolerable por el cuerpo humano [V]
Considerando resistividad medida en campo	5945.4	5247.7	14021.3	1435
Considerando resistividad especificada en plano	2213.5	3636.6	3446.6	1032.2
Considerando resistividad calculada	1943,7	3491,4	2884,3	995,9

Donde se observa que considerando como resistividad del suelo la obtenida mediante mediciones, los potenciales tanto de toque como de paso exceden los valores tolerables por el cuerpo humano, lo cual genera una situación insegura dentro de la subestación al momento de producirse una falla.

Mientras que considerando la resistividad del terreno especificada en el plano y el calculado, el potencial de paso se mantiene dentro del rango de tolerancia. Así mismo es importante resaltar que para ambos casos los potenciales tanto de toque como de paso se presentan básicamente en la periferia de la malla de tierra.

7.1.2 Subestación Jobo Norte

En la figura 7.2 se puede apreciar que las mediciones de resistividad realizadas en los terrenos adyacentes a la subestación Jobo Norte demuestran que se trata de un terreno Heterogéneo, con tendencia ascendente, lo cual indica que la resistividad de la primera capa del terreno es menor que la resistividad de la segunda capa del mismo. El conocimiento de este parámetro resulta de gran importancia al momento de establecer las posibles recomendaciones al SPT.

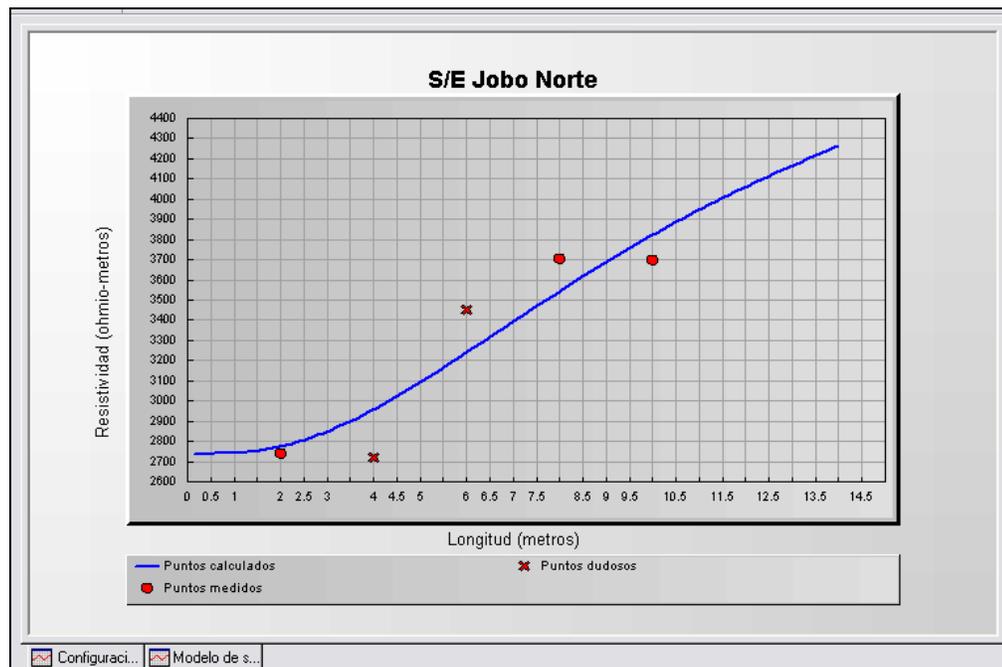


Figura 7.2. Tendencia de la Resistividad del suelo de la Subestación Jobo Norte

Así mismo, en la tabla 7.1 se presenta de manera resumida tanto el valor de resistencia de la malla de tierra de la subestación medido en campo, como los valores arrojados por las simulaciones considerando la resistividad del suelo medida en campo y la especificada en el plano, cotejando así ambos resultados con el valor establecido por la norma.

Tabla 7.3. Resistencia de la malla de tierra S/E Jobo Norte

Resistencia de la Malla de Tierra			
Valor medido en campo [Ω]	Valor obtenido mediante simulación considerando ρ medido [Ω]	Valor obtenido mediante simulación considerando ρ calculado [Ω]	Valor establecido por la norma IEEE [Ω]
7,24	36,32	8,36	5

Se puede notar que este valor medido de resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación no cumple con el valor establecido por la norma IEEE std. 80, en consecuencia, si se llegase a presentar una falla en

la subestación, el paso de la corriente de falla hacia la malla de tierra se dificultaría, lo cual podría ocasionar daños a los equipos y al personal. Igualmente, se ratifica la gran influencia que tiene la resistividad del terreno en el valor de resistencia de la malla, al observar la variación que existe entre los valores medidos y los arrojados en las simulaciones. Esto debido a que posiblemente el terreno bajo el cual se dispuso la malla fue tratado previa instalación de la malla y en consecuencia la resistividad de los terrenos aledaños a la subestación no es la misma resistividad de los terrenos bajo los cuales está colocada la malla.

En cuanto a los potenciales existentes en la malla de tierra de la subestación se obtuvo lo siguiente:

Tabla 7.4. Potenciales de Toque y Paso de la S/E Jobo Norte

	Potencial de Toque y Paso			
	Valor Maximo calculado mediante el simulador considerando ρ medido [V]	Valor Maximo tolerable por el cuerpo humano [V]	Valor Maximo calculado mediante el simulador considerando ρ calculado [V]	Valor Maximo tolerable por el cuerpo humano [V]
Potencial de Paso	7126,7	3969,2	2304,8	3450,7
Potencial de Toque	11070	1115,3	3558,2	985,7

Donde se observa que considerando el valor de resistividad medido en campo, los potenciales tanto de toque como de paso exceden los valores tolerables por el cuerpo, lo cual genera una situación insegura dentro de la subestación al momento de producirse una falla. Mientras que considerando el valor de resistividad calculado el potencial de toque excede los límites. Estos potenciales de toque y paso para ambos casos se presentan básicamente en la periferia de la malla de tierra.

7.1.3 Subestación Temblador

En la figura 7.3 se puede apreciar que las mediciones de resistividad realizadas en los terrenos adyacentes a la subestación Temblador demuestran que se trata de un terreno Heterogéneo, con tendencia descendente, lo cual indica que la resistividad de la primera capa del terreno es mayor que la resistividad de la segunda capa del mismo. El conocimiento de este parámetro resulta de gran importancia al momento de establecer las posibles recomendaciones al SPT.

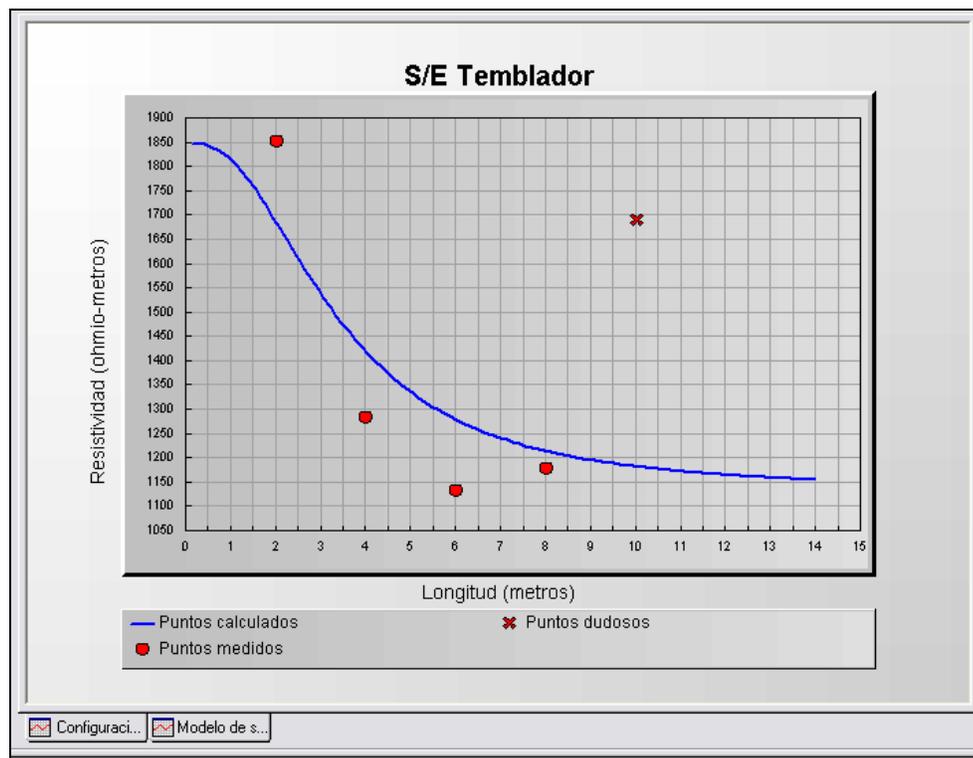


Figura 7.3. Tendencia de la Resistividad del suelo de la Subestación Temblador

Así mismo se presenta de manera resumida una tabla donde se puede apreciar tanto el valor de resistencia de la malla de tierra de la subestación medido en campo, como el arrojado por las simulaciones, cotejando ambos resultados con el valor establecido por la norma.

Tabla 7.5. Resistencia de la malla de tierra S/E Temblador

Resistencia de la Malla de Tierra			
Valor medido en campo [Ω]	Valor obtenido mediante simulación considerando ρ medido [Ω]	Valor obtenido mediante simulación considerando ρ calculado [Ω]	Valor establecido por la norma IEEE [Ω]
4,57	8,31	4,21	5

En este caso se puede notar que el valor medido de resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación se encuentra dentro del rango establecido por la norma IEEE std. 80, lo cual es satisfactorio. Así mismo cotejando los valores de R_g arrojados por las simulaciones considerando tanto la resistividad medida como la calcula, se hace evidente que el valor de resistividad de los terrenos aledaños a las subestaciones no es la misma resistividad de los terrenos donde actualmente se encuentra dispuesta la malla.

En cuanto a los potenciales existentes en la malla de tierra de esta subestación se obtuvo lo siguiente:

Tabla 7.6. Potenciales de Toque y Paso de la S/E Temblador

	Potencial de Toque y Paso			
	Valor Maximo calculado mediante el simulador considerando ρ medido [V]	Valor Maximo tolerable por el cuerpo humano [V]	Valor Maximo calculado mediante el simulador considerando ρ calculado [V]	Valor Maximo tolerable por el cuerpo humano [V]
Potencial de Paso	1865,5	3653,5	875,9	3304,6
Potencial de Toque	2832	1036,4	1298,5	949,2

Donde se observa que considerando tanto el valor de resistividad medido en campo, como el calculado, el potencial de toque excede el valor tolerable por el cuerpo, lo cual genera una situación insegura dentro de la

subestación al momento de producirse una falla. Así mismo es importante resaltar que los potenciales tanto de toque como de paso se presentan básicamente en la periferia de la malla de tierra.

7.2 Análisis de los resultados obtenidos en las mediciones de continuidad

La Norma NETA MTS 2001, indica en su sección 7.13 que para la inspección y procedimientos de prueba de todo sistema de tierra, se deben realizar:

- *Inspección visual y mecánica del área*

- *Pruebas eléctricas*

Realizar punto a punto pruebas para determinar la resistencia entre el principal sistema de puesta a tierra y los equipos eléctricos.

- *Valores de prueba*

Los valores de resistencia de punto a punto no deben superar los 0.5 ohm.

Tomando como base esta norma, se presentan de manera resumida en una tabla los puntos considerados críticos en cada una de las subestaciones bajo estudio.

7.2.1 Subestación Morichal

Las mediciones de continuidad realizadas tanto en la S/E 3 como en la S/E 15, de la subestación Morichal, no arrojaron valores fuera de lo establecido por la norma.

7.2.2 Subestación Jobo Norte

Tabla 7.7. Valores críticos arrojados en medición de continuidad en la S/E Jobo Norte

Mediciones de Continuidad S/E Jobo Norte				
N°	Lugar	Equipo	Valor Obtenido [Ω]	Valor Adecuado Según Norma NETA [Ω]
1	Patio de 115Kv	Seccionador H - 204	336.7	0.5
			45.27	0.5
2	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 104	0.846	0.5
3	Patio de 115Kv	Seccionador H - 203	306.7	0.5
4	Patio de 115Kv	Seccionador H - 214	241.5	0.5
5	Patio de 115Kv	Interruptor H - 114	14.08	0.5
6	Patio de 115Kv	Interruptor H - 104	0.846	0.5
7	Patio de 115Kv	Interruptor H - 103	171.5	0.5

De 16 puntos medidos en la subestación Jobo Norte se obtuvieron siete (7) puntos considerados fuera del margen establecido por la norma. Estos deben ser revisados y de ser necesarios sustituidos por personal calificado.

7.2.3 Subestación Temblador

Tabla 7.8. Valores críticos arrojados en medición de continuidad en la S/E Temblador

Mediciones de Continuidad S/E Temblador				
N°	Lugar	Equipo	Valor Obtenido [Ω]	Valor Adecuado Según Norma NETA [Ω]
1	Patio de 34.5kV	Seccionador B - 604	No se obtuvo medida	0.5
2	Patio de 34.5kV	Interruptor B - 205	56.91	0.5
3	Patio de 115kV	Seccionador H - 104	45.31	0.5

De 26 puntos medidos en la subestación Temblador solo se obtuvieron tres (3) puntos considerados fuera del margen establecido por la norma, los cuales deben ser revisados y sustituidos por personal calificado.

CAPITULO VIII

PROPUESTAS DE MEJORAS

Una vez analizados los resultados obtenidos en la evaluación del sistema de puesta a tierra de las subestaciones eléctricas Morichal, Temblador y Jobo Norte, se pueden ofrecer las siguientes recomendaciones:

La norma IEEE establece que la malla de puesta a tierra de una subestación debe extenderse hasta una distancia de 1m después de la ubicación de la cerca perimetral. En los planos de las tres subestaciones bajo estudio (Ver Anexo A) se aprecia que no se cumple con esta condición, por lo cual se recomienda llevar a cabo dicha extensión de la malla en cada una de ellas, para cumplir con la norma y así evitar la presencia de potenciales peligrosos en la cerca perimetral de las subestaciones.

8.1 Propuesta N° 1, Hincamiento Profundo.

La manera más convencional y eficiente para mejorar este tipo de sistemas de puesta a tierra es mediante el método de hincamiento profundo. Este método es el más recomendado, consiste básicamente en insertar en el terreno barras de cobre asociadas a la malla de tierra, hasta alcanzar o aproximarse al nivel freático del terreno.

No hay duda de que la puesta a tierra a grandes profundidades, asegura mejores características eléctricas. Pero en la práctica existen ciertos factores que limitan la profundidad a la cual se puede llevar la conexión a tierra. Entre estos factores encuentran, no sólo factores económicos sino también estratos rocosos que se puedan presentar en el terreno.

A medida que se aumenta la profundidad de la puesta a tierra, las características de esta se ven menos afectadas por las variaciones

climáticas. Para grandes profundidades se deben utilizar barras prolongables, con sus respectivas extensiones.

Así pues, para la implementación de este método resulta necesario realizar pruebas de suelos, para determinar la profundidad a la cual se encuentra el nivel freático del terreno. Igualmente es recomendable establecer las características físicas del mismo.

Las barras de hincamiento profundo se dispondrán en los pozos de prueba existentes en cada una de las esquinas de la subestación, con una longitud que dependerá de la profundidad a la cual se encuentre el nivel freático del terreno y la facilidad que permita el mismo para el hincamiento.

La selección del diámetro de las barras depende casi exclusivamente de la rigidez mecánica necesaria para enterrar dicha barra sin que esta se deforme. En realidad, el diámetro influye muy poco en las características eléctricas de la puesta a tierra.

Ventaja del método

Con este método se logra disminuir no solo el valor de resistencia de la malla de puesta a tierra sino que también es posible disminuir los potenciales de toque y paso que se pueden generar en la malla en caso de que ocurriese una falla.

Desventaja del método

A largo plazo la conexión entre las barras prolongables resulta en mayor resistencia, debido a la corrosión que se genera entre cada unión de las barras.

8.2 Propuesta N° 2, Barras Químicas

Otra opción que se pudiese considerar para mejorar los sistemas de puesta a tierra, es la implementación del sistema de Barras Químicas, este provee una malla de tierra de baja resistencia. Una de estas barras equivale a más de 10 barras tipo copperweld. Este tipo de sistema se utiliza principalmente cuando se cuenta con un espacio muy reducido para la instalación del sistema de puesta a tierra o cuando el terreno disponible para tal fin resulta muy rocoso.

Para definir la ubicación y el número de barras químicas a ser instaladas, es necesario realizar pruebas al terreno, tales como: Ph, Calinidad, Electrolitos, a fin de determinar las características de mismo en cuanto a acidez, humedad, conductividad, entre otras.

Ventajas de las Barras Químicas

- Mayor conductividad, lo cual hace más efectiva la disipación de corriente.
- Puede ser instalada en interiores o exteriores y en cualquier tipo de suelo. Es útil para espacios existentes porque requiere menor espacio para su instalación.

Desventajas de las Barras Químicas

- Estos sistemas requieren de un mantenimiento periódico cada dos (2) años aproximadamente dependiendo esto del tipo de suelo. Si no se realiza este mantenimiento, a largo plazo, las barras pierden sus propiedades.

8.3 Propuesta N° 3, Disminución del Reticulado de la Malla

Disminuir la separación entre conductores paralelos de la malla de tierra. La ventaja que ofrece esta recomendación radica en que al disminuir el espaciamiento entre conductores la malla de tierra tomaría una forma muy similar a un plato de cobre y la conducción de la corriente sería mas efectiva.

8.3.1 Subestación Morichal

A continuación se muestra una simulación de la propuesta mediante la herramienta computacional ETAP:

El reticulado actual de la malla es de 4 x 4m, se propone reducirlo a 2 x 2m

Resultados obtenidos considerando la resistividad calculada.

Tabla N° 8.1 Resistencia de la malla S/E Morichal

Resistencia de la Malla de Tierra		
Valor en simulación original [Ω]	Valor obtenido en simulación de propuesta 3 [Ω]	Valor establecido por la norma IEEE [Ω]
6.52	4.63	5

Tabla N° 8.2 Potenciales de Toque y Paso S/E Morichal

	Potencial de Toque y Paso		
	Valor Maximo calculado mediante el simulador [V]	Valor Maximo obtenido implementando propuesta 3 [V]	Valor Maximo tolerable por el cuerpo humano [V]
Potencial de Paso	1943,7	1515	3491,4
Potencial de Toque	2884,3	2486,6	995,9

Se puede apreciar que con esta propuesta se logra disminuir la resistencia de la malla de tierra, al igual de los potenciales de toque y paso. La ventaja que ofrece esta recomendación radica en que al disminuir el espaciamiento entre conductores la malla de tierra tomaría una forma muy semejante a un plato de cobre y la conducción de la corriente sería más efectiva.

8.3.2 Subestación Jobo Norte

Se recomienda de manera prioritaria reemplazar todos los conductores de conexión a tierra que han sido cortados, tanto de la cerca como de los equipos, así como los conductores que mostraron valores errados en las mediciones de continuidad.

Al igual que para la subestación Morichal, para esta subestación se recomienda la implementación de las propuestas N°1, N° 2 y N°3.

A continuación se muestran los resultados arrojados en la simulación de la propuesta N°3, tomando como valor de resistividad el calculado, $\rho = 1275,32 \Omega\text{-m}$.

El reticulado actual de la malla es de 3.5 x 3.5m, se propone reducirlo a 1.75 x 1.75m

Resultados obtenidos considerando resistividad calculada $\rho = 1275,32 \Omega\text{-m}$

Tabla N° 8.3 Resistencia de la malla S/E Jobo Norte

Resistencia de la Malla de Tierra		
Valor en simulación original [Ω]	Valor obtenido en simulación de propuesta 3 [Ω]	Valor establecido por la norma IEEE [Ω]
8,36	8,28	5

Tabla N° 8.4 Potenciales de Toque y Paso S/E Jobo Norte

	Potencial de Toque y Paso		
	Valor Maximo calculado mediante el simulador [V]	Valor Maximo obtenido implementando propuesta 3 [V]	Valor Maximo tolerable por el cuerpo humano [V]
Potencial de Paso	2304,8	2168,1	3450
Potencial de Toque	3558,2	3423,5	985,7

Se puede apreciar que con esta propuesta se logra disminuir la resistencia de la malla de tierra, al igual de los potenciales de toque y paso.

8.3.3 Subestación Temblador

El sistema de puesta a tierra de la subestación Temblador presenta condiciones satisfactorias en cuanto a resistencia de la malla de tierra.

Sin embargo resulta necesario revisar los conductores de conexión a tierra de los equipos que arrojaron valores errados en las mediciones de continuidad.

En cuanto a los potenciales de la malla, las simulaciones indican que el potencial de toque excede el límite tolerable por el cuerpo, por lo cual es posible implementar las propuestas N° 1, N° 2 y N° 3.

A continuación se muestran los resultados arrojados en la simulación de la propuesta N° 2:

El reticulado actual de la malla es de 3.5 x 3.5m, se propone reducirlo a 1.75 x 1.75m

Resultados Obtenidos considerando resistividad calculada $\rho = 862,87 \Omega\text{-m}$

Tabla N° 8.5 Resistencia de la malla S/E Temblador

Resistencia de la Malla de Tierra		
Valor en simulación original [Ω]	Valor obtenido en simulacion de propuesta 3 [Ω]	Valor establecido por la norma IEEE [Ω]
4,21	4,19	5

Tabla N° 8.6 Potenciales de Toque y Paso S/E Temblador

	Potencial de Toque y Paso		
	Valor Maximo calculado mediante el simulador [V]	Valor Maximo obtenido implementando propuesta 3 [V]	Valor Maximo tolerable por el cuerpo humano [V]
Potencial de Paso	875,9	850,1	3304,6
Potencial de Toque	1298,5	1379,6	949,2

Se puede apreciar que con esta propuesta se logra disminuir la resistencia de la malla de tierra, al igual de los potenciales de toque y paso.

Finalmente se recomienda de manera general para todas las subestaciones, llevar a cabo evaluaciones al sistema de puesta a tierra de cada una de las subestaciones cada dos (2) años.

CONCLUSIONES

Después de llevar a cabo la evaluación al sistema de puesta a tierra de las subestaciones eléctricas Morichal, Temblador y Jobo Norte de 115/34.5 kV y realizada la interpretación de los datos obtenidos, es posible establecer las siguientes conclusiones:

1) El perfil de resistividad de los terrenos aledaños a la S/E Morichal, muestra un comportamiento heterogéneo con tendencia descendente, al igual que los terrenos adyacentes a la S/E Temblador. Mientras que para la subestación Jobo Norte, el perfil de resistividad de los terrenos aledaños a la subestación muestra un comportamiento heterogéneo con tendencia ascendente.

2) La resistencia de la malla de tierra de las subestaciones Morichal y Jobo Norte excede el valor máximo de cinco (5) ohm establecido por la norma IEEE Std. 80-2000. Mientras que la malla de tierra para la S/E Temblador mostró un valor satisfactorio.

3) Se ratificó la eficiencia del Método Wenner de los Cuatro Electrodo para la medición de resistividad del suelo, así como del Método de Caída de Potencia para la medición de resistencia de la malla de tierra.

4) Los valores obtenidos en las mediciones de continuidad realizadas en la subestación Temblador mostraron que la conexión a tierra del interruptor B-205 y los seccionadores B-604, B-104, H-124 y H-104 superan los 0,5ohm establecidos por la norma Neta, en cuanto a la S/E Jobo Norte se detectó que la conexión a tierra de los seccionadores B-104, H-203, H-214, H-122 y los interruptores H-114, H-104 y H-103 se encuentran fuera de la norma.

6) La mayoría de los conductores de conexión a tierra de equipos y estructuras de la subestación Jobo Norte han sido hurtados, específicamente en el patio de 115kV.

4) Las simulaciones dieron como resultado que tanto en la S/E Morichal como en la S/E Jobo Norte se exceden los potenciales de Toque y Paso. Mientras que en la S/E Temblador el potencial de Toque excede los valores tolerables por el cuerpo humano.

5) Fue necesario calcular la resistividad aparente del área de las S/E debido a que los valores de resistividad de los terrenos aledaños a las subestaciones no se relacionan con la resistividad que existe en los terrenos bajo los cuales están dispuestas las mallas de tierra.

(6) Las simulaciones realizadas considerando el valor de resistividad calculado, arrojaron valores de resistencia de malla de tierra más cercanos a los obtenidos en las mediciones.

6) Se ratificó la eficiencia de los simuladores CYMGrd y ETAP para el diseño y análisis de sistemas de puesta a tierra.

7) La norma IEEE establece que la malla de puesta a tierra de una subestación debe extenderse un (1) metro después de la cerca perimetral. En los planos de las tres (3) subestaciones bajo estudio se aprecia que no se cumple con esta condición.

BIBLIOGRAFÍA

- Agulleiro I. *“Técnicas Modernas para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra en Zonas Urbanas”*.
- Barahona, C. Cideos, R. Morroquin, C. (2003) *“Manual para Aterrizaje en Subestaciones y Sistemas Eléctricos”*. Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Albert Einstein, El Salvador.
- Ojeda, N. (2008). *“Sistema de Puesta a Tierra (Instalaciones Industriales y Edificios)”*. Puerto. La Cruz, Venezuela.
- Suarez, L. (2007) *“Sistemas de Puesta a Tierra y Protección Contra Descargas Atmosféricas de Cervecería Polar C.A”* Coordinación de Ingeniería Eléctrica, Universidad Simón Bolívar.
- Thielen, L (2007). *Curso de Sistema de Protección Atmosférica y Puesta a Tierra*. Barquisimeto, Venezuela.
- Velásquez, R. (2005) *“Curso Sistemas de Puesta a Tierra”*. Esp Oil International Training Group.
- IEEE Std 80 IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding
- www.LEM.com

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO B

EQUIPO DE MEDICIÓN ISA T-3000

Características principales de la fuente de alimentación:

Voltaje 230AC 50*60Hz

Consumo de potencia 1kW máximo.



Equipo de medición ISA T-3000



Electrodos de hincamiento y cables del equipo.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

ISA T-3000



Istrumentazioni Sistemi Automatici S.r.l.

VIA PRATI BASSI 22 - 21020 TAINO (VA) - ITALY
 OFFICES TEL. +39.0331.956081 - FAX +39.0331.957091
 LAB: TEL. +39.0331.956483 -
 E-MAIL isa@isatest.com
 WEB www.isatest.com

CALIBRATION CERTIFICATE AND TEST RESULTS		DOC. KIE 10102		Page 1/4	
		REV. 1			
TEST SET T3000 Test specification: CII10102		SERIAL NO. 2009/16525-1		CUSTOMER PROGUSA LLC	
TEST DESCRIPTION	TEST MODE	SPEC.	TEST RESULT	UNITS	
1) GENERAL					
- POWER ON-OFF	48 HOURS	OK	OK	-	
- THERMAL CYCLES	24 HOURS	OK	OK	-	
- BURN-IN	24 HOURS	OK	OK	-	
- INSULATION TEST	1400 Vac; 1 MIN.	OK	OK	-	
- H.V. OUT INSULATION TEST	4600 Vac; 1 MIN.	OK	OK	-	
- DIELECTRIC RESISTANCE	500 VDC	> 2 MOhm	2	MOhm	
- PROTECTIVE EARTH	200mA DC	< 0,1 Ohm	0,1	Ohm	
- VISUAL INSPECTION	N.A.	OK	OK	-	
- MANUAL AND DOCUMENTS	N.A.	OK	OK	-	
2) FUNCTIONAL TEST					
2.1) HIGH I A.C.					
- MEASUREMENT ACCURACY	200 A	± 2 A	+0,4	A	
-VOLTAGE, OPEN CIRCUIT	OPEN CIRCUIT	> 6 V	6,2	V	
-VOLTAGE, O.C., RED. POWER	230 V	> 1.2 V	1,42	V	
	115 V	> 2.6 V	-	-	
- OUTPUT POWER	60 mOhm; 100 A	> 5.5 V	5,5	V	
- OUTPUT WAVEFORM	60 mOhm; 100 A	OK	OK	-	
- ZERO CROSSING	60 mOhm; 100 A	OK	OK	-	
- OVERLOAD MESSAGE	400 A; 15 s	OK	OK	-	
2.2) OTHER I A.C.					
			10 A	40 A	
- MEASUREMENT ACCURACY	5 A FOR 10 A 10 A FOR 40 A	± 45 mA ± 130 mA	+1	-50	mA
-VOLTAGE, OPEN CIRCUIT	OPEN CIRCUIT	> 80; > 24 V	92	26,1	V
-VOLTAGE, O.C., RED. POWER	SUPPLY 230 V	> 16; > 5 V	20,4	5,7	V
	SUPPLY 115 V	> 34; > 10 V	-	-	-
2.3) HIGH V A.C.					
- SAFE OPERATION	Knob=0; key; buttons; LED's	OK	OK	-	
- MEASUREMENT ACCURACY	3000 V	± 21 V	-2	V	
- OUTPUT POWER	16.5 kOhm, 3000 V	> 0.15 A	0,17	A	
- OVERLOAD MESSAGE	1 kOhm, 600 V	> 0.6 A	0,76	A	

FINAL TEST CERTIFICATION		DOC. KIE 10102 REV. 1		Page 2/4	
TEST SET T3000 Test specification: CII10102	SERIAL NO.		2009/16525-1		
	CUSTOMER		PROGUSA LLC		
TEST DESCRIPTION	TEST MODE	SPEC.	TEST RESULT	UNITS	
2.4) LOW V A.C.					
- MEASUREMENT ACCURACY	200 V	± 1.6 V	-0,3	V	
- OUTPUT POWER	470 Ohm, 250 Vca	> 130 VA	133,7	VA	
- OVERLOAD MESSAGE	10 Ohm	> 1.5 A	1,5	A	
- OUT AT REDUCED POWER	230 V	> 54 V	69,5	V	
	115 V	> 108 V	-		
2.5) D.C. CURRENT					
- MEASUREMENT ACCURACY	2 A	± 30 mA	-3	mA	
- OUTPUT POWER	2 Ohm; 2 A	> 8 W	8	W	
- CURRENT IMPULSE PEAK	0.1 Ohm	> 10 A	10	A	
- CURRENT IMPULSE DISPLAY	POLARITY BY PULSES	OK	OK	-	

FINAL TEST CERTIFICATION

DOC. KIE 10102
REV. 1

Page 3/4

TEST DESCRIPTION	TEST MODE	SPEC.	TEST RESULT				UNITS	
TEST SET T3000		SERIAL NO. 2009/16525-1						
Test specification: CII10102		CUSTOMER PROGUSA LLC						
2.6) AUXILIARY A.C.VOLTAGE	- MEASUREMENT ACCURACY	65 V 130 V 260 V	± 0.7V ± 1 V ± 1.9 V	65 V	130 V	260 V	V	
	- OUTPUT POWER	65 V; 141 Ohm	> 30 VA	35,6			VA	
	- LOAD-NO LOAD VARIATION	65 V; 141 Ohm	< 3,2 V	2,3			V	
	- OVERLOAD MESSAGE	65 V	> 40 VA	48,4			VA	
	- PRE-FAULT ADJUSTMENT	65 V	OK	OK			-	
	- PHASE ANGLE BETWEEN I _{main} AND V _{aux}	57 V; 5 A	1° ± 1 DIGIT	0°	90°	180°	270°	°
	- PHASE ANGLE BETWEEN V _{main} AND V _{aux}	57 V; 57 V	1° ± 1 DIGIT	-1	0	+1	-1	°
	- OUTPUT FREQUENCY	57 V	40-500 Hz	40-500			Hz	
	2.7) AUXILIARY D.C.VOLTAGE	- MEASUREMENT ACCURACY	130 V 240 V	± 0.85V ± 1.8 V	130	240		V
		- OUTPUT POWER	116 V; 150 Ohm	> 90 W	90			W
		- LOAD-NO LOAD VARIATION	116 V; 150 Ohm	< 1,3 V	0,8			V
		- RIPPLE UNDER LOAD	116 V; 150 Ohm	< 1,3 V _{rms}	0,207			V
		- CURRENT LIMIT	10 Ohm	20 V max	OK			-
		2.8) TIMER	- START: INT-EXT.	-	OK	OK		
	- START EXT.: NO-NC-EDGE		-	OK	OK			-
- START EXT.: CLEAN-VOLT.	-		OK	OK			-	
- START EXT, V: THRESHOLDS	D.C. VOLTAGE		12-50 V	10-47			V	
- STOP: INT-EXT.	-		OK	OK			-	
- STOP EXT.: NO-NC-EDGE	-		OK	OK			-	
- STOP EXT.: CLEAN-VOLT.	-		OK	OK			-	
- STOP EXT, V: THRESHOLDS	ADJUSTED VCC		12-50 V	10-47			V	
- TIMING ACCURACY	50 VCC; 1 s		1 ms	1			ms	

FINAL TEST CERTIFICATION		DOC. KIE 10102 REV. 1		Page 4/4	
TEST SET T3000 Test specification: CII10102	SERIAL NO.		2009/16525-1		
	CUSTOMER		PROGUSA LLC		
TEST DESCRIPTION	TEST MODE	SPEC.	TEST RESULT	UNITS	
2.9) EXTERNAL MEASUREMENTS					
- I EXTERNAL ACCURACY; RANGE 20 mA	20 mA dc	± 0.3 mA	+0,04	mA	
- I EXTERNAL ACCURACY; RANGE 10 A	5 A ac	± 65 mA	-13	mA	
- I EXTERNAL; ANGLE Vaux- IE	57 V; 5 A	1°	1	°	
-600 V EXTERNAL: ACCURACY	100 Vac	± 0.9 V	+0,17	V	
- 600 V EXTERNAL; ANGLE Vaux -VE	57 V; 57 V	1°	1	°	
- 10 V EXTERNAL: ACCURACY	10 Vac	± 100 mV	-51	mV	
- 10 V EXTERNAL; ANGLE Vaux -VE	10 V; 57 V	1°	1	°	
2.10) FUNCTIONAL TESTS					
- CT RATIO	100 A // 1 A	100 \pm 2	99,87	-	
- CT RATIO; ANGLE IMAIN -IE	100 A; 100//1	1°	1	°	
- VT RATIO	3000 V // 30 V	100 \pm 2	100,8	-	
- TV RATIO; ANGLE VMAIN -VE	300 V; 3000//30	1°	1	°	
- CT SATURATION CURVE	90 V	53 \pm 5	56,58	V	
2.11) OTHER PERFORMANCES					
- EMERGENCY BUTTON	NO LOAD	OK	OK	-	
- AUXILIARY CONTACT	NO LOAD	OK	OK	-	
- RESISTORS SET	OHMMETER	OK	OK	-	
- CONNECTION TO PC	X.PRO-3000	OK	OK	-	
- SAVE RESULTS	CT, VT	OK	OK	-	
- DISPLAY RESULTS	-	OK	OK	-	
- DELETE RESULTS	-	OK	OK	-	

THIS CALIBRATION CERTIFICATE ENSURES THAT THE TEST SET PERFORMANCES ARE AS DESCRIBED IN THE CATALOGUE.
THIS CERTIFICATE IS VALID FOR 1 YEAR FROM THE DATE OF ISSUE.

Operator: 

Approval: L. BIOTTI


I. S. A. s.r.l.
Istrumentazione Elettronica Automatica
Quality Manager
(Ing. Luca Biotti)

Date 24.07.2009

ANEXO C

Registro Fotográfico

- Subestación Morichal:



Subestación Morichal



Mediciones de continuidad en los conductores de conexión a tierra.

- Subestación Jobo Norte:

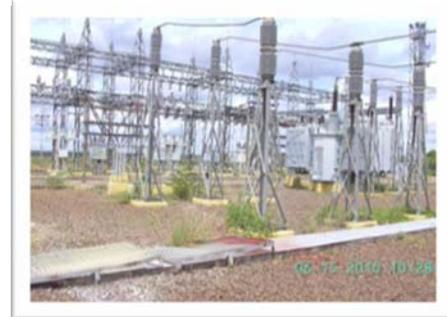


Algunos de los conductores cortados en cerca perimetral y estructuras.



Pozo de prueba y medición de continuidad en conductor de conexión a tierra

- Subestación Temblador:



Patios de 34,5 y 115kV respectivamente.



Algunos conductores desprendidos de cerca perimetral



Pozo de prueba y medición de continuidad en conductor de conexión a tierra

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

TÍTULO	“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS MORICHAL, TEMBLADOR Y JOBO NORTE 115/34,5kV DE PDVSA-DISTRITO MORICHAL, ESTADO MONAGAS”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E MAIL
Betancourt Aguiar María José	CVLAC: 18.826.004 E MAIL: betancourtamaria@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

evaluacion
 corriente
 potencial
 continuidad
 resistividad
 resistencia

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Eléctrica

RESUMEN (ABSTRACT):

Este estudio abarca una breve descripción de las subestaciones Eléctricas Morichal, Temblador y Jobo Norte. Para la evaluación del Sistema de Puesta a Tierra de dichas subestaciones fue necesario realizar mediciones en campo, tales como resistividad de suelo y resistencia de la malla de tierra, esto con la finalidad de determinar si el valor de resistencia de la malla de tierra cumple o no con lo establecido en la norma IEEE Std. 80-2000. Así mismo se llevaron a cabo mediciones de continuidad eléctrica entre los principales equipos y estructuras de las subestaciones y su conexión a la malla de tierra, a propósito de verificar que dichos equipos se encuentren correctamente colocados a la malla de tierra y que el valor de resistencia que ofrecen las uniones entre ellos no excedan el valor establecido por la norma. Por otra parte se realizaron simulaciones del sistema de puesta a tierra de dichas subestaciones mediante la herramienta computacional ETAP.

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

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Ing. Hernán Parra	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	X			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Ing. Luís Pérez	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	X			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Ing. Adriana Méndez	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	X			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Ing. Verena Mercado	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	X			
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	07	22
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

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

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Puesta a Tierra.doc	Aplicación/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: Dpto. de Protecciones Eléctricas (Monagas) (OPCIONAL)

TEMPORAL: Seis Meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Electricista

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Electricidad

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui

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

De acuerdo con el Artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente:

Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad Oriente y solo podrán ser utilizadas para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario

Betancourt Aguiar María José
AUTOR

Ing. Hernán Parra
TUTOR

Ing. Adriana Méndez
JURADO

Ing. Verena Mercado
JURADO

Ing. Verena Mercado
POR LA SUBCOMISION DE TESIS