

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Desarrollo de un simulador para el diseño de redes de tierra de subestaciones de potencia basado en el estándar IEEE 80-2000.

PRESENTADO POR:

JAIME JAVIER ARRIOLA SUÁREZ

JORGE LUIS RODRÍGUEZ DURÁN

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR :

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

Desarrollo de un simulador para el diseño de redes de tierra de subestaciones de potencia basado en el estándar IEEE 80-2000.

Presentado por :

JAIME JAVIER ARRIOLA SUÁREZ

JORGE LUIS RODRÍGUEZ DURÁN

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTÉZ

San Salvador, Mayo 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

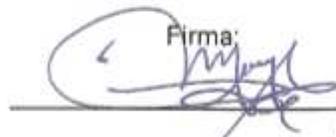
Docente Asesor :

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ CORTÉZ

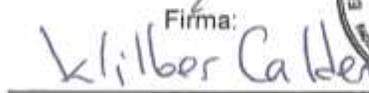
ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, miércoles 25 de mayo de 2016, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:30 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director

Firma: 

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario

Firma: 

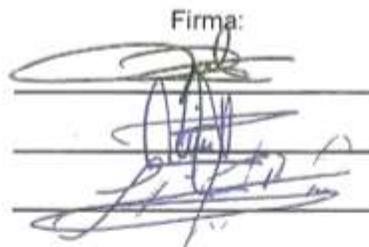


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

1- Ing. Numa Pompilio Jiménez Cortéz

2- MSc. Jorge Alberto Zetino Chicas

3- MSc. Luis Roberto Chevez Paz

Firma: 

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

Desarrollo de un simulador para el diseño de redes de tierra de subestaciones de potencia basado en el estándar IEEE 80-2000.

A cargo de los Bachilleres:

- Arriola Suárez Jaime Javier

- Rodríguez Durán Jorge Luis

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

8.1

(ocho punto uno .)

AGRADECIMIENTOS

Por Jaime Javier Arriola Suárez:

A Dios: mi buen Padre que en todo momento de la vida me ha guiado con paciencia y amor para lograr metas que van más allá de todo cuanto yo pueda soñar. Estoy seguro que cada noche de desvelo en el camino hasta éste punto de mi vida Él estuvo diciéndome a oído: “Tú puedes lograrlo”. Cuando saqué una mala nota o dejé una materia me dijo: “No te desanimes, sigue adelante” y ahora yo sé que me dice: “Estoy orgulloso de tí”.

A mi mamá: Rosa Gladys Suárez, quien ha sido un maravilloso ejemplo de esfuerzo quien a través de la vida que Dios le prestado me ha provisto los medios necesarios para llegar a éste punto de mi vida y a mi papá que de alguna manera ha colaborado también en la consecución de ésta meta.

A mi compañero: Jorge Rodríguez, quien ha tenido la bondad, paciencia y confianza de trabajar conmigo en muchas asignaturas a lo largo de nuestra formación como Ingenieros y ahora en el presente trabajo de graduación, tiempo durante el cual me ha demostrado ser un excelente amigo, quien se ha esforzado de forma aplaudible y admirable en la realización de éste trabajo de graduación. Estoy plenamente convencido que me faltan palabras para agradecerle y le deseo éxitos y la realización total de sus sueños y objetivos en sus futura vida como Ingeniero Electricista.

A mis amigos: René Antonio Iraheta y William Sánchez Amaya por ser personas maravillosas conmigo, les agradezco completamente su amistad la cual considero un regalo de Dios y así mismo les deseo lo mejor en su vida.

Finalmente a aquellos que en su momento fueron mis compañeros en alguna asignatura, estoy plenamente convencido que éste no es un logro “mío” sino de muchos otros que en su momento tuvieron la bondad de ayudarme.

Al final de ésta carrera creo que Dios tiene mucho más éxitos para mí en el futuro y cito La Palabra de Dios respecto a ello: *“Yo sé muy bien que todavía no he alcanzado la meta; pero he decidido no fijarme en lo que ya he recorrido, sino que ahora me concentro en lo que me falta por recorrer. Así que sigo adelante, hacia la meta, para llevarme el premio que Dios nos llama a recibir por medio de Jesucristo.”* (Filipenses 3:13-14)

AGRADECIMIENTOS

Por Jorge Luis Rodríguez Durán:

A Dios: por aparecer en silencio en los momentos críticos cuando no encontraba una salida, y por demostrarme que las situaciones que no están bajo mi control tienen una razón de ser. Agradezco sus bendiciones y misericordia. Dios es bueno.

A mi mamá: Ana Lucía Durán de Rodríguez, que en todo momento ha estado conmigo con su precioso amor, su atención, sus consejos, su apoyo y su inigualable lucha. No tengo palabras para expresarte todo lo que significas para mí. Te amo, mamá.

A mi papá: Jorge Alberto Rodríguez Arévalo, por ser ese padre ejemplar y amoroso, por alegrar mis días ese buen humor que siempre te ha caracterizado. Eres el tipo de padre que un día espero ser. Te amo, papá.

A mi hermana: Jennifer Saraí Rodríguez Durán, por estar conmigo en los momentos más difíciles sin recibir nada a cambio. Por los momentos chistosos, por los malos y por todos esos que vienen en nuestra aventura en la capital. Te amo, hermanita.

A mi hermana: Ingrid Oneyda Medrano Hernández, más que una amiga te considero una hermana, gracias por estar en cada momento difícil y por ser así de divertida. Te has ganado un lugar muy especial en mi vida. Te quiero.

A mis amigos de toda la vida: Rocio Loewner, Jeremías Sorto, Kelvin Acosta, Elmer Funes, David Guevara, Wilber Marquez, Kevin López y Salvador Cubias, por los buenos vaciles, las carcajadas y todo el apoyo. Los quiero hermanos.

A Grecia Cruz: por aparecer en el momento más crítico de mi carrera para apoyarme y darme su cariño. Te quiero.

A mi guitarra: por alejarme de la realidad y ser mi más preciada inspiración.

A mis compañeros de la EIE: gracias a todos los que de alguna forma me ayudaron, platicamos y compartimos algún momento.

GRACIAS TOTALES.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPITULO I: MARCO TEÓRICO | 2 |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DEL TEMA | 3 |
| 1.2. OBJETIVOS | 3 |
| 1.2.1. OBJETIVOS GENERALES | 3 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS | 3 |
| 1.3. ALCANCES | 4 |
| 1.4. ANTECEDENTES | 4 |
| 1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 4 |
| 1.6. JUSTIFICACION | 5 |
| 1.7. DEFINICIONES | 5 |
| 1.7.1. PARÁMETROS DE DISEÑO | 8 |
| 1.8. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA | 9 |
| 1.8.1. ¿QUÉ ES UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA? | 9 |
| 1.8.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MODELO DEL TERRENO | 10 |
| 1.8.3. DATOS DE CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO DE LA SUBESTACIÓN | 11 |
| 1.8.4. MÉTODO DE CÁLCULO O CRITERIO DE DISEÑO | 12 |
| 1.8.5. ASPECTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE UNA CUADRÍCULA | 18 |
| 1.8.6. CUMPLIMIENTO DE ASPECTOS LEGALES Y DE SEGURIDAD | 18 |
| 1.9. PELIGRO EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA | 22 |
| 1.9.1. RANGOS DE LA CORRIENTE TOLERABLE | 22 |
| 1.9.1.1. EFECTO DE LA FRECUENCIA DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA | 22 |
| 1.9.1.2. EFECTO DE LA MAGNITUD DE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA | 23 |
| 1.9.1.3. EFECTO DE LA DURACIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA | 23 |
| 1.9.1.4. PRIMEROS AUXILIOS ANTE UN CHOQUE ELÉCTRICO. | 24 |
| 1.9.2. CORRIENTE LÍMITE TOLERABLE POR EL CUERPO | 24 |
| 1.10. PROGRAMAS COMERCIALES | 26 |
| 1.10.1. SKM GROUND MAT | 26 |
| 1.10.2. AUTO GROUND DESIGN Y AUTOGRID | 28 |
| 1.10.3. CYMGRD | 29 |
| 1.10.4. ETAP: GROUND GRID SYSTEMS | 31 |
| CAPITULO II: ESTUDIO DEL TERRENO | 33 |
| 2.1. DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO | 34 |
| 2.2. TIPOS DE SUELO | 34 |
| 2.2.1. SUELOS HOMOGÉNEOS Y HETEROGÉNEOS | 34 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.3. | MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD | 35 |
| 2.3.1. | MÉTODO DE INSPECCIÓN O CLASIFICACIÓN DEL SUELO..... | 35 |
| 2.3.2. | MÉTODO DE WENNER..... | 36 |
| 2.3.2.1. | VENTAJAS DEL MÉTODO DE WENNER..... | 37 |
| 2.3.2.2. | EJEMPLO PRÁCTICO DEL MÉTODO DE WENNER..... | 37 |
| 2.3.3. | MÉTODO DE SCHLUMBUGER-PALMER. | 37 |
| 2.4. | ESTÁNDAR IEEE 81-2012 | 37 |
| 2.5. | MODELO UNIFORME DEL SUELO | 38 |
| 2.5.1. | EJEMPLO PRÁCTICO | 38 |
| 2.6. | MODELO DE DOS CAPAS DEL SUELO | 38 |
| 2.6.1. | MÉTODO GRÁFICO DE SUNDE | 38 |
| 2.6.1.1. | EJEMPLO PRÁCTICO..... | 40 |
| 2.7. | GEOMETRÍA DE LA RED DE TIERRA | 42 |
| 2.8. | EFFECTO DE LA HUMEDAD, LA TEMPERATURA Y EL CONTENIDO QUÍMICO DEL SUELO EN LA RESISTIVIDAD | 43 |
| 2.9. | TRATAMIENTO DEL SUELO PARA OBTENER UNA RESISTIVIDAD MAS BAJA | 44 |
| CAPITULO III: CRITERIOS DE DISEÑO Y SEGURIDAD UTILIZANDO IEEE 80-2013 | | 45 |
| 3.1. | DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO | 46 |
| 3.2. | CRITERIO DE VOLTAJES TOLERABLES..... | 46 |
| 3.2.1. | VOLTAJE DE PASO TOLERABLE | 47 |
| 3.2.2. | VOLTAJE DE TOQUE TOLERABLE..... | 47 |
| 3.2.3. | RESISTENCIA PROMEDIO DEL CUERPO HUMANO..... | 48 |
| 3.3. | CALCULO DE VOLTAJES DE PASO Y MALLA REALES | 49 |
| 3.4. | RESISTIVIDAD Y ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL | 49 |
| 3.4.1. | MATERIALES TÍPICOS PARA LA CAPA SUPERFICIAL | 50 |
| 3.4.2. | EFFECTO DE REDUCCION DE CORRIENTE A TRAVES DEL CUERPO POR LA CAPA SUPERFICIAL..... | 50 |
| 3.5. | ELEVACION DEL POTENCIAL DE PUESTA A TIERRA (GPR) | 51 |
| 3.6. | CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA | 52 |
| 3.6.1. | CÁLCULO SIMPLIFICADO (SVERAK)..... | 52 |
| 3.6.2. | ECUACIONES DE SCHWARZ PARA SUELO HOMOGÉNEO | 53 |
| 3.6.3. | ECUACIONES DE SCHWARZ PARA SUELO DE DOS CAPAS | 54 |
| 3.7. | PARAMETRO CRÍTICOS | 54 |
| 3.7.1. | CORRIENTE DE FALLA SIMÉTRICA | 54 |
| 3.7.2. | FACTOR DE DECREMENTO (D_f)..... | 55 |
| 3.7.3. | CÁLCULO DEL FACTOR DE DIVISIÓN DE CORRIENTE (S_f) | 56 |
| 3.7.3.1. | MÉTODO GRÁFICO PARA EL CÁLCULO DE S_f | 56 |
| 3.7.3.2. | EJEMPLO DEL MÉTODO GRÁFICO PARA EL CÁLCULO DE S_f | 57 |
| 3.7.4. | CORRIENTE MÁXIMA DE CUADRÍCULA MALLA (I_G) | 58 |

| | | |
|--|--|------------|
| 3.7.5. | DURACIÓN DE LA FALLA (tf) Y DURACIÓN DEL CHOQUE (ts) | 58 |
| 3.7.6. | GEOMETRIA Y DISEÑO DE LA CUADRÍCULA..... | 58 |
| 3.7.6.1. | SELECCIÓN DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR..... | 59 |
| 3.8. | REFINAMIENTO DEL DISEÑO PRELIMINAR..... | 59 |
| CAPITULO IV: EJEMPLOS PRÁCTICOS UTILIZANDO EL ESTÁNDAR IEEE 80-2013 | | 61 |
| 4.1. | DESCRIPCION DEL CAPITULO | 62 |
| 4.2. | DISEÑO DE RED DE TIERRA (SUBESTACIÓN 1)..... | 62 |
| 4.2.1. | DISEÑO NO. 1: CUADRÍCULA CUADRADA SIN VARILLAS | 63 |
| 4.2.2. | DISEÑO NO. 2: CUADRÍCULA CUADRADA CON VARILLAS | 68 |
| 4.2.3. | DISEÑO NO. 3: CUADRÍCULA RECTANGULAR CON VARILLAS | 71 |
| 4.2.4. | DISEÑO NO. 4: CUADRÍCULA EN FORMA DE “L” | 75 |
| 4.3. | DISEÑO DE RED DE TIERRA (SUBESTACIÓN 2)..... | 79 |
| 4.4. | SIMULACIÓN EN R-PAT..... | 82 |
| 4.4.1. | SIMULACIÓN DE DISEÑO 4: CUADRÍCULA EN FORMA DE “L” | 82 |
| 4.4.2. | RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON R-PAT | 84 |
| 4.5. | COMPARACIÓN DE RESULTADOS | 86 |
| CAPITULO V: ESPECIFICACIÓN DEL PROGRAMA (R-PAT)..... | | 89 |
| 5.1. | DESCRIPCION DEL CAPÍTULO | 90 |
| 5.2. | DESARROLLO DEL SOFTWARE | 90 |
| 5.3. | ¿POR QUE JAVA?..... | 90 |
| 5.4. | CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE | 91 |
| 5.5. | DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ..... | 92 |
| 5.6. | PROGRAMACIÓN EN JAVA..... | 96 |
| 5.7. | REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SISTEMA OPERATIVO | 98 |
| CONCLUSIONES | | 99 |
| RECOMENDACIONES | | 100 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 101 |
| ANEXO | | 102 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIG. 1: RELACIÓN ENTRE LOS VALORES ACTUALES DE LA CORRIENTE DE FALLA Y LOS VALORES DE IF, If y Df PARA UNA DURACIÓN tf | 6 |
| FIG. 2: A) SUELO HOMOGÉNEO, RESISTIVIDAD UNIFORME. B) MODELO DE SUELO DE DOS CAPAS. C) MODELO DEL SUELO MULTICAPAS O N CAPAS. | 11 |
| FIG. 3: FLUJOGRAMA DEL MÉTODO DE LOS 12 PASOS DEL ESTÁNDAR IEEE 80-2013. | 13 |
| FIG. 4: COMPARACIÓN ENTRE LAS ECUACIONES Y LA GRÁFICA Z DESARROLLADA POR BIEGELMEIER. | 26 |
| FIG. 5: MÉTODO DE WENNER. | 36 |
| FIG. 6: GRÁFICO DE SUNDE. | 39 |
| FIG. 7: GRÁFICA DE SUNDE CON INTERPOLACIÓN PARA LA CURVA $\rho_2/\rho_1=3$ | 41 |
| FIG. 8: CURVAS DE LOS EFECTOS DE LA TEMPERATURA, LA HUMEDAD Y LA SAL. | 43 |
| FIG. 9: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS VOLTAJES DE PASO Y TOQUE EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA. | 46 |
| FIG. 10: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DETALLADA DEL VOLTAJE DE PASO. | 47 |
| FIG. 11: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DETALLADA DEL VOLTAJE DE TOQUE | 48 |
| FIG. 12: CURVA PARA EL CÁLCULO DE Sf: 100% DE CONTRIBUCIÓN, EN BUEN ESTADO..... | 57 |
| FIG. 13: CUADRICULA CUADRADA SIN VARILLAS | 65 |
| FIG. 14: CUADRÍCULA CUADRADA CON 20 VARILLAS DE 7.5M..... | 68 |
| FIG. 15: CUADRÍCULA RECTANGULAR CON 38 VARILLAS DE 10M. | 72 |
| FIG. 16: CUADRÍCULA EN FORMA DE “L” CON 24 VARILLAS DE 7.5M..... | 75 |
| FIG. 17: DATOS DE ENTRADA DE RESISTIVIDAD DEL SUELO Y DE LA SUBESTACIÓN | 82 |
| FIG. 18: INGRESO DE DATOS DE VARILLA Y DATOS DE CUADRÍCULA | 82 |
| FIG. 19: SELECCIÓN DE GEOMETRÍA DEL TERRENO. | 83 |
| FIG. 20: INGRESO DE DATOS DE LA CAPA SUPERFICIAL..... | 83 |
| FIG. 21: INGRESO DE FACTOR DE LA CORRIENTE MÁXIMA DE CUADRÍCULA..... | 83 |
| FIG. 22: VENTANA DONDE SE INGRESAN LAS MEDIDAS DEL PERÍMETRO DE LA FORMA L..... | 84 |
| FIG. 23: ÁREA DE RESULTADOS | 85 |
| FIG. 24: PESTAÑA DE ASPECTOS LEGALES Y DE SEGURIDAD. | 86 |
| FIG. 25: INTERFAZ PRINCIPAL DEL PROGRAMA. | 93 |
| FIG. 26: MENÚ ARCHIVO. | 94 |
| FIG. 27: ENTORNO DE APRENDIZAJE | 95 |
| FIG. 28: MENÚ AYUDA | 96 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1: ÍNDICE DE PARÁMETROS DE DISEÑO..... | 9 |
| TABLA 2: REQUERIMIENTOS ESTABLECIDOS POR SIGET PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. | 21 |
| TABLA 3: VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS DE RESISTENCIA DE RED DE TIERRA (RG) DE UNA SUBESTACIÓN EN FUNCIÓN DE SU CAPACIDAD..... | 22 |
| TABLA 4: EFECTOS FISIOLÓGICOS SEGÚN LA CORRIENTE QUE ATRAVIESA EL CUERPO..... | 23 |
| TABLA 5: RESISTIVIDADES TÍPICAS DE LOS SUELOS. | 35 |
| TABLA 6: TABLA SIMPLIFICA DEL ESTÁNDAR IEEE 80-2013..... | 35 |
| TABLA 7: PUNTOS DE RESISTIVIDAD APARENTE OBTENIDOS EN PREDIO BALDÍO UES..... | 37 |
| TABLA 8: MEDICIONES DE RESISTIVIDAD APARENTE CON EL MÉTODO DE WENNER..... | 40 |
| TABLA 9: UNA TABLA DE MATERIALES TÍPICOS PARA LA CAPA SUPERFICIAL | 50 |
| TABLA 10: COMPARACIÓN ENTRE ECUACIONES DE VOLTAJE TOLERABLES CON Y SIN CAPA SUPERFICIAL. | 51 |
| TABLA 11: COMPORTAMIENTO DE CS RESULTADO DE LA COMPARACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL Y EL TERRENO. | 51 |
| TABLA 12: VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS DE RESISTENCIA DE RED DE TIERRA (RG) DE UNA SUBESTACIÓN EN FUNCIÓN DE SU CAPACIDAD..... | 52 |
| TABLA 13: MATERIALES DE CONDUCTORES | 59 |
| TABLA 14: DATOS PARA EL DISEÑO DE LA SUBESTACIÓN 1..... | 63 |
| TABLA 15: DATOS DE LA SUBESTACIÓN 2 PARA EL DISEÑO DE LA RED DE TIERRA. | 80 |
| TABLA 16: RESULTADOS DE LOS DISEÑOS PROPUESTOS DE UNA FORMA MANUAL Y POR MEDIO DEL PROGRAMA. | 87 |
| TABLA 17: VERIFICACIÓN DE ASPECTOS LEGALES Y DE SEGURIDAD. | 88 |
| TABLA 18: COMPONENTES UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO DE R-PAT EN JAVA..... | 97 |

INTRODUCCIÓN

El diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación no es una tarea fácil. En cualquier subestación, un sistema de puesta a tierra tiene un papel muy importante ya que está directamente relacionado con la seguridad de las personas y es de vital importancia para garantizar la operación correcta de la subestación.

Los primeros pasos para un nuevo diseño requieren calcular parámetros como: la resistencia de tierra, el incremento de potencial de tierra, voltajes de paso y toque, la corriente máxima de rejilla, el tamaño mínimo del conductor, el tamaño de varilla, el máximo nivel de corriente de falla, la resistividad del suelo, etc.

Al ser una cantidad grande de cálculos, iteraciones y análisis que se deben realizar, existen compañías desarrolladoras de software dedicadas a este tema, que facilitan a empresas eléctricas las herramientas informáticas necesarias para realizar diseños de una manera rápida, precisa y efectiva, con la desventaja, que el software dedicado a este tema es costoso.

En el presente trabajo de graduación se desarrolla un software simulador de redes de tierra para subestaciones con el objetivo de facilitar una herramienta informática a estudiantes y profesionales diseñadores.

El programa y el presente trabajo de graduación se basan en las reglas o pasos enumerados en el estándar IEEE-80-2013 y en el Acuerdo 29-E-2000. En el trabajo se desarrolla de manera simple y sistematizada el método propuesto, abarcando temas importantes como: Criterios de seguridad, de diseño, aspectos legales y sugerencias que se deben tener en cuenta al implementar o construir cualquier sistema de puesta a tierra.

El programa fue desarrollado en JAVA ya que presenta una funcionalidad multiplataforma y su programación es orientada a objetos.

El software fue utilizado para simular el diseño de la red de tierra de una propiedad de una empresa distribuidora, obteniendo resultados satisfactorios. Con el desarrollo de este programa obtenemos una herramienta útil en casos prácticos que nos facilita el optimizar redes de tierra en aspectos de seguridad, desempeño y economía.

CAPITULO I

Marco Teórico

MARCO TEÓRICO

1.1. DESCRIPCIÓN DEL TEMA

En el presente trabajo de graduación se describe el método de diseño de sistemas de puesta a tierra que considera el estándar IEEE-80-2013 y el acuerdo 29-E-2000, con el cual se desarrolla un simulador que facilita el diseño y análisis de sistemas de puestas a tierra, segura y eficiente, para subestaciones.

El diseño de una puesta a tierra para una subestación resulta ser un proceso complejo si no se cuenta con las herramientas informáticas adecuadas. Es por ello que se estudiaron los softwares libres creados entorno a la temática, así como también los softwares de paga o profesionales de mayor demanda en el mercado. Partiendo de esto se logra desarrollar un software capaz de cumplir partes importantes de los softwares profesionales como: el modelo de dos capas del suelo. Todo esto en base a criterios de seguridad, diseño y desempeño que establecen tanto la IEEE 80-2013 como el acuerdo 29-E-2000 de SIGET.

Debido a la disponibilidad de la versión 2013, el trabajo presentado es consistente con los cambios recientemente introducidos por la IEEE en el diseño de la puesta a tierra de subestaciones.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GENERALES

- Desarrollar un Simulador para el análisis y diseño redes de tierra para subestaciones de potencia basado en el estándar IEEE 80-2013.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar un entorno de aprendizaje y otro profesional de los conceptos básicos para el diseño de redes de puesta a tierra por el método de los doce pasos establecido por el estándar IEEE 80-2013.
- Desarrollar una rutina de análisis de redes de tierra de subestación con modelo de suelo de dos capas.
- Implementar una rutina para la interpretación de las mediciones de resistividad aparente y obtener la resistividad de terreno uniforme requerido en el procedimiento de diseño.
- Desarrollo de rutina para el cálculo del factor de división de corriente de falla (S_f).

1.3. ALCANCES

- Desarrollar un simulador para el diseño de redes de tierra que cumpla con las expectativas y requerimientos de un profesional o empresa, de tal forma que puedan utilizarlos en sus proyectos. Además, se pretende aportar un recurso didáctico para que estudiantes de ingeniería eléctrica adquieran los conocimientos básicos y la capacidad de diseñar redes de puesta tierra, basados en un estándar internacional como lo es el estándar IEEE 80-2013 y los requerimientos del acuerdo de SIGET No. 29-E-2000.
- El trabajo de graduación y el Software se basará solamente en métodos numéricos, gráficos e iterativos no utilizando el método de los elementos finitos.
- Investigar el diseño de un sistema de puesta a tierra de una subestación de distribución y/o de transmisión de El Salvador, para conocer la corriente de tierra y resistencia a tierra (R_g) medida, con el objeto de verificar el cumplimiento del estándar IEEE 80-2013 por medio del Software desarrollado.

1.4. ANTECEDENTES

El trabajo de graduación que lleva por título: “Investigación de una metodología para la optimización de una red de polarización a tierra”, llevado a cabo en el año 1997, en la Universidad de El Salvador, es altamente teórico y matemático. En éste se trata ampliamente la teoría electromagnética relacionada al tema de puesta a tierra, además según los autores se desarrolló un programa de cálculo, el cual con el transcurso del tiempo se perdió. No hay indicios de que los autores hayan utilizado el estándar IEEE 80 sino más bien el estándar IEEE-142.

1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La problemática del trabajo de graduación parte del hecho que en la Universidad de El Salvador se carece de un simulador o software que facilite el aprendizaje a los estudiantes de los criterios de diseño de redes de tierra para subestaciones de potencia. Sin esta herramienta informática el proceso para diseñar redes de tierra se hace de una manera imprecisa y vulnerable a errores por la gran cantidad de cálculos que se deben realizar. Además, al sumar la elaboración de reportes, planos y diseño detallado, son aspectos que implementados en un software podrían ahorrar mucho tiempo a estudiantes o ingenieros diseñadores de redes de tierra.

1.6. JUSTIFICACION

El diseño de sistemas de puesta a tierra, es una actividad básica y primordial en todo proyecto de construcción de subestaciones de distribución y transmisión. El estándar IEEE 80-2013 es la norma de mayor aplicación en este tipo de diseño, presentando un método de carácter numérico. Es por ello que existen empresas desarrolladoras de software dedicadas a esta temática. La desventaja que presentan los softwares profesionales en el mercado, es su alto costo, haciéndoles inaccesibles para estudiantes o profesionales en el diseño de sistemas de puesta a tierra.

En El Salvador la mayoría de empresas eléctricas no cuentan con software para el análisis y diseño de redes de tierra. En la Universidad de El Salvador no se cuenta con un Software que facilite el realizar diseños de sistemas de puesta a tierra, ni los fondos necesarios para realizar una compra de Software moderno y actual. Por lo tanto, existe la necesidad de Desarrollar un Software que permita la simulación de redes de tierra prácticas.

1.7. DEFINICIONES

- **Resistividad del terreno:** es la resistencia eléctrica específica de un determinado material. Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ) y se mide en ohmios metro ($\Omega \cdot m$)
- **Potencial de Paso:** Es la diferencia en el potencial superficial experimentado por una persona parada con los pies separados 1 m sin contactar ningún objeto puesto a tierra. Éste potencial surge debido al aumento en el potencial de la superficie donde la persona se encuentra parada. De las diferentes situaciones de Shock que existen ésta es la menos peligrosa porque no implica a órganos vitales en la trayectoria de la corriente.

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

- **Potencial de Toque:** Es la diferencia de potencial entre el aumento de potencial de tierra (GPR) y el potencial de la superficie en el punto donde una persona está parada mientras al mismo tiempo está en contacto con una estructura puesta a tierra.

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

- **Corriente asimétrica efectiva de falla:** Es el valor de la señal de corriente asimétrica, integrada sobre el intervalo de duración de la falla. (Ver figura 1)

$$I_F = D_f \cdot I_f$$

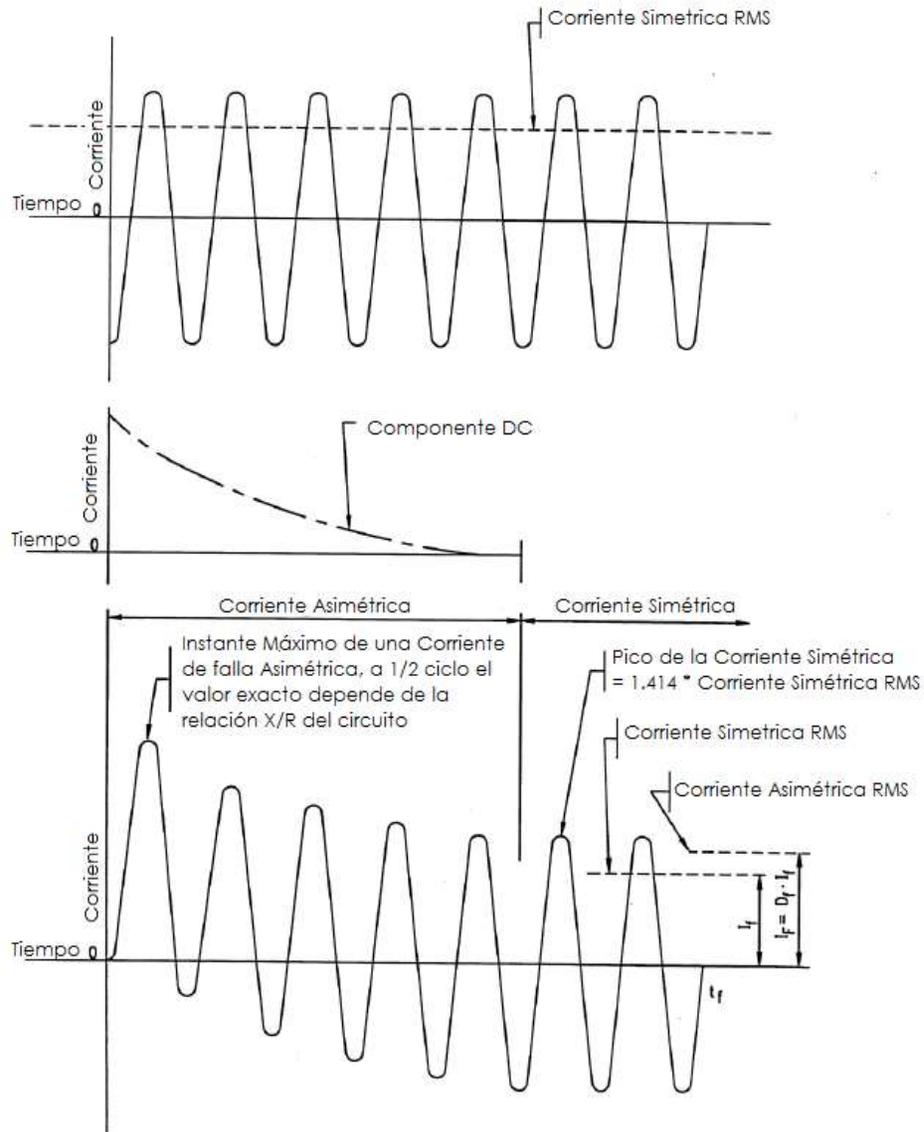


Fig. 1: Relación entre los valores actuales de la corriente de falla y los valores de I_F , I_f y D_f para una duración t_f

Donde:

I_F = Corriente asimétrica durante la falla.

I_f = Corriente simétrica rms de de falla a tierra

D_f = Factor de decremento

- **Factor de división de la corriente de falla (Sf):** Representa la relación inversa de la corriente simétrica de falla a la porción de corriente que fluye entre la cuadrícula de puesta a tierra y la tierra circundante.

$$S_f = \frac{I_g}{3I_o}$$

Donde:

S_f : Es el factor de división de corriente

I_g : Es la corriente simétrica de cuadrícula rms

I_o : Es la corriente de secuencia cero de la falla

- **Conexión equipotencial:** Interconexión eléctrica de partes conductoras realizado para mantener el equipo interconectado a un potencial eléctrico común, éste tiene además como intención brindar seguridad al personal que durante una contingencia se encuentre en contacto con cualquier equipo eléctrico o superficie metálica.
- **Factor de decremento:** Factor de ajuste usado en conjunto con la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos orientados a la seguridad de las puestas a tierra. Éste determina el equivalente rms de la señal de corriente asimétrica para una determinada duración de la falla (t_f), y es tomando en cuenta para el efecto del offset DC y la atenuación de dicha componente durante la falla.
- **Aumento del potencial de tierra (GPR):** es el potencial eléctrico máximo que la red de puesta a tierra de la subestación puede alcanzar respecto a un punto de puesta a tierra distante por el paso de una corriente de tierra I_G . Esta tensión, GPR, es igual a la corriente máxima de rejilla por la resistencia de rejilla.

$$GPR = I_G R_G$$

- **Cuadrícula de puesta a tierra:** Sistema de electrodos de tierra horizontales que consiste en un conjunto de conductores desnudos enterrados, que proveen una tierra común para dispositivos eléctricos o estructuras metálicas, usualmente en una localización específica.
- **Máxima corriente de cuadrícula (I_G):** Un valor de diseño de la máxima corriente de cuadrícula se define como:

$$I_G = D_f \cdot I_g$$

Donde:

I_G : Es la máxima corriente de cuadrícula en Amperios

D_f : Factor de decremento para la duración completa de la falla dada en s

I_g : Corriente rms simétrica de la cuadrícula en amperios

- **Material superficial:** Un material instalado sobre el suelo consistente de pero no limitado a grava, asfalto o materiales hecho por el hombre. El material superficial, dependiendo de la

resistividad del material, puede impactar de forma significativa para limitar la corriente de cuerpo, el potencial de paso y de toque, donde los pies de la persona se ven involucrados.

- **Corriente de falla simétrica a tierra:** El máximo valor rms de corriente de falla después del instante de inicio de la falla a tierra. Como tal, representa al valor rms de la componente simétrica en el primer semiciclo de la onda de corriente que se desarrolla después del instante de la falla en el momento cero. Para fallas de fase a tierra (asimétrica):

$$I_{f(0^+)} = 3I_o$$

Donde:

$I_{f(0^+)}$: Es la corriente rms inicial de falla a tierra

I_o : Es el valor rms de la corriente de secuencia cero simétrica, que se desarrolla justo después del instante de inicio de la falla, reflejando así la contribución de las reactancias subtransitorias de las máquinas giratorias a la falla.

1.7.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

| Símbolo | Descripción | Unidades |
|-------------|---|------------------|
| ρ | Resistividad del Suelo | Ωm |
| ρ_s | Resistividad de la Capa Superficial | Ωm |
| $3I_0$ | Corriente de falla simétrica | A |
| A | Área total de la cuadrícula | m^2 |
| C_s | Factor de decremento de la capa superficial | |
| d | Diámetro del conductor | m |
| D | Espaciamiento entre conductores paralelos | m |
| D_f | Factor de decremento para el cálculo de I_G | |
| D_m | La mayor distancia entre dos puntos de la cuadrícula | m |
| E_m | Voltaje de malla en el centro de la malla de la esquina | V |
| E_s | Voltaje de paso entre un punto del perímetro de la cuadrícula y otro punto a un metro distancia | V |
| E_{step} | Voltaje de paso tolerable | V |
| E_{touch} | Voltaje de toque tolerable | V |
| h | Profundidad de la cuadrícula | m |
| h_s | Profundidad de la capa superficial | m |

| | | |
|----------|---|----------|
| I_G | Corriente máxima de cuadrícula | A |
| I_g | Corriente simétrica de cuadrícula | A |
| K | Factor de reflexión entre diferentes resistividades | |
| K_h | Factor del efecto de la profundidad de cuadrícula | |
| K_i | Factor de corrección de la geometría de la cuadrícula | |
| K_{ii} | Factor de corrección por los conductores de la cuadrícula | |
| K_m | Factor de espaciamiento para el voltaje de malla | |
| K_s | Factor de espaciamiento para el voltaje de paso | |
| L_C | Longitud Total de conductor | m |
| L_M | Longitud total: $L_C + L_R$ | m |
| L_R | Longitud total de varillas | m |
| L_r | Longitud de una varilla | m |
| n_R | Número de varillas | |
| R_g | Resistencia de puesta a tierra | Ω |
| S_f | Factor de división de la Corriente de falla | |

Tabla 1: índice de parámetros de diseño

1.8. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

1.8.1. ¿QUÉ ES UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA?

En una subestación es una cuadrícula con conductores formando mallas que tienen la función de brindar protección contra cualquier tipo de falla a tierra en un sistema eléctrico al establecer una trayectoria de baja impedancia hacia la tierra donde se conducen las corrientes de falla, limitando los potenciales de tierra a valores tolerables para una persona.

Existen dos objetivos principales que debe cumplir el sistema de puesta a tierra de cualquier subestación, bajo condiciones normales y de falla:

- Asegurar que las personas dentro de la subestación y en sus vecindades, no estén expuestas a potenciales de tierra peligrosos.
- Proporcionar los medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de la red y de los equipos.

El diseño de una buena red de puesta a tierra es una tarea crítica debido a que existen muchos parámetros que afectan el diseño. Al ser una parte tan importante de un sistema eléctrico, éste tipo de instalaciones están regidas por diferentes códigos o leyes; también existen estándares que sirven de guía para el diseño y construcción. (IEEE 80, IEEE 81, IEEE 142, Acuerdo 29-E-200)

Los aspectos a tener en cuenta para el diseño correcto de un sistema de puesta a tierra son:

- Características físicas y modelo del terreno.
- Tipo de construcción y análisis de cortocircuito de la Subestación.
- Método de cálculo o criterio de diseño.
- Cumplimiento de aspectos legales y de seguridad.
- Presupuesto y Mano de Obra.

1.8.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MODELO DEL TERRENO

La dificultad de la implementación o construcción de un sistema de puesta a tierra depende directamente de la selección del terreno, ya que sus características y parámetros afectan en gran medida las variables más importantes a ser calculadas y con las cuales se procede a diseñar. Las variables o parámetros a tener en cuenta son:

- Área
- Resistividad

El área del sistema de puesta a tierra (A) es el factor más importante en la determinación de la resistencia del sistema de puesta a tierra (R_g). Entre mayor sea A , menor será R_g y por lo tanto, es menor la elevación del potencial de tierra (GPR). La forma geométrica del terreno puede ser: cuadrada, rectangular, en forma de "L" o de cualquier forma.

La resistividad (ρ) es otro factor importante para la determinación de R_g , el escoger un terreno con una alta resistividad dificulta el obtener una resistencia R_g baja.

Entre los métodos para medir la resistividad del terreno se encuentran:

- El método de Wenner o de los cuatro electrodos.
- Método Schlumberger – Palmer
- Por inspección o clasificación de terreno o suelo.

El objetivo fundamental de las mediciones es encontrar un modelo de suelo que ofrezca una buena aproximación del suelo real. La resistividad varía lateralmente y con respecto a la profundidad, dependiendo de la estratificación del terreno. Las condiciones climáticas influyen en la resistividad medida, razón por la cual, dichas mediciones deben realizarse, en lo posible, en época de verano prolongado para obtener la resistividad más alta y desfavorable.

Los modelos más comúnmente usados para la interpretación de la resistividad del suelo son:

- **Modelo de suelo uniforme:** Usado sólo cuando existe una variación moderada de la resistividad aparente. En condiciones de suelo homogéneo, que raramente ocurren en la práctica, el modelo de suelo uniforme puede ser razonablemente exacto.
- **Modelo de suelo de dos capas:** Es una representación muy exacta de las condiciones reales del suelo, y consiste en una capa superior de profundidad finita y con resistividad diferente a la de la capa más baja de espesor infinito.
- **Modelo de suelo multicapa:** Usado cuando las condiciones del suelo son más complejas.

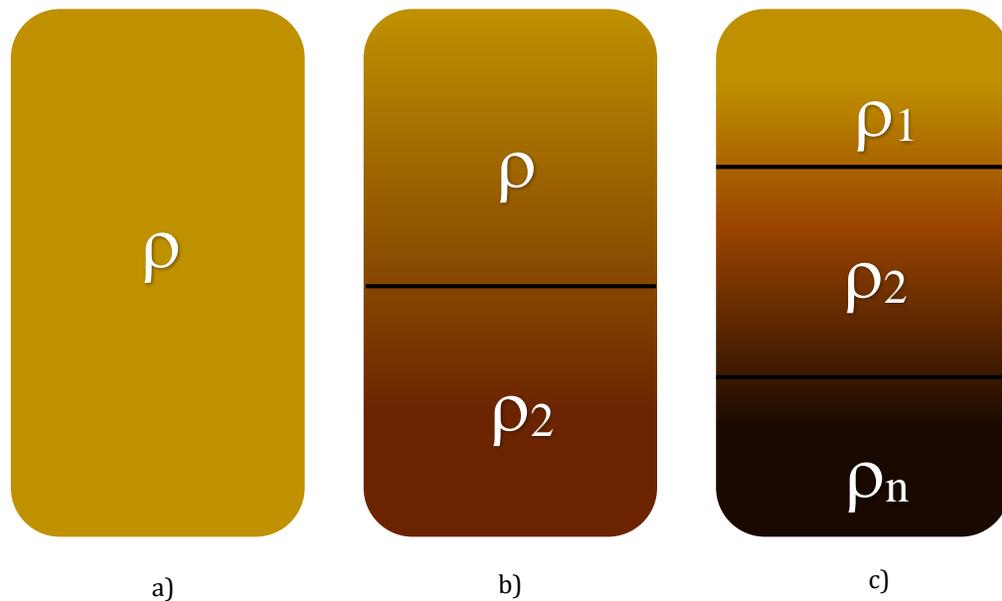


Fig. 2: a) Suelo Homogéneo, resistividad uniforme. b) Modelo de Suelo de dos Capas. c) Modelo del Suelo Multicapas o n capas.

El tipo de suelo y exactitud requerida por la aplicación determinaran el tipo de modelo del suelo a utilizar.

1.8.3. DATOS DE CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO DE LA SUBESTACIÓN

El diseño de un sistema de puesta a tierra se basa en la subestación a implementar, es decir, una subestación con mayor capacidad o potencia exigirá un sistema de puesta a tierra con menor resistencia, de acuerdo a los requerimientos de la normativa nacional.

El diseñador debe tener en cuenta los siguientes datos de la subestación para lograr un sistema de puesta a tierra eficiente y seguro:

- **La potencia de la subestación:** determina el valor de R_g a calcular según lo establecido por el acuerdo 29-E-2000.
- **Tiempos de coordinación de protecciones que equivalen a los tiempos de duración de falla:** afectan directamente el valor del potencial de paso y toque, el tamaño del conductor y el factor de decremento.
- **Corrientes simétricas y asimétricas de falla monofásica:** determina el tamaño del conductor y la corriente máxima de cuadrícula (I_G).
- **Número de líneas de transmisión y alimentadores de la subestación:** determinan el factor de división de la corriente de falla (S_f) que afecta directamente el cálculo del GPR.

1.8.4. MÉTODO DE CÁLCULO O CRITERIO DE DISEÑO

El criterio de diseño utilizado en el presente trabajo se basa en el método presentado por el estándar IEEE 80-2013, el cual consiste en una serie ordenada de doce pasos. En la figura 5 se presenta un flujograma que representa el orden de los doce pasos y las iteraciones que deben realizarse de ser el caso. Los pasos a ejecutar durante el diseño de un sistema de puesta a tierra para una subestación son los siguientes:

- **Paso 1: Datos de campo.** Se determina el área de la red de tierra (A), la resistividad del suelo (ρ) y el modelo de suelo necesario (es decir, el modelo uniforme o de dos capas).
- **Paso 2: Cálculo del conductor.** Se determina el tamaño del conductor. La corriente de falla simétrica ($3I_o$), y el tiempo de despeje de falla (t_c). La ecuación (1) calcula el tamaño del conductor.

$$A_{kcmil} = 3I_o \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c} \quad (1)$$

Dónde: K_f es una constante del material del conductor seleccionado. (Ver tabla 2, sección 13.1, IEEE 80-2013).

- **Paso 3: Voltaje de toque y paso.** Las tensiones de toque y paso tolerables por una persona son determinadas por las ecuaciones (2) y (3) respectivamente. La elección del tiempo (t_s) se basa en el criterio del ingeniero de diseño.

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

Donde: ρ_s es la resistividad del material de superficie y C_s es el factor de reducción de corriente en la capa superficial y se calcula:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (4)$$

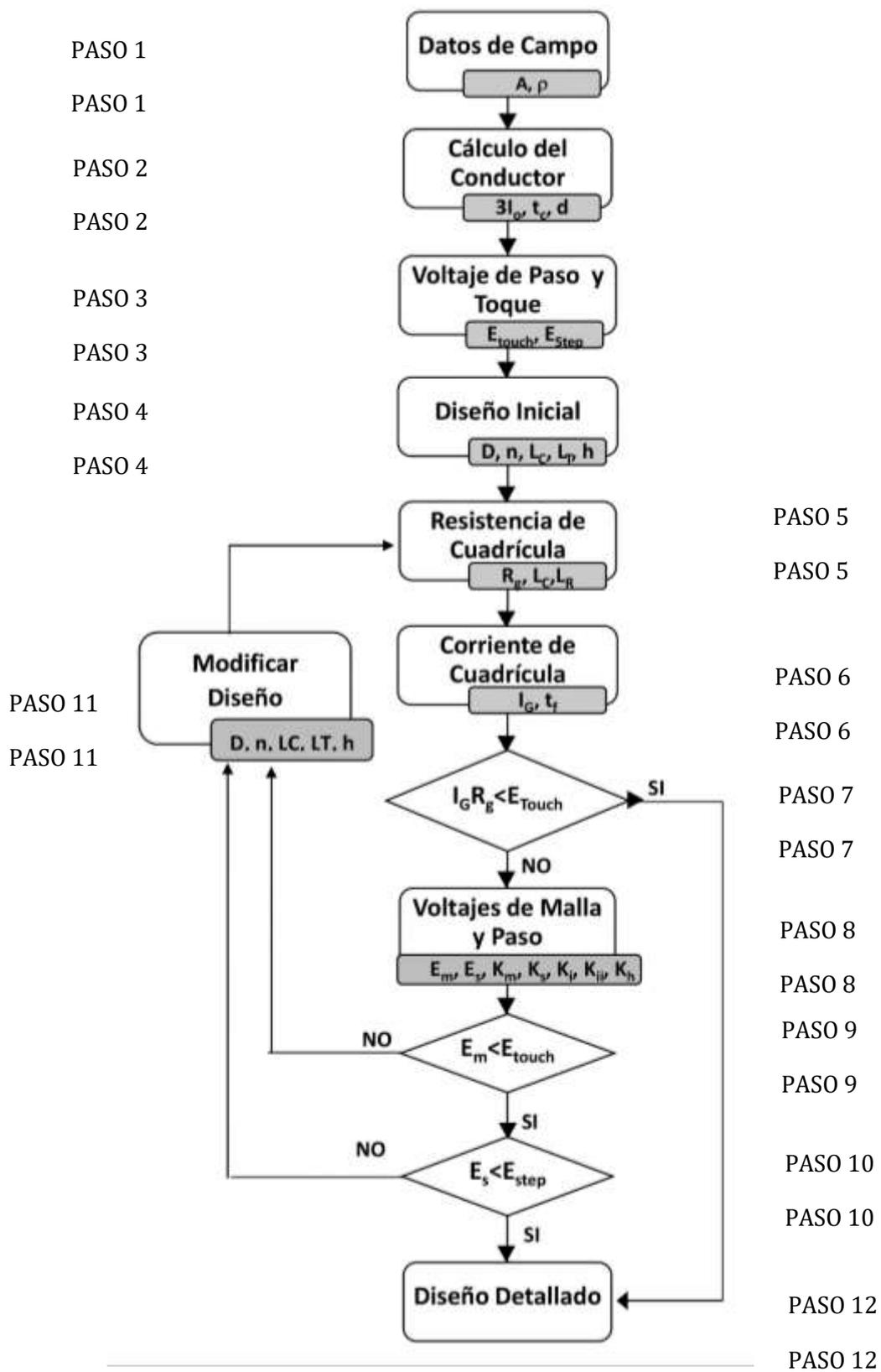
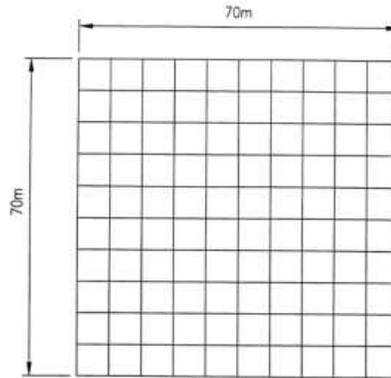


Fig. 3: Flujograma del método de los 12 pasos del estándar IEEE 80-2013.

- **Paso 4: Diseño inicial.** Cálculo de los parámetros de diseño preliminares como la distancia entre los conductores paralelos (D), número de varillas verticales (n_R), profundidad de enterramiento de la cuadrícula (h), longitud total de conductores horizontales (L_c), longitud total de conductor y varillas (L_r), configuración de filas y columnas de la cuadrícula (Ejemplo: S100 = 10 filas x 10 columnas). Se trata que la cuadrícula este formada por mallas cuadradas.



- **Paso 5: Resistencia de cuadrícula (R_g).** El cálculo de la resistencia a tierra es recomendable hacerlo con la ecuación más exacta que presenta el estándar: La ecuación de Schwarz (5).

Para suelo uniforme:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (5)$$

Donde: a es el radio del conductor de la cuadrícula y b es el radio de la varilla.

$$a' = \sqrt{a \cdot 2h} \quad (6)$$

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (8)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (9)$$

Los valores de k_1 y k_2 se calculan por medio de las siguientes ecuaciones dependiendo del valor de la profundidad (h).

Para k_1 :

h con un valor cercano a cero:

$$k_1 = -0.04x + 1.41 \quad (10)$$

h con un valor cercano a $\frac{1}{10}\sqrt{A}$:

$$k_1 = -0.05x + 1.20 \quad (11)$$

h con un valor cercano a $\frac{1}{6}\sqrt{A}$:

$$k_1 = -0.05x + 1.13 \quad (12)$$

Para k_2 :

h con un valor cercano a cero:

$$k_2 = 0.15x + 5.50$$

h con un valor cercano a $\frac{1}{10}\sqrt{A}$:

$$k_2 = 0.10x + 4.68$$

h con un valor cercano a $\frac{1}{6}\sqrt{A}$:

$$k_2 = 0.05x + 4.40$$

Donde $x = \text{Largo/Ancho}$ de la Subestación.

- **Paso 6: Corriente de cuadrícula.** Se determina la duración de la corriente de falla (t_f), factor de División de la corriente de falla (S_f), el factor de decremento (D_f) y la máxima corriente de la cuadrícula con la ecuación:

$$I_G = 3I_o \cdot S_f \cdot D_f \quad (13)$$

- **Paso 7. Decisión.** Si $GPR = I_G \cdot Rg$ es menor a E_{touch} se procede al último paso (Diseño detallado), si no, se sigue al paso 8.
- **Paso 8. Voltajes de malla y paso.** Se calculan los voltajes de malla y paso, de acuerdo a la cuadrícula propuesta.

Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (14)$$

Donde:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16h \cdot d} + \frac{(D + 2h)^2}{8D \cdot d} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi(2\pi - 1)} \right] \right] \quad (15)$$

Para cuadrículas con varillas en el perímetro:

$$K_{ii} = 1 \quad (16)$$

Para cuadrículas sin varillas:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (17)$$

$$K_h = \sqrt{1 + h} \quad (18)$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (19)$$

Donde:

$n_b = 1$, para cuadrículas cuadradas.

$n_c = 1$, para cuadrículas cuadradas y rectangulares.

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

Si no,

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (20)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (21)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x \cdot L_y}} \quad (22)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (23)$$

L_c , es la longitud total de conductor utilizado en la cuadrícula horizontal en metros.

L_p , es la longitud perimetral de la cuadrícula en metros.

L_x , es la longitud máxima de la cuadrícula en el eje x en metros.

L_y , es la longitud máxima de la cuadrícula en el eje y en metros.

D_m , es la máxima distancia entre dos puntos aleatorios en la cuadrícula en metros.

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (24)$$

Para cuadrículas sin ninguna varilla o con algunas varillas en lugares que no sean el perímetro o esquinas:

$$L_M = L_C + L_R \quad (25)$$

L_R , es la longitud total de todas las varillas verticales. $L_R = n_R L_r$, donde L_r es la longitud de una varilla.

Para cuadrículas con varillas en las esquinas o en el perímetro:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (26)$$

L_r , es la longitud de una varilla en metros.

Voltaje de paso (E_s):

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (27)$$

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \quad (28)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (29)$$

- **Paso 9: Condición.** Se busca controlar el voltaje de toque, si se cumple que: E_m es menor a $E_{\text{touch}70}$, se sigue al paso 10, si no, se sigue al paso 11: Modificar diseño.
- **Paso 10: Condición.** Se busca controlar el voltaje de paso si se cumple que: E_s es menor a $E_{\text{step}70}$. De cumplirse se sigue al paso 12, si no, se sigue al paso 11: Modificar diseño.
- **Paso 11: Modificar diseño.** En este paso se regresa al paso 5, y en él se modifica el diseño. Se puede cambiar la disposición de las cuadrículas o incrementar el espesor del material superficial.
- **Paso 12: Diseño detallado.** En este paso se tiene un diseño de red de tierra seguro, estable y eficiente. Se proceden a realizar los planos, detallar costo de materiales y mano de obra, y todos los aspectos que puedan incluirse en la implementación del proyecto.

1.8.5. ASPECTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE UNA CUADRÍCULA

Para establecer ideas básicas y conceptos, los siguientes puntos sirven como guía para comenzar un diseño de puesta a tierra. (Específicamente en el paso 4):

- Instalar conductor formando un lazo perimetral y mallas de puesta a tierra. Esto evita concentraciones altas de corriente.
- El calibre de conductor recomendado es: 4/0, pero puede ser un mínimo de 2/0.
- La cuadrícula puede ser enterrada entre profundidades de 0.3 – 0.5m.
- En los cruces de conductor debe existir un conector o soldadura exotérmica.
- El espaciamiento entre conductores paralelos debe ser de 3m – 7m.
- Deben colocarse primordialmente varillas en el perímetro.
- En terrenos heterogéneos o de alta resistividad es recomendable colocar varillas más largas.
- En casos de altas corrientes de cortocircuito usar calibres de conductor más grandes.
- La relación de aspecto en una malla puede ser de 1:1 - 1:3.

1.8.6. CUMPLIMIENTO DE ASPECTOS LEGALES Y DE SEGURIDAD

1.8.6.1. SIGET Y EL ACUERDO 29-E-2000

En El Salvador, la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET) es la encargada de emitir las normas y reglamentos que rigen los sectores de Electricidad y de Telecomunicaciones. Ha establecido los requisitos legales para el diseño e implementación de Redes de Tierra para subestaciones de distribución en El Salvador. Estas normas fueron publicadas en el Acuerdo No. 29-E-2000 en junio del año 2000 y que lleva por título: “Normas Técnicas de Diseño, Seguridad y Operación de las Instalaciones de Distribución Eléctrica”.

La norma fue establecida con el objetivo principal de: ***“Establecer las disposiciones, criterios y requerimientos mínimos para asegurar que las mejoras, expansiones y nuevas construcciones de las instalaciones de distribución de energía eléctrica, se diseñen, construyan y operen, garantizando la seguridad de las personas y bienes y la calidad del servicio”.***

Claramente se logra apreciar que la lista de prioridades reflejadas en esta norma son:

- 1) **Seguridad de las personas.**
- 2) **Seguridad de los bienes.**
- 3) **La calidad del Servicio o Desempeño del Sistema Eléctrico.**

En conclusión, el diseño de cualquier instalación eléctrica prioriza ante todo la seguridad de las personas. Este es el principal requerimiento de diseño para un sistema de puesta a tierra.

Si bien el acuerdo 29-E-2000 establece los criterios de diseño, no considera los métodos y procedimientos para la medición y mantenimiento de las redes de tierra de distribución. También, es importante mencionar, que no existe una reglamentación o norma de SIGET para las redes de tierra en Subestaciones de Transmisión o Generación, por lo que para estos casos se recomienda utilizar la IEEE 80-2013, IEEE 81-2012 y la IEEE 665.

1.8.6.2. NORMAS DE SUBESTACIONES Y REDES DE TIERRA EN EL ACUERDO 29-E-2000

En el acuerdo 29-E-2000 las normas para el diseño de subestaciones se encuentran en el Capítulo VI: “Subestaciones”. El cual establece normas para todos los aspectos que conciernen al diseño. Los métodos de puesta a tierra son desarrollados en el Capítulo VII. Estos métodos deben ser utilizados para las conexiones de la red de tierra tal y como lo declara el Artículo 54 del Capítulo VI.

En la tabla 2 se resumen los requerimientos que establece SIGET para una red de tierra con su respectivo capítulo y artículo con el que se pueden encontrar en el acuerdo 29-E-2000.

| No. | Requisito | Art. | Comentario |
|------------|---------------------------------|-------------|--|
| 1 | Circuito de tierra | 54.1 | Proveer un circuito de muy baja resistencia para la circulación de las corrientes a tierra ya sean debidas por falla a tierra del sistema o la operación de pararrayos. Implementar el “análisis del circuito de tierra” de la subestación. |
| 2 | Potencial de paso y de contacto | 54.2 | Evitar que durante la circulación de corrientes de falla a tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación que |

| | | | |
|-----------|--|------------|--|
| | | 57 | <p>puedan ser peligrosas para el personal, considerando que las tensiones tolerables por el cuerpo humano deben ser mayores que las tensiones resultantes en la red de tierras.</p> <p>El potencial de paso y de contacto deben estar en niveles seguros; seguir las indicaciones de la IEEE 80.</p> |
| 3 | GPR | 57 64.4 | <p>El incremento del potencial a tierra (GPR) en una subestación cuando la corriente de falla es drenada a tierra no debe representar peligro para el personal que se encuentre dentro de la subestación o a aquellos en su perímetro o que toquen su cerca perimetral; seguir las indicaciones de la IEEE 80.</p> <p>Que el GPR sea menor o igual a 5000 V.</p> |
| 4 | Transferencia de potencial | 57 | <p>Los efectos de transferencia de potencial deberán ser estudiados y limitados; seguir las indicaciones de la IEEE 80.</p> <p>Implementar el “análisis de transferencia de potencial”</p> |
| 5 | Resistencia de tierra | 64.4 | Que el valor de la resistencia de puesta a tierra esté conforme a la tabla No. 22 |
| 6 | Varilla de puesta a tierra | 62 | Que las varillas de puesta a tierra sean de 2.4 m x 12.7 mm como mínimo. |
| 7 | Material de la varilla de puesta a tierra | 62 | <p>Debe ser de cobre, otro material o aleación que minimice la corrosión durante la vida útil.</p> <p>Implementar análisis de protección contra la corrosión.</p> |
| 8 | Separación entre varillas | 62 | La separación entre varillas deberá ser como mínimo igual a su longitud. |
| 9 | Capacidad de corriente del Conductor de la red de tierra | 61.4 E) | <p>Deberá tener una capacidad no mayor de:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Los conductores de fase que suministrarán la corriente de falla; 2) La corriente máxima que puede circular por el conductor. |
| 10 | Material del conductor de la red de tierra | 61.1 | <p>Debe ser de cobre, otro material o aleación que minimice la corrosión durante la vida útil.</p> <p>Implementar análisis de protección contra la corrosión.</p> |

| | | | |
|----|---|---------|--|
| 11 | Resistencia mecánica del conductor | 61.4 F) | Debe tener una resistencia mecánica adecuada para las condiciones a que está sometido. En conductores sin protección se debe utilizar un No. 8 AWG (8.37 mm ²). |
| 12 | Ubicación del cable perimetral de la red de tierra | 55 | El cable que forme el perímetro exterior de la red de tierras, deberá ser continuo de manera que encierre toda el área en que se encuentra el equipo de la subestación, por lo menos un metro fuera del perímetro de la subestación, en aquellos lugares en que haya circulación de personas. |
| 13 | Forma de la cuadrícula de la red de tierra | 55 | En cada cruce de conductores de la red de tierra, éstos deberán conectarse rígidamente entre sí y en los puntos adecuados conectarse a electrodos de una longitud y diámetro mínimos de 2.40 m y 12.7 mm, respectivamente, clavados verticalmente y/o contruidos de tal manera que garantice el nivel de conductividad en el futuro. La red de tierras deberá estar constituida por cables colocados paralela y perpendicularmente, con un espaciamiento adecuado a la resistividad del terreno y preferentemente formando mallas. |
| 14 | Caja de registro | 55 | El diseño del sistema de tierras deberá considerar las cajas de registro necesarias para efectos de medición y mantenimiento. |
| 15 | Cercanía a tuberías de líquidos o gases inflamables | 63.3 | Este tipo de tubería debe tener una conexión a la red de tierra de la instalación y la implementación de protección catódica; de lo contrario se debe guardar una distancia de 3 m de la red de tierra. |
| 16 | Resistencia a tierra en instalaciones subterráneas | 64.3 | Debe ser de 5 Ω |

Tabla 2: Requerimientos establecidos por SIGET para el diseño de un Sistema de Puesta a Tierra.

1.8.6.3. VALORES DE RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN

El cálculo de la Red de Tierra, así como su diseño, está basado en un principio por el valor de la resistencia de la Red de Tierra (R_g) que se desea lograr. Este valor objetivo cambia dependiendo de la capacidad instalada de transformación o de manejo de potencia para la subestaciones de maniobra. El acuerdo 29-E-2000, para las subestaciones, establece los valores de (R_g) en función de su capacidad de potencia y se encuentran en la tabla 3.

| Capacidad de la Subestación (MVA) | Resistencia de la Red de Tierra (Ohm) |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| ≤0.05 | 12 |
| 0.05 - 0.1 | 6 |
| 0.1 - 0.5 | 2 |
| 0.5 - 1 | 1.5 |
| 1 - 50 | 1 |
| 50 - 100 | 0.5 |
| >100 | 0.2 |

Tabla 3: Valores máximos permitidos de Resistencia de Red de Tierra (R_g) de una subestación en función de su capacidad.

1.9. PELIGRO EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

En una subestación, el peligro es inminente; existe circulación de corriente eléctrica por el suelo, partes metálicas, por el neutro y cables de guarda, exponiendo a las personas y trabajadores a potenciales peligrosos. Por lo tanto, también es importante conocer a detalle las características perjudiciales que tiene la corriente eléctrica.

1.9.1. RANGOS DE LA CORRIENTE TOLERABLE.

Los efectos perjudiciales de una corriente eléctrica que pasa a través de las partes vitales de un cuerpo humano dependen de:

- La frecuencia.
- La duración.
- La magnitud.

La consecuencia más peligrosa de tal exposición es una condición cardíaca conocida como **fibrilación ventricular**, dando como resultado la detención inmediata de la circulación sanguínea.

1.9.1.1. EFECTO DE LA FRECUENCIA DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Los efectos de la corriente alterna sobre el cuerpo dependerán de su frecuencia, haciéndose menos dañinos a medida que la frecuencia se incrementa, ya que a medida que esto ocurre, por *efecto pelicular*, la penetración de la corriente en el cuerpo humano se va haciendo menor.

Las frecuencias tolerables por el cuerpo humano son mayores a 3000Hz. Es importante tener en cuenta que mundialmente [B1]¹ en los sistemas de transmisión y distribución las frecuencias utilizadas son: 50Hz y 60Hz. En el caso de El Salvador la frecuencia es de 60Hz.

1.9.1.2. EFECTO DE LA MAGNITUD DE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

Los efectos fisiológicos más comunes de la corriente eléctrica en el cuerpo, son expresados en orden creciente de magnitud de corriente en la tabla 4.

El criterio de diseño de redes de tierra en el presente trabajo de graduación, se basa en la importancia del umbral de corriente que causa la fibrilación ventricular: 60mA. Si las corrientes de choque pueden mantenerse por debajo de este valor por un sistema de puesta a tierra cuidadosamente diseñado, lesiones o la muerte pueden ser evitadas.

| Corriente | Efecto |
|---------------|--|
| 1 mA | Umbral de percepción |
| 1-6 mA | Produce dolor, pero la persona tiene control para soltar el objeto energizado (Conocida como corriente "Let-go") |
| 9-25 mA | Produce dolor, no hay control para soltar el objeto energizado. Dificultad para respirar. Ningún efecto permanente |
| 60-100 mA | Fibrilación ventricular; paro cardíaco; paro respiratorio o muerte |
| Mayores a 1 A | Daños masivos en tejido que pueden producir la muerte |

Tabla 4: Efectos fisiológicos según la corriente que atraviesa el cuerpo.

1.9.1.3. EFECTO DE LA DURACIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Con duración nos referimos al tiempo en el que, el cuerpo humano, conduce la corriente eléctrica en un choque eléctrico. La magnitud de las lesiones eléctricas es siempre directamente proporcional al tiempo que la corriente está recorriendo el cuerpo, ya que cuanto mayor sea la exposición, mayor daño se producirá en los tejidos. Por esta causa es siempre un grave problema que el accidentado quede unido a la fuente de corriente, ya que sus lesiones se irán incrementando momento a momento. Por lo tanto, el despeje de una falla a tierra en un corto tiempo da una ventaja para la supervisión en un accidente.

Estudios y la experiencia muestran que el riesgo de lesiones graves o la muerte puede reducirse si la duración de un flujo de corriente a través del cuerpo es muy breve. Biegelmeier y Lee proponen como criterio que el tiempo de acción de las protecciones sea menor a 0.5 s. Su investigación proporciona evidencia de que un corazón humano se

convierte cada vez más susceptible a la fibrilación ventricular cuando el tiempo de exposición a la corriente se aproxima al período de latido del corazón, pero que el peligro es menor si el tiempo de exposición a la corriente está en la región de 0.06 s a 0.3 s.

1.9.1.4. PRIMEROS AUXILIOS ANTE UN CHOQUE ELÉCTRICO.

Cuando tenga que atenderse a una persona electrocutada, lo primero que ha de hacerse es, interrumpir el paso de la corriente eléctrica por su cuerpo: actuando sobre el interruptor correspondiente, separando de la víctima el conductor. No hay que olvidar en ningún momento que el electrocutado, es un conductor, y por lo tanto, debe evitarse tocarlo hasta que no se esté seguro de que por él ha dejado de pasar corriente.

Una vez que esto ha ocurrido se le tratará de reanimar inmediatamente (RCP). Normalmente estará desvanecido, carecerá de pulso o lo tendrá muy débil y, probablemente, tenga algunas quemaduras. En primer lugar se intentará restablecer el ritmo cardiaco normal, así como conseguir la regularidad respiratoria. Para ello se aplicará masaje cardiaco y respiración artificial. Se debe intentar recuperar incluso a aquellas personas que puedan parecer muertas, ya que puede ocurrir que simplemente tengan paralizadas las funciones respiratorias y cardíacas pero aún no haya transcurrido tiempo suficiente como para que hayan llegado a sufrir daños orgánicos irreversibles. Por lo tanto, un electricista debe saber de primeros auxilios y Resucitación Cardio-Pulmonar (RCP), para salvar vidas. Todo Trabajador eléctrico debe aprobar un curso de electricidad básica y un curso de primeros auxilios ante choques eléctricos y manejar las técnicas de rescate.

1.9.2. CORRIENTE LÍMITE TOLERABLE POR EL CUERPO.

Basado en los estudios de Dalziel [B3], la corriente que no causa fibrilación de magnitud I_B en duraciones que van desde los 0.03 s a 3.0 s está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo, como se describe por la ecuación 30:

$$S_B = I_B^2 \cdot t_s \quad (30)$$

Donde:

I_B es la magnitud de la corriente rms que pasa a través del cuerpo en A.

t_s es la duración de la exposición a la corriente en s.

S_B es la constante empírica relacionada con la energía de choque eléctrico tolerado por un determinado por ciento de una población determinada.

Daziel en sus resultados, asume que el 99.5 % de las personas pueden soportar, sin sufrir fibrilación ventricular, la corriente dada por la ecuación 31:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (31)$$

Donde: $k = \sqrt{S_B}$

Daziel establece dos pesos promedios de población para el cálculo de I_B .

| Peso | 50 kg | 70 kg |
|-----------------|--------------|--------------|
| $S_B (A^2.s)$ | 0.0135 | 0.0246 |
| $k (A.s^{0.5})$ | 0.116 | 0.157 |

Por lo tanto:

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (50 \text{ kg}) \quad (32)$$

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (70 \text{ kg}) \quad (33)$$

En la figura 4 se muestra una comparación entre las ecuaciones y la gráfica Z desarrollada por Biegelmeier. La curva Z establece como límite 0.2s de duración para una corriente de 500mA y decrece hasta un tiempo de 2s para una corriente de 50mA.

La gráfica de la ecuación establecida por Daziel para un peso de 50 kg, establece un límite menor para la corriente tolerable entre los tiempos de 0.06s a 0.7s. Lo importante es tener en cuenta evitar superar el umbral que establecen las gráficas y no llegar a la zona donde es posible una fibrilación ventricular. Para propósitos de diseño se utiliza un peso de 70kg y su ecuación respectiva de Daziel.

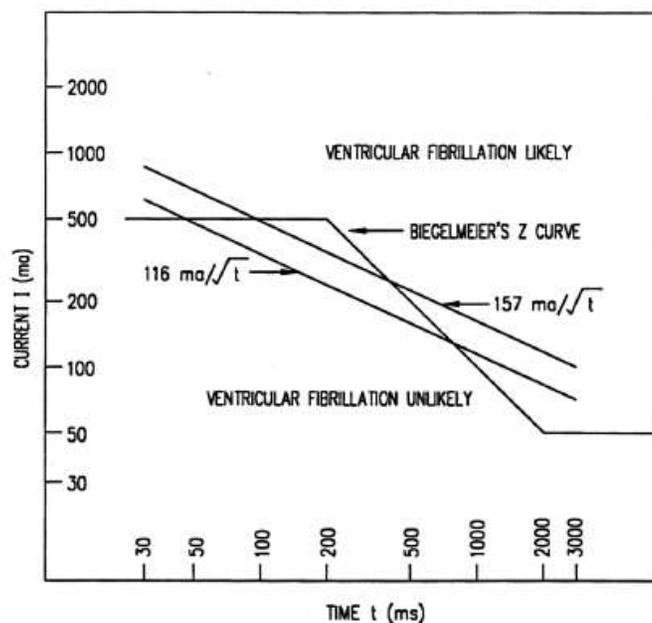


Fig. 4: Comparación entre las ecuaciones y la gráfica Z desarrollada por Biegelmeier.

1.10. PROGRAMAS COMERCIALES

Existen muchos programas dedicados al análisis de Sistemas de Puesta a Tierra. Un gran porcentaje de ellos presenta un alto nivel de análisis y simulación teniendo como objetivo alcanzar la máxima similitud de resultados con el mundo real.

Entre los programas principales y de mayor prestigio en el mercado se encuentran:

- SKM Ground Mat – SKM Analysis, Inc.
- Auto Ground Design – Safe Engineering Services & Technologies ltd. (SES)
- Auto Grid Pro – Safe Engineering Services & Technologies ltd. (SES)
- CYMGRD, Substation Grounding Program – CYME, Power Engineering Software and Solutions.
- ETAP Ground Grid Systems.

1.10.1. SKM GROUNDMAT

SKM GroundMat es un programa para el diseño de rejilla de tierra de la subestación y el análisis. Está diseñado para ayudar a optimizar el diseño de cuadrícula o reforzar las redes existentes de cualquier forma. Se utiliza la técnica de elementos finitos para el análisis algoritmo potencial y las instalaciones de gráficas para validar la eficacia del sistema de tierra.

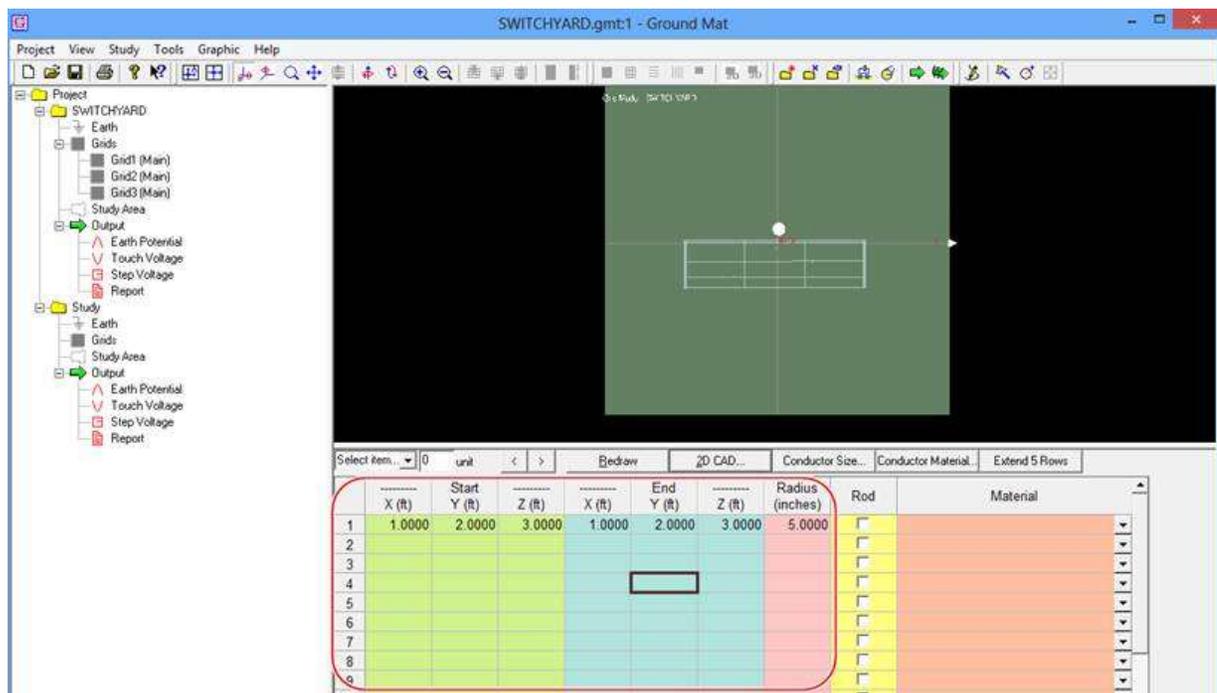


Ilustración 1: Interfaz del programa SKM Ground Mat

Entre las opciones de análisis que presenta el programa se encuentra:

- El usuario especifica la corriente de falla.
- Análisis del potencial a tierra y rejilla.
- Capacidad para analizar múltiples sistemas de tierra.
- Capacidad para analizar el aumento potencial de cada sistema de puesta a tierra incluyendo rejillas o barras pasivas vecinas.
- Análisis de seguridad incluyendo materiales de superficie, con base en el peso corporal y el tiempo de exposición.
- Opción de utilizar IEEE Std. 80 o IEC Std. 479 para el análisis de seguridad.
- Cálculo del voltaje de paso y toque máximos admisibles.
- Informe amplio para la red y la configuración de varilla.
- Informe amplio para el análisis de potencial de superficie con los datos y las corrientes de la estación difunde a tierra por los elementos de la red.
- Evaluación de puntos de peligro.
- Tensión de contacto, tensión de paso, y el análisis de potencial de tierra.

SKM GroundMat es un programa de diseño profesional. Su precio varía entre los \$3,000 y los \$30,000. El programa principal tiene diferentes precios con respecto a la capacidad de análisis que puede realizar. Esto cambia por la cantidad de buses que permite. Además, existen módulos que pueden ser agregados al programa principal por un costo adicional dependiendo del tipo de módulo.

1.10.2. AUTO GROUND DESIGN Y AUTOGRID

La herramienta de ingeniería Auto Ground Design es el paquete de software completamente automatizado que puede analizar y diseñar sistemas de puesta a tierra sin la intervención del usuario entre las distintas fases del proyecto. A diferencia de Auto Grid Pro que es una herramienta potente y fácil de usar, que proporciona un entorno sencillo, automatizado e integrado para la realización de estudios de puesta a tierra. Es decir, Auto Grid es un programa de simulación de nivel medio, y Auto Ground Design de alto nivel.

Auto Ground Design tiene las siguientes funciones:

- Genera diseños de sistemas de puesta a tierra sobre la base de una simple descripción del sitio de la subestación.
- Modelos de sistemas de puesta a tierra y evalúa su desempeño.
- Analiza y diseña las redes de puesta a tierra en forma arbitraria horizontales que consisten en arreglos horizontales y verticales de conductores desnudos enterrados en el uniforme y los suelos de varias capas. Esto se consigue con un método de mallado automático que da cuenta de cualquier forma poligonal.
- Una interfaz fácil de usar también está disponible para simplificar la especificación de la zona de toma de tierra arbitraria horizontal.
- Realiza diseños automatizados con varios procedimientos, como Automático, Punto Medio, lineal, y los métodos definidos por el usuario.
- Permitir al usuario especificar si se van a utilizar varillas de puesta a tierra en el diseño.
- Calcula potenciales de tierra en lugares de suelo específicos llamados puntos de observación, que se pueden definir de forma automática o manualmente.
- Los resultados intermedios de la tierra, resistividad del terreno y los análisis de distribución de corriente de falla se incluyen como parte integral de los resultados finales a fin de comprender mejor estos resultados mediante el examen de todos los pasos involucrados en el proceso de diseño automatizado.



Ilustración 2: Interfaz del programa Auto Ground Design

Los precios para ambos programas rondan los \$5000, también presentan complementos o funciones con diferentes capacidades de análisis y por ende diferentes precios.

1.10.3. CYMGRD

El software CYMGRD diseña y analiza sistemas de puesta a tierra de subestaciones y es especialmente desarrollado para ayudar a los ingenieros a optimizar el diseño de nuevas redes y reforzar las existentes, de cualquier forma, en virtud de ser fácil de usar, y presentar una función de evaluación de puntos de peligro.

Entre las funciones que presenta CYMGRD se encuentran:

- El análisis de elementos finitos de los conductores y barras de rejilla de tierra.
- El cálculo de la resistencia de tierra de la estación (R_G) y la elevación del potencial de tierra (GPR).
- Análisis del potencial de paso y toque, dentro y fuera del perímetro de la red, con pantalla a color en la representación 2D o 3D.

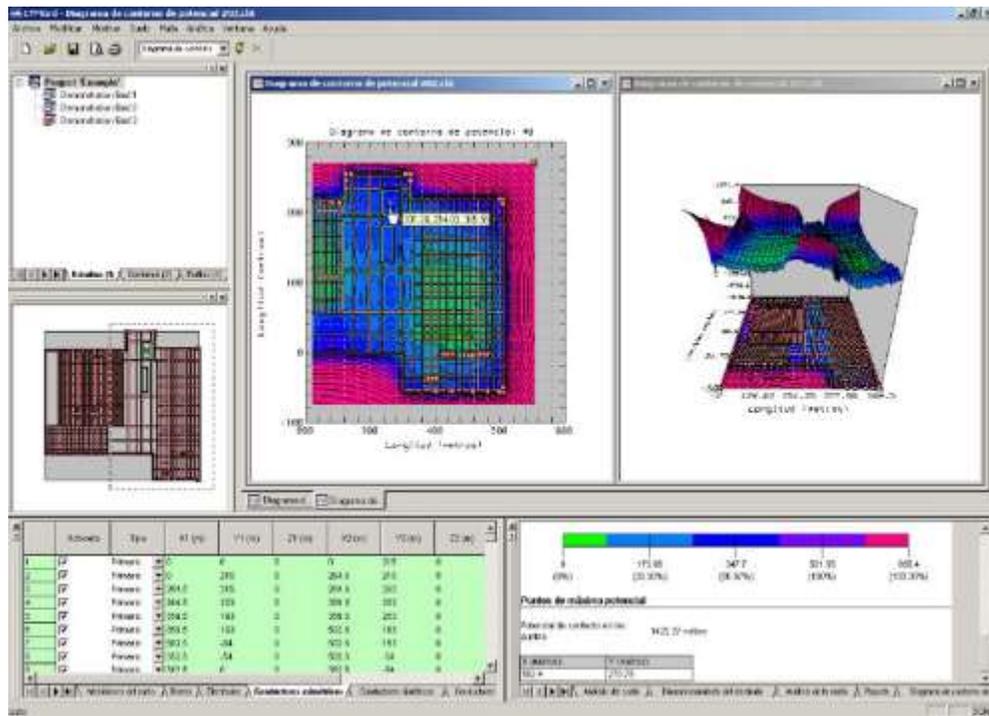


Ilustración 4: Interfaz de CYMGRD

- Análisis del modelo uniforme del suelo o de dos capas a partir de mediciones de campo o valores definidos por el usuario.
- Biblioteca de los tipos más comunes de materiales de la capa de superficie.
- Biblioteca de valores de resistividad del suelo de la estación típica.
- Cálculos de evaluación de seguridad para paso y contacto máximas tensiones admisibles según IEEE 80™ 2000.
- Cálculo del factor de división de corriente (SF) estimado a partir de los datos de configuración de la subestación según IEEE 80™ 2000.
- Cálculo del factor de decremento (DF) desde el bus (X / R) de proporción y duración de choque de datos según IEEE 80™ 2000.
- Componente DC de la corriente de falla asimétrica a tenerse en cuenta en los cálculos.
- Análisis de electrodos para el dimensionamiento óptimo de conductores y varillas basado en el tipo más común de material de electrodo según IEEE Std. 80-2000 y Std. 837-2002.
- Soporta redes simétricas o asimétricas de cualquier forma.
- Arbitrariamente ubicada varillas de tierra.
- Capacidad para modelar electrodos de retorno y electrodos diferentes.
- Capacidad para modelar barras de hormigón revestido.

- Cálculo de la máxima monofásica a la corriente de falla a tierra para una red.

1.10.4. ETAP: GROUND GRID SYSTEMS

ETAP es un software utilizado para el diseño, simulación, operación, control, optimización y automatización de la generación, transmisión, distribución de la energía eléctrica, también de los sistemas de potencia industriales. Una de sus aplicaciones es el diseño de sistemas de puesta a tierra por medio de su aplicación: Ground Grid Systems.

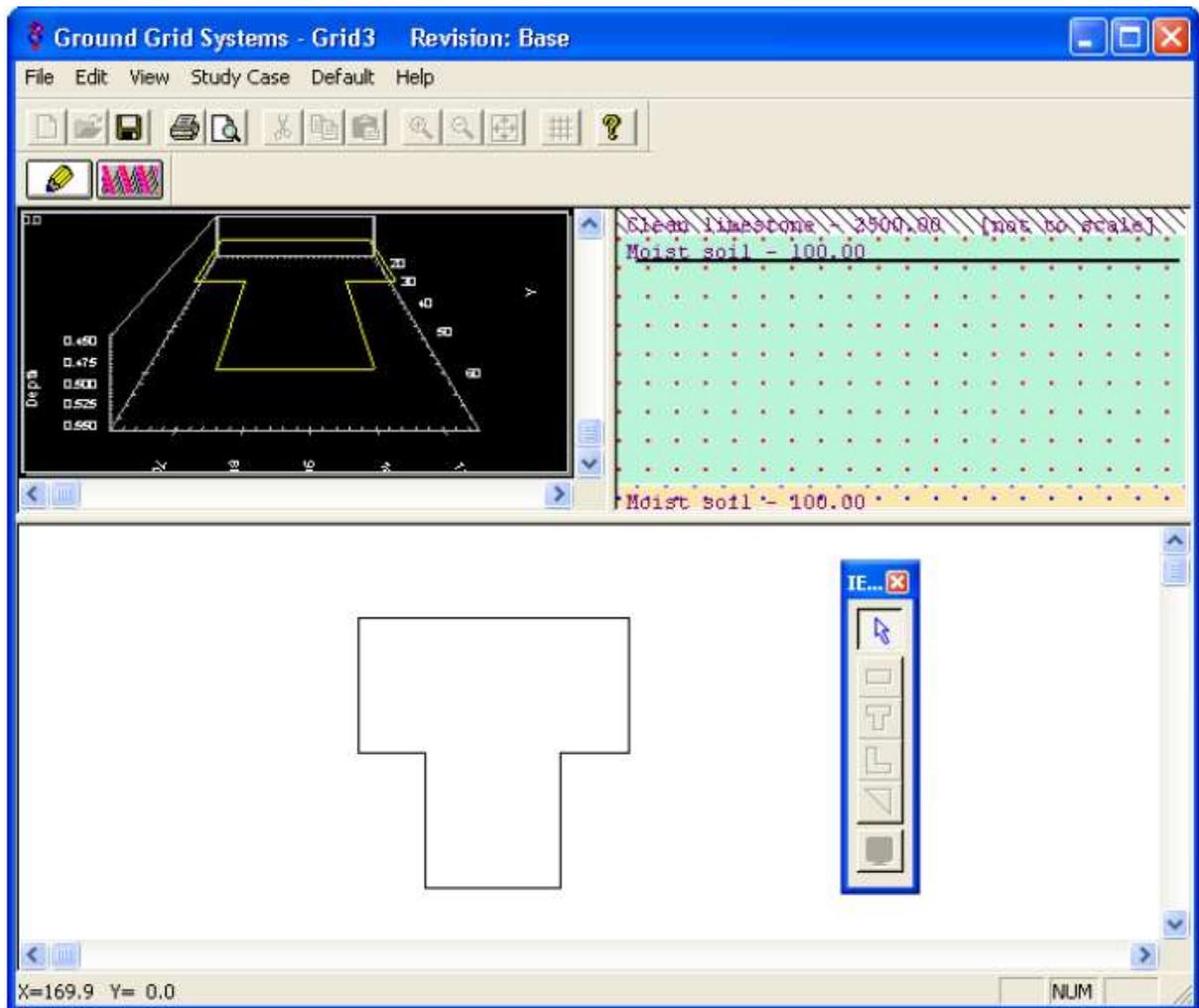


Ilustración 5: Interfaz de ETAP: Ground Grid Systems

Entra las funciones de análisis que presenta Ground Grid Systems se encuentran:

- Cálculo los potenciales de paso y toque tolerables.
- Compara potenciales calculados con los potenciales de paso y toque tolerables.
- Optimiza el número de conductores y varillas basados en el precio y la seguridad.
- Cálculo la corriente máxima permitida para conductores especificados.
- Cálculo la resistencia del sistema de tierra.
- Cálculo del aumento de potencial a tierra.
- Biblioteca de conductores.
- Permitir una configuración de suelo de dos capas, además se considera material superficial.
- Configuraciones de la red de tierra que muestran conductores y varillas.
- Cálculo de potenciales de toque y paso en cualquier punto de la cuadrícula.
- Manejo de configuraciones irregulares del terreno.

En conclusión: los programas en el mercado presentan un alto nivel de análisis, pero presentan altos precios los cuales no son accesibles para las instituciones de educación superior. Es por ello que la elaboración de un programa libre es necesaria.

CAPITULO II

ESTUDIO DEL TERRENO

ESTUDIO DEL TERRENO

2.1. DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO

El estudio del terreno permite dar a conocer las características físicas y mecánicas del suelo, es decir, la composición de las capas más profundas; así como el tipo de cimentación y los asentamientos para evitar problemas por el peso que va a soportar.

El estudio de resistividad del terreno, es esencial para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad, y es una pieza clave para determinar si el terreno es apto para llevar a cabo la construcción de la subestación o que si requiere un trato especial de mayor costo. Se define a la resistividad del terreno, como la resistencia eléctrica que este presenta ante la circulación de una corriente ya sea esta continuo de alterna. Su unidad está dada normalmente en Ω -m.

En este capítulo se describen y calculan los factores del terreno que afectan el diseño de un sistema de puesta a tierra, como lo son: La forma geométrica del terreno, el área, la resistividad, y se desarrollan los modelos con los que se pueden representar el suelo.

Se toma en cuenta también el caso en que se escoge un terreno de alta resistividad en base a otros criterios como la localidad; para estos casos, existen métodos con los cuales se pueden combatir las altas resistividades. Estos métodos son desarrollados en el presente capítulo.

2.2. TIPOS DE SUELO

2.2.1. SUELOS HOMOGÉNEOS Y HETEROGÉNEOS

Existen dos clasificaciones para los tipos de suelos:

- Suelos Homogéneos
- Suelos Heterogéneos

El suelo homogéneo consta de una capa de suelo, mientras que el heterogéneo consta de 2 o “n” capas más, donde n es un número entero. Por propósitos prácticos y de alcances, en el presente trabajo se utiliza y calcula resistividades con un máximo de 2 capas.

Típicamente los suelos son heterogéneos; es decir, presentan variaciones de la resistividad conforme varia la profundidad. En algunos casos se encuentran variaciones horizontales, aunque estas variaciones no suelen ser tan grandes comparadas con los cambios verticales. Si el suelo presenta una variación mínima con respecto a la profundidad se considera homogéneo, en caso contrario es necesario aplicar un modelo de “n” capas.

2.3. MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD

Entre los métodos para calcular la resistividad se encuentra:

- Método de Inspección o Clasificación del suelo
- Método de Wenner
- Método de Schlumberger-Palmer

2.3.1. MÉTODO DE INSPECCIÓN O CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Al estar presentes ante un suelo homogéneo, se puede tomar un criterio por simple inspección utilizando la tabla 5.

Este método no es preciso, y puede caer en un error de precisión, pero para obtener resultados prácticos y rápidos es el más factible.

| TIPO DE SUELO | RANGO DE RESISTIVIDAD (Ωm) |
|-----------------|--|
| Lama | 5 - 100 |
| Humus | 10 - 150 |
| Limo | 20 - 100 |
| Arcilla | 80 - 330 |
| Caliza fisurada | 500 - 1000 |
| Caliza compacta | 1000 - 5000 |
| Granito | 1500 - 10000 |
| Arena común | 3000 - 9000 |
| Basalto | 10000 - 20000 |

Tabla 5: Resistividades típicas de los suelos.

La tabla muestra intervalos con los cuales podemos tomar la media aritmética. El estándar IEEE 80-2013, nos presenta una tabla más simplificada.

| Clasificación del Suelo | Resistividad ($\Omega\text{-m}$) |
|-------------------------|------------------------------------|
| Tierra orgánica húmeda | 10 |
| Suelo húmedo | 10^2 |
| Suelo seco | 10^3 |
| Roca | 10^4 |

Tabla 6: Tabla simplificada del estándar IEEE 80-2013.

Para propósitos de confiabilidad, seguridad y precisión se utilizan métodos más especializados como el de Wenner. También, por el hecho que comúnmente los suelos no son homogéneos y es necesario determinar la resistividad de capas profundas.

2.3.2. MÉTODO DE WENNER

El método más popular es el de Wenner, el cual consiste en enterrar cuatro electrodos a una profundidad "b" y espaciados a una misma distancia "a". El método consiste en inyectar corriente que puede ser continua o a cierta frecuencia mientras se realiza la medición del voltaje entre los pines internos. Luego aplicando la relación de voltaje entre corriente se obtiene la resistencia de la porción de suelo estudiada y con la formula siguiente es posible determinar la resistividad del suelo.

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (34)$$

Donde:

ρ_a Es la resistividad aparente en Ωm

R Es la resistencia medida en Ω

a Es la distancia entre los electrodos en m

b Es la profundidad de enterramiento de los electrodos en m

Si b es un valor pequeño comparado con a la ecuación puede ser reducida a:

$$\rho = 2\pi a R \quad (35)$$

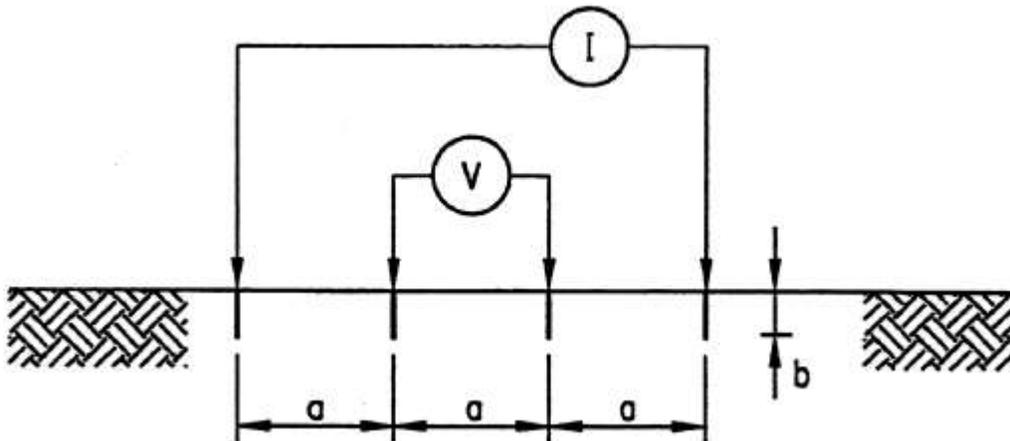


Fig. 5: Método de Wenner.

Si la variación en las mediciones de resistividad presenta grandes fluctuaciones o sugieren resistividades que puedan acusar tensiones inseguras, se recomienda que se realicen una mayor cantidad de mediciones.

2.3.2.1. VENTAJAS DEL MÉTODO DE WENNER

- Obtiene la resistividad del suelo de capas profundas sin la necesidad de que los electrodos lleguen a tales profundidades.
- No es necesario equipo pesado.
- Los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos o los orificios creados en el suelo.

2.3.2.2. EJEMPLO PRÁCTICO DEL MÉTODO DE WENNER

Se decide realizar una medición de resistividad del suelo en el predio baldío de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador. Para la medición de resistividad de suelo se aplica el método de cuatro puntos arreglo Wenner disponiendo los electrodos como se muestra en la figura 6.

Aplicando la ecuación 35, se obtienen los siguientes resultados:

| Espaciamiento [m] | ρ_a [Ωm] |
|-------------------|-------------------------|
| 1 | 102.8 |
| 2 | 95.49 |
| 3 | 93.05 |
| 4 | 95.24 |
| 5 | 97.91 |
| 6 | 98.98 |
| 7 | 100.48 |
| 8 | 99.42 |
| 9 | 98.07 |

Tabla 7: Puntos de resistividad aparente obtenidos en predio baldío UES.

2.3.3. MÉTODO DE SCHLUMBUGER-PALMER.

Otro método es el de Schlumberger-Palmer el cual es una versión del método de Wenner en el cual los electrodos están enterrados a una profundidad “b” pero no están igualmente espaciados. Este método proporciona mejor sensibilidad para un largo espaciamiento.

2.4. ESTÁNDAR IEEE 81-2012

El estándar IEEE 81-2012 es una Guía para la Medición de la resistividad, la impedancia y los potenciales de superficie de un Sistema de Puesta a Tierra, al contrario del estándar IEEE 80, la IEEE 81 profundiza en estos temas de medición tomando como criterio la seguridad. Se

recomienda estudiar el estándar IEEE 81 para una mejor comprensión y mayor conocimiento en el área de las mediciones de sistemas de puesta a tierra.

2.5. MODELO UNIFORME DEL SUELO

Cuando se realizan mediciones de la resistividad del terreno y los valores no presentan cambios significativos, se puede usar un valor promedio para la resistividad del suelo, como una primera aproximación o para establecer el orden de magnitudes. La resistividad aproximada para un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en varios sitios y direcciones dentro del suelo, así:

$$\rho_{a\text{ prom}} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_3 + \dots + \rho_{an}}{n} \quad (36)$$

Donde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_3 + \dots + \rho_{an}$ Son resistividades aparentes medidas a diferentes espaciamientos siguiendo el método de Wenner

n Es el número total de medidas tomadas

Pero la mayoría de los suelos no reúnen este criterio, ya que en la práctica la resistividad de los suelos varía significativamente. En lugar del promedio aritmético, también puede emplearse la distribución normal para obtener la resistividad aparente del suelo. Como guía general, un suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de las resistividades medidas es menor del 30%.

2.5.1. EJEMPLO PRÁCTICO

Utilizando los datos obtenidos de la tabla 7 se concluye que el suelo puede ser considerado homogéneo ya que no existen variaciones significativas mayores al 30%; Por lo tanto aplicando la ecuación 36, se obtiene una resistividad del suelo de: 97.93 Ωm .

2.6. MODELO DE DOS CAPAS DEL SUELO

Cuando las mediciones presentan una gran variación o diferencia entre sus valores extremos, es recomendable utilizar un modelo de dos capas. El modelo de suelo de dos capas puede ser calculado por el método gráfico de Sunde.

2.6.1. MÉTODO GRÁFICO DE SUNDE

Un modelo de suelo de dos capas puede representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita.

En muchos casos, la representación de un electrodo de tierra basado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema seguro de puesta a tierra. Un modelo de suelo de dos capas puede aproximarse empleando el método gráfico de Sunde. Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por inspección de las medidas de resistividad. Solamente H es obtenido por el método de Sunde, como sigue:

- Dibujar el gráfico ρ_a vs. a .
- De la gráfica anterior se estiman ρ_1 y ρ_2 , extendiendo el gráfico en ambos extremos para obtener los valores de resistividad si los datos de campo son insuficientes.
- Determinar ρ_2/ρ_1 y seleccionar una curva del gráfico de la figura 6, o interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.
- Seleccionar el valor de ρ_a/ρ_1 sobre el eje Y dentro de la región pendiente de la curva ρ_2/ρ_1 apropiada.
- Leer el valor correspondiente a/h sobre el eje X.
- Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado ρ_a/ρ_1 por ρ_1 .
- Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de ρ_a vs. a . Calcular la profundidad del nivel superior h usando la separación de prueba apropiada a .

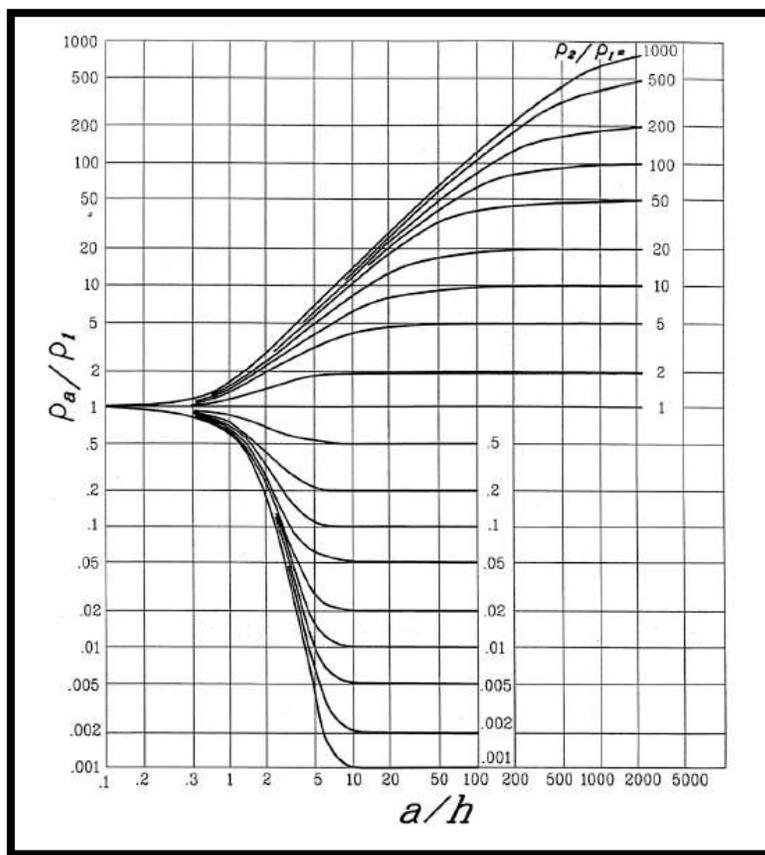


Fig. 6. Gráfico de Sunde.

2.6.1.1.EJEMPLO PRÁCTICO

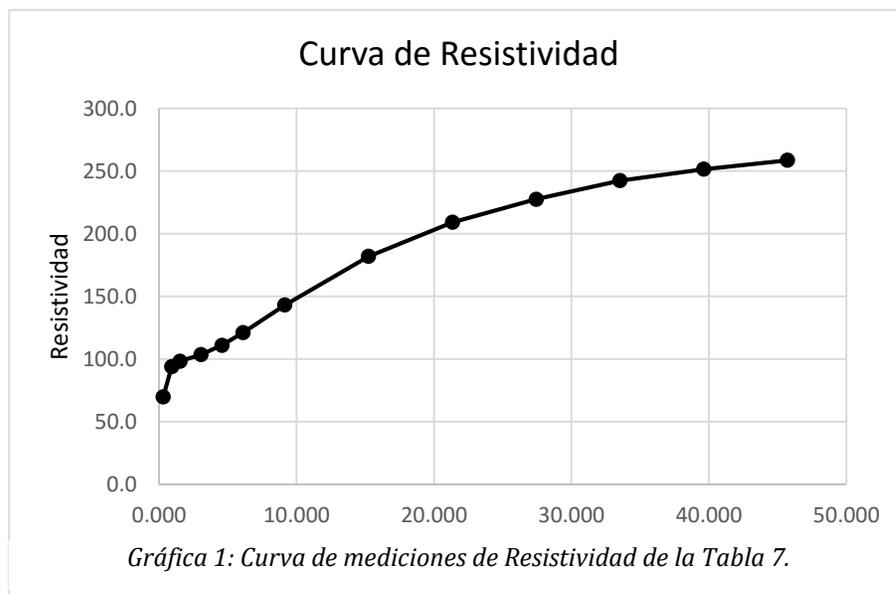
En la tabla de mediciones con las resistividades aparentes y la separación de los electrodos utilizados en el método de Wenner.

| Espaciamento (m) | Resistividad Aparente ($\Omega \cdot m$) |
|------------------|--|
| 0.305 | 69.8 |
| 0.915 | 93.8 |
| 1.524 | 98.2 |
| 3.048 | 103.4 |
| 4.573 | 110.9 |
| 6.098 | 121.0 |
| 9.146 | 143.1 |
| 15.244 | 181.9 |
| 21.341 | 209.1 |
| 27.439 | 227.5 |
| 33.537 | 242.3 |
| 39.634 | 251.5 |
| 45.731 | 258.5 |

Tabla 8: Mediciones de Resistividad Aparente con el método de Wenner

Se grafican los datos y se escogen arbitrariamente valores extremos de resistividad ρ_1 y ρ_2 .

Ejemplo: $\rho_1 = 100\Omega m$ $\rho_2 = 300\Omega m$.



Se obtiene ρ_2/ρ_1 , y con este dato se toma una curva de la gráfica de Sunde (Fig. 7) o se interpola para obtener la curva si no existe. Ejemplo: $\rho_2/\rho_1=3$ (se interpola)
 Ahora Seleccionamos un valor de ρ_a/ρ_1 que se encuentre en el punto medio de la inclinación que presenta la curva seleccionada en el paso anterior. (Ver figura 7, $\rho_a/\rho_1 = 2$).

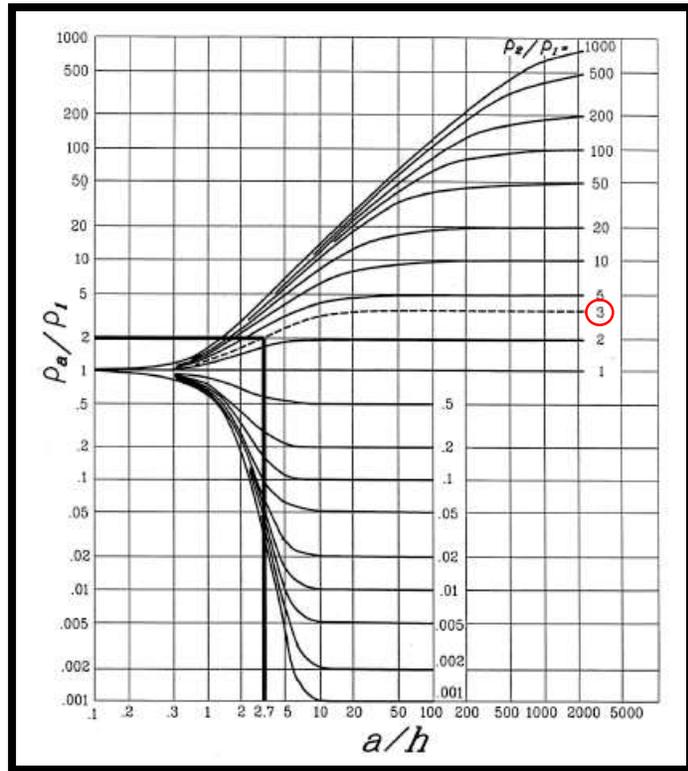


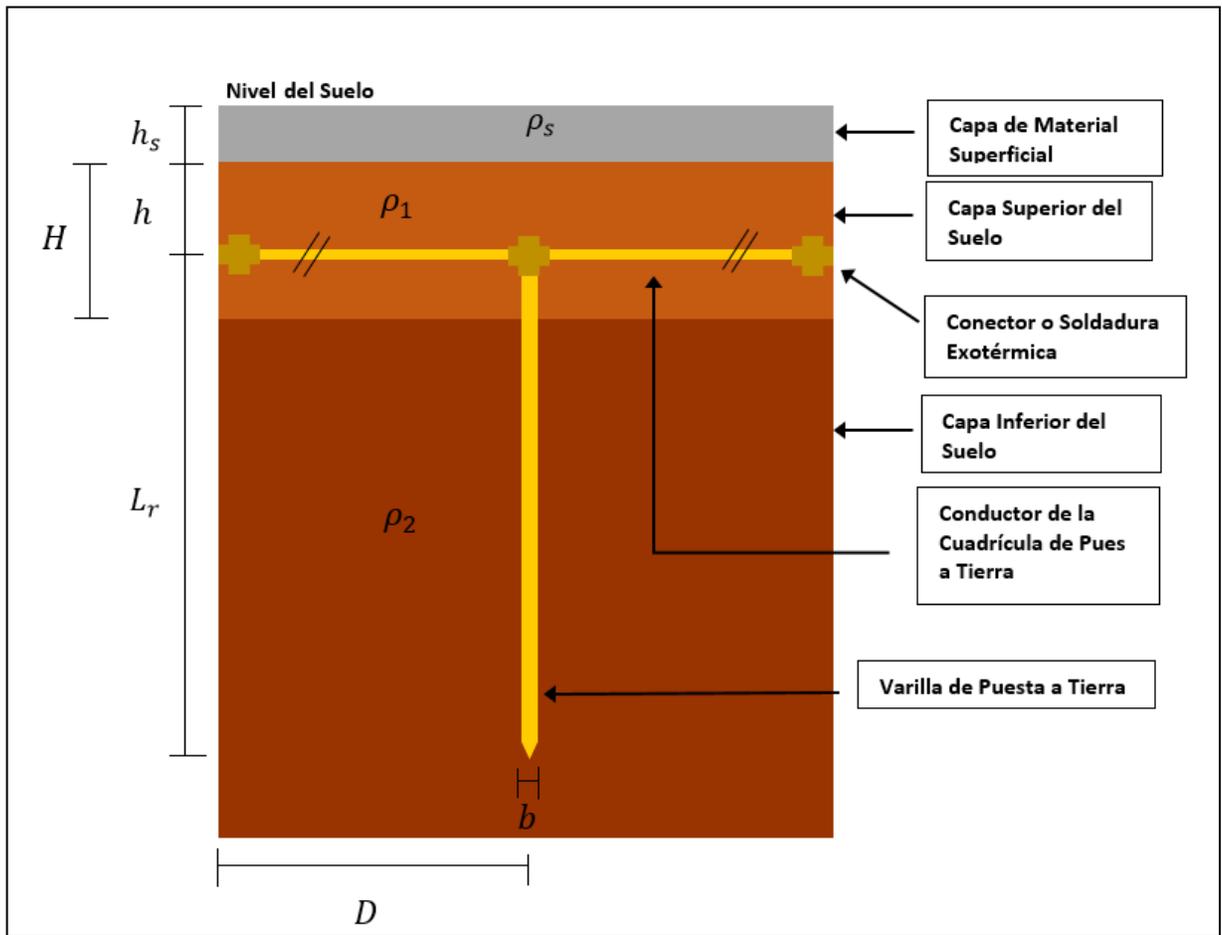
Fig. 7: Gráfica de Sunde con interpolación para la curva $\rho_2/\rho_1=3$

Obtenemos con el valor de ρ_a/ρ_1 , el valor de a/h en el eje x. Ejemplo: $a/h = 2.7$ (Ver figura 7). Ahora se calcula ρ_a , donde: $\rho_a/\rho_1 = 2 \rightarrow \rho_a = 2(100) = 200$. Con el valor de ρ_a se obtiene “a” de la gráfica 1, por lo tanto $a = 19$

Y se procede a calcular H, donde H es la profundidad de la capa superior del terreno.

$$H = \frac{a}{(a/h)} = \frac{19}{2.7} = 7m$$

Con lo cual se obtiene un modelo del terreno de dos capas con una $\rho_1 = 100\Omega m$, $\rho_2 = 300\Omega m$ y $H = 7m$. (Ver figura 8).



2.7. GEOMETRÍA DE LA RED DE TIERRA

La Geometría del terreno puede ser: Cuadrada, Rectangular, en forma de L o amorfa. La limitante de una figura amorfa es que no puede ser extremadamente delgada en su parte central.

Para el diseño de un sistema de puesta a tierra la forma geométrica del terreno está relacionada directamente con el cálculo del Voltaje de Malla E_m .

Esto se logra apreciar en el cálculo del factor geométrico K_m [Ecuación 15], que se utiliza para calcular el Voltaje de Malla E_m [Ecuación 14].

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

Donde, K_{ii} depende inversamente proporcional en una forma potencial a n

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

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$$

Si tomamos diseños con iguales configuraciones de cuadrículas y la misma área, se concluye que n varía en el orden de las centésimas entre cada forma geométrica posible. Por lo tanto, podemos elegir entre cualquier figura geométrica tomando en cuenta la que mejor se adapte a la forma del terreno. Lo que se debe asegurar es tener un valor alto de n , ya que para el cálculo de k_{ii} , n es inversamente proporcional de una manera potencial. Como diseño básico y valor mínimo, n debe ser mayor e igual a 1.

$$n \geq 1 \quad (48)$$

Si no, tendremos valores altos de K_{ii} y por lo tanto del Voltaje de Malla E_m , dando como resultado un diseño inseguro de un sistema de puesta a tierra.

2.8. EFECTO DE LA HUMEDAD, LA TEMPERATURA Y EL CONTENIDO QUÍMICO DEL SUELO EN LA RESISTIVIDAD

La conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica. Por esta razón la resistividad de la mayoría de suelos se eleva abruptamente cuando el contenido de humedad es menor al 15% del peso del suelo. La cantidad de humedad adicional depende del tamaño de grano, compacidad, y la variabilidad de los tamaños de grano. Sin embargo, como se muestra en la curva 2 de la figura 9, la resistividad es poco afectada una vez el contenido de humedad es superior a aproximadamente 22%.

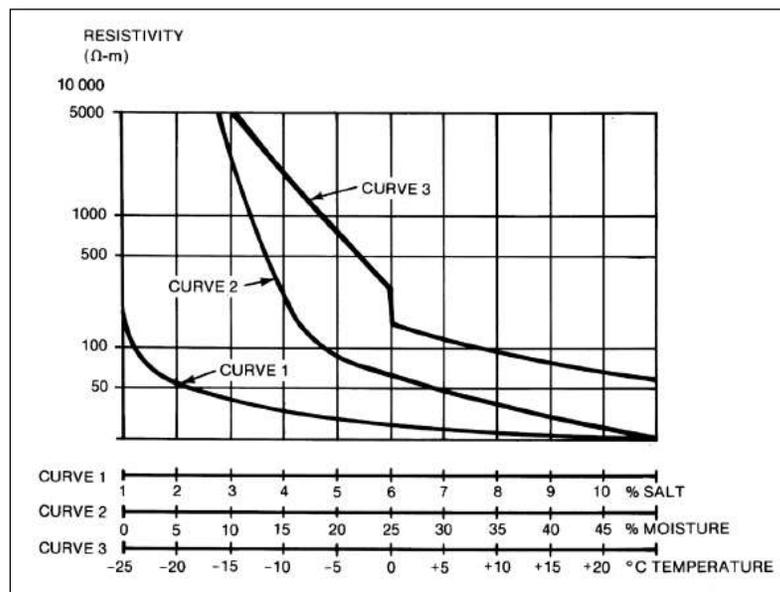


Fig. 8: Curvas de los efectos de la temperatura, la humedad y la sal.

El efecto de la temperatura sobre la resistividad del terreno es casi insignificante para temperaturas por encima del punto de congelación. A 0°C, el agua en el suelo comienza a congelarse y la resistividad aumenta rápidamente. La curva 3 muestra esta variación típica de un suelo franco arenoso que contiene 15,2% de humedad en peso.

La composición y la cantidad de sales solubles y ácidos presentes en el suelo pueden afectar considerablemente su resistividad. La curva 1 de la figura 9 ilustra un efecto típico de sal (cloruro sodio) en la resistividad de un suelo que contiene 30% de humedad en peso.

La Figura 9 no se debe utilizar para los propósitos de cálculo. Para determinar la resistividad real del suelo, pruebas tales como las descritas en el estándar IEEE 81 se deben realizar en el sitio.

2.9. TRATAMIENTO DEL SUELO PARA OBTENER UNA RESISTIVIDAD MAS BAJA

Con frecuencia, es imposible obtener la reducción deseada de resistencia de tierra agregando más conductores o más varillas de tierra a la malla. Una solución alternativa es incrementar de manera efectiva el diámetro de los electrodos, modificando el suelo alrededor del electrodo. Los métodos más conocidos son los siguientes:

- El uso de bentonita, una arcilla natural que contiene montmorillonita, que se formó por acción volcánica hace mucho tiempo, y es un elemento no corrosivo, estable y tiene una resistividad de 2.5 Ω -m al 300% de humedad. Es de naturaleza higroscópica.
- El uso de sales como cloruro de sodio, magnesio y sulfatos de cobre, o cloruro de calcio, para incrementar la conductividad del suelo alrededor del electrodo. Pero estas sales emigran a otras áreas.
- El uso de electrodos de tipo químico que constan de un tubo de cobre relleno de una sal. Los agujeros en el tubo permiten la entrada de humedad, disolver las sales y permitir que la solución de sal se filtre en la tierra.
- Materiales artificiales de tierra, de baja resistividad colocados alrededor de las varillas y de los conductores en la zanja.
- Electrodos revestidos de concreto, donde el concreto por ser un material higroscópico y que atrae la humedad, al ser enterrado en el suelo se comporta como un semiconductor mediano con resistividades de 30 a 90 Ω -m, pero facilita la corrosión.

CAPITULO III

Criterios de Diseño y Seguridad
utilizando IEEE 80-2013

3.1. DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO

A continuación se presenta una descripción de los criterios de diseño de sistemas de puesta a tierra (SPT) con el algoritmo propuesto en IEEE 80-2013. Como se ha mencionado un sistema de puesta a tierra debe instalarse para limitar los gradientes de potencial de tierra a niveles de tensión y corriente para que no pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla.

3.2. CRITERIO DE VOLTAJES TOLERABLES

La seguridad de una persona depende de la prevención de cantidades críticas de energía de choque absorbidas por el cuerpo humano antes de que la falla sea despejada y el sistema desenergizado. Es por ello que se calculan límites para los voltajes máximos tolerables los cuales son:

- Voltaje de Toque (E_{touch})
- Voltaje de Paso (E_{step})

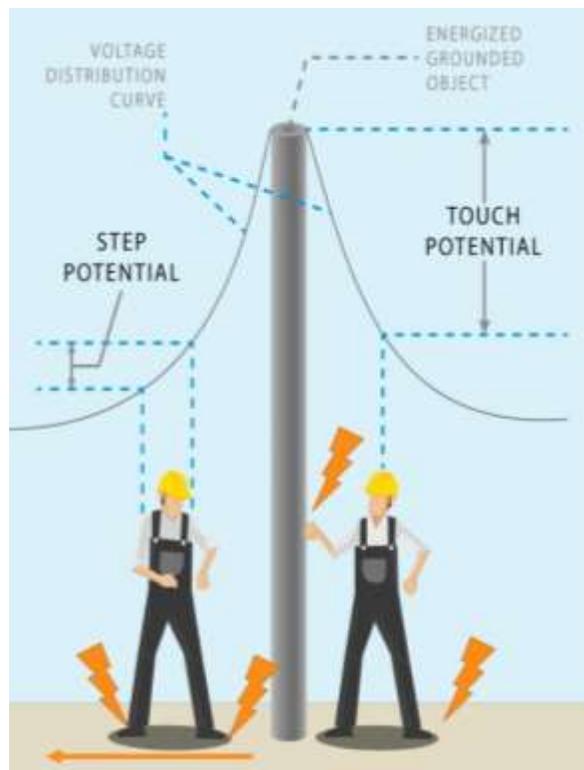


Fig. 9: Representación gráfica de los voltajes de Paso y Toque en una instalación eléctrica.

3.2.1. VOLTAJE DE PASO TOLERABLE

Es la parte de la tensión de puesta a tierra que puede ser puenteadada por un ser humano entre los dos pies, considerándose el paso de una longitud de 1 metro" aunque resulta más intuitivo el facilitado por el estándar IEEE 80-2013, al destacar la ausencia de la persona en su definición: "La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asimila a un metro, en la dirección del gradiente de potencial máximo".

En la figura 11, se muestra el circuito equivalente de la diferencia de tensión de un paso o contacto entre pies.

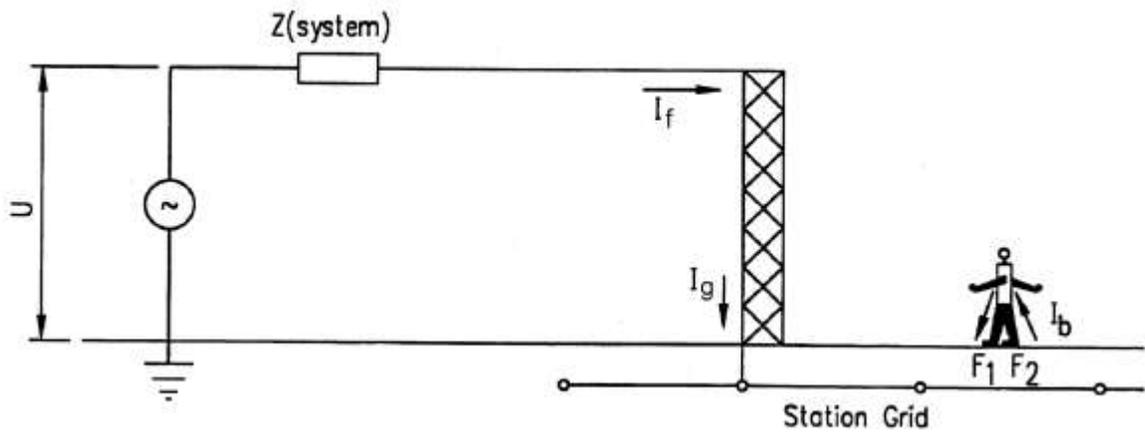


Fig. 10: Representación gráfica detallada del voltaje de paso.

El voltaje tolerable de paso, correspondiente a un individuo con peso corporal de 50kg y 70kg, E_{step50} y E_{step70} respectivamente está dada por la ecuación 49 y 50:

$$E_{step50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (49)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (50)$$

3.2.2. VOLTAJE DE TOQUE TOLERABLE

Es la fracción de la tensión de puesta a tierra que puede ser puenteadada por una persona entre la mano y el pie (considerando un metro) o entre ambas manos", aunque, a semejanza de la de paso, resulta también más intuitiva la proporcionada por el estándar IEEE 80-2013, que dice así:

La tensión de contacto es la diferencia de potencial entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia igual a la distancia horizontal máxima que se puede alcanzar, o sea, aproximadamente, 1 metro".

En la figura 12, se muestra el circuito equivalente de la tensión de contacto.

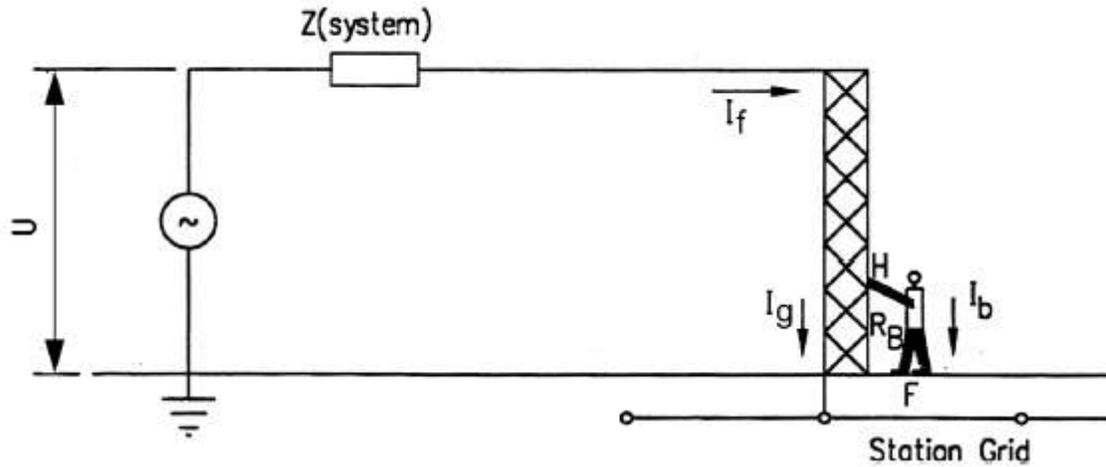


Fig. 11: Representación gráfica detallada del voltaje de toque

El voltaje tolerable de toque, correspondiente a un individuo con peso corporal de 50kg y 70kg $E_{touch50}$ y $E_{touch70}$, respectivamente, está dada por la ecuación 51 y 52:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (51)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (52)$$

3.2.3. RESISTENCIA PROMEDIO DEL CUERPO HUMANO

Tanto para las tensiones de paso y de toque se debe tener en cuenta el valor estándar de la resistencia del cuerpo humano:

$R_B = 1000\Omega \rightarrow$ Resistencia promedio del cuerpo humano.

$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \rightarrow$ Corriente tolerable por el cuerpo en función del tiempo (A)

$t_s \rightarrow$ Corriente tolerable por el cuerpo en función del tiempo (A)

$6 \cdot C_s \cdot \rho_s = 2R_f \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies separados 1m en serie sobre la capa superficial.

$1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s = \frac{R_f}{2} \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies juntos en serie sobre la capa superficial.

$R_B = \rho/4b \rightarrow$ Resistencia a tierra de un disco metálico de radio b (b = 0.08 m) sobre la superficie de una malla homogénea de resistividad ρ .

$C_s \rightarrow$ Factor de disminución de la capa superficial calculada con la ecuación (17).

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad del material de la capa superficial en Ω -m.

3.3. CALCULO DE VOLTAJES DE PASO Y MALLA REALES

Este cálculo se encuentra detallado en la sección 1.8.4, paso 8.

3.4. RESISTIVIDAD Y ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL

Para el diseño de la malla de puesta a tierra de una subestación la inclusión de una capa de piedra en la superficie del terreno ayudará a que las tensiones de toque y paso tolerables aumenten, limitando la corriente que pasaría por el cuerpo humano ya que la capa agrega una resistencia a la del promedio del cuerpo. La actualización del estándar IEEE 80-2013, da la importancia a la capa superficial para obtener una red de tierra segura en lugar de bajos valores de R_g .

Una capa superficial con un espesor (h_s) entre $0.08\text{m} \geq h_s \geq 0.15\text{m}$ de un material de alta resistividad como la grava o la roca volcánica triturada, colocada sobre la superficie más arriba de la malla, incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación y la corriente por el cuerpo bajará considerablemente. La reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo en contacto con la malla, y del espesor y material de la capa superficial.

La capa superficial también es útil para retardar la evaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. Una capa con un espesor entre

0.1m y 0.15m, disminuye el factor de riesgo (relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de cortocircuito) a una relación 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra.

3.4.1. MATERIALES TÍPICOS PARA LA CAPA SUPERFICIAL

El estándar IEEE 80-2013 presenta una tabla de materiales típicos para la capa superficial en dos condiciones: seco y húmedo.

| Material Superficial | Resistividad (Ωm) | |
|--|-----------------------------------|--------|
| | Seco | Húmedo |
| Grava general | 2,000,000 | 2500 |
| Crusher run granite (NC) | 140,000,000 | 1300 |
| 0.04 m crusher run granite (GA) | 4,000 | 1200 |
| 0.02 to 0.025 m granite (CA) | 1,000,000 | 6513 |
| No. 4, 0.025 to 0.05 m washed granite (GA) | 1,500,000 | 5000 |
| No.3, 0.05 to 0.1 m washed granite | 2,600,000 | 10000 |
| Washed limestone (I) | 7,000,000 | 2000 |
| Washed granite, similar to 0.02 m gravel | 2,000,000 | 10000 |
| Washed granite, similar to pea gravel | 40,000,000 | 5000 |
| No. 57, 0.02 m washed granite (NC) | 190,000,000 | 8000 |
| Asfalto | 2,000,000 | 10000 |
| Concreto | 1,000,000 | 21 |

Tabla 9: una tabla de materiales típicos para la capa superficial

3.4.2. EFECTO DE REDUCCION DE CORRIENTE A TRAVES DEL CUERPO POR LA CAPA SUPERFICIAL

Si la resistividad de la capa superficial es mucho mayor que la resistividad del terreno la corriente a través del cuerpo será considerablemente menor comparado al caso donde no se coloca una capa superficial. Esto se debe al incremento de la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas. Este efecto de reducción por una capa superficial de mayor resistividad que la resistividad del suelo puede ser representado por el factor:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (54)$$

El factor C_s está relacionado con la seguridad, ya que afecta directamente los cálculos de los límites de voltajes de toque y paso. Es decir, que si colocamos una capa de grava,

los valores límites de voltajes tolerables aumentaran considerablemente debido al aumento de la resistencia de contacto, de no ser así, los valores limites solo dependen del tiempo en que las protecciones son coordinadas. Esto se debe a que si no existe una capa de grava la resistividad $\rho_s = 0$.

| | $E_{touch70}$ | E_{step70} |
|---------------------------------|--|--|
| Sin Material Superficial | $E_{touch70} = (1000) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$ | $E_{touch70} = (1000) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$ |
| Con Material Superficial | $E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$ | $E_{touch70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$ |

Tabla 10: Comparación entre ecuaciones de voltaje tolerables con y sin capa superficial.

El factor C_s tiene las siguientes características:

| | Si | Entonces |
|------------------|-----------|-----------------|
| Deseable | $C_s < 1$ | $\rho < \rho_s$ |
| Mínimo | $C_s = 1$ | $\rho = \rho_s$ |
| No Aplica | $C_s > 1$ | $\rho > \rho_s$ |

Tabla 11: Comportamiento de C_s resultado de la comparación entre la resistividad de la capa superficial y el terreno.

Por lo tanto para un diseño seguro, el mínimo valor de $C_s = 1$. Y esto se obtiene teniendo: $\rho = \rho_s$

3.5. ELEVACION DEL POTENCIAL DE PUESTA A TIERRA (GPR)

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

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (53)$$

EL GPR según SIGET en el acuerdo 29-E-2000 debe ser menor a 5,000V para definir un sistema de puesta a tierra como seguro.

3.6. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Un buen sistema de puesta a tierra proporciona una resistencia baja a una tierra remota, con el fin de minimizar riesgos eléctricos al controlar la elevación del potencial de tierra (GPR).

El acuerdo 29-E-2000, para garantizar valores seguros en las subestaciones, establece los valores de (R_g) en función de su capacidad de potencia y se encuentran en la tabla 12.

| Capacidad de la Subestación (MVA) | Resistencia de la Red de Tierra (Ohm) |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| ≤ 0.05 | 12 |
| 0.05 - 0.1 | 6 |
| 0.1 - 0.5 | 2 |
| 0.5 - 1 | 1.5 |
| 1 - 50 | 1 |
| 50 - 100 | 0.5 |
| > 100 | 0.2 |

Tabla 12: Valores máximos permitidos de Resistencia de Red de Tierra (R_g) de una subestación en función de su capacidad.

3.6.1. CÁLCULO SIMPLIFICADO (SVERAK)

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

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (54)$$

Dónde:

- L Longitud total de conductores enterrados en m.
- T Longitud total de conductores enterrados en m.
- ρ Resistividad del terreno Ω -m.
- A Área ocupada por la malla de tierra m².
- H Profundidad de la malla en m.

Esta ecuación es muy útil en cuadrículas sin varillas de puesta a tierra.

3.6.2. ECUACIONES DE SCHWARZ PARA SUELO HOMOGÉNEO

El cálculo de la resistencia a tierra es recomendable hacerlo con la ecuación más exacta que presenta el estándar: La ecuación de Schwarz.

Para suelo homogéneo:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (55)$$

Donde: a es el radio del conductor de la cuadrícula y b es el radio de la varilla.

$$a' = \sqrt{a \cdot 2h} \quad (56)$$

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (57)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (58)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (59)$$

Los valores de k_1 y k_2 se calculan por medio de las siguientes ecuaciones dependiendo del valor de la profundidad (h).

Para k_1 :

h con un valor cercano a cero:

$$k_1 = -0.04x + 1.41 \quad (60)$$

h con un valor cercano a $\frac{1}{10}\sqrt{A}$:

$$k_1 = -0.05x + 1.20 \quad (61)$$

h con un valor cercano a $\frac{1}{6}\sqrt{A}$:

$$k_1 = -0.05x + 1.13 \quad (62)$$

Para k_2 :

h con un valor cercano a cero:

$$k_2 = 0.15x + 5.50 \quad (63)$$

h con un valor cercano a $\frac{1}{10}\sqrt{A}$:

$$k_2 = 0.10x + 4.68 \quad (64)$$

h con un valor cercano a $\frac{1}{6}\sqrt{A}$:

$$k_2 = 0.05x + 4.40 \quad (65)$$

Donde $x = \text{Largo/Ancho}$ de la Subestación.

3.6.3. ECUACIONES DE SCHWARZ PARA SUELO DE DOS CAPAS

Para el cálculo de resistencia en un modelo de dos capas podemos emplear el método de Schwarz. En las ecuaciones que siguen, las expresiones para R1, R2 y Rm se han modificado, para tener en cuenta esta situación.

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (66)$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2 \pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (67)$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (68)$$

Donde:

$$\rho_a = \frac{L_r \rho_1 \rho_2}{\rho_2 (H - h) + \rho_1 (L_r + h - H)} \quad (69)$$

Esta resistividad es la vista por el sistema de puesta a tierra compuesto por una malla horizontal y varillas verticales de tierra.

3.7. PARAMETRO CRÍTICOS

3.7.1. CORRIENTE DE FALLA SIMÉTRICA

Por razones prácticas se recomienda hallar los siguientes tipos de falla, aunque generalmente será una falla monofásica.

- Falla línea - línea - tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$I_f = 3I_0 = \frac{3E \cdot X_2}{X_1(X_0 + X_2) + (X_2 \cdot X_0)} \quad (66)$$

- Falla línea – tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$I_f = 3I_0 = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (67)$$

Donde:

I_0 → Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla en A.

E → Tensión fase – neutro RMS en V.

Z_1 → Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla.

Z_2 → Impedancia equivalente de secuencia (-) del sistema en el punto de falla.

Z_0 → Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla.

En una ubicación dada, una falla simple línea – tierra será la de mayor valor si $Z_1 \cdot Z_0 > (Z_2)^2$ en el punto de la falla y una falla línea – línea – tierra será la peor si $Z_1 \cdot Z_0 < (Z_2)^2$, es común que en un sistema dado $Z_1 = Z_2$. Desde el punto de vista de seguridad de las personas y la calidad de energía, es conveniente que se limiten los valores de corriente de falla (Trifásica y monofásica)

3.7.2. FACTOR DE DECREMENTO (D_f)

En el diseño de la malla a tierra, se debe considerar la corriente asimétrica de falla, la cual resulta de multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento, que a su vez está dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad (68)$$

Donde:

t_f → Duración de la falla en s.

T_a → Constante de tiempo de la componente DC.

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{2\pi R} \quad (69)$$

X, R → Componentes de la impedancia subtransitoria de falla que se usan para determinar la relación X/R.

3.7.3. CÁLCULO DEL FACTOR DE DIVISIÓN DE CORRIENTE (S_f)

El proceso de cálculo consiste en derivar una representación equivalente de los cables de guarda, neutros, etc. Esto es, conectarlos a la malla en la subestación y luego resolver el equivalente para determinar qué fracción de la corriente total de falla fluye entre la malla y la tierra circundante, y qué fracción fluye a través de los cables de guarda o neutros hacia la tierra. S_f depende de:

- Localización de la falla.
- Magnitud de la resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación.
- Cables y tubos enterrados en las vecindades de la subestación o directamente conectados al sistema de puesta a tierra.
- Cables de guarda, neutros u otras trayectorias de retorno por tierra.
- Líneas de transmisión y alimentadores de la subestación; cantidad, número de cables de guarda y la impedancia de cada uno; cantidad y resistencia de puestas a tierra; longitud de líneas de transmisión y alimentadores; material y calibre de cables de guarda y neutros.

Existe una serie de desarrollos matemáticos, curvas y tablas que permiten encontrar el valor de S_f . En el presente trabajo y para la implementación en el programa se utiliza el método gráfico.

3.7.3.1. MÉTODO GRÁFICO PARA EL CÁLCULO DE S_f

Este método gráfico está basado en los resultados obtenidos usando el programa EPRI TR-100622. El método correlaciona la corriente de falla de secuencia cero de la subestación, obtenida a partir de un estudio de cortocircuito estándar, con la corriente real que fluye entre el sistema de puesta a tierra y la tierra circundante.

Las gráficas se dividen en 4 categorías:

- Categoría A: 100% remota y 0% local, esto se refiere a la contribución de la corriente de falla. Con X líneas de Transmisión y Y Alimentadores.
- Categoría B: 75% remota y 25% local.
- Categoría C: 50% remota y 50% local.
- Categoría D: 25% remota y 75% local.

La ventaja principal de este método es su facilidad, ya que se evita un análisis de cortocircuito que puede ser complejo si no se tiene la herramienta informática necesaria.

3.7.3.2. EJEMPLO DEL MÉTODO GRÁFICO PARA EL CÁLCULO DE Sf

En una subestación de 13.2kV de maniobra con 1 línea transmisión y 4 alimentadores se desea encontrar el factor de división de corriente si la Resistencia de puesta a tierra (R_g) es de 1Ω y los sistemas de puesta a tierra de las torres anexas son de buena calidad.

Solución:

Al ser una subestación de maniobra no presenta dispositivos generadores de corrientes de falla como por ejemplo: motores. Entonces se considera una contribución 100% remota. Si las torres que transportan los cables de subtransmisión tienen puestas a tierra de buena calidad, se considera la gráfica de 15Ω y 25Ω . El número de líneas de transmisión es 1. El número de alimentadores es de 4. Y la resistencia de puesta a tierra es de 1Ω .

En la figura 13, tomamos la curva que representa a 1 línea de transmisión y 4 alimentadores. Luego utilizando el valor de la resistencia de puesta a tierra, recorremos el eje "y" hasta intersectar la curva $1/4$. Al intersectar recorremos en el eje "x" y leemos el valor de % total de corriente en la cuadrícula. El factor Sf para este ejemplo se calcula:

$$S_f = \frac{26\%}{100\%} = 0.26$$

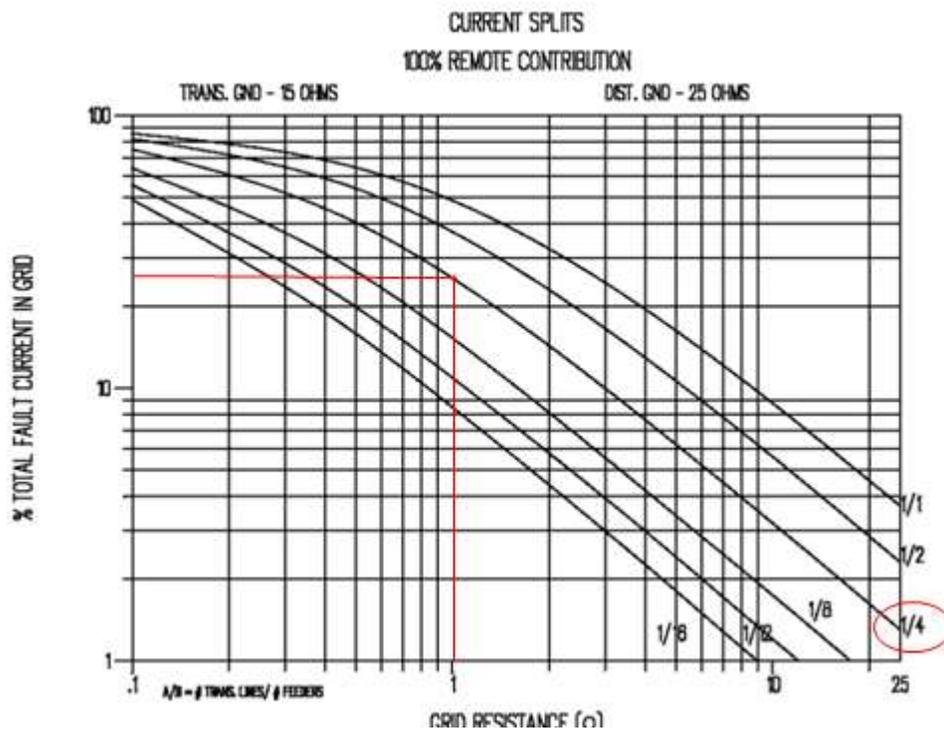


Fig. 12: Curva para el cálculo de Sf: 100% de contribución, en buen estado

3.7.4. CORRIENTE MÁXIMA DE CUADRÍCULA MALLA (I_G)

El valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra (corriente asimétrica) que fluye a través de la malla de la subestación hasta la tierra circundante está dado por:

$$I_G = I_f \cdot D_f \cdot S_f \quad (70)$$

3.7.5. DURACIÓN DE LA FALLA (t_f) Y DURACIÓN DEL CHOQUE (t_s)

La duración de la falla y la duración del choque normalmente se asumen iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de choques sucesivos, como los producidos por los recierres automáticos de los reclosers. La selección de t_f puede reflejar tiempos de despeje rápidos de la subestación de transmisión y tiempos de despeje lentos para subestaciones de distribución e industriales. La selección de t_f y t_s puede resultar en la combinación más pesimista de factores de decremento de corrientes de falla y corrientes permitidas por el cuerpo humano. Valores típicos para t_f y t_s están en el rango de 0.25 s a 1 s.

3.7.6. GEOMETRIA Y DISEÑO DE LA CUADRÍCULA

Las limitaciones de los parámetros físicos de una malla de puesta a tierra están basadas en las restricciones físicas y económicas de la misma. También por el diseño óptimo que puede lograrse si se siguen las siguientes restricciones establecidas por el estándar IEEE 80-2013.

- Los espaciamientos típicos entre conductores (D) están en el rango:
$$15\text{m} > D > 3\text{m}$$
- Las profundidades típicas (h) están en el rango:
$$1.5\text{m} > h \geq 0.5\text{ m}$$
- Los calibres típicos de conductores están en el rango y deben ser clase B:
$$500\text{ MCM} - 2/0\text{ AWG}$$
- El diámetro del conductor de la malla tiene un efecto despreciable sobre la tensión de malla. El área del sistema de puesta a tierra (A) es el factor más importante en la determinación de la resistencia de malla (R_g). Entre mayor sea A, menor será R_g y por lo tanto, es menor la elevación del potencial de tierra (GPR).

3.7.6.1. SELECCIÓN DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR

La fórmula para el calibre del conductor es:

$$A_{kcmil} = 3I_o \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c} \quad (71)$$

Donde:

A_{kcmil} Es el are del conductor en kcmil.

$3I_o$ Es la corriente de falla rms en kA

K_f Es una constante del material del conductor para varios valores de temperatura de fusión y utilizando la temperatura ambiente.

t_c Duración de la corriente en s.

El estándar IEEE 80-2013 presenta una tabla de materiales de conductores con su respectivo constante de Kf.

| Material | Conductivity (%) | Tm ^a (°C) | Kf |
|--------------------------------|------------------|----------------------|-------|
| Copper, annealed soft – drawn | 100 | 1083 | 7.00 |
| Copper, comercial hard – drawn | 97 | 1084 | 7.06 |
| Copper, comercial hard – drawn | 97 | 250 | 11.78 |
| Copper-clad Steel wire | 40 | 1084 | 10.45 |
| Copper-clad Steel wire | 30 | 1084 | 12.06 |
| Cooper-clad Steel rod | 17 | 1084 | 14.64 |
| Aluminum-clad Steel rod | 20.3 | 657 | 17.26 |
| Steel 1020 | 10.8 | 1510 | 18.39 |
| Stainless-clad Steel wire | 9.8 | 1400 | 14.72 |
| Zinc-coasted Steel rod | 8.6 | 419 | 28.96 |
| Stainless Steel 304 | 2.4 | 1400 | 30.05 |

Tabla 13: Materiales de conductores

3.8. REFINAMIENTO DEL DISEÑO PRELIMINAR

Si los cálculos basados en el diseño preliminar indican que pueden existir diferencias de potencial peligrosas dentro de la subestación, se deben estudiar diferentes alternativas de selección y aplicarlas donde sea adecuado. Algunas alternativas de solución:

- **Disminuir la resistencia total de la malla:** Al disminuir R_g se disminuye el GPR y por lo tanto el voltaje máximo transferido. Esto se puede lograr aumentando el área total de la malla (A), enterrando varillas de puesta a tierra, que penetren en capas de más baja resistividad.
- **Disminuir o ajustar los espaciamientos de los conductores de la malla (D):** Además de disminuir el espaciamiento D (lo cual aumenta la cantidad de conductor a enterrar) también se puede pensar en extender el conductor de la malla por fuera de la cerca, incrementar la cantidad de varillas perimetrales, enterrar dos o más conductores paralelos a lo largo del perímetro, aumentar la profundidad de la malla y disminuir el espaciamiento cerca al perímetro de la malla.
- **Instalando mallas equipotenciales:** Hacerlo debajo de la capa de roca triturada y en los sitios donde las cuadrillas se ubican con más frecuencia. Las mallas equipotenciales se conectan a la malla principal y a la estructura metálica del equipo que está justo encima de ella (seccionadores, interruptores, etc). Las mallas equipotenciales se pueden construir en cable de cobre N° 6 AWG con espaciamientos de 0.6m.
- **Derivar una porción más grande de la corriente de falla hacia otras trayectorias:** Esto se puede lograr disminuyendo la resistencia de puesta a tierra de las torres vecinas a la subestación. Esto también significa trasladar el problema a las torres de transmisión y distribución, donde no hay control de acceso.
- **Limitar la corriente total de falla.**
- **Colocando barreras para limitar el acceso a algunas áreas de la subestación.**
- **Incrementando el voltaje tolerable de paso y toque:** El límite de voltajes tolerables puede incrementarse si se disminuyen los tiempos de despeje de fallas, utilizando una capa superficial de alta resistividad o aumentando la profundidad de la misma.

CAPITULO IV

EJEMPLOS PRÁCTICOS UTILIZANDO
EL ESTÁNDAR IEEE 80-2013

4.1. DESCRIPCION DEL CAPITULO

En este capítulo se aplican todas las ecuaciones, tablas, y gráficas para el diseño de Redes de Tierra de Subestaciones de Potencia. Los objetivos del desarrollo de ejemplos prácticos son los siguientes:

- Mostrar la aplicación de los 12 pasos del estándar IEEE 80-2010.
- Aplicar los 12 pasos del estándar con diferentes diseños de cuadrícula para un área determinada.
- Ilustrar la dificultad del procedimiento y justificar la elaboración de un simulador.
- Mostrar la diferencia entre la aplicación de métodos y cálculos sencillos, y la aplicación de métodos más exactos.
- Comparar los valores de voltajes tolerables y voltajes presentes en la subestación para determinar el grado de seguridad que presenta.
- Aplicar los aspectos legales del acuerdo 29-E-2000.
- Utilizar el simulador desarrollado.

4.2. DISEÑO DE RED DE TIERRA (SUBESTACIÓN 1)

En la tabla 14 se describen todos los datos necesarios para el cálculo y diseño de una red de puesta a tierra para una subestación de 15 MVA, 115/13 kV.

| Datos de Subestación | | |
|--|--------------|---------|
| Potencia de la Subestación | P | 15 MVA |
| Relación equivalente vista desde el punto de falla con las reactancias subtransitorias | X/R | 3.33 |
| Duración de la Falla | t_f | 0.5 s |
| Factor de División de Corriente | S_f | 0.6 |
| Corriente simétrica de falla a tierra (Bus de 115kV) | $I_f = 3I_o$ | 3,180 A |

| | | |
|---|--------------|------------------------|
| Corriente simétrica de falla a tierra (Bus de 115kV) | $I_f = 3I_o$ | 6,814 A |
| Datos del Suelo | | |
| Resistividad | ρ | 400 Ωm |
| Área disponible | A | 5292 m ² |
| Datos de la cuadrícula | | |
| Profundidad de la cuadrícula | h | 0.5 m |
| Datos de la capa superficial | | |
| Profundidad de la capa superficial | h_s | 0.102 m |
| Resistividad de la capa superficial | ρ_s | 2,500 Ωm |

Tabla 14: Datos para el diseño de la subestación 1.

4.2.1. DISEÑO NO. 1: CUADRÍCULA CUADRADA SIN VARILLAS

Utilizando los 12 pasos del estándar IEEE 80-2010:

- **Paso 1: Datos de Campo.**

Con el área disponible se diseña una cuadrícula cuadrada de 70 x 70 m sin varillas. Donde la resistividad es de:

$$\rho = 400 \Omega\text{m}$$

Y el área:

$$A = 4900 \text{ m}^2$$

- **Paso 2: Tamaño del conductor.**

Para el cálculo del conductor utilizaremos la corriente del bus de 13kV, asumiendo el uso de un conductor de cobre a una temperatura ambiente de 40° C. (Se utiliza la tabla 13 y la ecuación 71).

$$A_{kcmil} = 3I_o \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c}$$

$$A_{kcmil} = 6,814 \cdot 7.06 \cdot \sqrt{0.5}$$

$$A_{kcmil} = 34.02 \text{ kcmil} = 17.2 \text{ mm}^2$$

Basados en este cálculo podemos utilizar un conductor calibre No. 4 AWG pero debido a la aplicación, se requiere un conductor que soporte esfuerzos mecánicos y robustez, se utiliza el mínimo propuesto por el estándar IEEE 80-2010: 2/0 AWG.

- **Paso 3: Criterios de Voltaje de Paso y Toque.**

Para una capa superficial con profundidad de 0.102m y resistividad de 2500 Ωm , en un suelo con resistividad de 400 Ωm se tiene un factor reductivo C_s de:

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

$$C_s = 0.74$$

Asumiendo que en la subestación 1 no caminaran personas con un peso menor a 70kg se calculan los voltajes de paso y toque.

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{step70} = 2686.6 \text{ V}$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{touch70} = 838.2 \text{ V}$$

- **Paso 4: Diseño Inicial.**

Con una cuadrícula de 70 x 70 m, con un espacio entre conductores paralelos $D = 7\text{m}$ para todas las mallas, una profundidad de enterramiento $h = 0.5\text{m}$, y ninguna varilla se obtiene una longitud total de conductor $L_T = 2 * 11 * 70 = 1540\text{m}$.

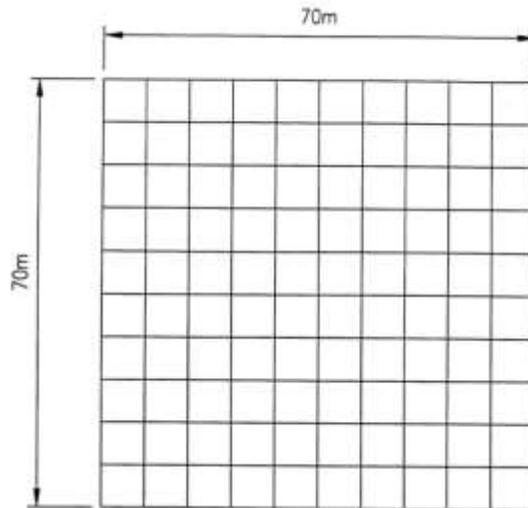


Fig. 13: Cuadrícula cuadrada sin varillas

- **Paso 5: Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.**

El cálculo de R_g se realiza con la ecuación de Sverak ya que el diseño no presenta varillas.

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

$$R_g = 2.78\Omega$$

- **Paso 6: Corriente máxima de cuadrícula.**

Para determinar la corriente máxima de cuadrícula es necesario calcular D_f :

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{2\pi R} = \frac{3.33}{2\pi} = 0.53$$

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

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.53}{0.5} \left(1 - e^{\frac{-2(0.5)}{0.53}}\right)} \approx 1$$

Luego utilizando el valor de S_f y la corriente de falla en el bus de 115kV, debido a que el bus de 13kV no contribuye a la elevación del GPR por la configuración Δ/Y de la subestación, tenemos que la corriente máxima de cuadrícula es:

$$I_G = I_f \cdot D_f \cdot S_f$$

$$I_G = (3180)(1)(0.6) = 1908A$$

- **Paso 7: GPR.**

Calculamos la elevación de potencial de tierra (GPR):

$$GPR = I_G R_g$$

$$GPR = (1908)(2.78)$$

$$GPR = 5304V$$

Y ahora comprobamos si el diseño cumple con $GPR < E_{touch70}$. Al no cumplir esta condición procedemos al paso 8.

- **Paso 8: Voltaje de Malla.**

Se calculan los voltajes de malla y paso, de acuerdo a la cuadrícula propuesta.

Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Donde:

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

Por ser una cuadrícula cuadrada:

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p} = \frac{2(1540)}{4(70)} = 11$$

$$n_b = 1$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 11$$

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

$$K_{ii} = 0.57$$

$$K_h = \sqrt{1 + h}$$

$$K_h = 1.225$$

Por lo tanto:

$$K_m = 0.89$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$K_i = 2.272$$

Para cuadrículas sin ninguna varilla:

$$L_M = L_C$$

$$L_M = 1540m$$

Dando como resultado el Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.89 \cdot 2.272}{1540}$$

$$E_m = 1002.1 V$$

- **Paso 9: E_m vrs E_{touch} .**

Obteniendo el valor del voltaje de malla y comparándolo con el voltaje de toque se concluye que:

$$E_m > E_{touch70}$$

Por lo tanto, es necesario rediseñar la cuadrícula, lo cual corresponde al paso 11 según el método del estándar IEEE 80-2010. (Ver figura 3)

4.2.2. DISEÑO NO. 2: CUADRÍCULA CUADRADA CON VARILLAS

En el diseño anterior, al llegar al paso 9 y realizar la comparación correspondiente, concluimos que el voltaje de malla es mayor que el voltaje de toque y por lo tanto es necesario un rediseño, que corresponde al paso 11.

Para lograr cumplir las condiciones del paso 9 se recomiendan las siguientes modificaciones:

1. Reducir el espaciamiento entre conductores paralelos (D), aumentando el número de mallas y por lo tanto la longitud de conductor
2. Agregar varillas, con longitud y diámetro mínimos de 2.4m y 12.7 mm, respectivamente.

En el diseño 2 se agregan 20 varillas (n_R) de 7.5m (L_r) en el perímetro de la cuadrícula cuadrada de 70 x 70 m. Los datos del sistema son los mismos de la tabla 14 y se regresa al paso 5 tal y como lo indica el flujograma de los 12 pasos.

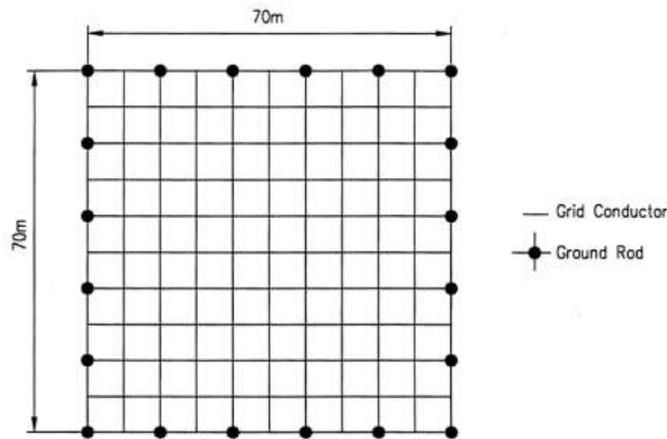


Fig. 14: Cuadrícula cuadrada con 20 varillas de 7.5m

- **Paso 5: Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.**

Al agregar varillas se modifica el valor de L_T , dando como resultado:

$$L_T = 1540 + 20 \cdot 7.5 = 1690m$$

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

$$R_g = 2.75\Omega$$

- **Paso 6 y 7.**

La nueva elevación de potencial a tierra (GPR) es:

$$GPR = (1908)(2.75) = 5247V$$

El cual siguiendo mayor al voltaje de toque y se prosigue al paso 8.

- **Paso 8: Voltaje de Malla.**

Se calculan los voltajes de malla y paso, de acuerdo a la cuadrícula propuesta.

Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Donde:

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

Por ser una cuadrícula cuadrada, n conserva el mismo valor, $K_{ii} = 1$ por llevar varillas

$$n = 11$$

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + h}$$

$$K_h = 1.22$$

Por lo tanto:

$$K_m = 0.77$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$K_i = 2.272$$

Para cuadrículas con varillas en las esquinas y en el perímetro:

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

Donde:

$$L_C = 1540$$

$$L_R = L_r n_R = (7.5)(20)$$

$$L_M = 1786.36 \text{ m}$$

Dando como resultado el Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.77 \cdot 2.272}{1786.36}$$

$$E_m = 747.4V$$

Voltaje de paso (E_s):

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

Donde:

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

$$L_s = 0.75(1540) + 0.85(150) = 1282.5m$$

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

$$K_s = 0.406$$

Por lo tanto:

$$E_s = 548.9V$$

- **Paso 9: E_m vs E_{touch} .**

Obteniendo el valor del voltaje de malla y comparándolo con el voltaje de toque se concluye que:

$$E_m < E_{touch70}$$

- **Paso 10: E_s vs E_{step} .**

Obteniendo el valor del voltaje de paso y comparándolo con el voltaje de paso tolerable se concluye que:

$$E_s < E_{step70}$$

Por lo tanto se procede al paso 12.

- **Paso 12: Diseño detallado.**

Al modificar los parámetros de diseño hemos obtenido una red de tierra segura. El diseño detallado consiste en la elaboración de planos de la red de tierra, lista de materiales y presupuesto los cuales están fuera del alcance del trabajo de graduación.

4.2.3. DISEÑO NO. 3: CUADRÍCULA RECTANGULAR CON VARILLAS

En el diseño anterior no se cubre toda el área disponible de suelo ($A = 5292 \text{ m}^2$); como alternativa al diseño No. 2 se desarrolla un diseño No. 3 con una cuadrícula rectangular de $63 \times 84 \text{ m}$, utilizando el mismo espaciamiento entre conductores paralelos $D = 7 \text{ m}$, con 9 filas y 12 columnas y 38 varillas de 10 m cada una. Los datos para el diseño son los mismos de la tabla 14.

- **Paso 5: Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.**

El nuevo valor de L_T :

$$L_T = (13)(63) + (10)(84) + (38)(10) = 2039 \text{ m}$$

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

$$R_g = 2.62\Omega$$

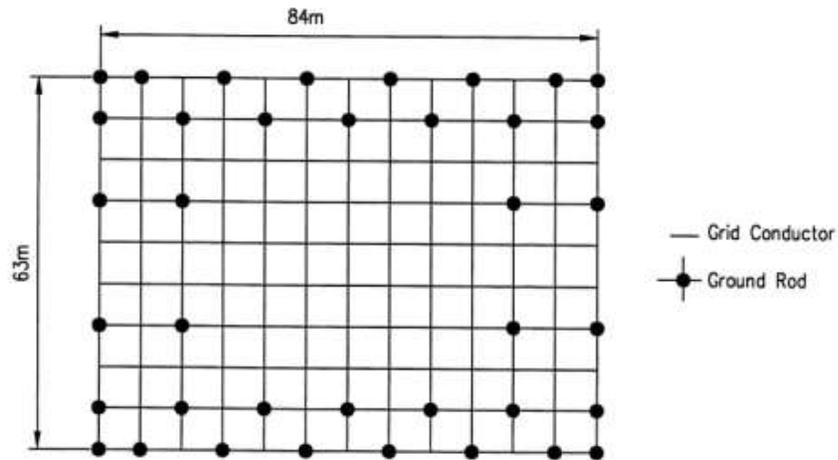


Fig. 15: Cuadrícula rectangular con 38 varillas de 10m.

- **Paso 6 y 7.**

La nueva elevación de potencial a tierra (GPR) es:

$$GPR = (1908)(2.62) = 4998.96V$$

El cual siguiendo mayor al voltaje de toque y se prosigue al paso 8.

- **Paso 8: Voltaje de Malla.**

Se calculan los voltajes de malla y paso, de acuerdo a la cuadrícula propuesta.

Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Donde:

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

El cálculo de n_b se modifica por ser una cuadrícula rectangular dando como resultado:

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p} = \frac{2(1659)}{294} = 11.29$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = 1.005$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 11.35$$

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + h}$$

$$K_h = 1.22$$

Por lo tanto:

$$K_m = 0.77$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$K_i = 2.324$$

Para cuadrículas con varillas en las esquinas y en el perímetro:

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

Donde:

$$L_C = 1659m$$

$$L_R = L_r n_R = 380 m$$

$$L_M = 2292.15m$$

Dando como resultado el Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.77 \cdot 2.324}{2292.15}$$

$$E_m = 595.8V$$

Voltaje de paso (E_s):

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

Donde:

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

$$L_s = 0.75(1659) + 0.85(380) = 1567.25m$$

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

$$K_s = 0.4$$

Por lo tanto:

$$E_s = 452.69V$$

- **Paso 9: E_m vrs E_{touch} .**
Obteniendo el valor del voltaje de malla y comparándolo con el voltaje de toque se concluye que:

$$E_m < E_{touch70}$$

- **Paso 10: E_s vrs E_{step} .**
Obteniendo el valor del voltaje de paso y comparándolo con el voltaje de paso tolerable se concluye que

$$E_s < E_{step70}$$

Por lo tanto se procede al paso 12.

- **Paso 12: Diseño detallado.**

Al modificar la forma de la cuadrícula de diseño hemos obtenido una red de tierra segura. La diferencia radica en la longitud extra de conductor y de varillas utilizadas. Ambos diseños son seguros. El diseño detallado consiste en la elaboración de planos de la red de tierra, lista de materiales y presupuesto los cuales están fuera del alcance del trabajo de graduación.

4.2.4. DISEÑO NO. 4: CUADRÍCULA EN FORMA DE "L"

En este ejemplo se modifica el diseño anterior para ilustrar el diseño y cálculo de una red de tierra para una cuadrícula en forma de "L". Se utiliza un área de 4900m², con 24 varillas de 7.5m de longitud. Otros datos se mantienen igual. Ver tabla 14.

Como no se ha modificado los valores para el cálculo de la capa superficial se procede desde el paso 5.

- **Paso 5: Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.**

El nuevo valor de L_T :

$$L_T = 1575m + (24)(7.5) = 1755m$$

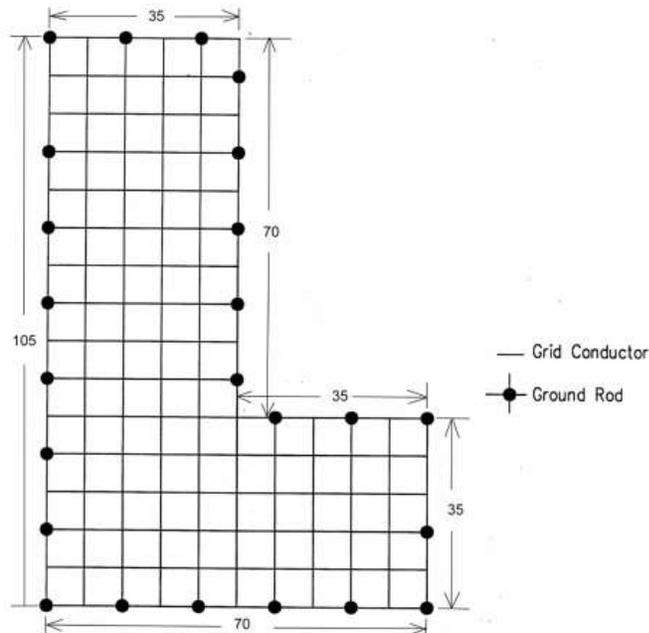


Fig. 16: Cuadrícula en forma de "L" con 24 varillas de 7.5m

Resistencia de puesta a tierra:

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

$$R_g = 2.74\Omega$$

- **Paso 6 y 7.**

La nueva elevación de potencial a tierra (GPR) es:

$$GPR = (1908)(2.74) = 5228V$$

El cual siguiendo mayor al voltaje de toque y se prosigue al paso 8.

- **Paso 8: Voltaje de Malla.**

Se calculan los voltajes de malla y paso, de acuerdo a la cuadrícula propuesta.

Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

Donde:

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

El cálculo de n_b se modifica por ser una cuadrícula rectangular dando como resultado:

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} = \frac{2(1575)}{350} = 9$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = 1.12$$

$$n_c = \left(\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right)^{\frac{0.7A}{L_x \cdot L_y}}$$

$$n_d = 1$$

$$\mathbf{n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 12.2}$$

$$\mathbf{K_{ii} = 1}$$

$$K_h = \sqrt{1 + h}$$

$$\mathbf{K_h = 1.225}$$

Por lo tanto:

$$\mathbf{K_m = 0.76}$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$\mathbf{K_i = 2.45}$$

Para cuadrículas con varillas en las esquinas y en el perímetro:

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

Donde:

$$\mathbf{L_C = 1575m}$$

$$\mathbf{L_R = L_r \cdot n_R = 180 m}$$

$$\mathbf{L_M = 1867.05m}$$

Dando como resultado el Voltaje de malla (E_m):

$$E_m = \frac{400 \cdot 1908 \cdot 0.76 \cdot 2.45}{1867.05}$$

$$\mathbf{E_m = 761.1V}$$

Voltaje de paso (Es):

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

Donde:

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

$$L_s = 0.75(1575) + 0.85(180) = 1334.25m$$

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

$$K_s = 0.41$$

Por lo tanto:

$$E_s = 574.6V$$

- **Paso 9: E_m vrs E_{touch} .**
Obteniendo el valor del voltaje de malla y comparándolo con el voltaje de toque se concluye que:

$$E_m < E_{touch70}$$

- **Paso 10: E_s vrs E_{step} .**
Obteniendo el valor del voltaje de paso y comparándolo con el voltaje de paso tolerable se concluye que

$$E_s < E_{step70}$$

Por lo tanto se procede al paso 12.

- **Paso 12: Diseño detallado.**

Al modificar la forma de la cuadrícula de diseño hemos obtenido una red de tierra segura. El diseño detallado consiste en la elaboración de planos de la red de tierra, lista de materiales y presupuesto los cuales están fuera del alcance del trabajo de graduación.

4.3. DISEÑO DE RED DE TIERRA (SUBESTACIÓN 2)

En la tabla 15 se describen todos los datos necesarios para el cálculo y diseño de una red de puesta a tierra para una subestación de 12 MVA, 46/23 kV.

| Datos de Subestación | | |
|--|--------------|----------------|
| Potencia de la Subestación | P | 12 MVA |
| Relación equivalente vista desde el punto de falla con las reactancias subtransitorias | X/R | 3.33 |
| Duración de la Falla | t_f | 0.5 s |
| Factor de Decremento | D_f | 1 |
| Factor de división de corriente | S_f | 1 |
| Líneas de Transmisión | - | 1 |
| Líneas de Distribución | - | 3 |
| Corriente simétrica de falla a tierra (Bus de 23kV) | $I_f = 3I_o$ | 1877 A |
| Datos del Suelo | | |
| Resistividad | ρ | 100 Ω m |
| Largo | - | 31.68m |
| Ancho | - | 27m |
| Datos de la cuadrícula | | |
| Profundidad de la cuadrícula | h | 0.75 m |
| Calibre de conductor | - | 4/0 |

| | | |
|-------------------------------------|----------|------------------|
| Columnas | - | 8 |
| Filas | - | 8 |
| No. de varillas | n_R | 52 |
| Diámetro de la varilla | d | 15.87mm |
| Longitud de la varilla | L_r | 3.048m |
| Datos de la capa superficial | | |
| Profundidad de la capa superficial | h_s | 0.1m |
| Resistividad de la capa superficial | ρ_s | 2,500 Ω m |

Tabla 15: Datos de la subestación 2 para el diseño de la red de tierra.

Utilizando los 12 pasos del estándar IEEE 80-2010:

- **Paso 1: Datos de Campo.**

Con el área disponible se diseña una cuadrícula cuadrada de 70 x 70 m sin varillas. Donde la resistividad es de:

$$\rho = 100 \Omega m$$

Y el área:

$$A = 855.36 m^2$$

- **Paso 2: Tamaño del conductor.**

El calibre del conductor es 4/0.

- **Paso 3: Criterios de Voltaje de Paso y Toque.**

Para una capa superficial con profundidad de 0.1m y resistividad de 2500 Ω m, en un suelo con resistividad de 100 Ω m se tiene un factor reductor C_s de:

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

$$C_s = 0.70$$

Asumiendo que en la subestación 2 no se encontraran personas con un peso menor a 70kg se calculan los voltajes de paso y toque.

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{step70} = 2553.36 V$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{touch70} = 804.864 V$$

- **Paso 4: Diseño Inicial.**

Una cuadrícula rectangular de 31.68 x 27m, con un espacio entre conductores paralelos $D = 3.96m$ para todas las mallas, una profundidad de enterramiento $h = 0.75m$, 52 varillas de longitud y diámetro de 3.048m y 15.87mm, respectivamente.

- **Paso 5: Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.**

El nuevo valor de L_T :

$$L_T = (9)(31.68) + (52)(3.048) = 686.616m$$

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

$$R_g = 1.60\Omega$$

- **Paso 6 y 7.**

La elevación de potencial a tierra (GPR) es:

$$GPR = (892.61)(1.6) = 1461.47V$$

El cual es menor al voltaje de toque y por lo tanto el diseño pasa al paso 12.

- **Paso 12: Diseño detallado.**

Hemos obtenido una red de tierra segura. El diseño detallado consiste en la elaboración de planos de la red de tierra, lista de materiales y presupuesto los cuales están fuera del alcance del trabajo de graduación.

4.4. SIMULACIÓN EN R-PAT

Uno de los objetivos al desarrollar los ejemplos de la sección anterior es demostrar la dificultad que presenta el cálculo de los 12 pasos si se realiza manualmente.

En esta sección se recalcula el diseño 4: cuadrícula en forma de "L" con el simulador: R-PAT.

4.4.1. SIMULACIÓN DE DISEÑO 4: CUADRÍCULA EN FORMA DE "L"

En la parte superior del entorno principal del programa se encuentran las secciones donde se ingresan los datos.

The screenshot displays two panels from the R-PAT software. The left panel, titled "Resistividad Aparente del Terreno", includes a "Modelo del Terreno" section with radio buttons for "Una capa" (selected) and "Dos capas", and an "Ingresar la Resistividad:" section with radio buttons for "Manualmente" (selected) and another option. Input fields are provided for "Resistividad Capa Superior" (400 Ω.m), "Resistividad Capa Inferior", and "Longitud Capa Superior" (m). The right panel, titled "Datos de Subestación", contains input fields for "Corriente de Falla Simétrica" (3180 A), "Duración de la Falla" (0.5 s), "Frecuencia" (60 Hz), "Relación X/R", and "Potencia" (15 MVA).

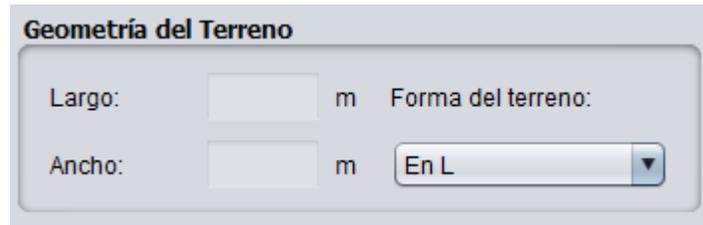
Fig. 17: Datos de entrada de Resistividad del Suelo y de la Subestación

The screenshot displays two panels from the R-PAT software. The left panel, titled "Datos de Varilla", includes a checked checkbox for "¿Con Varillas?", a "Catálogo" button, and input fields for "Número de Varillas" (24), "Longitud de Varilla" (7.5 m), and "Radio de la Varilla" (10 mm). The right panel, titled "Datos de Cuadrícula", includes input fields for "Profundidad" (0.5 m), "Filas" (15), and "Columnas" (10), along with dropdown menus for "Material de Conductor" (Automático) and "Cobre recocido de suave consistencia".

Fig. 18: Ingreso de datos de Varilla y datos de cuadrícula

En la figura 18, se muestra la parte del programa donde se ingresan los datos del terreno y la subestación. Se elige el modelo de una capa para el terreno.

Se ingresan los datos de varilla y de la cuadrícula. El cálculo del conductor puede ser ingresado de una manera manual o de una manera automática y el material del conductor puede ser elegido de una lista aprobada por IEEE 80-2010.



Geometría del Terreno

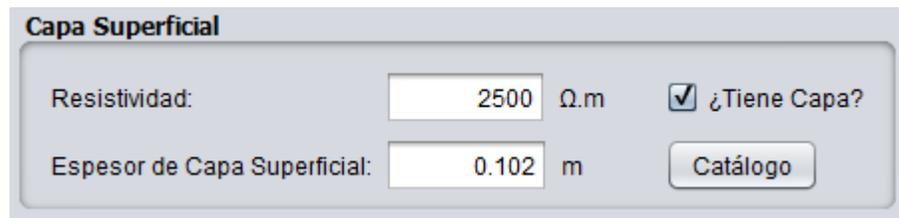
Largo: m Forma del terreno: En L

Ancho: m Catálogo

Fig. 19: Selección de geometría del Terreno.

Al seleccionar: "Forma L" se abre una nueva ventana donde se ingresan las medidas de la forma L en particular. (Ver figura 23).

Se ingresan los datos de la Capa Superficial.



Capa Superficial

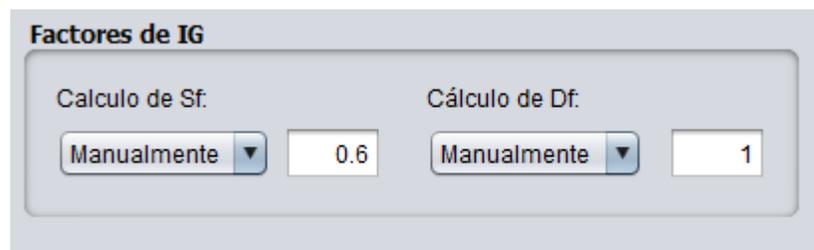
Resistividad: Ω.m ¿Tiene Capa?

Espesor de Capa Superficial: m Catálogo

Fig. 20: Ingreso de datos de la capa superficial.

Se ingresan los factores de la corriente máxima de cuadrícula:

- Factor de división de corriente.
- Factor de decremento.



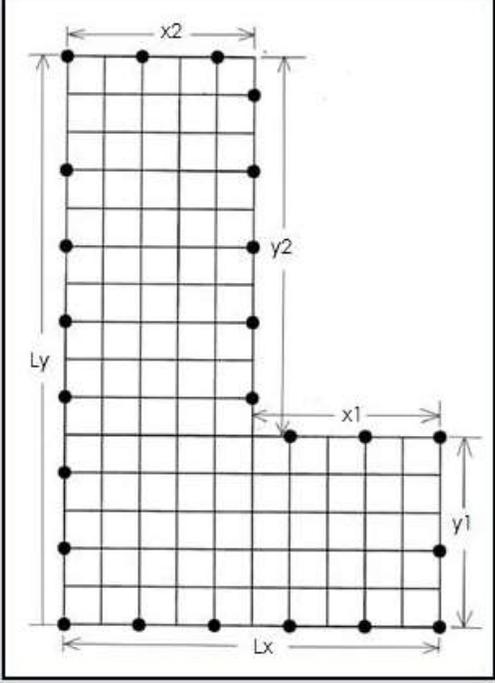
Factores de IG

Calculo de Sf. Cálculo de Df.

Manualmente Manualmente

Fig. 21: Ingreso de factor de la corriente máxima de cuadrícula

Ingreso Datos para cuadrícula en forma de L



El diagrama muestra una cuadrícula en forma de L. Las dimensiones se definen como: L_x (ancho total), L_y (altura total), x_1 (ancho del brazo horizontal), x_2 (ancho del brazo vertical), y_1 (altura del brazo horizontal) y y_2 (altura del brazo vertical).

| | | |
|----|----------------------------------|---|
| x1 | <input type="text" value="35"/> | m |
| x2 | <input type="text" value="35"/> | m |
| y1 | <input type="text" value="35"/> | m |
| y2 | <input type="text" value="70"/> | m |
| Lx | <input type="text" value="70"/> | m |
| Ly | <input type="text" value="105"/> | m |

Fig. 22: Ventana donde se ingresan las medidas del perímetro de la forma L..

Terminado el ingreso de datos, se da click en el botón: **Ejecutar Análisis**.

4.4.2. RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON R-PAT

En el área de resultados se encuentran dos pestañas:

- Resultados
- Aspectos Legales y de Seguridad En la pestaña de resultados se encuentran todos los cálculos importantes ordenados en secciones, de los 12 pasos del estándar IEEE 80-2010. (Ver figura 24)

En la Pestaña de aspectos legales y de seguridad se verifica:

- El cumplimiento de los aspectos legales según el acuerdo 29-E-2000.
- El cumplimiento de los aspectos de seguridad según el estándar IEEE 80-2013

| RESULTADOS | | ASPECTOS LEGALES Y DE SEGURIDAD | |
|--|-------------------------|--|---|
| Capa Superficial | | Resistividad del Terreno | |
| Material: | Grava General | Modelo Utilizado: | Una capa |
| Resistividad del Material | 2500.0 $\Omega \cdot m$ | Resistividad de la Capa Superior: | 400.00 $\Omega \cdot m$ |
| Factor Reductivo de la Grava [Cs]: | 0.74 | Resistividad de la Capa Inferior: | - $\Omega \cdot m$ |
| Altura Capa Superficial [hs]: | 0.102 m | Profundidad de la Capa Superior: | - m |
| Geometría del Terreno y La Cuadrícula | | Parámetros Críticos | |
| Área: | 4900.00 m ² | Factor de División de Corriente de Falla [Sf]: | 0.60 |
| Forma del Terreno: | En L | Factor de Decremento [Df]: | 1.00 |
| Configuración | | Corriente Máxima de cuadrícula [IG]: | 1908.00 A |
| Datos de Conductor | | Puesta a Tierra | |
| Calibre | Hilos | Diámetro | |
| 2/0 | 19 | 10.63 mm | Resistencia de Puesta a tierra: 2.81 Ω |
| Longitud Total de Conductor: | 1575.00 m | | |
| Espaciamiento entre Conductores: | 10.50 m | | |
| Datos de Varillas | | Voltajes Críticos Tolerables | |
| Longitud Total de Varillas: | 180.00 m | Voltaje de Malla [Em]: | 747.47 V |
| Número de Varillas | 24.00 | Voltaje Tolerable de Toque (Etouch) | 840.55 V |
| Longitud de Varilla | 7.50 | Voltaje de Toque [Es]: | 567.71 V |
| | | Voltaje Tolerable de paso (Estep) | 2696.10 V |
| | | Vista en Planta | Generar Reporte |

Fig. 23: Área de Resultados

También, se muestran conclusiones y recomendaciones según los resultados del diseño. (Ver figura 25)

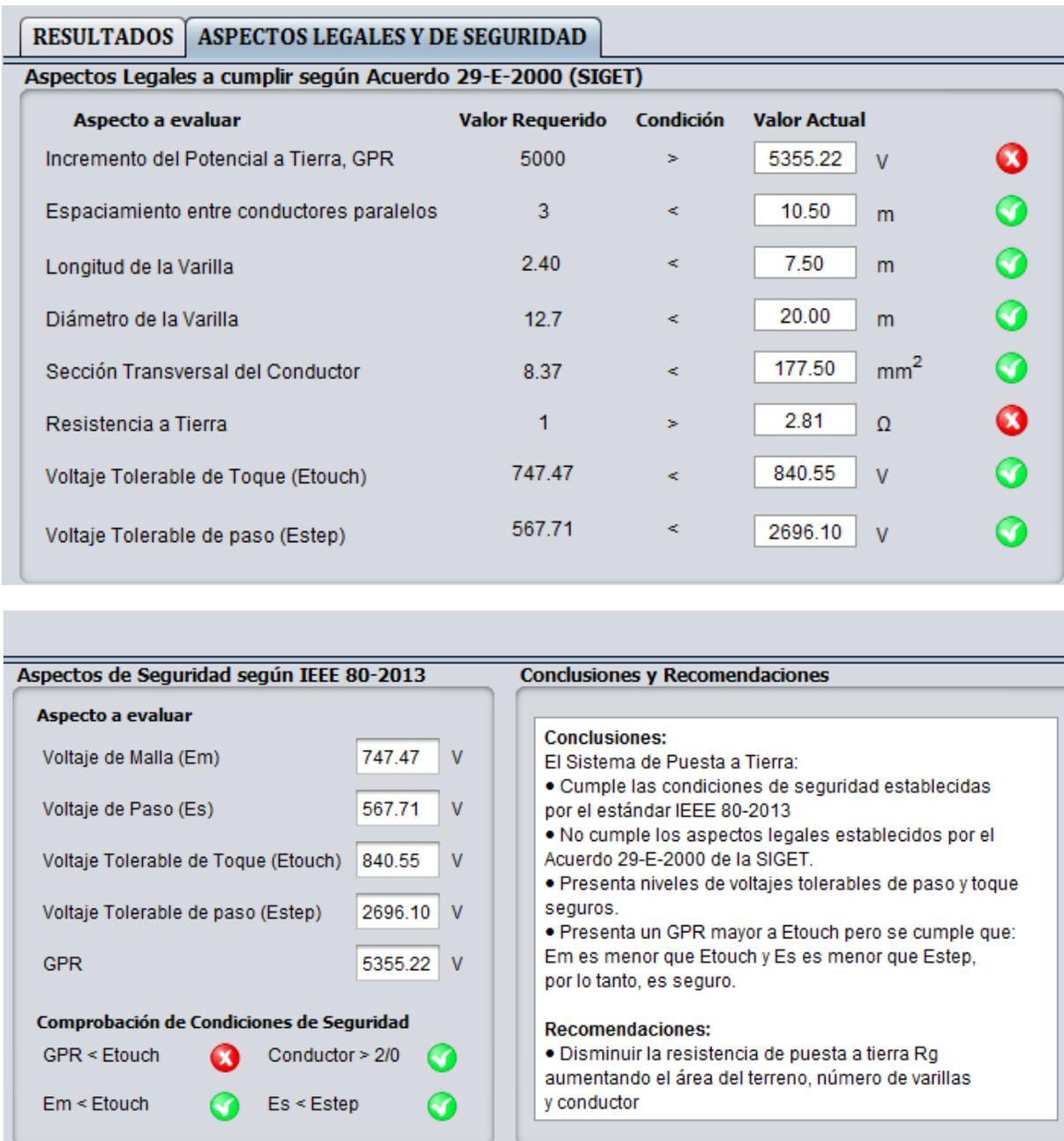


Fig. 24: Pestaña de Aspectos legales y de seguridad.

4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Una de las ventajas importantes de utilizar el simulador es el ahorro de tiempo, trabajo y esfuerzo. Al ser una gran cantidad de ecuaciones, la manipulación de datos, el uso de una calculadora y la aproximación de unidades pueden aportar a la probabilidad de un error.

En la tabla 16 se muestra una comparación de resultados de los diseños propuestos para la subestación 1 y 2.

| Datos | SUBESTACIÓN 1 | | | | | | SUBESTACIÓN 2 | |
|---|------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| | Diseño 2 (Cuadrada) | | Diseño 3 (Rectangular) | | Diseño 4 (Forma "L") | | Diseño 1 (Rectangular) | |
| | Manual | Programa | Manual | Programa | Manual | Programa | Manual | Programa |
| Factor de reducción (C_s) | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.7 | 0.7 |
| E_{step} [V] | 2686.6 | 2696.10 | 2686.6 | 2696.10 | 2686.6 | 2696.10 | 2560.25 | 2560.25 |
| E_{touch} [V] | 838.2 | 840.55 | 838.2 | 840.55 | 838.2 | 840.55 | 806.59 | 806.59 |
| Resistencia de puesta a tierra (R_g) [Ω] | 2.75 (Sverak) | 2.87 (Schwarz) | 2.62 (Sverak) | 2.65 (Schwarz) | 2.74 (Sverak) | 2.81 (Schwarz) | 1.60 (Sverak) | 1.64 (Schwarz) |
| Corriente máxima de cuadrícula (I_G) [A] | 1908 | 1908 | 1908 | 1908 | 1908 | 1908 | 892.61 | 892.61 |
| GPR [V] | 5247 | 5470.68 | 4998.96 | 5052.19 | 5228 | 5362.99 | 1461.47 | 1461.47 |
| Voltaje de malla (E_m) [V] | 747.4 | 739.62 | 595.8 | 584.45 | 761.1 | 747.47 | 136.62 | 136.62 |
| Voltaje de paso (E_s) [V] | 548.9 | 549.11 | 452.69 | 457.73 | 574.6 | 567.71 | 119.60 | 119.60 |

Tabla 16: Resultados de los diseños propuestos de una forma manual y por medio del programa.

En la tabla 17 se muestra la verificación de los aspectos legales y de seguridad para cada diseño.

| Aspecto a Evaluar | SUBESTACIÓN | | | | SUBESTACIÓN 2 |
|---|------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | Diseño 1 (Cuadrada) | Diseño 2 (Cuadrada) | Diseño 3 (Rectangular) | Diseño 4 (Forma "L") | Diseño 1 (Rectangular) |
| GPR [Menor a 5000V] | | | | | |
| Espaciamiento entre conductores paralelos (D) [Mayor a 3m] | | | | | |
| Longitud de la Varilla (L_r) [Mayor a 2.40m] | | | | | |
| Diámetro de la Varilla (b) [Mayor a 12.7mm] | | | | | |
| Resistencia a Tierra (R_g) [tabla] | | | | | |
| Voltaje de Toque E_{touch} [Mayor a E_m] | | | | | |
| Voltaje de Paso E_{step} [Mayor a E_s] | | | | | |

Tabla 17: Verificación de Aspectos Legales y de Seguridad.

CAPITULO V

ESPECIFICACIÓN DEL PROGRAMA (R-PAT)

5.1. DESCRIPCION DEL CAPÍTULO

En el presente capítulo, se presenta el programa para el cálculo de una red de tierra basada en el estándar IEEE 80-2000. Se muestra como se desarrolló el algoritmo de programación del software, el mismo que nos facilitara el cálculo de los parámetros admisibles que exige el estándar.

5.2. DESARROLLO DEL SOFTWARE

Este software está desarrollado con la principal característica de permitir al usuario realizar los cálculos de los parámetros eléctricos de la red de puesta a tierra de manera rápida, sencilla y efectiva, debido a que los cálculos de forma manual son muy largos y tediosos, por la complejidad y magnitudes que se requieren. El programa fue desarrollado en JAVA en Netbeans ya que es una herramienta visual que permite crear aplicaciones o programas en un ambiente de fácil adaptación e interacción del usuario con el software.

5.3. ¿POR QUE JAVA?

Dentro de una amplia gama de opciones para ejecutar nuestro trabajo de graduación se eligió JAVA debido a que es un lenguaje de alto nivel que permite crear programas complejos en relativamente menos líneas de código respecto a otros niveles de programas; así mismo forma parte de nuestra decisión el hecho de que millones de aplicaciones en el mundo están basadas en JAVA y ello hace que un porcentaje muy cercano al 100% de las personas tengan JAVA en su computadora. Por otra parte la gran diversidad de APIS (Interfaz de programación de aplicaciones) facilita en gran medida la tarea del programador al encontrar diversas rutinas ya elaboradas por otras personas que pertenecen a una comunidad de nivel mundial, ejemplo de ello es la API denominada "iText" relacionada al reporte generado por el software, dicha API permite generar documentos en PDF con algunos pasos relativamente sencillos. Finalmente JAVA es un puente que permite al programador ingresar en un paradigma de programación ampliamente utilizado por uno de los lenguajes que actualmente está teniendo alto impacto en el medio como lo es ANDROID el cual podría ser paso lógico de evolución para los autores del actual trabajo de graduación, ello para obtener un medio de ingresos además de la Ingeniería Eléctrica como tal. Las anteriores y otras características de JAVA la hacen la mejor opción para programar un proyecto de esta magnitud.

5.4. CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE

Los cálculos de parámetros de un sistema de puesta a tierra son muy complejos y extensos de obtener, por esto es indispensable la utilización de un software que permita de forma automatizada el cálculo de los mismos. Este software proporciona los cálculos de los parámetros de una malla de puesta a tierra de manera rápida y sencilla. Además nos permite realizar el almacenamiento de los datos ingresados como también de los calculados, estos valores se presentan en un reporte en formato PDF. Las características por las cuales es necesaria la utilización del mismo se presentan a continuación:

- **Facilidad de manejo:** Para los cálculos de los parámetros eléctricos de una red de puesta a tierra el usuario debe ingresar los siguientes datos: resistividad de la capa superficial del terreno si la posee, profundidad de la capa superficial del terreno si la posee, resistividad del terreno, distancia del lado mayor y lado menor de la red, valor de la corriente simétrica de falla, tiempo de despeje de la falla, relación entre la reactancia y la resistencia del sistema donde ocurre la falla, factor de división de la corriente de falla, material del conductor a utilizar, número de varillas, longitud de varilla, diámetro de la barra si es el caso. Todos estos pasos se realizan de forma secuencial permitiendo su rápida y fácil comprensión
- **Ambiente del software:** Para interacción del usuario con el software fue diseñada una interfaz gráfica con múltiples componentes de entrada de datos y ventanas de selección.
- **Velocidad de Obtención de los Cálculos:** La obtención de los cálculos de los parámetros de la red de puesta a tierra mediante el software, se realiza de forma rápida, ya que el programa es de fácil manejo y contiene solo una ventana necesaria para ingresar los datos y mostrar las salidas.
- **Respaldo de datos y cálculos** La información ingresada y los resultados obtenidos en el software tendrá facilidad de ser reportados en un archivo PDF, de esta manera el usuario puede tener la información almacenada y hacer uso de la misma cuando el disponga.
- **Ejecutable en cualquier computador** El programa tiene una característica muy importante, este puede ser ejecutable en cualquier computador.

5.5. DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ

En la figura 26 se muestra la interfaz gráfica que ha sido desarrollada en JAVA, para la obtención de los parámetros de la red de puesta a tierra, aplicando los criterios que establece el estándar IEEE 80-2013.

Entre las secciones del programa se encuentran:

1. Ingreso de Datos

El ingreso de datos está compuesto por:

- Resistividad del Terreno
- Datos de Subestación
- Datos de Varilla
- Datos de Cuadrícula
- Geometría del Terreno
- Capa Superficial
- Factores de IG

2. Resultados

Resultados está compuesto por:

- Capa Superficial
- Resistividad del Terreno
- Datos de Conductor
- Resistencia de Puesta a Tierra
- Geometría de la Cuadrícula
- Parámetros Críticos
- Datos de Varillas
- Voltajes Críticos Tolerables
- Selección de Vista en Planta o Perfil
- Generar Reporte

3. Aspectos legales y de seguridad

En los aspectos legales y de seguridad, según el Acuerdo 29 E-2000, se verifica el cumplimiento de:

- El incremento de Potencial a tierra (GPR)
- Espaciamiento mínimo entre conductores paralelos

Simulador de Redes de Puesta a Tierra [R-PAT]

Archivo Entorno de Aprendizaje Funciones de Ingeniería Ayuda

Resistividad Apparente del Terreno

Modelo del Terreno:
 Una capa
 Dos capas

Resistividad Capa Superior: Ω.m

Resistividad Capa Inferior: Ω.m

Ingresar la Resistividad:
 Manualmente

Longitud Capa Superior: m

Datos de Subestación

Corriente de Falla Simétrica: A

Duración de la Falla: s

Frecuencia: Hz

Relación X/R:

Potencia: MVA

Datos de Varilla

¿Con Varillas?

Número de Varillas:

Longitud de Varilla: m

Radio de la Varilla: mm

Datos de Cuadrícula

Profundidad: m

Filas:

Columnas:

Material de Conductor:

Geometría del Terreno

Largo: m Forma del terreno:

Ancho: m

Capa Superficial

Resistividad: Ω.m ¿Tiene Capa?

Espesor de Capa Superficial: m

Factores de IG

Calculo de Sf:

Cálculo de Df:

RESULTADOS **ASPECTOS LEGALES Y DE SEGURIDAD**

Capa Superficial

Material:

Resistividad del Material: Ω.m

Factor Reductivo de la Grava [Cs]:

Altura Capa Superficial [hs]: m

Resistividad del Terreno

Modelo Utilizado:

Resistividad de la Capa Superior: Ω.m

Resistividad de la Capa Inferior: Ω.m

Profundidad de la Capa Superior: m

Datos de Conductor

| Calibre | Hilos | Diámetro |
|----------------------|----------------------|-------------------------|
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> mm |

Longitud Total de Conductor: m

Espaciamiento entre Conductores: m

Puesta a Tierra

Resistencia de Puesta a tierra: Ω

Geometría del Terreno y La Cuadrícula

Área: m²

Forma del Terreno:

Configuración:

Parámetros Críticos

Factor de División de Corriente de Falla [Sf]:

Factor de Decremento [Df]:

Corriente Máxima de cuadrícula [IG]: A

Datos de Varillas

Longitud Total de Varillas: m

Número de Varillas:

Longitud de Varilla:

Voltajes Críticos Tolerables

Voltaje de Malla [Em]: V

Voltaje Tolerable de Toque (Etouch): V

Voltaje de Toque [Es]: V

Voltaje Tolerable de paso (Estep): V

Fig. 25: Interfaz principal del programa.

- Longitud de la Varilla
- Diámetro de la Varilla
- Sección transversal del conductor
- Resistencia a Tierra
- Voltaje Tolerable de Toque
- Voltaje Tolerable de Paso

En la Barra principal de menú se encuentra:

- **Archivo:**

Donde se encuentran las funciones de nuevo, abrir, guardar, modificación de los datos de usuario, la frecuencia y la opción salir. Los archivos son guardados en formato .ter, es una extensión personalizada del programa.

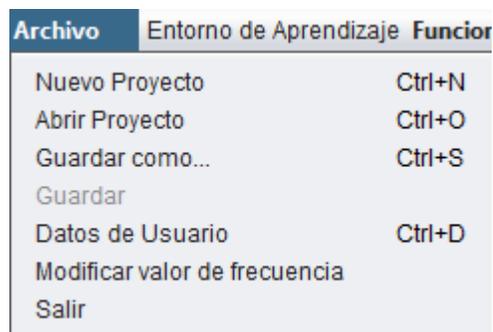


Fig. 26: Menú archivo.

- **Entorno de Aprendizaje**

En el entorno de Aprendizaje nos encontramos con una interfaz más didáctica. Se encuentra ordenada por pasos que corresponden al estándar. El programa sirve como guía mientras el usuario ingresa datos y calcula las variables pertinentes según sea el paso. Así también se describe en que consiste cada procedimiento realizado y su resultado. (Ver figura 28)

- **Funciones de Ingeniería**

Las funciones de ingeniería consisten en una lista de ventanas que permiten el cálculo de variables relacionadas con los sistemas de puesta a tierra. Estas son:

- Cálculo de Rg en cuadrícula sin varillas
- Cálculo de Rg en cuadrícula con varillas
- Cálculo del factor de división de corriente

- **Ayuda**

En ayuda se encuentra el desarrollo de temas importantes para el diseño de redes de puesta a tierra. También una lista de catálogos para la especificación de la red de puesta a tierra. Entre los temas que se desarrollan se encuentran:

- Método de los 12 pasos del estándar IEEE 80-2013
- Medición de la Resistividad del Suelo
- Criterio de Voltajes Tolerables
- Peligro en una sistema de Puesta a Tierra
- Calculo de la Resistencia de Puesta a Tierra
- Capa Superficial
- Cumplimiento de Aspectos Legales y de Seguridad
- Entre otros

Entorno de Aprendizaje

Archivo Edit

Paso 1: Datos de Campo

Se determina el área de la red de tierra (A), la resistividad del suelo (ρ) y el modelo de suelo necesario (modelo uniforme o dos capas)

INGRESO DE DATOS

Ingrese el valor de la resistividad del terreno: $\Omega \cdot m$

Especifique la forma del terreno:

Ingrese el largo del terreno: m

Ingrese el ancho del terreno: m

RESULTADOS

Área de la cuadrícula: m^2

Calcular

Ir a siguiente paso -->

Fig. 27: Entorno de Aprendizaje

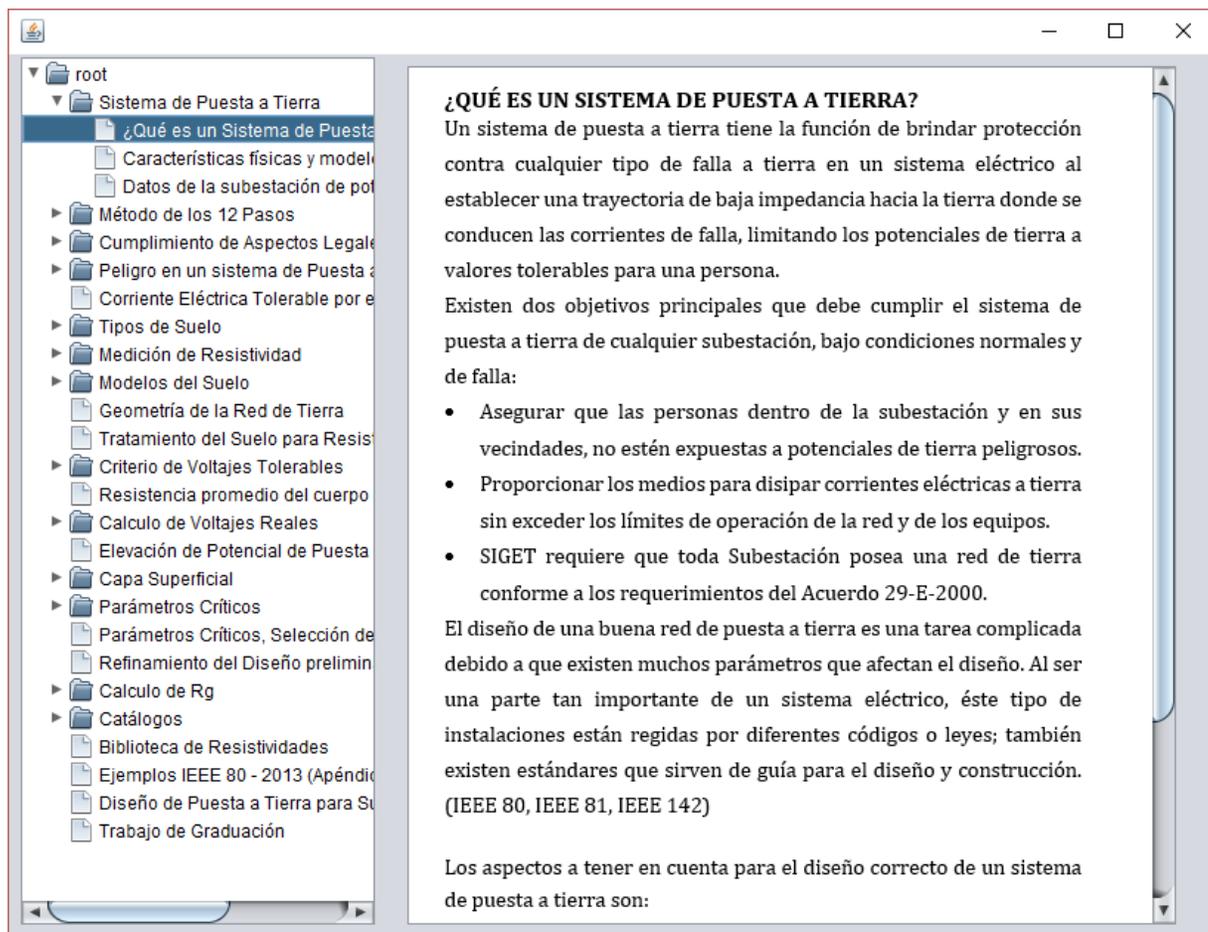


Fig. 28: Menú Ayuda

5.6. PROGRAMACIÓN EN JAVA

El lenguaje de programación: JAVA, el cual es de alto nivel y orientado a objetos, se auxilia de diversos conceptos y componentes (librerías, API'S) para permitir al programador una experiencia compleja en un primer momento pero sencilla en el transcurso del tiempo. En la tabla 18 se citan algunos de los componentes propios de JAVA y de terceros utilizados en el desarrollo de R-PAT

En la tabla 18 se observa que fueron un total de 64 elementos los utilizados de las diversas librerías/API listadas lo cual implica relacionarse con más de 200 tipos de métodos diferentes (y los argumentos de los mismos como también los valores de retorno de éstos) ya que cada elemento de la librería puede tener uno o más objetos relacionados al mismo (ello depende de la librería/API), ello sumado a la tarea de desarrollo de clases por parte de los autores.

El programa cuenta con un estimado de 12,000 líneas de código que se reparten en 37 diferentes clases diseñadas para la ejecución de tareas específicas como por ejemplo el cálculo de Rg, el cálculo del calibre de conductor, el cálculo del factor de división de corriente, las 8 funciones de ingeniería entre, otras tareas

| Componente (Librería/API) | Elementos usados | Descripción | Uso |
|--|--|---|---|
| JAVA SWING | 16 | Librería gráfica para la creación de GUI'S propia de JAVA | Define elementos como botones, ventanas y todo lo concerniente a una GUI |
| JAVA AWT | 15 | Librería gráfica para la creación de GUI'S (antigua) propia de JAVA | Aunque no se usó para el desarrollo de las GUI'S, si se utilizó su funcionalidad gráfica para dibujar la vista en planta de la cuadrícula |
| IO FILE | 9 | Librería propia de JAVA para manejo de archivos | Abrir, leer, crear y guardar archivos de proyecto con extensión “.ter” |
| ITEXT | 15 | API de terceros que maneja archivos en formato PDF (Puede crear o modificar uno existente) | API utilizada para generar el reporte con los datos ingresados y resultados en el entorno profesional de R-PAT |
| JAVA UTIL | 9 | Librería con utilidades diversas | Define entidades como ArrayList (arreglos dinámicos) y Arrays (arreglos estáticos y usuales) que se utilizaron en diversas tareas de programación |
| Clases propias (Desarrolladas por los autores de la tesis) | 37 | Clases para tareas de cálculo, manejo de archivos, elementos gráficos, etc. | Cálculos diversos, recolección de datos provistos por el usuario y procesamiento de los mismos a fin de obtener los resultados deseados |
| TOTAL: | 5 librerías/API'S, 64 elementos y más de 200 tipos de objetos | | |

Tabla 18: Componentes utilizados para el desarrollo de R-PAT en JAVA.

5.7. REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SISTEMA OPERATIVO

Es necesario, como primer paso, instalar la versión 8.40 o superior de JAVA en la PC. JAVA se puede descargar fácilmente del internet.

Las versiones de Windows donde R-PAT se puede ejecutar son:

- Windows Vista SP2
- Windows 7
- Windows 8
- Windows 8.1
- Windows 10

Las versiones de Linux donde R-PAT se puede ejecutar son:

- Oracle Linux 5.5+1
- Oracle Linux 6.x (32 bits), 6.x (64 bits)²
- Oracle Linux 7.x (64 bits)²
- Red Hat Enterprise Linux 5.5+1, 6.x (32 bits), 6.x (64 bits)²
- Ubuntu Linux 12.04 LTS, 13.x
- SUSE Linux Enterprise Server 10 SP2+, 11.x

Los requerimientos de hardware son:

- Espacio disponible en disco duro: 124MB para el JRE, 2MB para JAVA UPDATE, 2
- Procesador: Pentium 2 a 266MHZ
- Memoria RAM: 128MB

CONCLUSIONES

- El programa desarrollado (R-PAT) para obtener los parámetros eléctricos de la red de puesta a tierra para subestaciones, se desarrolló tomando en cuenta el estándar IEEE 80-2013, y está desarrollado en JAVA.
- Este programa es de rápida adaptación, ya que se caracteriza por su ambiente gráfico, similar al sistema operativo Windows.
- El programa facilita el desarrollo de los 12 pasos en tiempo y exactitud, y facilita la compresión de los resultados.
- El conocimiento y aplicación efectiva, eficiente y correcta de las diversas API'S que contiene nuestro software redujo a unas cuantas líneas de código tareas tales como la generación de un reporte en formato PDF.
- La verificación del cumplimiento de aspectos legales y de seguridad se presenta de una manera práctica y comprensible.
- Se comprobó la validez del programa aplicando ejemplos de trabajos de sistemas de puesta a tierra realizados por la norma, los resultados de los ejemplos se compararon con los obtenidos con el programa desarrollado.
- La seguridad en una subestación se garantiza controlando los voltajes de toque y paso, y la elevación de potencial a tierra (GPR).
- Actualmente, según el estándar IEEE 80-2013, no es necesario reducir el valor de resistencia de puesta a tierra (R_g) si se respetan los límites tolerables de voltaje de paso, toque y GPR.
- La unión de neutro y tierra en varios puntos es perjudicial al crear lazos de tierra.
- La corriente máxima de cuadrícula (I_G) es cero en condiciones de falla trifásica.
- Todo sistema de puesta a tierra para subestaciones debe poseer capa superficial.
- Todo electricista, técnico electricista e ingeniero electricista debe conocer de primeros auxilios y resucitación cardiopulmonar.
- Los criterios de seguridad y aspectos legales deben de cumplirse para garantizar la seguridad y desempeño del sistema de puesta a tierra y por lo tanto de la subestación.
- El incremento de la capa superficial aumenta el valor de los voltajes tolerables y es el nuevo enfoque principal de la IEEE 80-2013, sin embargo, es importante que el diseñador disminuya la Resistencia de Puesta a Tierra para evitar sobretensiones y estrés en el sistema y así evitar daños en equipo.

RECOMENDACIONES

- Incentivar al desarrollo de software en la EIE dado que muchas herramientas de análisis necesarias o muy convenientes para el Ingeniero Electricista son de alto costo monetario; por lo cual implementar una iniciativa como acá mencionada le brinda al estudiante la oportunidad de desarrollar herramientas de aplicación académica y así mismo le brinda al desarrollador la oportunidad de entender a profundidad las diversas tareas que el desarrollador de un software.
- Utilizar el entorno de aprendizaje junto al menú ayuda para una fácil comprensión en el diseño de redes de puesta a tierra

BIBLIOGRAFÍA

- *IEEE STD 80-1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" (Revision of IEEE STD 80-1976).*
- *IEEE STD 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" (Revision of IEEE STD 80-1986).*
- *IEEE STD 80-2013, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" (Revision of IEEE STD 80-2000).*
- *IEEE STD 81-1983, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System".*
- *Acuerdo No. 29-E-2000: Norma Técnicas de Diseño, Seguridad y Operación de las Instalaciones de Distribución Eléctrica. SIGET. San Salvador, junio de 2000.*
- *"Manual de aplicación de la norma IEEE STD 81-2012" Trabajo de Graduación de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.*
- *NEC 2007 (2007). National Electric Code. Massachusetts*
- *IEEE Std 142-2007(2007). Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. New York*
- *Head First: JAVA. Kathy Sierra y Bert Bates. Grupo O'RELLY. 2008*
- *IEEE Std 142-2007(2007). Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. New York*
- *A Comparison of IEC 479-1 and IEEE Std 80 on Grounding Safety Criteria, Vol. 23, No. 5, 1999.*
- *Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part 1 – Analytical Study.*
- *Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part 2– Comparison Between Theoretical and experimental results.*
- *Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part 3 – Study of Grounding Grids Performance and New Electrodes Configuration.*
- *Sakis Meliopoulos, A. P., F. Xia, E. B. Joy, and G. J. Cokkinides (1993) An advanced compute model for grounding system analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 8(1), 13-23.*

ANEXO

Para el cálculo del factor de división de corriente S_f por el método grafico, se enlistan a continuacion las graficas a utilizar.

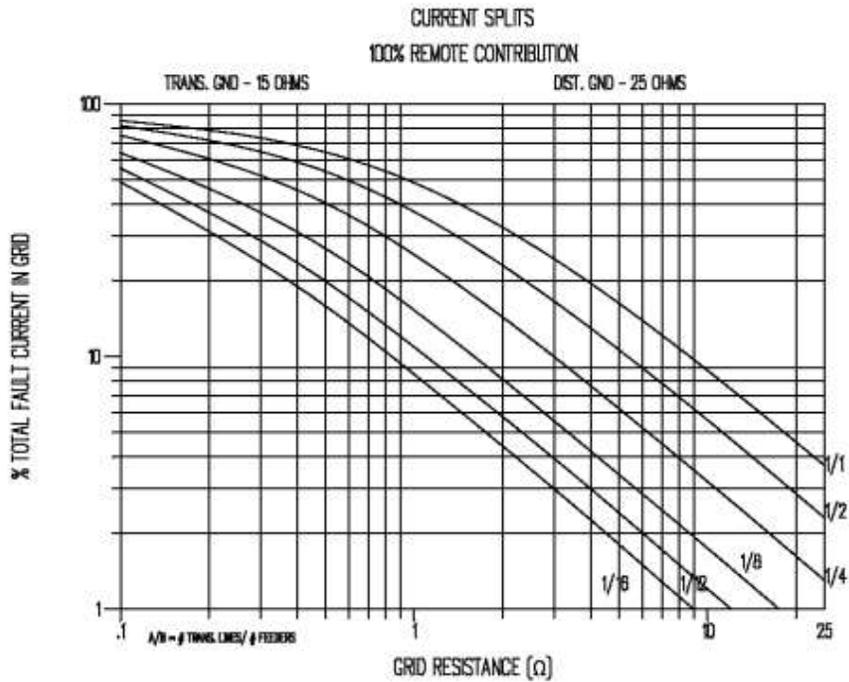
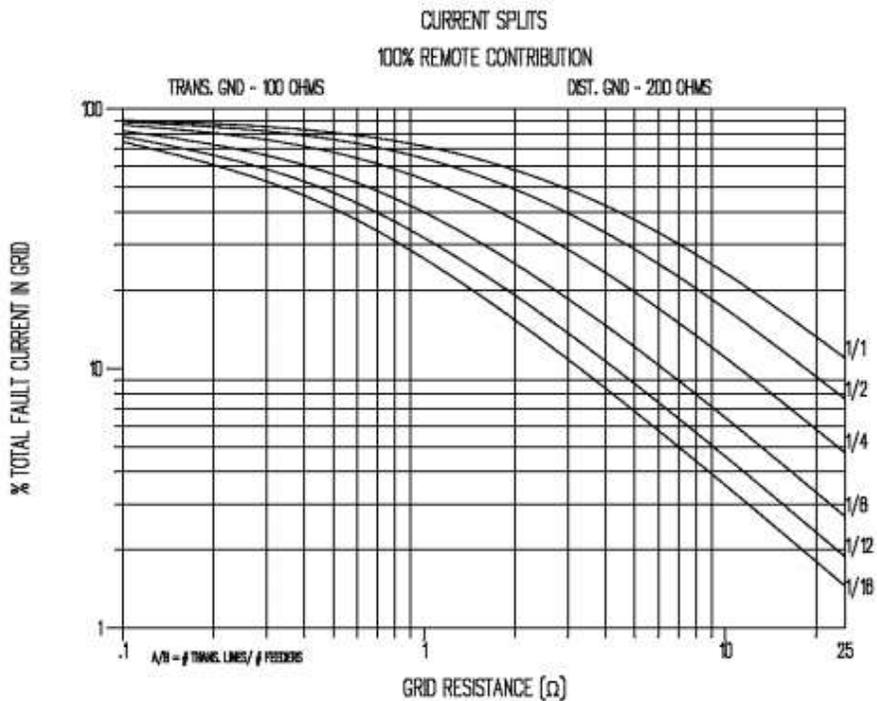


Figure C.1—Curves to approximate split factor S_f



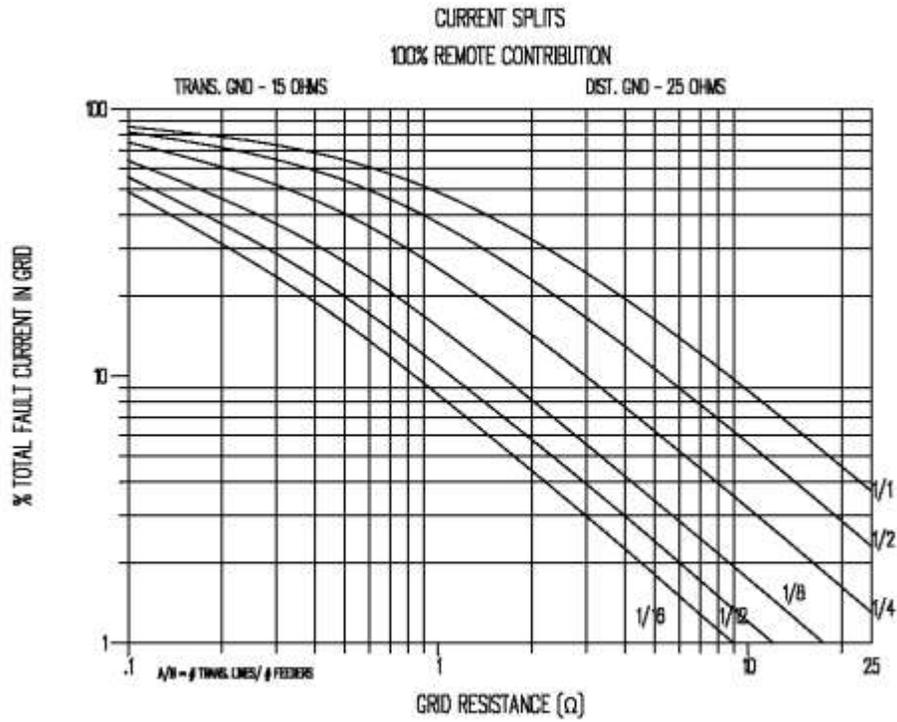
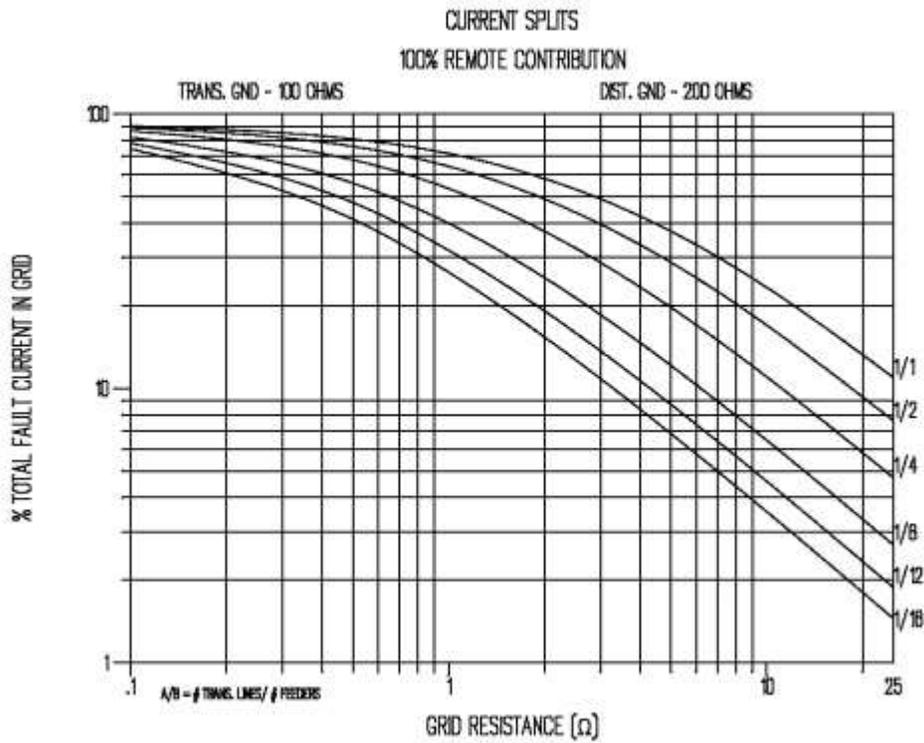


Figure C.1—Curves to approximate split factor S_f



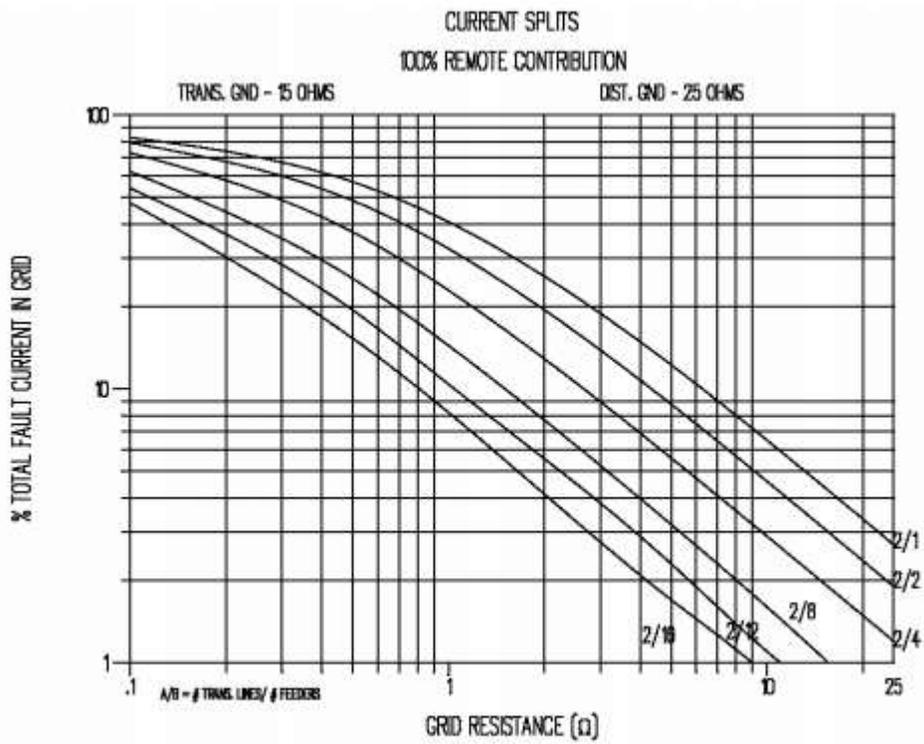
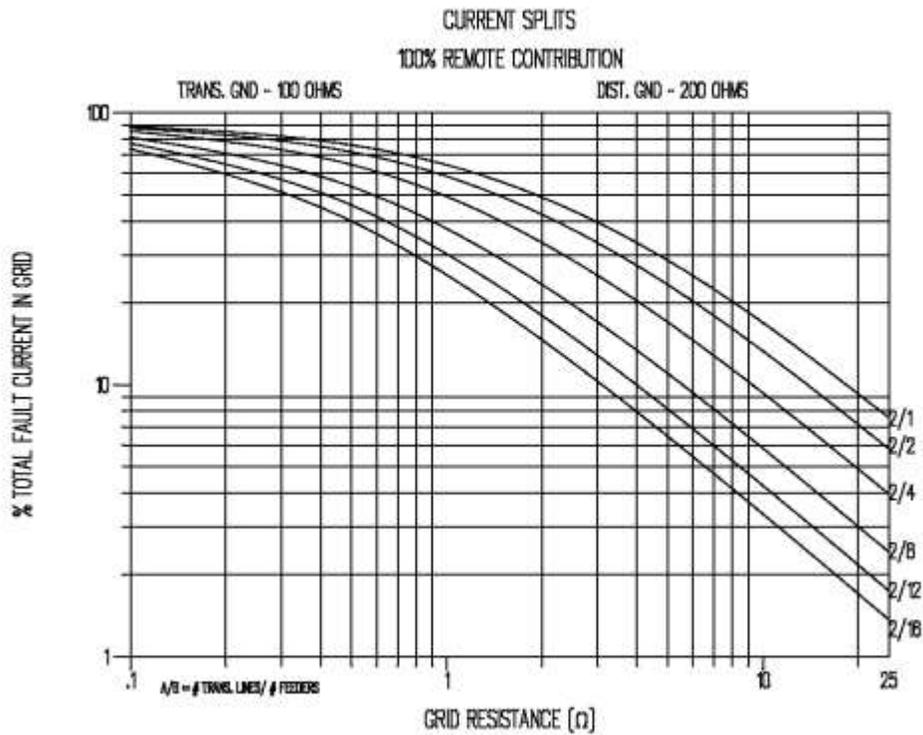


Figure C.3—Curves to approximate split factor S_f



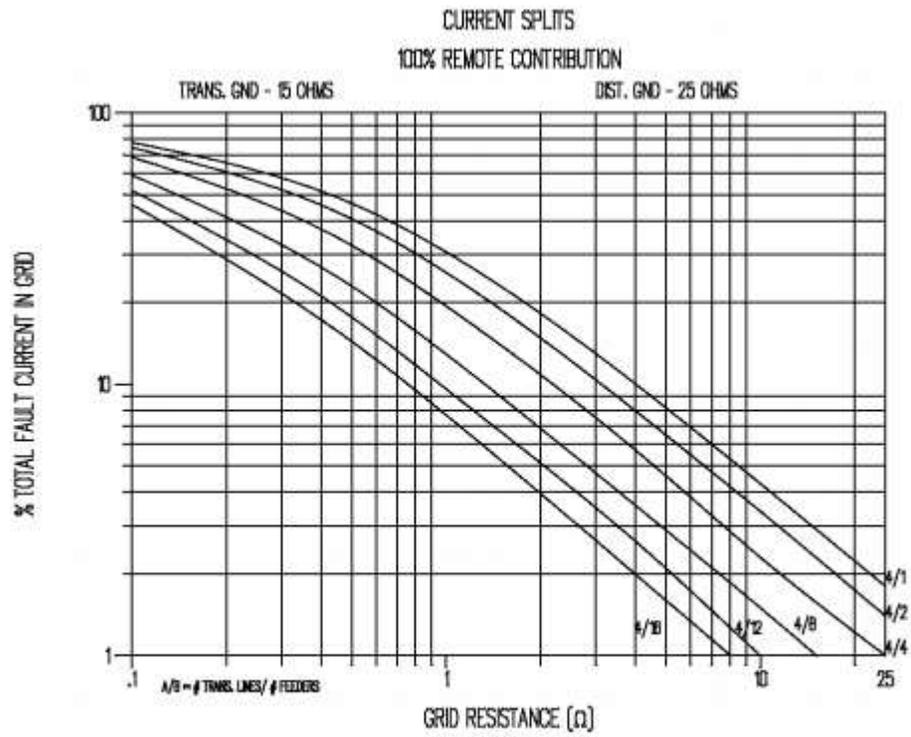
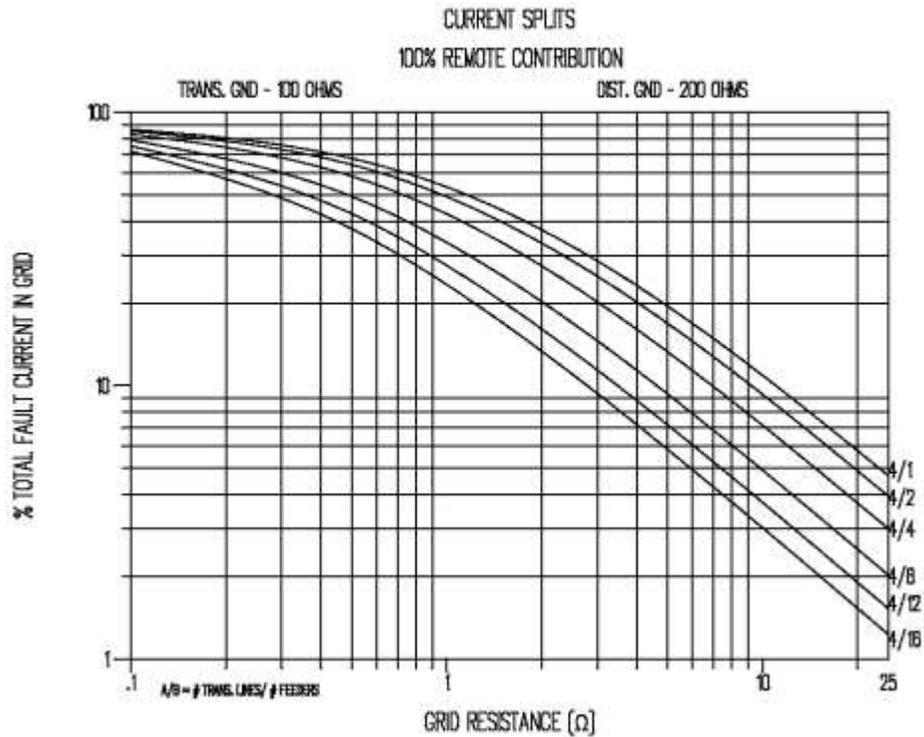


Figure C.5—Curves to approximate split factor S_f



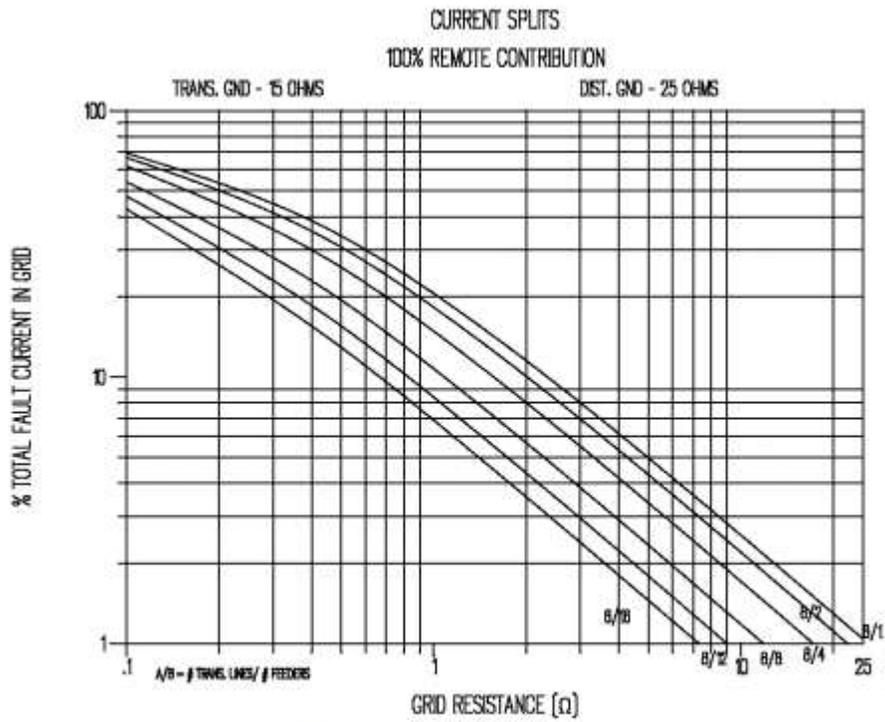
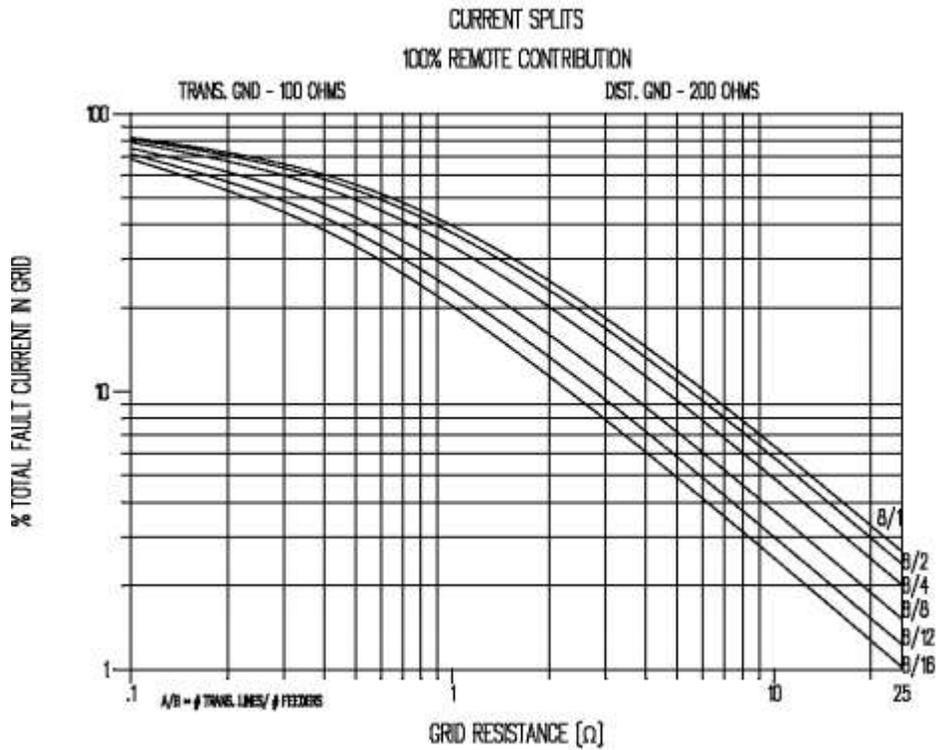


Figure C.7—Curves to approximate split factor S_f



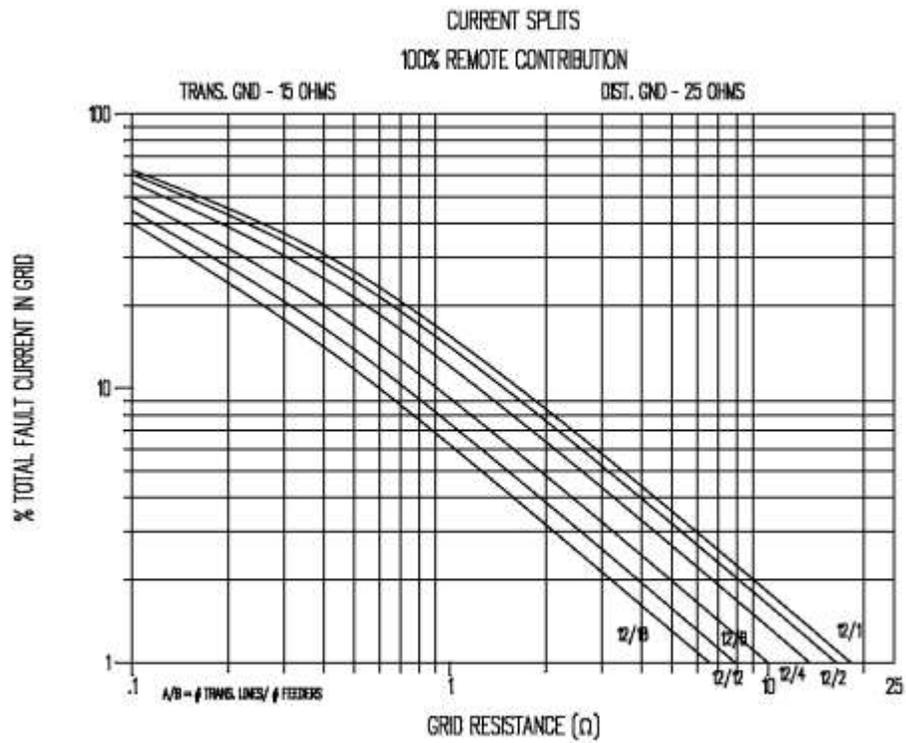
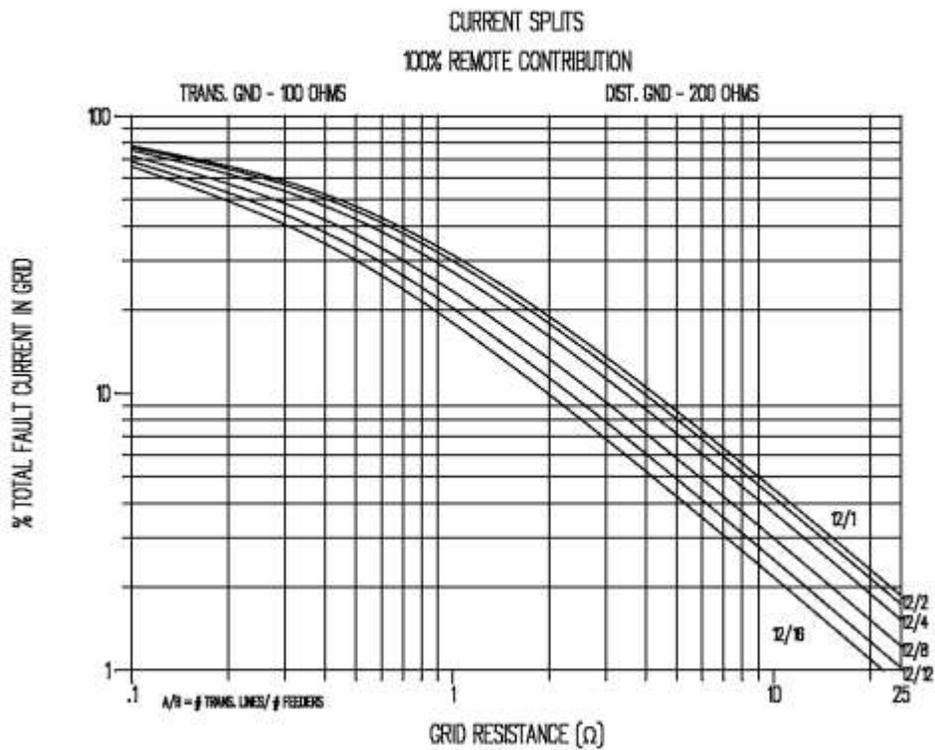


Figure C.9—Curves to approximate split factor S_f



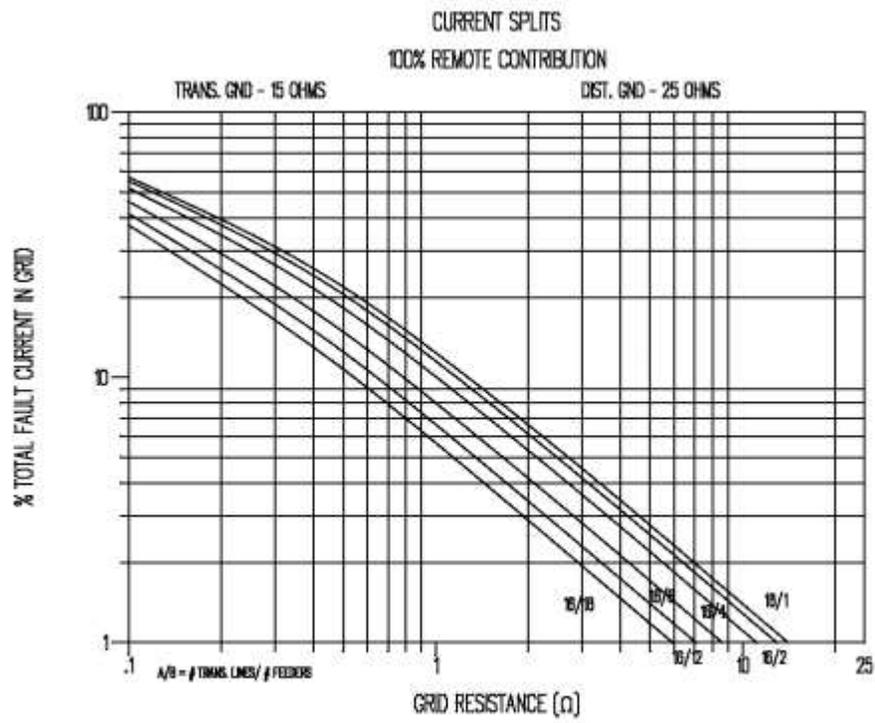
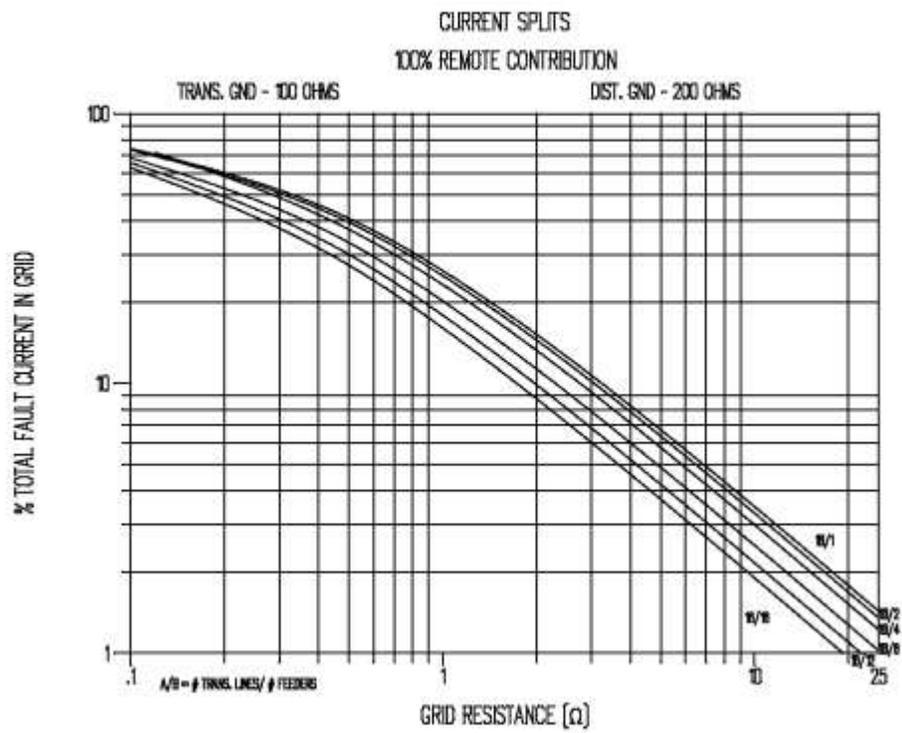


Figure C.11—Curves to approximate split factor S_f



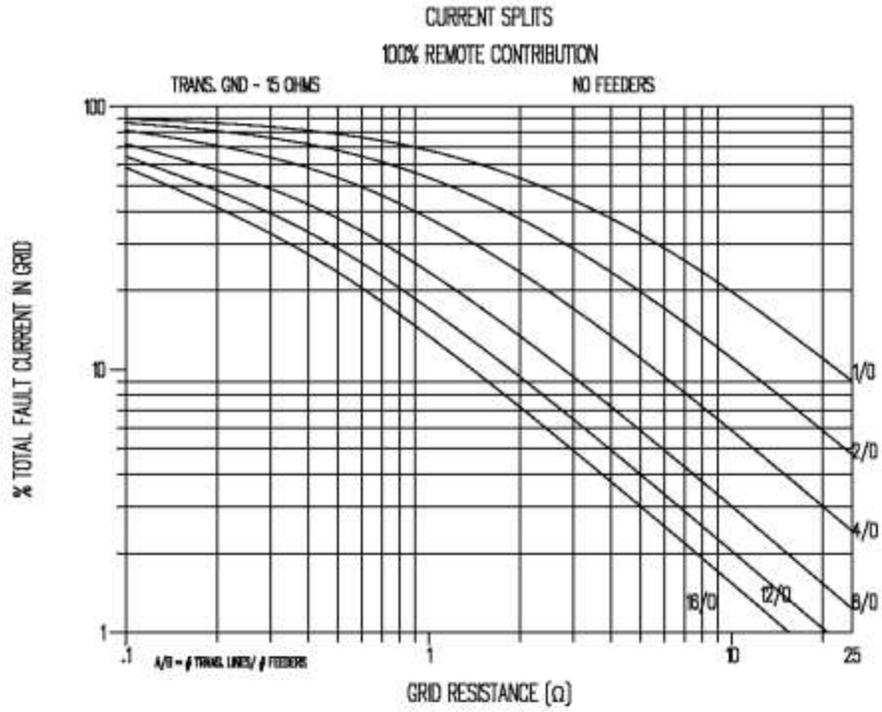
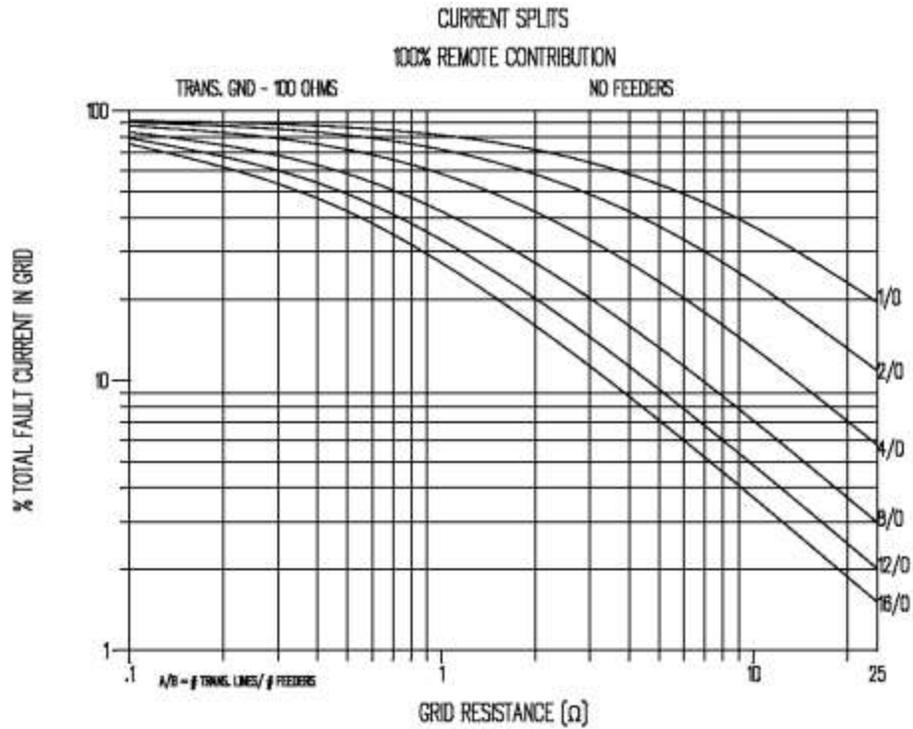


Figure C.13—Curves to approximate split factor S_f



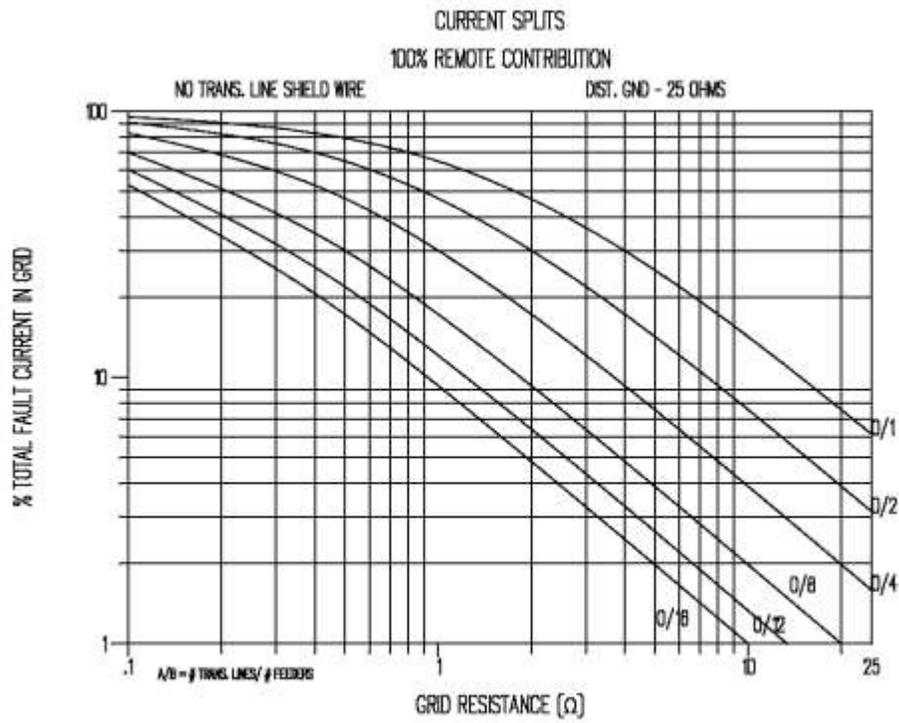
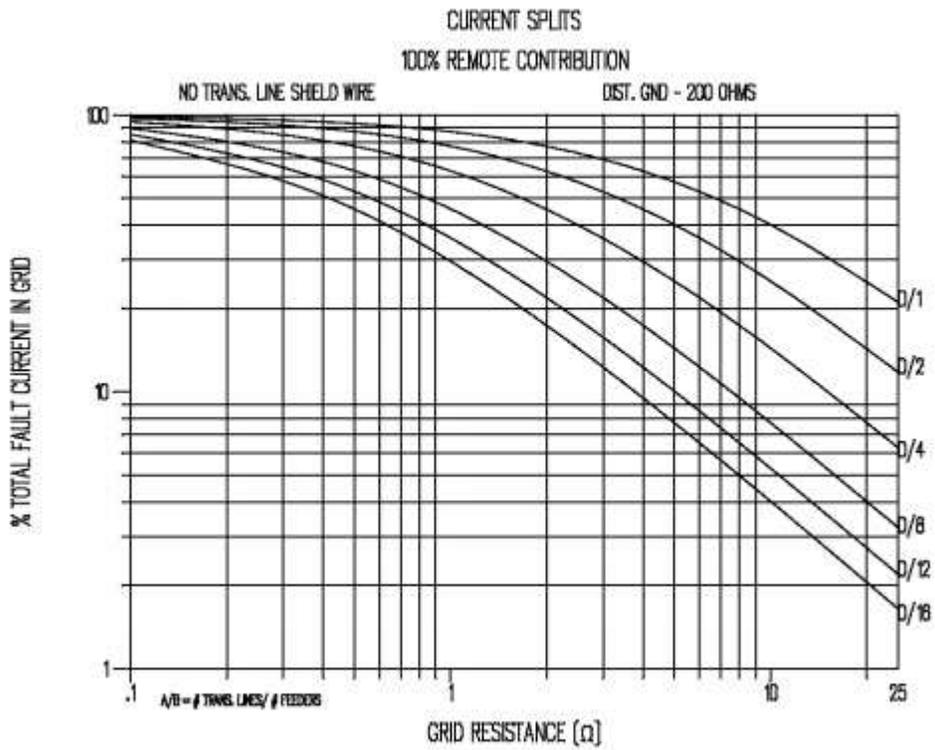


Figure C.15—Curves to approximate split factor S_f



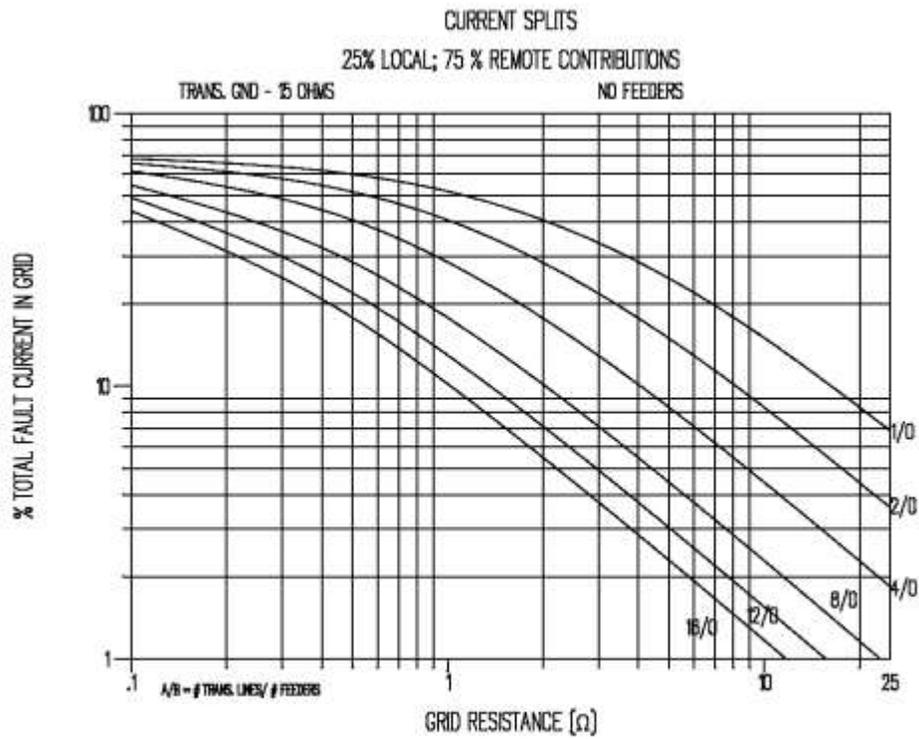
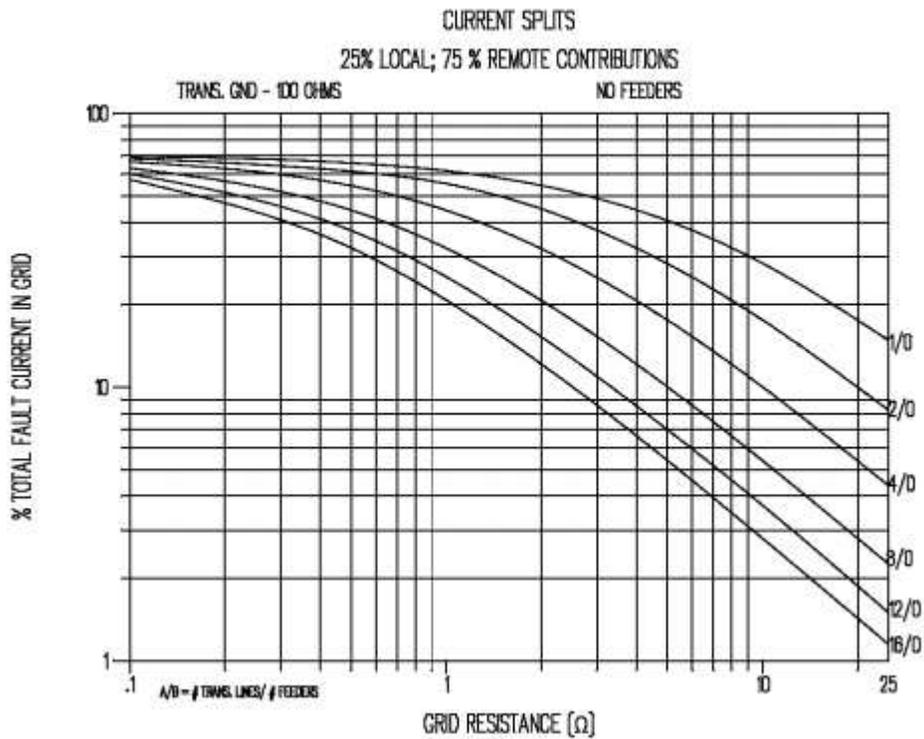


Figure C.17—Curves to approximate split factor S_f



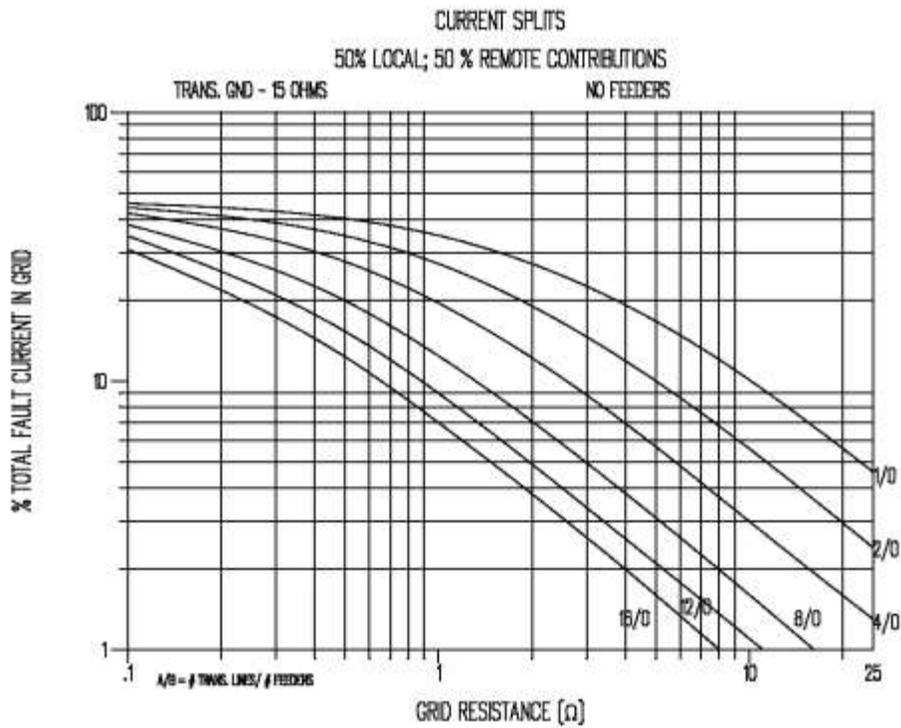
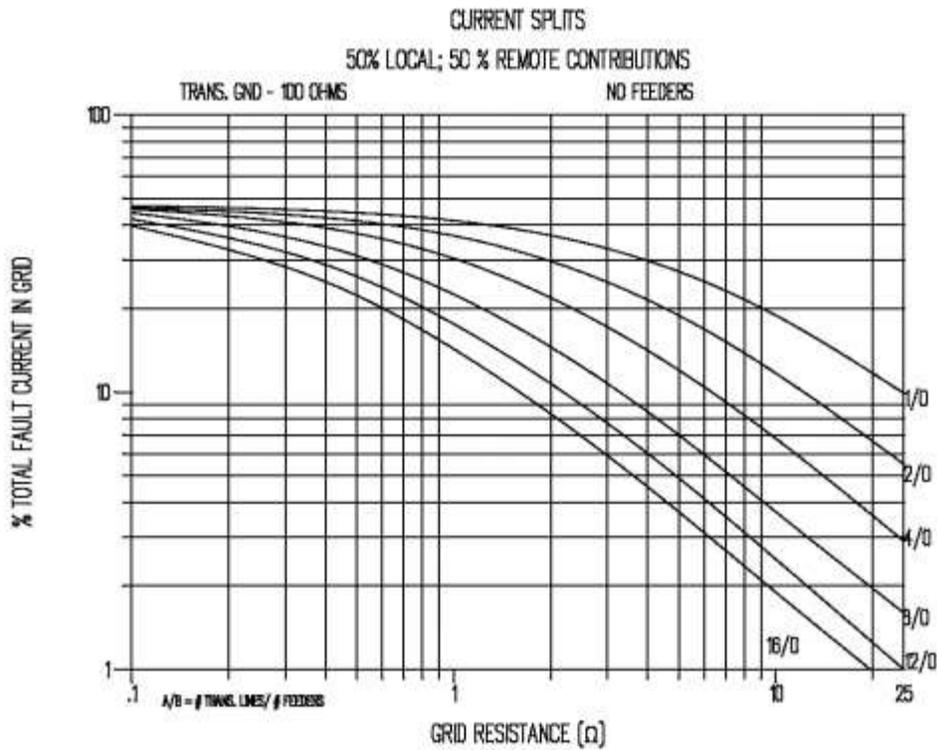


Figure C.19—Curves to approximate split factor S_f



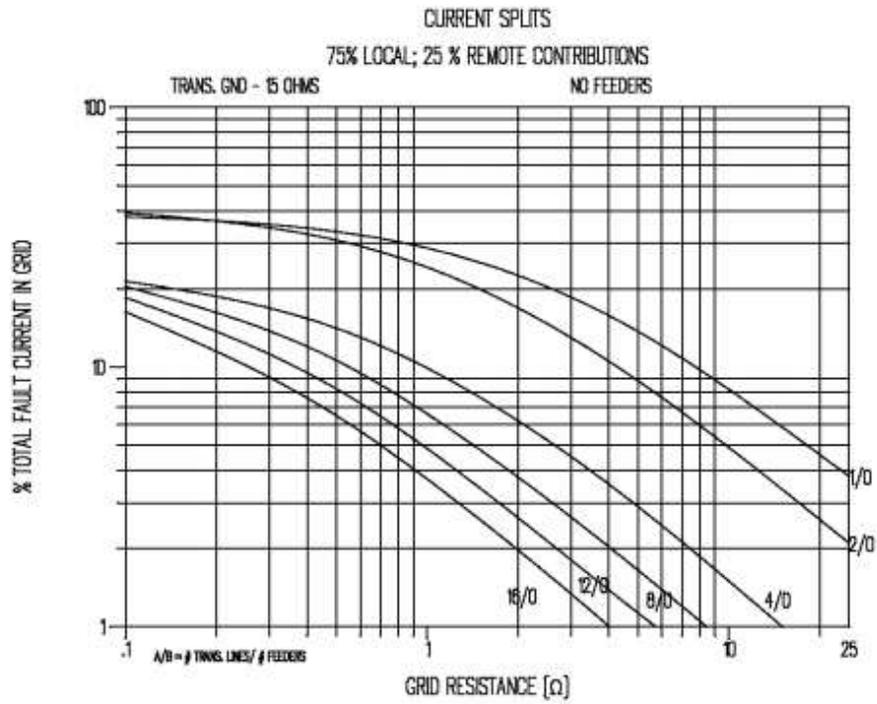


Figure C.21—Curves to approximate split factor S_f

