

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**IMPLEMENTACIÓN DE EJECUTABLES JAVA PARA
EL ANÁLISIS DE POTENCIALES ELÉCTRICOS Y
RESISTENCIA DE DISPERSIÓN EN SUELOS DE
SUBESTACIONES AC. DE ALTA TENSIÓN.**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

DENIS NISAES MORENO ORIHUELA

PROMOCIÓN 2005 – II

LIMA – PERÚ

2010

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Nisaes y Dina, mis hijos Nisaes Pedro y Lesly, y a mi esposa Ycela. Confío en que algún día, en la lejanía del tiempo, cuando se le ocurra a mis hijos y nietos releer estas hojas, les agrade recordar con cariño a su padre o abuelo, y me juzguen con benevolencia; si es así, me daré por satisfecho. También, mi deuda de gratitud a los docentes Lic. Santiago Mendoza e Ing. Gregorio Aguilar, por sus enseñanzas y consejos.

ÍNDICE DETALLADO

PRÓLOGO	13
 CAPÍTULO I:	
INTRODUCCIÓN	18
1.1 Objetivos.....	20
1.2 Formulación del problema.....	21
1.3 Antecedentes.....	21
1.4 Alcances.....	22
1.5 Definiciones.....	22
1.5.1 Electrodo auxiliar a tierra.....	22
1.5.2 Encerramiento continuo.....	22
1.5.3 Compensación DC offset.....	23
1.5.4 Factor de decremento.....	23
1.5.5 Corriente de falla asimétrica efectiva.....	23
1.5.6 Corrientes de encerramiento.....	25
1.5.7 Factor de división de la corriente de falla.....	25
1.5.8 Puesta a Tierra	25
1.5.9 Sistema Puesta a Tierra (SPT).....	25
1.5.10 Corriente a tierra.....	26
1.5.11 Electrodo a tierra.....	26
1.5.12 Malla a tierra	26
1.5.13 Aumento del potencial a tierra (GPR).....	26

1.5.14	Circuito de retorno a tierra.....	26
1.5.15	Rejilla a tierra.....	27
1.5.16	Corriente de rejilla máxima.....	27
1.5.17	Voltaje de malla.....	27
1.5.18	Voltaje de toque metal con metal.....	27
1.5.19	Encerramiento no continuo.....	28
1.5.20	Electrodo primario a tierra.....	28
1.5.21	Voltaje de Paso.....	29
1.5.22	Reactancia Subtransitoria.....	29
1.5.23	Material Superficial.....	29
1.5.24	Corriente simétrica de rejilla.....	29
1.5.25	Corriente simétrica de falla a tierra.....	30
1.5.26	Voltaje de toque.....	30
1.5.27	Voltaje de transferencia.....	31
1.5.28	Relación X/R.....	31

CAPÍTULO II:

	CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL JAVA.....	32
2.1	Seguridad para el diseño.....	32
2.1.1	El problema básico.....	32
2.1.2	Condiciones de peligro.....	36
2.2	Rango de corriente tolerable	37
2.2.1	Efecto de la frecuencia.....	38
2.2.2	Efecto de la magnitud y duración.....	39
2.2.3	Importancia en eliminar una falla rápidamente.....	41
2.3	Límite de corriente tolerable por el cuerpo.....	42

2.3.1	Fórmula de la magnitud y duración de la corriente.....	42
2.3.2	Suposiciones alternas.....	43
2.3.3	Comparación de las ecuaciones de Dalziel y la curva de Biegelmeier.....	46
2.3.4	Notas sobre el recierre (reclosing).....	48
2.4	Circuito accidental a tierra	48
2.4.1	Resistencia del cuerpo humano.....	48
2.4.2	Trayectorias de corriente a través del cuerpo.....	50
2.4.3	Circuitos accidentales equivalentes.....	51
2.4.4	Efecto de una capa delgada del material superficial.....	57
2.5	Criterio del voltaje tolerable.....	62
2.5.1	Definiciones.....	62
	a) Aumento del potencial a tierra (GPR).....	62
	b) Voltaje de malla.....	63
	c) Voltaje de toque metal-metal.....	63
	d) Voltaje de paso.....	63
	e) Voltaje de toque.....	63
	f) Voltaje transferido.....	63
2.5.2	Situaciones típicas de choque.....	65
2.5.3	Criterios del voltaje de paso (step) y de toque (touch).....	66
2.5.4	Efecto de corrientes a tierra sostenidas.....	69

CAPÍTULO III:

CONSIDERACIONES PRINCIPALES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA

PUESTA A TIERRA 70

3.1 Definiciones..... 70

3.1.1 Electrodo auxiliar a tierra.....	70
3.1.2 Electrodo a tierra.....	70
3.1.3 Malla a tierra.....	70
3.1.4 Rejilla a tierra	71
3.1.5 Electrodo primario a tierra	71
3.2 Concepto general	71
3.3 Electrodo primario y auxiliar a tierra	74
3.4 Aspectos básicos del diseño de rejillas.....	74
3.5 Diseño en condiciones difíciles.....	76
3.6 Conexiones a la rejilla.....	77
3.7 Selección de los conductores y conexiones.....	78
3.7.1 Requisitos básicos.....	79
3.7.2 Selección del material para conductores y problemas relacionados de corrosión.....	79
a) El cobre.....	79
b) El acero con revestimiento de cobre.....	80
c) El aluminio.....	80
d) El acero.....	81
e) Otras consideraciones.....	81
3.7.3 Factores del dimensionamiento de los conductores.	82
3.7.3.1 Corrientes simétricas.....	82
a) Sustitución de fórmulas.....	85
b) Simplificación de fórmulas.....	86
3.7.3.2 Corrientes Asimétricas.....	89
a) Utilizando un factor de reducción.....	89
b) Utilizando las tablas de corrientes asimétricas.....	90

3.7.3.3 Factores secundarios del calibre del conductor.....	93
3.7.4 Selección de conexiones.....	95

CAPÍTULO IV:

CARACTERÍSTICAS, ESTRUCTURA Y SELECCIÓN DEL MODELO DE SUELO..... 97

4.1 Características del suelo.....	97
4.1.1 Modelo de suelo.....	97
4.1.2 Efecto del gradiente de voltaje.....	98
4.1.3 Efecto de la magnitud de la corriente.....	98
4.1.4 Efecto de la humedad, temperatura y contenido químico.....	98
4.1.5 Uso de capas de material superficial.....	101
4.2 Estructura del suelo y selección del modelo de suelo.....	104
4.2.1 Investigación de la estructura del suelo.....	104
4.2.2 Clasificación de los suelos y rango de resistividad.....	104
4.2.3 Mediciones de la resistividad.....	104
4.2.4 Interpretación de las mediciones de la resistividad del suelo....	110
4.2.4.1 Suposición de suelo uniforme.....	112
4.2.4.2 Suposiciones del suelo no uniforme.....	115
a) Modelo de suelo de dos capas (general)....	115
b) Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico.....	116
c) La comparación de un modelo de suelo uniforme y de dos capas.	123
d) Modelo de suelo de capas múltiples.....	125

CAPÍTULO V:

IMPLEMENTACIÓN DEL EJECUTABLE JAVA – MÓDULO 1.....	126
5.1 Introducción.....	126
5.2 Ejemplo 5.1: Cálculo de resistividades para suelo de 2 capas.....	133
5.3 Implementación del Ejecutable Java – Módulo 1.....	138
5.3.1 Lenguaje del Ejecutable Java - Módulo 1.....	140
5.3.2 Ejemplo 5.2: Primera y Segunda Capa a 140 y 63 ohm-m.....	145
5.3.3 Ejemplo 5.3: Primera y Segunda Capa a 8 y 107 ohm-m.....	147
5.3.4 Ejemplo 5.4: Primera y Segunda Capa a 57 y 308 ohm-m.....	149

CAPÍTULO VI:

IMPLEMENTACIÓN DEL EJECUTABLE JAVA – MÓDULO 2.....	151
6.1 Introducción.....	151
6.2 Implementación del ejecutable Java – Módulo 2.....	153
6.2.1 Ejemplo 6.1: Diseño de rejilla cuadrada sin varillas.....	153
6.2.2 Ejemplo 6.2: Diseño de rejilla cuadrada con varillas.....	160
6.2.3 Lenguaje del Ejecutable Java – Módulo 2.....	162

CAPÍTULO VII:

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISPERSIÓN.....	171
7.1 Necesidades usuales.....	171
7.2 Cálculos simplificados.....	171
7.3 Ecuaciones de Schwarz.....	174
7.4 Notas sobre la resistencia de los electrodos primarios.....	178
7.5 Tratamiento del suelo para bajar la resistividad.....	178

CAPÍTULO VIII:

DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE MÁXIMA DE REJILLA.....	181
8.1 Definiciones.....	181
8.1.1 Compensación DC offset	181
8.1.2 Factor de decremento.....	181
8.1.3 Factor de división de la corriente de falla.....	181
8.1.4 Corriente de rejilla máxima.....	182
8.1.5 Reactancia Subtransitoria.....	182
8.1.6 Corriente simétrica de rejilla.....	183
8.1.7 Reactancia sincrónica.....	183
8.1.8 Reactancia Transitoria.....	183
8.1.9 Relación X/R.....	183
8.2 Procedimiento.....	184
8.3 Tipos de fallas a tierra.....	185
8.4 Efecto de la resistencia a tierra de la subestación.....	189
8.5 Efecto de la resistencia de falla.....	189
8.6 Efecto del cable de guarda y del conductor neutro.....	190
8.7 Efecto de ductos y cables enterrados directamente.....	191
8.8 Peores tipos de fallas y ubicación.....	191
8.9 Cálculo de la división de corriente.....	195
8.10 Efecto de la asimetría.....	199
8.11 Efecto de los cambios futuros.....	205

CAPÍTULO IX:

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO SEGURO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA.....	207
---	------------

9.1	Criterios de diseño.....	207
9.2	Parámetros críticos.....	210
9.2.1	Corriente máxima de rejilla (I_G).....	210
9.2.2	Duración de la falla (t_f) y duración de la descarga (t_S).....	210
9.2.3	Resistividad del suelo (ρ).....	211
9.2.4	Resistividad de la capa superficial (ρ_S).....	211
9.2.5	Geometría de la rejilla.....	211
9.3	Índice de parámetros de diseño.....	212
9.4	Procedimiento de diseño.....	214
9.5	Cálculo de los voltajes máximo de malla y de paso.....	216
9.5.1	Voltaje de malla (E_m).....	217
9.5.2	Voltaje de paso (E_S).....	222
9.6	Refinamiento del diseño preliminar.....	222
9.7	Aplicación de ecuaciones para E_m y E_S	224
9.8	Uso del análisis por computador en el diseño de rejilla.....	225

CAPÍTULO X:

PRUEBAS DE CAMPO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA YA

	CONSTRUIDO.....	227
10.1	Mediciones de la impedancia	227
10.1.1	El método de dos puntos.....	227
10.1.2	El método de los tres puntos.....	228
10.1.3	Relación del método.....	228
10.1.4	Pruebas de las etapas de falla.	229
10.1.5	Método de la caída de potencial.....	229
10.2	Investigación de campo los contornos de potencial	

y voltajes de toque y de paso.....	233
10.3 Valoración de las mediciones de campo para diseño seguro.....	235
10.4 Prueba de integridad de la rejilla a tierra.....	235
10.5 Verificaciones periódicas del Sistema Puesta a Tierra que se instala...	237
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	238
Conclusiones.....	238
Recomendaciones.....	241
ANEXO A:	
NUMERACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	245
ANEXO B:	
ANÁLISIS DE POTENCIALES ELÉCTRICOS Y RESISTENCIA DE	
DISPERSIÓN.....	253
B.1 Ejemplo 1 – Rejilla cuadrada sin varillas	254
B.2 Ejemplo 2 – Rejilla cuadrada con varillas.....	259
B.3 Ejemplo 3 – Rejilla rectangular con varillas.....	261
B.4 Ejemplo 4 – Rejilla en forma de “L” con varillas.....	263
ANEXO C:	
ANÁLISIS GRÁFICO Y APROXIMADO DE LA DIVISIÓN DE CORRIENTE....	266
C.1 Introducción.....	266
C.2 Como utilizar los gráficos y la tabla de impedancia equivalente.....	267
C.3 Ejemplos.....	268
C.4 Ecuaciones para calcular las impedancias de línea.....	269

ANEXO D:

ECUACIONES SIMPLIFICADAS DE PASO Y MALLA.....	281
---	-----

ANEXO E:

MODELO DE SUELO UNIFORME EQUIVALENTE PARA SUELOS NO UNIFORMES.....	283
E.1 Cálculos de la resistividad aparente.....	284

ANEXO F:

ACERCA DEL JAVA	285
F.1 Independencia de la plataforma	285
F.2 Sintaxis	286
F.3 Industria relacionada	288

PRÓLOGO

El presente trabajo viene a ser una guía para el ingeniero de diseño, en logro del dominio de técnicas y metodologías para el análisis de potenciales eléctricos y resistencia de dispersión en suelos de subestaciones de energía eléctrica de corriente alterna (AC) de alta tensión. La Implementación de Ejecutables Java es para facilitar el análisis en el diseño, puesto que cuenta con cálculos numéricos tediosos como son las matrices, sumatorias e iteraciones.

Es importante resaltar mi aporte con los Ejecutables Java porque está absolutamente libre de licencias y de portabilidad magnética.

El capítulo 1, se refiere a la introducción del trabajo en mención, indicando los objetivos específicos, la formulación de la problemática, los antecedentes, los alcances y las definiciones pertinentes para el desarrollo del mismo.

El capítulo 2, se refiere a las consideraciones principales para el diseño del Sistema de Puesta a Tierra (en adelante, llamado SPT), explicando la seguridad del dos criterios concretos, primero proveer los medios para conducir corrientes eléctricas hacia el planeta bajo condiciones normales y de fallas asegurando que el personal no esté expuesta a los peligros de un golpe eléctrico crítico en las cercanías de una subestación de energía eléctrica y, segundo proteger los equipos eléctricos sin exceder el límite que afecten severamente la continuidad del servicio.

El subcapítulo 2.2, se refiere al rango de corriente tolerable por el cuerpo humano dependiendo de la duración, magnitud y frecuencia. Se explica la Fibrilación Ventricular que es la consecuencia más peligrosa ante la exposición de la corriente.

El subcapítulo 2.3, se refiere a la formulación de la magnitud y duración del corriente límite tolerable por el cuerpo a 50 ó 60 Hertz y que a su vez debe ser menor al valor que causa la fibrilación ventricular del corazón. También, se hace comparación la formulación de Dalziel y la curva de Biegelmeier para este mismo propósito.

El subcapítulo 2.4, se refiere al circuito accidental a tierra que es aquel voltaje que causará la circulación de una corriente tolerable por el cuerpo humano. Esto a su vez se describe como el voltaje total efectivo del circuito accidental denominado voltaje de toque y de paso.

El subcapítulo 2.5, se refiere a la formulación del voltaje tolerable de toque y de paso para peso corporal de 50 y 70 kg considerando la capa de grava superficial de manera tal que la persona no absorba una cantidad crítica de descarga eléctrica, antes de que la falla se elimine y se suspenda el servicio de energía del sistema.

El capítulo 3, se refiere a las consideraciones principales para el diseño del SPT para limitar el efecto del gradiente de potencial a tierra para niveles de voltaje y corriente que no pondrán en peligro la seguridad de las personas o equipos bajo condiciones normales y falla. El sistema debe garantizar el servicio continuo. También, se explican las condiciones difíciles para el diseño como en áreas donde la resistividad del suelo es un tanto alta o el espacio de la subestación de energía eléctrica es muy escaso.

Importante incluir la selección de los conductores que conducirán la corriente de falla al planeta según las exigencias de resistencia a la fusión, conductividad, corrosión y deterioro mecánico de los mismos. Se muestran las propiedades eléctricas y mecánicas de los conductores como el cobre, acero con revestimiento de cobre, aluminio y acero según estándares de la ASTM.

El capítulo 4, se refiere a las características del suelo y sus efectos ante la magnitud de la corriente en la resistividad del mismo, dependiendo de las características térmicas, contenido de humedad y composición química. También, se hace mención a la estructura y selección del modelo de suelo mediante mediciones de la resistividad según el método Wenner. Un gran número de técnicas de medición se describen con detalle en el Estándar 81-1983 del Institute of Electrical and Electronics Engineers (en adelante, IEEE). El método de cuatro electrodos de Werner, generalmente es la técnica que más se utiliza. Se interpreta las mediciones de la resistividad del suelo bajo suposiciones de suelo uniforme y no uniforme como un modelo de suelo de dos capas.

El capítulo 5, se justifica el uso del análisis por computadora para el estudio de resistividades de un modelo de suelo de dos capas a partir de las mediciones según el método de cuatro electrodos de Wenner. Incluye la Implementación del Ejecutable Java – **Módulo 1** y ejemplos de aplicación.

El capítulo 6, se justifica el uso del análisis por computadora para los potenciales eléctricos y resistencia de dispersión. También, se agrega el diseño de rejilla a tierra aplicando las ecuaciones, tablas y gráficas. Incluye la Implementación del Ejecutable Java – **Módulo 2** y ejemplos de aplicación.

El capítulo 7, se refiere a la evaluación de la resistencia hacia la tierra remota de subestaciones de transmisión y otras más grandes, la resistencia a tierra es comúnmente de 1Ω ó menos. En subestaciones de distribución más pequeñas, el rango que comúnmente se acepta es desde 1Ω hasta 5Ω . Se explican también los tratamientos del suelo para bajar la resistividad del mismo.

El capítulo 8, se refiere a los procedimientos para determinar la corriente máxima de rejilla que dependen del lugar de falla, magnitud de la impedancia de rejilla, cables de guarda, neutros u otras trayectorias de retorno a tierra.

El capítulo 9, se refiere al procedimiento para el diseño del SPT, explicando de forma detallada el procedimiento compuesto por 12 pasos ilustrado mediante un diagrama de bloques, en el que se resaltan los parámetros críticos como la corriente máxima de rejilla, duración de la falla, resistividad del suelo, resistividad de la capa superficial y geometría de la rejilla.

El capítulo 10, se refiere a las pruebas de campo de un SPT ya construido, a los métodos de medición como son el de dos puntos, tres puntos y por caída de potencial. Esta última se utiliza universalmente en todos los tipos de mediciones de SPT.

Se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos similares en el futuro. Se muestra en el Anexo A la bibliografía y en el Anexo B los 4 ejemplos que aplica de las ecuaciones, tablas y gráficas que se han tratado en el presente trabajo. Entre los ejemplos tenemos a la rejilla cuadrada sin varillas y con varillas, la rejilla rectangular y en forma de "L" con varillas.

El Análisis gráfico y aproximado de la división de corriente se muestran el Anexo C; las ecuaciones simplificadas y modelo de suelo uniforme equivalente para suelos no uniformes de suelos en los anexos D y E respectivamente.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo está relacionado, principalmente, con subestaciones de energía eléctrica exteriores de corriente alterna (AC) ya sean convencionales. Los siguientes estándares dan información sobre aspectos específicos de subestaciones. El presente trabajo se debe usar en combinación con las siguientes publicaciones.

Código Nacional de Electricidad Suministro – 2001, Parte I “Reglas para la instalación y mantenimiento de estaciones de suministro eléctrico y equipos” y Sección 3 “Métodos de Puesta a Tierra para Instalaciones de Suministro Eléctrico y Comunicaciones”, elaborado por la DGE del Ministerio de Energía y Minas mediante RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 366-2001 EM/VME.

Código Nacional de Electricidad de Utilización – 2006, Sección 60 “Puesta a Tierra y Enlace Equipotencial”, elaborado por la DGE del Ministerio de Energía y Minas mediante RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 037-2006-MEM/DM.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Std. 81-1983 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.

IEEE Std. 81.2-1992, Guide for Measuring of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extender or Interconnected Grounding Systems.

Estas dos publicaciones antes mencionadas dan procedimientos para la medición de la resistividad, la resistencia de SPT instalados, los gradientes de superficie y la continuidad de los conductores de la rejilla.

IEEE Std. 142-1991, Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Green Book). Se conoce también como Green Book, cubre algunos (resistividad, humedad) de los aspectos prácticos como puesta a tierra de equipos, trayectorias de cables para evitar corrientes de tierra inducidas, puesta a tierra de cables de pantalla (protección contra estática y descargas) e instalaciones interiores, etc.

IEEE Std. 367-1996, Recommended Practice for Determining the Electric Power Substation Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault. Explica en forma detallada el fenómeno de la corriente asimétrica y de la división de la corriente de falla que ocurre en muchas trayectorias en paralelo.

IEEE Std. 837-1989 (Reaff 1996), Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding. Da pruebas y criterios para seleccionar las conexiones que se usarán en los SPT.

Accredited Standards Committee C2-1997, National Electric Safety Code (NESC)

1.1 Objetivos

El objetivo integral es dar lineamientos e información pertinente para la seguridad en el diseño de subestaciones de energía eléctrica de corriente alterna (AC). Los objetivos específicos son:

- a) Establecer, como base para el diseño, los límites seguros de las diferencias de potencial que puedan existir en una subestación y sistemas eléctricos en condiciones de falla, entre los puntos que pueden entrar en contacto con el cuerpo humano.
- b) Revisar las normas internacionales de subestaciones de energía eléctrica y sistemas eléctricos con referencia especial a la seguridad y desarrollar criterios para el diseño seguro.
- c) Dar un procedimiento técnico muy detallado y por etapas para el diseño de sistemas prácticos de puesta a tierra basados en esos criterios.
- d) Implementar un método analítico por computador que asista al ingeniero de diseño en obtener el modelo de suelo más adecuado a partir de la toma de mediciones de campo y observaciones.
- e) Implementar un método analítico por computador que asista al ingeniero de diseño en la solución de los problemas típicos que se presentan en los sistemas prácticos de puesta a tierra como son los potenciales eléctricos y la geometría de la resistencia de dispersión.

1.2 Formulación del problema

Los errores en un SPT representan un peligro de seguridad industrial. La instalación incorrecta implica desde lesiones menores hasta la muerte de una persona, lo mismo que operaciones erráticas ó daños costosos e irreparables a los equipos e instalaciones.

El diseño del SPT en subestaciones se debe realizar de manera tal, que límite el efecto del gradiente de potencial a tierra tanto en niveles de corriente, voltaje de toque y voltaje de paso, para no poner en peligro la seguridad de las personas ó equipos bajo condiciones normales ó de falla.

1.3 Antecedentes

En el nuevo comercio global, las empresas de seguros limitan sus responsabilidades financieras cuando en una instalación no se puede demostrar la “calidad del sistema” (seguridad adecuada) y lo primero que investigan es si se está cumpliendo las normas.

La política corporativa de las empresas de seguros es lograr seguridad y rentabilidad, tratando de evitar accidentes y de pagar considerables sumas de dinero por indemnización en caso de siniestro.

Los procedimientos para desarrollar un SPT se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja. Los conceptos son ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger.

1.4 Alcances

Los problemas peculiares de las subestaciones de energía eléctrica de corriente continua (DC), el análisis cuantitativo de los efectos de las descargas eléctricas (lightning surges), el fenómeno de la corrosión subterránea, la protección catódica y los modelos de suelo de tres (3) capas a más, estarán fuera del alcance del presente trabajo.

1.5 Definiciones

Muchas de las definiciones sólo son pertinentes para la sustentación del presente trabajo. No se hará referencia a ninguna de las definiciones que se dan a continuación, a menos que se necesite por claridad. Todas las demás definiciones están dentro del texto de las cláusulas individuales. Para definiciones adicionales refiérase al IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms [B21].

1.5.1 Electrodo auxiliar a tierra : Un electrodo con cierto diseño ó restricciones de operación. Su función puede ser distinta a la de conducir la corriente de falla a tierra hacia el planeta. Los electrodos auxiliares típicos incluyen estructuras metálicas subterráneas y barras de refuerzo en concreto, si está conectado a la rejilla a tierra. Los electrodos auxiliares pueden tener una capacidad limitada para transportar corriente.

1.5.2 Encerramiento continuo: es el encerramiento de barra en la cual las secciones continuas de la cubierta, a lo largo del mismo conductor de fase están empalmadas para dar una trayectoria eléctricamente continua a la corriente, en toda la longitud del encerramiento. Los empalmes cruzados, que conectan los

encerramientos de las otras fases, se hacen sólo en los extremos de la instalación y en algunos pocos puntos intermedios seleccionados.

1.5.3 Compensación de corriente continua (DC Offset): es la diferencia entre la onda simétrica de corriente y la onda real de corriente durante una condición transitoria del sistema de potencia. Matemáticamente, la corriente real de falla se puede separar en dos partes, una componente alterna simétrica y una componente unidireccional (DC). La componente unidireccional puede ser de cualquier polaridad, pero no cambia de polaridad y decrecerá a alguna velocidad predeterminada.

1.5.4 Factor de decremento: es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de SPT orientados con seguridad. Determina el equivalente de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada t_f , tomado en cuenta para el efecto del “DC offset” inicial y su atenuación durante la falla.

1.5.5 Corriente de falla asimétrica efectiva: es el valor RMS de la onda de corriente asimétrica, integrada sobre el intervalo de duración de la falla (Fig. 1)

$$I_F = D_f \cdot I_f \quad (1)$$

Donde:

I_F : Es el valor de la corriente asimétrica de falla efectiva en amperios.

I_f : Es el valor de RMS de la corriente simétrica de falla a tierra en amperios.

D_f : Es el factor de decremento.

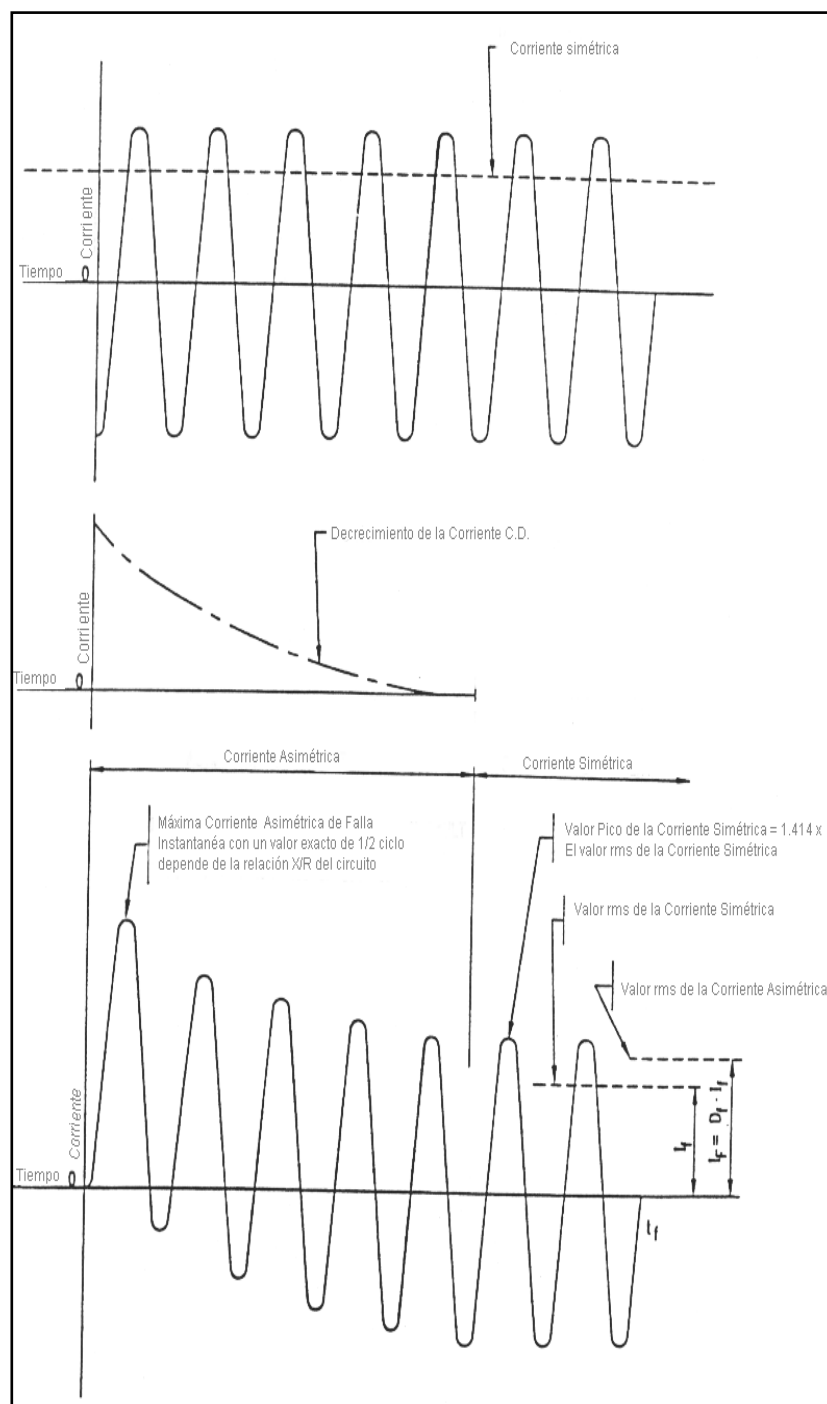


Figura 1.1 - Relaciones entre valores reales de la corriente de falla y valores de I_f , I_f y D_f para la duración de la falla t_f .

1.5.6 Corrientes de encerramiento: son corrientes que resultan de los voltajes inducidos en el encerramiento metálico por corrientes que fluyen en los conductores encerrados.

1.5.7 Factor de división de la corriente de falla: es un factor que representa al inverso de la relación de la corriente simétrica de falla a la parte de la corriente que fluye entre la rejilla a tierra y en los alrededores del planeta.

$$S_f = \frac{I_g}{3 \cdot I_0} \quad (2)$$

Donde:

S_f : Es el factor de división de la corriente de falla.

I_g : Es el valor RMS de la corriente simétrica de rejilla, en amperios.

I_0 : Es la corriente de falla de secuencia cero en amperios.

1.5.8 Puesta a Tierra : es una conexión conductora, ya sea intencional ó accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico ó equipo se conecta a tierra ó en elementos conductores de relativa extensión.

1.5.9 Sistema Puesta a tierra (SPT): comprende todas las interconexiones instaladas en un área específica ó aparato provisto(s) de una(s) tierra(s) ambos con el propósito de establecer un circuito de retorno a tierra y mantener su potencial casi igual al potencial del planeta.

1.5.10 Corriente a tierra: es una corriente fluyendo dentro ó fuera del planeta ó su equivalente trabajando como puesta a tierra.

1.5.11 Electrodo a tierra: conductor introducido en la tierra y se usa para recoger ó disipar corriente, desde ó hacia el interior del planeta.

1.5.12 Malla a tierra: Una placa sólida metálica ó un sistema de conductores desnudos con espacios estrechos que son conectados y con frecuencia colocados a pocas profundidades sobre una rejilla a tierra ó en otros sitios de la superficie de la tierra. Tratando de obtener una extra medida de protección minimizando el peligro a la exposición de altos voltajes de paso ó toque en lugares de operaciones críticas que frecuentemente usan las personas. Así como el enrejado metálico colocado por debajo ó sobre la superficie del suelo ó una red de alambre colocado directamente bajo el material superficial, son formas comunes de una malla a tierra.

1.5.13 Aumento del potencial de tierra (GPR): es el máximo potencial eléctrico que una subestación de rejilla a tierra puede alcanzar, relativo a una distancia de un punto que se asume como el potencial de tierra remoto. Este voltaje, GPR, es igual a los máximos tiempos de corriente de rejilla y resistencia de rejilla.

1.5.14 Circuito de retorno a tierra: es un circuito en el cual la tierra ó un cuerpo conductor equivalente, se utiliza para completar el circuito y permitir la circulación de corriente desde ó hacia la fuente de corriente.

1.5.15 Rejilla a tierra: sistema horizontal de electrodos que consiste de un número de interconexiones, conductores desnudos ocultos en la tierra, proporcionando una tierra común para los aparatos eléctricos ó estructuras metálicas.

NOTA – Las rejillas enterradas horizontalmente cercanas a la superficie de la tierra son también efectivas en controlar los gradientes de potencial en la superficie. Una rejilla típica comúnmente se complementa con un número de varillas a tierra y pueden, además, conectarse a los electrodos auxiliares a tierra para reducir su resistencia con respecto a la tierra remota.

1.5.16 Corriente de rejilla máxima: es un valor de diseño de la corriente de rejilla máxima, se define como sigue:

$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (3)$$

Donde:

I_G : Es la corriente de rejilla máxima en amperios.

D_f : Es el factor de decremento de la duración completa de la falla en segundos.

I_g : Es el valor RMS simétrico de la corriente de rejilla en amperios.

1.5.17 Voltaje de malla: es el voltaje máximo de toque dentro de una malla de una rejilla a tierra.

1.5.18 Voltaje de toque metal con metal: es la diferencia de potencial entre objetos metálicos ó estructuras dentro de los lugares de la subestación de energía

eléctrica que puede establecer un puente por el contacto directo mano-mano ó mano-pié.

NOTA – El voltaje de toque metal con metal entre objetos metálicos o estructuras conectadas a la rejilla a tierra se asume despreciable en subestaciones convencionales. Sin embargo, el voltaje de toque metal con metal entre objetos metálicos o estructuras conectadas a la rejilla a tierra y objetos metálicos internos de la subestación, tal como un cerca aislada, pero no conectada a la rejilla a tierra puede ser considerable.

En una subestación convencional, el peor voltaje de toque se encuentra comúnmente en la diferencia de potencial entre una mano y el pié en un punto a la distancia máxima alcanzable. Sin embargo, en el caso de un contacto metal con metal desde mano con mano o desde mano con pié, ambas situaciones se deberían investigar para las posibles condiciones de alcance peores. La *figura 2.11* y la *figura 2.12* ilustran estas situaciones.

1.5.19 Encerramiento no continuo: es una barra encerrada con las secciones consecutivas de la cubierta del conductor de la misma fase, aislado eléctricamente (ó aislado uno de otro), de manera que no puede haber circulación de corriente más allá de cada sección de encerramiento.

1.5.20 Electrodo primario a tierra : electrodo específicamente diseñado ó adaptado, para descargar la corriente de falla a tierra hacia el planeta. Los electrodos primarios típicos incluyen tales formas como las rejillas a tierra, conductores de contrapeso, varillas, etc.

1.5.21 Voltaje de Paso: es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pié sin tener contacto con cualquier objeto conectado al SPT.

1.5.22 Reactancia Subtransitoria: es la reactancia de un generador al inicio de una falla. Esta reactancia se usa en los cálculos de la corriente de falla simétrica inicial. La corriente decrece continuamente, pero se asume que se llegará a estabilizar a este valor como en la primera etapa, tardando aproximadamente 0,05 segundos después de una falla.

1.5.23 Material Superficial: es un material instalado sobre el suelo que consta de roca, grava, asfalto ó materiales hechos por el hombre, etc. Los materiales superficiales, dependen de la resistividad del material, los cuales pueden impactar significativamente la corriente del cuerpo por los voltajes de toque y de paso, involucrando los piés de la persona.

1.5.24 Corriente simétrica de rejilla: es la parte de la corriente de falla a tierra simétrica la cual fluye entre la rejilla y la tierra circundante, esto se puede expresar en la siguiente ecuación.

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad (4)$$

Donde:

I_g : Es el valor RMS de la corriente de rejilla simétrica en amperios.

S_f : Es el factor de división de la corriente de falla.

I_f : Es el valor RMS de la corriente de falla a tierra simétrica en amperios.

1.5.25 Corriente simétrica de falla a tierra: es el valor RMS máximo de la corriente simétrica de falla, después del inicio de una falla a tierra. Como Tal se representan los valores RMS de la componente simétrica en el primer medio ciclo de una onda de corriente que se desarrolla después del instante de una falla en un tiempo cero. Para las fallas de fase a tierra tenemos:

$$I_{f(0+)} = 3 \cdot I_0'' \quad (5)$$

Donde:

$I_{f(0+)}$: Es el valor RMS inicial de una corriente simétrica de falla a tierra.

I_0'' : Es el valor RMS de una corriente simétrica con secuencia cero que se desarrolla un instante después del inicio de la falla, manifestándose en las reactancias subtransitorias de las máquinas en movimiento que contribuyen a la falla.

Este valor RMS de corriente simétrica de falla se muestra en una notación abreviada I_f , ó solamente se refiere como $3 \cdot I_0''$.Para propósitos del presente trabajo, la razón fundamental para la notación anterior es que el valor inicial de la corriente simétrica de falla se supone como constante en la duración total de la falla.

1.5.26 Voltaje de toque: es la diferencia de potencial entre el aumento del potencial de tierra y el potencial de la superficie en un punto donde una persona se encuentre de pie y al mismo tiempo tenga una mano en contacto con una estructura conectado al SPT.

1.5.27 Voltaje de transferencia: es un caso especial del voltaje de toque, donde se transfiere un voltaje dentro ó fuera de la subestación desde ó hacia un punto externo remoto al sitio de la subestación.

1.5.28 Relación X/R: es la relación entre la reactancia y la resistencia del sistema. Esto es un indicador de la disminución en el valor de cualquier compensación de corriente continua. Un valor grande de X/R corresponde a una constante de tiempo grande y una razón baja de caída.

CAPÍTULO II

CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL JAVA

2.1 Seguridad para el diseño

2.1.1 El problema básico

En principio, un diseño seguro de SPT tiene los dos objetivos siguientes:

- Proveer los medios para conducir corrientes eléctricas hacia el planeta bajo condiciones normales y de fallas, sin exceder el límite de los equipos y cualquier otra operación ó que afecten severamente la continuidad del servicio.

- Asegurar que una persona no esté expuesta a los peligros de un golpe eléctrico crítico en las cercanías de una subestación de energía eléctrica.

Una aproximación práctica en lo que concierne y que hace posible el control de la interacción de los dos objetivos, es:

- El circuito intencional a tierra, que consiste de electrodos a tierra enterrados a una profundidad por debajo de la superficie de la tierra.

- El circuito accidental a tierra, establecida temporalmente por una persona expuesta a un gradiente de potencial en las cercanías de una subestación de energía eléctrica.

Frecuentemente las personas asumen que cualquier objeto conectado al SPT se puede tocar con toda seguridad. Una subestación de energía eléctrica con resistencia baja a tierra no es, en sí misma, una garantía de seguridad. Esto no es simplemente una relación entre la resistencia del SPT como un todo y el golpe de corriente máxima al que una persona se puede exponer. Por lo tanto, una subestación de energía eléctrica de resistencia a tierra relativamente baja puede ser peligrosa, mientras lo opuesto puede ser seguro. La IMPLEMENTACIÓN DEL JAVA garantiza un diseño seguro y adecuado técnicamente. Por ejemplo, si una subestación de energía eléctrica se alimenta desde una línea aérea sin protección ó cable neutro, es importante una rejilla de resistencia baja. La mayoría ó todas las corrientes de falla a tierra entran al planeta causando frecuentemente un aumento del potencial a tierra local [ver figura 2.1] Si se usa un conductor protegido, conductor neutro o cable alimentador subterráneo, etc. Una parte de la corriente de falla regresa a través de esta trayectoria metálica directamente a la fuente. Desde que esta unión metálica provee una impedancia baja con la trayectoria en paralelo del circuito de retorno, el aumento del potencial a tierra local es finalmente de magnitud baja. En cada caso, el efecto de esa parte de corriente de falla que entra al planeta dentro del área de la subestación de energía eléctrica debe ser además analizado. Si la geometría, localización de electrodos a tierra, características del suelo local, y otros factores contribuyen a un gradiente de potencial excesivo en la superficie terrestre, el SPT puede ser inadecuado a pesar de su capacidad para

transportar la corriente de falla en magnitudes y duraciones permitidas por los relevadores de protección.

Del capítulo 2.2 al 2.5 se detallan algunas suposiciones y criterios principales que permiten la evaluación de todos los factores necesarios en la protección de vidas humanas, el elemento más valioso del circuito accidental.

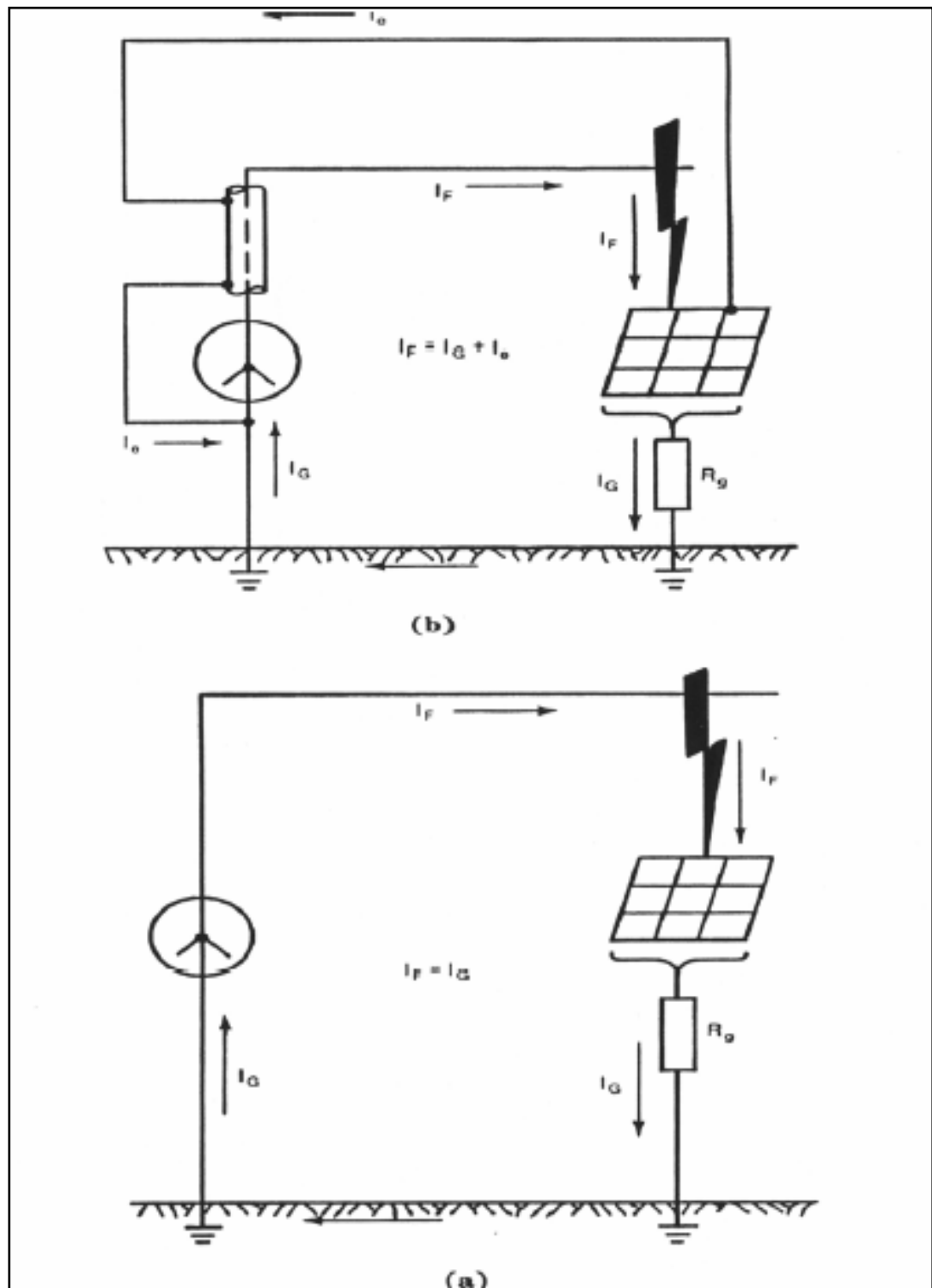


Figura 2.1 – Contorno Equipotencial de una rejilla a tierra típica con varillas o sin varillas.

2.1.2 Condiciones de riesgo

Durante las condiciones típicas de falla a tierra, la circulación de corriente hacia el planeta generará gradientes de potencial dentro y en los alrededores de una subestación de energía eléctrica como se muestra en la *figura 2.2* para una subestación con una rejilla a tierra rectangular sencilla en un suelo homogéneo.

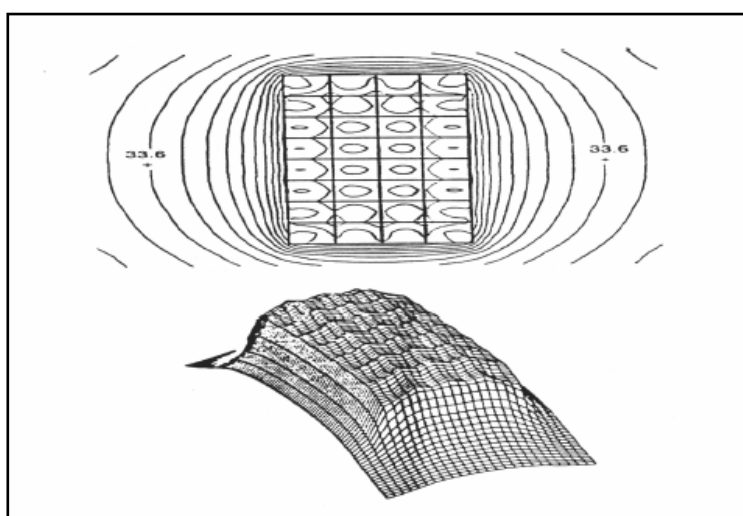


Figura 2.2 – Contorno equipotencial de una rejilla a tierra típica con varillas o sin varillas.

A no ser que se tomen las precauciones apropiadas en el diseño, el gradiente de potencial máximo a lo largo de la superficie terrestre puede ser de magnitud suficiente, durante las condiciones de falla a tierra para poner en peligro a una persona en el área. Además, los voltajes peligrosos se pueden generar entre estructuras conectadas al SPT ó en el chasis de los equipos y la tierra cercana.

Las circunstancias que hacen posibles los accidentes al golpe eléctrico son las siguientes:

- Relativamente, la corriente alta de falla a tierra está en relación con el área del SPT y su resistencia a la tierra remota.
- La resistividad del suelo y la distribución de corrientes a tierra, es tal que, un alto gradiente de potencial podría ocurrir en puntos de la superficie terrestre.
- La presencia de un individuo en un punto, tiempo y posición tal, que el cuerpo este uniendo dos puntos de alta diferencia de potencial.
- La falta de resistencias suficientes de contacto o resistencias en serie que limiten la corriente a través del cuerpo, a un valor seguro, bajo las circunstancias anteriores.
- La duración de la falla y el contacto del cuerpo; consecuentemente el flujo de la corriente a través del cuerpo por un tiempo suficiente puede causar daños a una intensidad de corriente dada.

La poca frecuencia de accidentes se debe, en gran parte, a la baja probabilidad de coincidencia de todas las condiciones perjudiciales descritas anteriormente.

2.2 Rango de corriente tolerable

Los efectos de una corriente eléctrica que circula a través de las partes vitales del cuerpo humano dependen de la duración, magnitud y frecuencia de la misma. Al exponerse, la consecuencia más peligrosa, es: **La Fibrilación Ventricular**, que consiste en la restricción inmediata de la circulación sanguínea.

2.2.1 El efecto de la frecuencia

Los seres humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica, en las frecuencias de 50 ó 60 Hertz. Las corrientes, cerca de 0,1 amperios pueden ser mortales. Las investigaciones realizadas por (Dalziel and Mansfield [B12]; Dalziel, Ogden, and Abbott [B15]), Nos indican que el cuerpo humano puede soportar una corriente un poco mayor a 25 Hertz y en corriente directa 5 veces más grande. Curiosamente, Dalziel y Mansfield afirman que corrientes más altas pueden soportarse a frecuencias comprendidas entre los 3,000 a 10,000 Hertz. Es importante mencionar que en algunos casos el cuerpo humano es capaz de tolerar corrientes muy altas, debido a descargas eléctricas. La Comisión Internacional Electrotécnica, provee curvas de la tolerancia del cuerpo humano a la corriente eléctrica, en función de la frecuencia y las corrientes de descarga capacitiva [IEC 60479-2(1987-039[B20])] Se reportan otros estudios en Dalziel [B5][B7], de los efectos de ambas corrientes tanto directa como impulsos oscilatorios.

La información concerniente a los problemas especiales de las subestaciones de corriente continua (CD) la encontramos en el reporte de 1957 de El Comité de Subestaciones AIEE [B4] El peligro de un golpe eléctrico producido por el efecto de líneas de transmisión aéreas, se revisan en la primera parte del reporte de 1972 de El Subcomité General de Sistemas [B22] Otra información adicional de los efectos de las líneas de transmisión aéreas, la encontramos en el capítulo 2.5 del Libro de Referencias para Líneas de Transmisión de 345 KV y superiores [B16].

2.2.2 El efecto de la duración y la magnitud

Los efectos fisiológicos de la corriente eléctrica en el cuerpo establecidos en orden de incremento de la magnitud de corriente son: el umbral de percepción, contracción muscular, insensibilidad, fibrilación del corazón, obstrucción del nervio respiratorio y quemaduras (Geddes and Baker [B18]; IEC 60479-1 (1994-09) [B19]).

La corriente de 1 mA se reconoce generalmente como el umbral de percepción; que es, la magnitud de corriente en la cual una persona es capaz de sentir una sensación suave de hormigueo en sus manos o dedos, causado por la corriente que circula por su cuerpo en ese momento (Dalziel [B7]).

Las corrientes de 1 a 6 mA, se catalogan a menudo como corrientes de soltura (liberación). Aún cuando son desagradables de soportar, generalmente no daña la habilidad de una persona en controlar sus músculos para liberar un objeto energizado que este sosteniendo. Un experimento clásico que realizó Dalziel (Dalziel y Massogilia [B13]) con 28 mujeres y 134 hombres, proporcionó un valor promedio de la corriente de liberación de 10,5 mA en las mujeres y 16 mA en los hombres; Así también, el valor de umbral de percepción de 6 mA en las mujeres y 9 mA en los hombres.

Corrientes comprendidas en el rango de los 9 a 25 mA, son dolorosas y se dificulta es casi imposible liberar objetos energizados sujetados con la mano. Debido a las corrientes elevadas, las contracciones musculares dificultan la respiración. Este efecto no es permanente y desaparece cuando se interrumpe el flujo de corriente, a menos que la contracción sea muy severa y obstruya la respiración por minutos en

lugar de segundos será necesaria aplicar la resucitación artificial (primeros auxilios) (Dalziel [B9]).

Hasta que el valor de la corriente se encuentre en el rango de los 60 a 100 mA. La fibrilación ventricular, el paro del corazón ó la abstención de respiración, podría causar algún daño ó la muerte. Una persona capacitada en respiración cardiopulmonar (CPR) debe suministrar CPR hasta que la victima pueda ser atendida en una instalación médica. (Dalziel [B25]; Dalziel and Lee[B10]).

Por consiguiente, se enfatiza la importancia del umbral de fibrilación. Con un SPT diseñado cuidadosamente, los golpes eléctricos pueden mantenerse por debajo de este valor y así, evitar lesiones a personas ó su muerte.

Tal como indica Dalziel y Otros (Dalziel, Lagen and Thurston [B14]; Dalziel y Massogilia [B13]), la corriente de no fibrilación de magnitud I_B en un rango comprendido desde 0,03 a 0,3 segundos de duración, se refiere a la energía absorbida por el cuerpo, tal como se especifica en la ecuación siguiente:

$$S_B = (I_B)^2 \cdot t_S \quad (6)$$

Donde:

I_B : Es el valor RMS de la corriente que circula través del cuerpo en amperios.

t_S : Es la duración a la exposición de corriente en segundos.

S_B : Es la constante empírica relacionada al golpe eléctrico.

Para mayores detalles de la ecuación (6) esta se puntualiza en el capítulo 2.3.

2.2.3 La importancia en eliminar una falla rápidamente

Considerando la importancia de la duración de la falla tanto en términos de la ecuación (6) e implícitamente como un factor de exposición-accidental, el eliminar rápidamente las fallas a tierra, es favorable por dos razones.

- Al eliminar rápidamente la falla, el riesgo de exponerse a un golpe eléctrico se reduce enormemente, a diferencia de situaciones en las cuales, las corrientes de falla persistan por varios minutos, que pueden llegar a ser horas.
- Varias pruebas y experimentos, muestran que si la duración del paso de corriente a través del cuerpo es corto, el riesgo de lesiones severas ó muerte se reducen enormemente.

El valor de corriente permitido, puede basarse por lo tanto en el tiempo de limpieza de las unidades de protección primaria o las protecciones de respaldo. Un buen proceso es utilizar el tiempo de limpieza, debido al mal funcionamiento de los relevadores, que coincidirá con todos los factores contraproducentes necesarios para ocasionar un accidente, tal como se especifica en el capítulo 2.1. Al Elegir el tiempo de desconexión de los relevadores de respaldo es más conservador en la ecuación (6), porque estos aseguran un margen superior de seguridad.

De la investigación hecha por Biegelmeier y Lee [B3] resultó un incentivo adicional, usar tiempos de interrupción menores a los 0,5 s. Su investigación proporcionó la evidencia que un corazón humano, llega a ser susceptible cada vez más a una fibrilación ventricular, cuando el tiempo de exposición a la corriente se aproxima al

tiempo del ritmo del corazón, pero ese peligro es mucho menor si el tiempo de exposición a la corriente es en el rango de los 0,06 a los 0,3 segundos.

2.3 Límite de corriente tolerable por el cuerpo

La duración y la magnitud de la corriente, que circula a través del cuerpo humano a una frecuencia de 50 ó 60 Hertz deben ser menores al valor que causa la fibrilación ventricular del corazón.

2.3.1 Fórmula de la magnitud y duración de la corriente

La Cantidad (duración) de corriente que puede soportar la mayoría de personas a 50 ó 60 Hertz, se refiere a su magnitud, de acuerdo a la ecuación (6) Que se fundamenta con los estudios realizados por Dalziel (Dalziel [B6]; Dalziel and Lee [B11]), y se asume que el 99,5% de todas las personas pueden soportarla con seguridad, sin sufrir una fibrilación ventricular. El paso de una corriente con magnitud y duración, se establece por la siguiente fórmula:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

Dalziel descubrió que el 99,5% de las personas que pesan 50 kg. pueden sobrevivir a un golpe eléctrico, lo que da como resultado un valor de $S_B = 0,01350$, Así, $k_{110} = 0,116$ y la fórmula para la corriente tolerable por el cuerpo es:

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

Para un peso corporal de 50 kg.

La ecuación (8) da como resultado para un $t_S = 1$ segundo, 116 mA y para un $t_S = 0,1$ segundo, 367 mA.

Debido a que la ecuación (7) se fundamenta en pruebas de un rango limitado entre 0,03 segundos y 3,0 segundos, obviamente no es válido para duraciones fuera del rango mencionado.

A través de los años, otros investigadores sugieren diferentes valores para I_B . Ferris et al. [B17] en 1936 propuso 100 mA como el umbral de fibrilación. El valor de 100 mA resultó de las comprobaciones realizadas en la Universidad de Columbia. En las pruebas, animales con pesos corporales y corazones parecidos al ser humano se expusieron al máximo tiempo de 3 s. Las investigaciones más recientes muestran la existencia de dos umbrales diferentes: Uno es, donde la duración del golpe eléctrico es más pequeña que el tiempo de una palpitación y el segundo, donde la duración del golpe eléctrico es más grande que el tiempo de una palpitación. Biegelmeier [B1][B2] propuso los valores de 500 mA para el primer umbral y 50 mA para el segundo umbral, para un adulto con un peso de 50 kg. También, Lee y Kouwenhoven [B10] [B23] [B24] realizaron otros estudios en este tema. La ecuación para la corriente tolerable por el cuerpo humano, desarrollada por Dalziel, es la base para la derivación de voltajes tolerables que se usan en el presente trabajo.

2.3.2 Suposiciones alternas

La corriente de fibrilación, se asume que es una función del peso corporal individual, tal como se ilustra en la *Figura 2.3*. Esta figura, muestra la relación entre la corriente

crítica y el peso corporal, para las diversas especies de animales (cerdos, perros, ovejas y becerros), y en la zona del umbral se muestra un 0,5% común para los mamíferos.

Antiguamente en 1961 las constantes S_B y k en las ecuaciones (6) y (7) eran 0,0272 y 0,165; se suponía válido para el 99,5% de todas las personas con un peso promedio de 70 kg. Sin embargo, los estudios posteriores hechos por Dalziel [B8][B11], en que se basa la ecuación (7), llevan a que los valores de $k = 0,157$ y de $S_B = 0,0246$, sean los que se deban aplicar a las personas con un peso estimado de 70 kg.

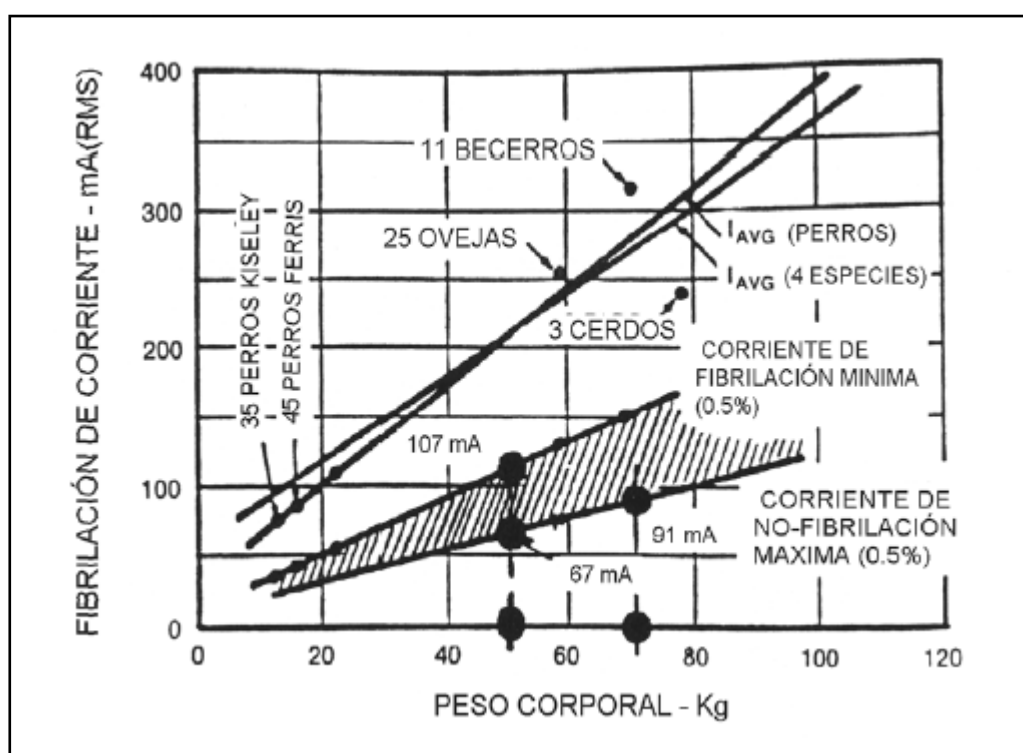


Figura 2.3 – Corriente de fibrilación vs. el peso corporal para diferentes animales. Basado en el golpe eléctrico durante tres segundos.

Por lo tanto,

$$I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t_S}} \quad (9)$$

Para un peso corporal de 70 kg. Pueden seleccionar $k = 0,157$, siempre que el peso promedio de la población sea al menos 70 kg.

La ecuación (7) indica que se pueden permitir corrientes corporales muchos mayores, en donde se pueda confiar, en que los dispositivos de protección de operación rápida limiten la duración de falla. Se necesita una decisión apropiada, para usar el tiempo de apertura los relevadores primarios de alta velocidad ó la protección de respaldo, como la base para el cálculo.

2.3.3 Comparación de la ecuación de Dalziel y la curva de Biegelmeier

La comparación de la ecuación (8), la ecuación (9), y la curva de forma **Z** de la corriente corporal contra el tiempo, fue publicada por Biegelmeier y Lee [B3] y se expone en la *Figura 2.4*. La curva **Z** tiene un límite de 500 mA para tiempos breves superiores a los 0,2 segundos, luego desciende a los 50 mA en un tiempo más allá de los 2 segundos.

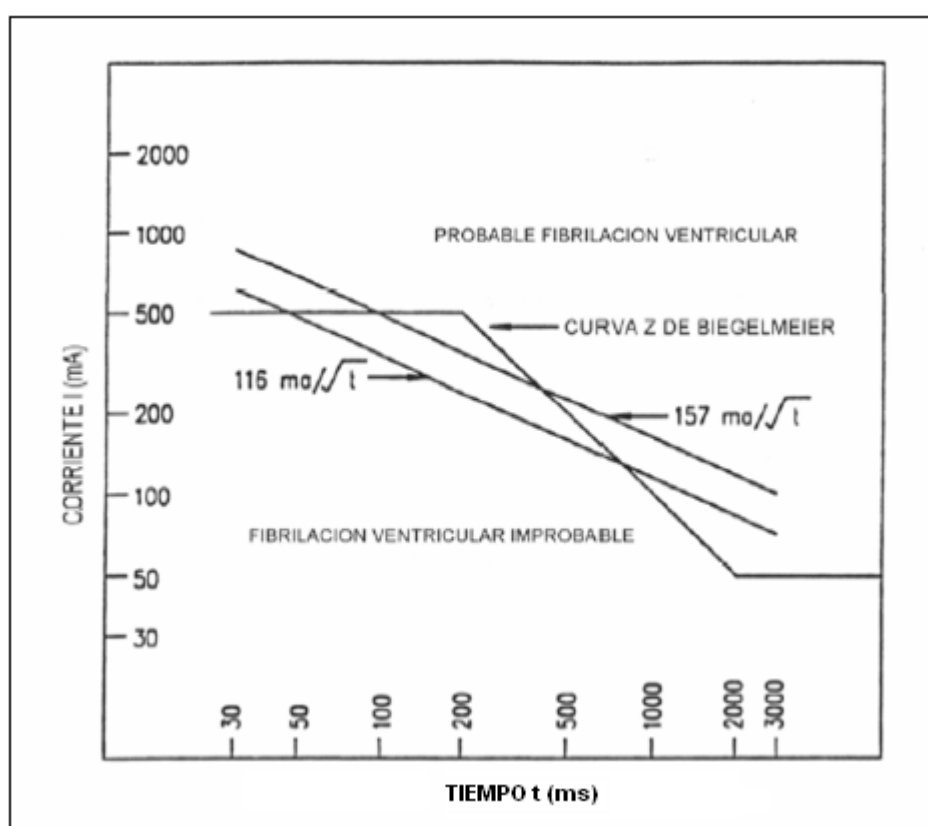


Figura 2.4 – Corriente corporal vs. el tiempo.

Utilizando la ecuación (8), la corriente permisible por el cuerpo será menor que la curva **Z** de Biegelmeier para tiempos a partir de 0,06 segundos hasta 0,7 segundos.

2.3.4 Notas sobre el recierre

El recierre después de una falla a tierra es común en las prácticas de moderna operación. En circunstancias semejantes, una persona se puede exponer al primer golpe eléctrico sin daños permanentes. Luego entonces, un recierre instantáneo automático simple podría resultar en un segundo golpe eléctrico, iniciando en menos de 0,33 segundos a partir del comienzo del primero. Es este segundo golpe eléctrico, que ocurre después de un intervalo de tiempo relativamente corto y antes de que la persona se haya recuperado, ello puede causar un accidente serio. Con el recierre manual, el peligro de exponerse a un segundo golpe eléctrico se reduce, porque el intervalo de tiempo de recierre puede ser significativamente mucho más grande.

El efecto acumulativo de dos o más golpes eléctricos seguidos no se ha valorado completamente, pero una asignación razonable se puede hacer al usar la suma de los golpes eléctricos individuales como el tiempo de una sola exposición.

2.4 Circuito accidental a tierra

2.4.1 La resistencia del cuerpo humano

Para corrientes en DC y AC a frecuencias de 50 ó 60 Hertz, el cuerpo humano se puede tomar como una resistencia. Típicamente, la trayectoria de corriente se considera desde una mano a los pies ó de un pié hacia el otro. La resistencia interna del cuerpo es aproximadamente 300Ω , en donde los valores de la resistencia del cuerpo incluyen los rangos de la piel desde 500Ω a 3000Ω , tal como sugiere Dalziel

[B26], Geddes y Baker [B59], Geiges [B60], Kiselev [B64] y Osypka [B72]. La resistencia corporal disminuye cuando se daña ó se perfora la piel en el punto de contacto con la corriente.

Tal como se mencionó anteriormente en el efecto de la magnitud y duración de la corriente, las extensas pruebas de conductividad Dalziel (B29) utilizan agua salada para humedecer las manos y piés, para determinar las corrientes de soldadura seguras con los piés y las manos húmedas. En los hombres, los valores que se obtuvieron utilizando una frecuencia de 60 Hertz son los siguientes: La corriente fue de 9 mA; los voltajes correspondientes fueron 21,0 V de mano a mano y 10,2 V de manos a piés. Por lo tanto, basándonos en este experimento la resistencia para un contacto de mano a mano es igual a $21,0/0,009$ ó 2330Ω , y la resistencia de mano a piés es igual a $10,2/0,009$ ó 1130Ω .

Las siguientes resistencias, en serie con la resistencia corporal, se asumen como:

- La resistencia de contacto de mano y pié es igual a cero.
- La resistencia del guante y un zapato es igual a cero.

Se utilizará en todo el desarrollo un valor de 1000Ω la cual representa la resistencia corporal desde las manos hasta los piés, también de mano a mano ó desde un pié hacia el otro, en la ecuación (10).

$$R_B = 1000\Omega \quad (10)$$

2.4.2 Trayectorias de corriente a través del cuerpo

Debemos de tener presente que al seleccionar una resistencia con un valor de 1000Ω se relaciona al paso de corriente, como, el paso de corriente entre la mano y el pié ó ambos piés, donde la mayor parte de ella pasa a través de los órganos vitales del cuerpo humano, incluyendo el corazón. Generalmente, se reconoce que la circulación de corriente que va de un pié hacia el otro es menos peligrosa. Refiriéndose a las pruebas hechas en Alemania por Loucks [B67] se menciona que se utilizan corrientes mucho más elevadas de pié a pié que de mano a pié para producir la misma corriente en la región del corazón. Loucks establece que la relación es tan alta como 25:1

Basándonos en estas conclusiones, los valores de resistencia mayores a 1000Ω posiblemente se podrían permitir, donde es concerniente el paso de corriente de un pié hacia el otro. Sin embargo, se deben considerar los siguientes factores:

- a) El voltaje entre los piés es doloroso, pero no fatal, esto podría resultar en una caída de una persona, la cual puede causar la circulación de corrientes más grandes en el área del pecho. El grado de este daño dependerá completamente en la duración de la falla y de la posibilidad de otro choque sucesivo, tal vez en el recierre.
- b) Una persona podría estar en una posición propensa, ya sea que esté trabajando ó descansando cuando se de la falla.

Aparentemente los daños provocados por el contacto de pié a pié son menores que los de otro tipo (mano-mano ó mano-piés). Sin embargo, han ocurrido muertes por el caso a) y el ignorarlo sería peligroso.

2.4.3 Circuitos accidentales equivalentes

Al utilizar el valor de la corriente tolerable por el cuerpo, que se establece por la ecuación (8) ó la ecuación (9) y las constantes apropiadas del circuito, es muy posible determinar el voltaje tolerable entre cualquiera de los dos puntos de contacto.

Las siguientes constantes se utilizan para el circuito accidental equivalente, las cuales se muestran en la *figura 2.5*.

I_b : Es la corriente corporal (El cuerpo es parte del circuito accidental) en *amperios*.

R_A : Es la resistencia total efectiva del circuito accidental en Ω (ohmios).

V_A : Es el voltaje total efectivo del circuito accidental (voltaje de toque ó de paso) en Voltios.

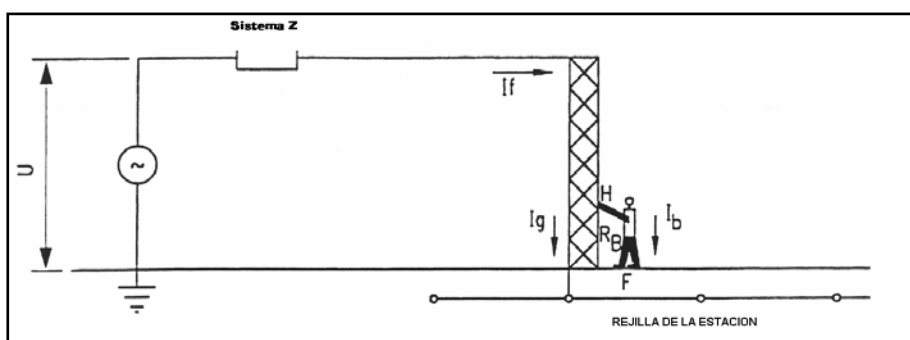


Figura 2.5 - Exposición al voltaje de toque.

La corriente tolerable por el cuerpo humano I_B se define por la ecuación (8) ó la ecuación (9), y se utiliza para definir el voltaje tolerable efectivo total del circuito accidental (voltaje de toque ó voltaje de paso): el voltaje tolerable total efectivo del

circuito accidental, es aquel voltaje que causará la circulación de una corriente corporal I_b igual a la corriente tolerable por el cuerpo humano I_B .

La *Figura 2.5* muestra a una persona tocando una estructura metálica en el terminal “H” y la corriente de falla I_f que se descarga a tierra. Las impedancias del circuito se muestran en la *figura 2.6*. El terminal “H” es un punto que se encuentra al mismo potencial que la rejilla, hacia la cual fluye la corriente de falla y el terminal “F” es el área pequeña en la superficie del planeta que está en contacto con ambos pies de una persona. La corriente I_b circula desde el terminal “H” a través del cuerpo de la persona hacia terminal “F”. El Teorema de Thevenin nos permite representar la red de estos dos terminales (H y F) de la *figura 2.6* por medio del circuito que se muestra en la *figura 2.7* (Dawalibi, Southey y Baishiki [B41]; Dawalibi, Xiong y Ma [B42]).

El voltaje Thevenin V_{Th} es el voltaje entre los terminales “H” y “F”, cuando la persona no está presente. La impedancia Thevenin Z_{Th} es la impedancia del sistema que se ve entre los terminales “H” y “F” con las fuentes de voltaje del sistema en corto circuito. La corriente I_B que circula a través del cuerpo de una persona en contacto con los terminales “H” y “F”, se expresa por la siguiente ecuación:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (11)$$

Donde:

R_B : Es la resistencia del cuerpo humano en Ω (ohmios).

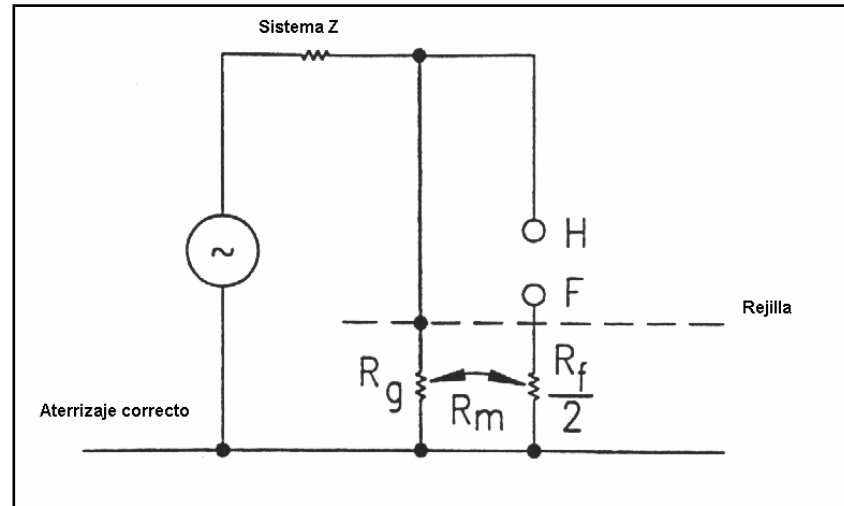


Figura 2.6 – Circuito de impedancias para el voltaje de toque

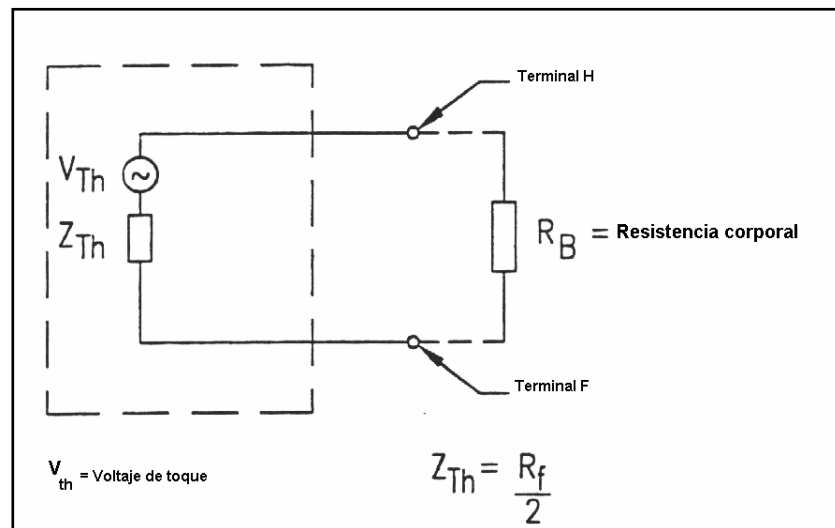


Figura 2.7 – Circuito del voltaje de toque.

La *figura 2.8* muestra la corriente de falla I_f que se descarga a tierra por medio del SPT de la subestación. La corriente I_b , circula desde un pié F2 a través del cuerpo de la persona hasta el otro pié, F1. Los terminales F1 y F2 son las áreas en la superficie del planeta que están en contacto con ambos piés. El teorema de Thevenin permite representar en la *figura 2.9* la red de estos terminales (F1 y F2). El voltaje Thevenin V_{Th} es el voltaje entre los terminales F1 y F2 cuando la persona no está presente. La impedancia Thevenin Z_{Th} es la impedancia del sistema como se ve entre los terminales F1 y F2 con las fuentes de voltaje del sistema en corto circuito. La corriente I_b que circula a través de cuerpo de una persona se expresa por la ecuación (11).

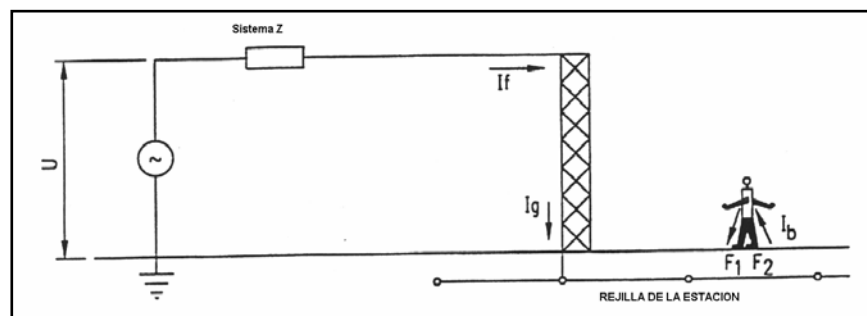


Figura 2.8 – Exposición al voltaje de paso.

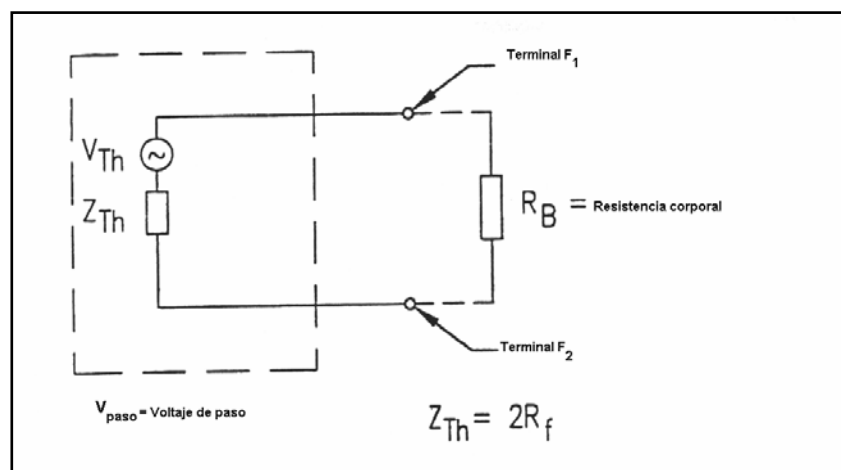


Figura 2.9 – Circuito del voltaje de paso.

La impedancia equivalente de Thevenin Z_{Th} se calcula con varios métodos (Dawalibi, Southey y Baishiki [B41]; Dawalibi, Xiong y Ma [B42]; ERPI EL-2699[B52]; Tapar, Gerez y Kejriwal [B85]; Laurent [B66]. En el presente trabajo se utilizan las siguientes fórmulas conservativas para la impedancia Thevenin equivalente:

Para el circuito accidental del voltaje de toque:

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2} \quad (12)$$

Y para el circuito accidental del voltaje de paso:

$$Z_{Th} = 2 \cdot R_f \quad (13)$$

Donde:

R_f : Es el valor de la resistencia a tierra de un pié sin tomar en cuenta el SPT de la subestación en ohmios.

Comúnmente, con el propósito de analizar el circuito, el pié humano se representa como un disco metálico conductor y la resistencia de contacto de los zapatos, calcetines, etc. se desprecia. El valor de la resistencia a tierra de un disco metálico conductor de radio b (m) en la superficie de un suelo homogéneo de resistividad ρ ($\Omega \cdot m$) se establece por la ecuación de Laurent [B65]

$$R_f = \frac{\rho}{4 \cdot b} \quad (14)$$

Tradicionalmente, el disco metálico que representa el pié, se toma como una placa circular con un radio de 0,08 metros. Con una pequeña aproximación, las ecuaciones para Z_{Th} se pueden obtener numéricamente y expresarse en términos de la resistividad ρ , tal como se expresa:

Para el circuito accidental de voltaje de toque:

$$Z_{Th} = 1,5 \cdot \rho \quad (15)$$

Para el circuito accidental de voltaje de paso:

$$Z_{Th} = 6 \cdot \rho \quad (13)$$

Basados en investigaciones realizadas por Dawalibi, Xiong y Ma [B42]: Meliopoulos, Xia. Joy y Cokkonides [B70]: y Tapar, Gerez y Kejriwal [B85]. Las ecuaciones (15) y (16) se conservan en el sentido que sobre estiman la impedancia Thevenin equivalente y, por lo tanto, resultarán en grandes corrientes corporales.

Al utilizar las ecuaciones (15) y (16) el voltaje equivalente total permisible (Voltaje de toque tolerable y Voltaje de paso tolerable) es:

$$E_{toque} = I_B(R_B + 1,5 \cdot \rho) \quad (17)$$

$$E_{paso} = I_B(R_B + 6 \cdot \rho) \quad (18)$$

2.4.4 El efecto de una capa delgada de material superficial

La ecuación (14) se basa en suponer una resistividad de suelo uniforme. De cualquier manera, comúnmente una capa de material superficial de alta resistividad con un espesor de 0,08-0,15 metros, como la grava, se esparce en la superficie terrestre sobre la rejilla a tierra, para aumentar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las persona en la subestación. La poca profundidad del material superficial se compara con el radio equivalente de un pié, evitando asumir una resistividad uniforme en la dirección vertical, cuando se calcula la resistencia a tierra de los pies. Sin embargo, para una persona en el área de la subestación, el material superficial se asume, por ser de extensión infinita en la dirección lateral.

Si la capa inferior del suelo tiene una resistividad más baja que el material superficial, solo algunas corrientes de rejilla ascenderán hacia la capa delgada del material superficial y el voltaje superficial será casi completamente igual que ése sin

el material superficial. Entonces, al colocar el material superficial, la corriente a través del cuerpo disminuirá considerablemente debido a la gran resistencia de contacto que ofrece entre la tierra y los pies. De cualquier manera, esta resistencia puede ser considerablemente menor que una capa superficial, lo suficiente gruesa para suponer una resistividad uniforme en todas las direcciones. La reducción depende de los valores relativos del suelo, las resistividades del material superficial y en el espesor del material superficial.

Lo inverso del principio que reduce la capacidad normal, es también verdad. Si la capa inferior del suelo tiene una resistividad más alta que el material superficial, una porción muy grande de la corriente de rejilla subirá hacia la capa delgada del material superficial. Sin embargo, a diferencia del caso descrito en el párrafo anterior, los potenciales superficiales serán alterados sustancialmente debido a la concentración de corriente cercana a la superficie. De este modo, la resistividad efectiva del material superficial no debe mejorarse sin tomar en cuenta este cambio en el potencial superficial. Este problema se puede resolver de una mejor manera utilizando un análisis de suelo de capas múltiples (referirse a estructura del suelo y selección del modelo de suelo).

Una expresión analítica para la resistencia a tierra del pie en una capa delgada de material superficial, se puede obtener con el uso del método de imágenes (Sunde [B79]; Tapar. Gerez y Emmanuel [B84]; Tapar. Gerez y Kejriwal [B85])

De la ecuación (19) hasta la ecuación (21) se da la resistencia a tierra del pie en el material superficial.

$$R_f = \left[\frac{\rho_S}{4 \cdot b} \right] C_S \quad (19)$$

$$C_S = 1 + \frac{16 \cdot b}{\rho_S} \sum_{n=1}^{\infty} K^n R_{m(2nh_S)} \quad (20)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_S}{\rho + \rho_S} \quad (21)$$

Donde:

C_S : Es el factor que reduce la capacidad normal de la capa superficial.

K : Es el factor de reflexión entre las diferentes resistividades del material.

ρ_S : Es la resistividad del material superficial en $\Omega \cdot m$

ρ : Es la resistividad de la tierra abajo del material superficial en $\Omega \cdot m$

h_S : Es el grosor del material superficial en m.

b : Es el radio del disco circular metálico que representa el pié en m.

$R_{m(2nh_S)}$: Es la resistencia a tierra mutua entre las dos placas paralelas, similares coaxiales, separadas por una distancia $(2nh_S)$, en un medio infinito de resistividad ρ_S , en $\Omega \cdot m$.

Para determinar el valor de $R_{m(2nh_S)}$, debemos considerar una placa circular delgada, D1, en el plano x-y con el eje z pasando por su centro. El radio de la placa es b y descarga una corriente I en un medio uniforme infinito de resistividad ρ_S . Utilizando coordenadas cilíndricas, el potencial en cualquier punto (r, z) , se da por las siguientes ecuaciones:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (22)$$

$$z = 2 \cdot n \cdot h_s \quad (23)$$

$$V_{r,z} = \frac{I \cdot \rho_s}{4\pi b} \operatorname{sen}^{-1} \left[\frac{2b}{\sqrt{(r-b)^2 + z^2} + \sqrt{(r+b)^2 + z^2}} \right] \quad (24)$$

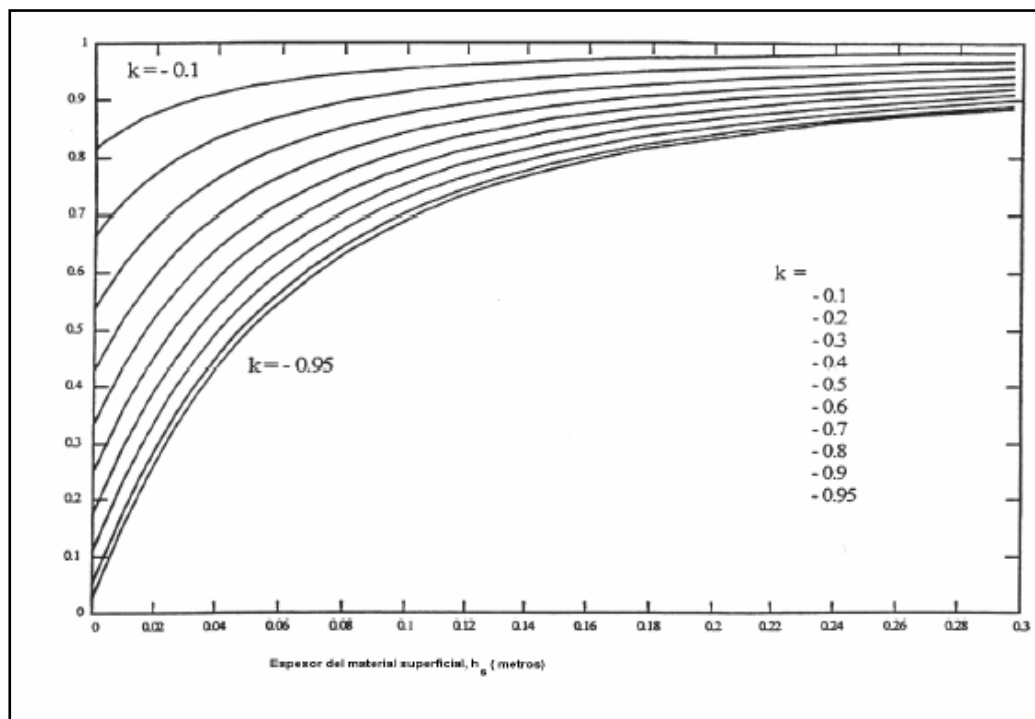
Considerando otra placa similar, D2, puesta en paralelo y coaxial a la placa circular, D1, y a una distancia ($2nh_s$) de ella. El potencial producido en D2 se puede determinar evaluando el potencial promedio sobre la superficie de la placa, por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{D2} = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^b (x 2\pi V_{r,z}) dx \quad (25)$$

La resistencia a tierra mutua $R_{m(2nh_s)}$ entre las dos placas se da por la ecuación:

$$R_{m(2nh_s)} = \frac{V_{D2}}{I} \quad (26)$$

Comparando las ecuaciones (14) y (19), C_s se puede considerar como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva de un pié en presencia de una capa gruesa de material superficial. Debido a las cantidades de C_s es un poco tedioso evaluarla sin el uso de una computadora; estos valores son precalculados para $b = 0,08$ m. y se dan en la de forma gráficos en la *figura 2.10*.

Figura 2.10 – C_s versus h_s

Muchos tipos de computadoras se han utilizado para obtener los valores de C_S (Dawalibi, Xiong y Ma [B42]; Meliopoulos, Xia, Joy y Cokkonides [B70]). Hay una gran semejanza entre los valores que se obtienen del computador con los valores de la *figura 2.10*.

La siguiente ecuación empírica nos da el valor de C_S . Los valores de C_S se obtienen utilizando la ecuación (27) que están dentro del 5% de los valores que se obtienen con el método analítico.

$$C_S = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_S}\right)}{2 \cdot h_S + 0,09} \quad (27)$$

2.5 Criterio del voltaje tolerable

2.5.1 Definiciones

a) Aumento del potencial de tierra (GPR): es el máximo potencial eléctrico que una subestación de energía eléctrica de rejilla a tierra puede alcanzar, referente a una distancia de un punto que se asume como el potencial de tierra remoto. Este voltaje, GPR, es igual a los máximos tiempos de corriente de rejilla y resistencia de rejilla.

NOTA – Bajo condiciones normales, el equipo eléctrico conectado al SPT opera con potencial a tierra casi cero. Esto es, el potencial de un conductor neutro conectado al SPT es casi idéntico al potencial de la tierra remota. Durante una falla a tierra la parte de la corriente de falla que se disipa por una rejilla hacia la tierra causa el incremento del potencial de la rejilla con respecto a la tierra remota.

b) Voltaje de malla: es el máximo voltaje de toque dentro de una malla de rejilla a tierra.

c) Voltaje de toque metal-metal: es la diferencia de potencial entre objetos metálicos ó estructuras dentro del lugar de la subestación de energía eléctrica que pueden establecer un puente por el contacto mano-mano ó mano-pies.

El peor voltaje de toque se encuentra comúnmente entre una mano y los piés, en un punto de distancia de máximo alcance. Hacemos referencia a las *figuras 2.11 y 2.12* para ilustrar mucho mejor estas situaciones.

d) Voltaje de paso: Es la diferencia de potencial en la superficie del suelo experimentado por una persona a una distancia de 1 metro sin tener contacto con cualquier objeto conectado al SPT.

e) Voltaje de toque: Es la diferencia de potencial entre el aumento de potencial de tierra (GPR) y el potencial en la superficie, en un punto donde la persona está de pié y al mismo tiempo hace contacto con la mano en una estructura conectado al SPT.

f) Voltaje transferido: Es un caso especial del voltaje de toque, donde el voltaje se transfiere hacia el interior ó fuera de la subestación de energía eléctrica, desde ó hacia un lugar exterior distante al lugar de la subestación.

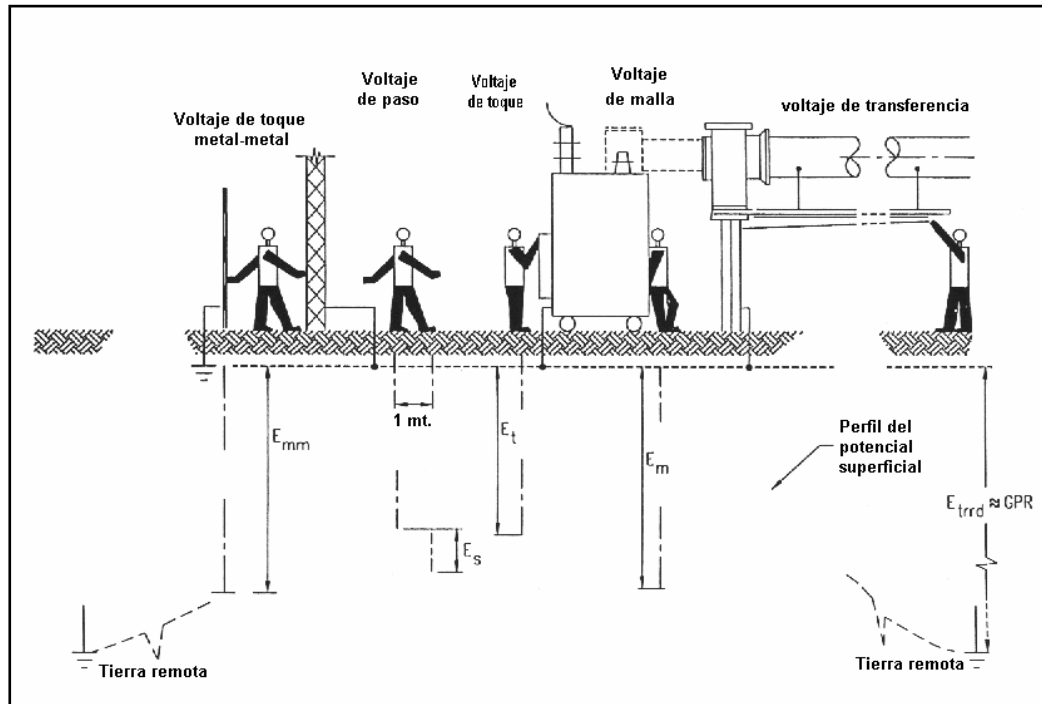


Figura 2.11 - Entornos básicos del golpe eléctrico.

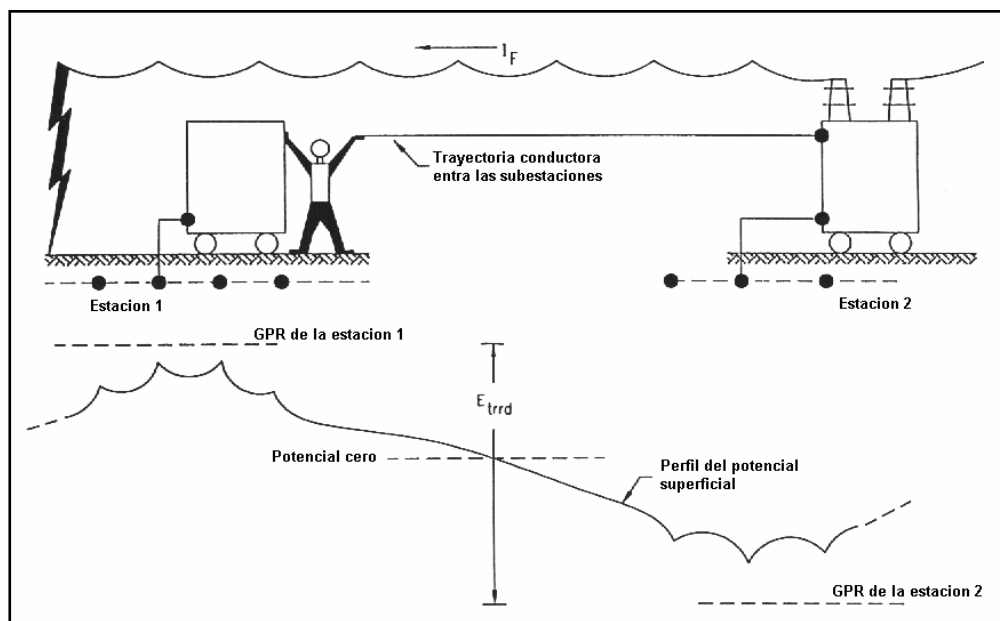


Figura 2.12 – Entorno típico del extenso potencial transferido

2.5.2 Situaciones típicas de choque

Las cinco situaciones básicas que involucran una persona e instalaciones conectadas al SPT durante una falla se muestran las *figuras 2.11 y 2.12*. Para un contacto de pié a pié, el circuito accidental equivalente se muestra en la *figura 2.8*, y el manejo del voltaje U es igual a E_S (Voltaje de paso). Para los tres ejemplos del contacto mano – piés utilizamos la *figura 2.11* y U es igual al E_t (Voltaje de toque), E_m (Voltaje de acoplamiento) ó E_{trrd} (Voltaje transferido).

Durante una falla, el planeta conduce las corrientes que provienen de las rejillas y electrodos que son enterrados por debajo de la superficie. El gradiente de potencial resultante tiene un efecto primario en el valor de U .

En el caso de las subestaciones convencionales, el caso característico del voltaje de toque metal-metal ocurre cuando objetos metálicos ó estructuras dentro del área de la subestación, no están empalmados a la rejilla a tierra. Los objetos como tuberías, rieles ó cercos que están colocados dentro ó cerca del área de la rejilla a tierra de la subestación y que no están empalmados a la rejilla, satisfacen este criterio.

Los sustanciales voltajes de toque metal-metal suceden cuando una persona se encuentra de pié dentro del área de la subestación y está tocando un objeto o estructura conectado a la rejilla a tierra. El cálculo actual del voltaje de toque metal-metal es complejo. En la práctica, resulta peligroso el contacto metal-metal y puede evitarse empalmado los puntos de potencial peligroso a la rejilla a tierra.

Normalmente, un caso de transferencia de voltaje sucede cuando una persona está de pié dentro del área de la subestación y toca un conductor conectado a la rejilla a

tierra en un punto remoto (Figura 2.12) ó una persona que está de pié en un punto remoto toca un conductor conectado a la rejilla de la subestación. Durante las condiciones de falla, la resultante del potencial de tierra puede igualar ó exceder el GPR total de una rejilla descargando la corriente de falla. De hecho, el voltaje de transferencia puede exceder la suma de el GPR en ambas subestaciones, debido a los voltajes inducidos en los circuitos de comunicación, alambrado estático ó neutro, tuberías, etc. No es nada práctico y muchas veces es imposible, diseñar un SPT fundamentado en el voltaje de toque causado por los voltajes de transferencia externos. Los peligros de estos voltajes de transferencia externos se evitan al utilizar aislantes ó dispositivos que los neutralicen, a la vez tratando y etiquetando claramente estos circuitos, tuberías, entre otros así como lo que existe para líneas energizadas.

2.5.3 Criterios del voltaje de paso y de toque

La seguridad de una persona depende en prevenir que absorba una cantidad crítica de descarga eléctrica, antes de que la falla se elimine y se suspenda el servicio de energía al sistema. El manejo del voltaje máximo de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites que se indican a continuación.

Para el voltaje de paso el límite es:

$$E_{paso} = (R_B + 2 \cdot R_f) I_B \quad (28)$$

$$E_{paso50Kg} = (1000 + 6 \cdot C_S \cdot \rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_S}} \quad (29)$$

Para un peso corporal de 50 kg.

$$E_{paso70Kg} = (1000 + 6 \cdot C_S \cdot \rho_S) \frac{0,157}{\sqrt{t_S}} \quad (30)$$

Para un peso corporal de 70 kg.

Similarmente, el límite del voltaje de toque es:

$$E_{toque} = \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) \cdot I_B \quad (31)$$

$$E_{toque50Kg} = (1000 + 1,5 \cdot C_S \cdot \rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_S}} \quad (32)$$

$$E_{toque70Kg} = (1000 + 1,5 \cdot C_S \cdot \rho_S) \frac{0,157}{\sqrt{t_S}} \quad (33)$$

Donde:

E_{paso} : Es el voltaje de paso en voltios.

E_{toque} : Es el voltaje de toque en voltios.

C_S : Es el factor reductor de la capacidad normal.

ρ_S : Es la resistividad del material superficial en $\Omega \cdot m$

t_S : Es la duración del golpe de corriente en segundos

Si no se usa la capa superficial protectora, entonces $C_S = 1$ y $\rho_S = \rho$. Los límites del voltaje de toque metal a metal se derivan de las ecuaciones del voltaje de toque,

la ecuación (32) y la ecuación (33). El contacto metal-metal, mano-mano y mano-piés, resultarán en $\rho_S = 0$. Por consiguiente, el total de la resistencia del circuito accidental es igual a la resistencia del cuerpo, R_B .

Al sustituir $\rho_S = 0$ en términos de la resistencia del pie de la ecuación (32) y la ecuación (33).

El límite del voltaje de toque metal-metal es:

$$E_{mm-toque\ 50kg} = \frac{116}{\sqrt{t_S}} \quad (34)$$

$$E_{mm-toque\ 70kg} = \frac{157}{\sqrt{t_S}} \quad (35)$$

Donde:

E_{mm} : Es el voltaje de toque metal-metal en voltios.

Los actuales voltaje de paso, voltaje de toque ó voltaje de toque metal a metal deben ser menores que el límite de voltaje máximo que se permite para garantizar la seguridad de las personas. Los peligros de estos voltajes de transferencia externos se evitan al utilizar dispositivos aislantes ó dispositivos que los neutralicen, a la vez tratando y etiquetando claramente estos circuitos, tuberías, etc. como lo existe para líneas energizadas.

2.5.4 El efecto de las corrientes a tierra sostenidas

Después que se establecieron los límites seguros del voltaje de paso y de toque, el SPT puede entonces diseñarse basándolo en la corriente de falla disponible y el tiempo de limpieza total. El diseñador debe también considerar las magnitudes de falla de bajo nivel sostenidas, que pueden estar sobre el umbral de la corriente de soldadura. Algunas fallas sostenidas que están por encima de la corriente de soldadura, pero por debajo del umbral de fibrilación, pueden causar la asfixia que se debe a la contracción prolongada de los músculos del pecho. Sin embargo, no sería práctico diseñarlo contra golpes eléctricos que son simplemente dolorosos y no causan daño permanente.

CAPÍTULO III

CONSIDERACIONES PRINCIPALES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA PUESTA A TIERRA

3.1 Definiciones

3.1.1 Electrodo auxiliar a tierra: Un electrodo con cierto diseño ó restricciones de operación. Su función puede ser distinta a la de conducir la corriente de falla a tierra hacia el planeta. Los electrodos auxiliares típicos incluyen estructuras metálicas subterráneas y barras de refuerzo en concreto, si está conectado a la rejilla a tierra. Los electrodos auxiliares pueden tener una capacidad limitada para transportar corriente.

3.1.2 Electrodo a tierra: conductor introducido en la tierra y se usa para recoger ó disipar corriente, desde ó hacia el interior del planeta.

3.1.3 Malla a tierra: Una placa sólida metálica ó un sistema de conductores desnudos con espacios estrechos que son conectados y con frecuencia colocados a pocas profundidades sobre una rejilla a tierra ó en otros sitios de la superficie de la tierra. Tratando de obtener una extra medida de protección minimizando el peligro a la exposición de altos voltajes de paso ó toque en lugares de operaciones críticas que frecuentemente usan las personas. Así como el enrejado metálico colocado por

debajo ó sobre la superficie del suelo ó una red de alambre colocado directamente bajo el material superficial, son formas comunes de una malla a tierra.

3.1.4 Rejilla a tierra : sistema horizontal de electrodos que consiste de un número de interconexiones, conductores desnudos ocultos en la tierra, proporcionando una tierra común para los aparatos eléctricos ó estructuras metálicas.

NOTA – Las rejillas enterradas horizontalmente cercanas a la superficie de la tierra son también efectivas en controlar los gradientes de potencial en la superficie. Una rejilla típica comúnmente se complementa con un número de varillas a tierra y pueden, además, conectarse a los electrodos auxiliares a tierra para reducir su resistencia con respecto a la tierra remota.

3.1.5 Electrodo primario a tierra: electrodo específicamente diseñado ó adaptado, para descargar la corriente de falla a tierra hacia el planeta. Los electrodos primarios típicos incluyen tales formas como las rejillas a tierra, conductores de contrapeso, varillas, etc.

3.2 Concepto general

El SPT debe instalarse de manera que límite el efecto del gradiente de potencial de tierra para niveles de voltaje y corriente que no pondrán en peligro la seguridad de las personas o equipos bajo condiciones normales y falla. El sistema debe garantizar el servicio continuo.

En la siguiente discusión, se asume que la rejilla a tierra tiene la forma de conductores enterrados horizontalmente, complementado por un número de varillas

verticales. Basado en dos estudios, el primero se reporta en un manual de aplicación del IEEE en 1954[B3] y el segundo publicado en 1980 (Dawalibi, Bauchard and Mukhedkar [B37], este concepto representa la práctica que prevalece de la mayoría de ambas utilidades en Estados Unidos y otros países.

Las razones para utilizar el sistema combinado de varillas verticales y horizontales son las siguientes:

- En subestaciones de energía eléctrica un electrodo sencillo es, por sí mismo, inadecuado en dar seguridad. En vista de ello, cuando varias varillas se conectan entre ellos y a todo el equipo los neutros, marcos y estructuras, el resultado es substancialmente un arreglo de rejillas de electrodos a tierra, prescindiendo del objetivo original. Si los enlaces conectados por casualidad se entierran en un suelo que tenga buena conductividad, esta única red puede representar un excelente SPT. En parte por esta razón, algunas utilidades dependen en el uso de una única rejilla. Sin embargo, las varillas son de un valor particular, como se explica en el literal b.
- Si la magnitud de la corriente con trayectoria hacia el interior de la tierra es alta, raramente es posible instalar una rejilla con una resistencia muy baja para asegurar que el incremento del potencial de tierra, no generará gradientes peligrosos en la superficie por el contacto humano. Entonces, el peligro puede eliminarse solamente por el control de los potenciales locales a través del área total.

Un sistema que combina una rejilla horizontal y un número de varillas verticales penetrando más abajo el suelo tiene las ventajas siguientes:

- Mientras que los conductores horizontales (rejilla) son más efectivos en reducir el peligro de un alto voltaje de paso y toque en la superficie de la tierra, con tal que la rejilla se instale en una hondura poco profunda (comúnmente 0,3-0,5 metros debajo del nivel), las varillas bastante grandes estabilizarán el funcionamiento de semejante sistema combinado. Para muchas instalaciones esto es muy importante, porque el congelamiento o la sequedad de las capas superiores del suelo podrían variar la resistividad del suelo con las estaciones del año, mientras que la resistividad de las capas inferiores del suelo permanece casi constante.
- Las varillas penetrando el suelo de baja resistividad son hasta ahora más efectivas en disipar corrientes de falla siempre que un suelo de dos capas o múltiples capas es encontrado y las capas superiores del suelo tienen una resistividad mucho más alta que las capas inferiores. Para otras instalaciones de espacio limitado, esta condición llega a ser de hecho la más deseable que suceda o lograr por el apropiado diseño (varillas extra grandes, etc.)
- Si las varillas se instalan predominantemente a lo largo del perímetro de la rejilla en condiciones alto-bajo o suelos uniforme, las varillas moderarán considerablemente el incremento escarpado del gradiente de la superficie cerca de los acoplamientos periféricos. Estos detalles son pertinentes para el

uso de métodos simplificados en determinar el gradiente de voltaje en la superficie de la tierra.

3.3 Electrodo primario y auxiliar a tierra

El electrodo primario a tierra está diseñado para descargar la corriente de falla hacia el planeta. Los electrodos primarios típicos incluyen tales formas como las rejillas a tierra, conductores de contrapeso, varillas, etc.

El electrodo auxiliar a tierra está diseñado para otros propósitos que no sea descargar la corriente de falla hacia el planeta. Los electrodos auxiliares típicos incluyen estructuras metálicas subterráneas y barras de refuerzo en concreto, si está conectado a la rejilla a tierra. Los electrodos auxiliares pueden tener una capacidad limitada para transportar corriente.

3.4 Aspectos básicos del diseño

El análisis conceptual comúnmente inicia con la inspección del propósito de la subestación de energía eléctrica, mostrando todos los equipos y estructuras principales. Para cimentar las ideas y conceptos básicos, los casos siguientes pueden servir para iniciar el análisis conceptual.

- Un circuito conductor continuo debe rodear el perímetro para encerrar mucha área como sea práctico. Esta disposición ayuda a evitar una alta concentración de corriente y por consiguiente, ambos gradientes altos en el área de la rejilla y cerca de los terminales del cable de proyección. Encerrando más área reduce también la resistencia de la rejilla a tierra.

- Dentro del circuito, los conductores se extienden comúnmente en líneas paralelas y donde sea práctico, a lo largo de las estructuras o fila de equipos para proporcionar conexiones cortas a tierra.
- Se puede incluir como un mínimo barras conductoras de cobre de 10 milímetros de diámetro enterrados 0,3 – 0,5 metros debajo del nivel, separadas de 3 – 7 metros en un patrón de rejilla. En conexiones cruzadas, los conductores empalmados juntamente serían seguros. Las varillas pueden estar en las esquinas de la rejilla y en los puntos de unión a lo largo del perímetro. Las varillas pueden instalarse también en equipos principales, especialmente cerca los apartarrayos. En suelos de múltiples capas o alta resistividad, podría ser útil usar varillas más grandes o varillas instaladas en puntos de unión adicionales.
- El SPT sería extendido sobre toda la subestación de energía eléctrica y con frecuencia más allá del límite de la verja. Múltiples terminales a tierra ó conductores de tamaño grande serían utilizados en lugares donde sucedan altas concentraciones de corriente, tal como la conexión de generadores neutro-tierra, bancos de condensadores o transformadores.
- La relación al lado de la malla de rejillas comúnmente es de 1:1 a 1:3, a no ser que un análisis preciso justifique más valores extremos. El cruce frecuente de conexiones tiene un efecto relativamente pequeño al disminuir la resistencia de una rejilla. El papel principal es asegurar un control adecuado de los potenciales de la superficie. El cruce de conexiones es útil también para obtener trayectorias múltiples para la corriente de falla,

minimizando la caída de voltaje en la misma rejilla y proveer una medida segura de redundancia en el caso de falla en el conductor.

3.5 Diseño en condiciones difíciles

En áreas donde la resistividad del suelo es un tanto alta o el espacio de la subestación es muy escaso, no es posible obtener un SPT de baja impedancia. Se debe separar los electrodos de la rejilla sobre un área más grande, como es hecho en condiciones más propicias. Tal circunstancia es típica de muchas subestaciones industriales, ocupando tan solo una fracción del área de uso normal para el equipo convencional. Esto frecuentemente hace difícil el control del gradiente de la superficie. Algunas de las soluciones incluyen:

- Uso predominante de electrodos a tierra remotos que requiere una consideración cuidadosa de potenciales transferidos, localizar apartarrayos y otros puntos críticos. Una caída de voltaje significativo puede desarrollarse entre las instalaciones locales y remotas, especialmente para fuentes de alta frecuencia (rayos).
- El uso de barras a tierra llevadas profundamente.
- Varios aditivos y tratamiento de suelos se utilizan en conjunción con varillas e interconexión de conductores que se explican totalmente en el tratamiento del suelo para bajar la resistividad.
- El uso de mallas alambradas. Es factible combinar ambos una superficie material y mallas fabricadas hechas de alambres enlazados para ecualizar el

campo del gradiente cerca de la superficie. Una típica malla alambrada consiste de alambres acerados de cobre revestido de sección transversal de $13,3 \text{ mm}^2$ un modelo de rejilla arreglado en $0,6 \times 0,6$ metros. Instalados en la superficie de la tierra y debajo de la superficie material y empalmado a la rejilla a tierra central en múltiples lugares.

- Donde es factible, conectar alambres estáticos y neutros a tierra (ver tipos de falla a tierra). Típico es el uso de electrodos a tierra auxiliares o como lazos de tierra hacia otros sistemas. Las consecuencias de tales aplicaciones, por supuesto, tienen que evaluarse cuidadosamente.

- Donde sea práctico, un depósito cercano con material de baja resistividad de volumen suficiente puede usarse para instalar una rejilla extra (satélite). Esta rejilla satélite, cuando está conectado adecuadamente a la rejilla principal, disminuirá la resistencia total y así, el aumento de potencial de tierra. El material inmediato de baja resistividad puede ser un depósito de arcilla o puede ser parte de una gran estructura, tal como la masa de concreto de un embalse hidroeléctrico (Verma, Merand y Barbeau [B86]).

3.6 Conexión de la rejilla

Conductores con la adecuada ampacidad y resistencia mecánica (Ver selección de conductores y conexiones) deben usarse para la conexión entre:

- Las partes metálicas conductoras a tierra que podrían llegar a energizarse accidentalmente, tal como estructuras metálicas, marcos de máquinas, cubiertas metálicas convencionales o que proveen de gas al dispositivo de

distribución, tanques de transformadores, protectores, etc. También, las piezas conductoras de metal que pudieron estar a diferente potencial concerniente a otras partes metálicas que se han energizado deben estar empalmadas, generalmente a través de la rejilla a tierra.

- Todas las fuentes de la corriente de incidente tales como pararrayos de la oleada, las baterías de los condensadores o los condensadores del acoplador y transformadores.

Todos los terminales de componente de tierra accesibles se deben examinar sobre una base periódica. La soldadura autógena exotérmica, cubierta o los conectores del tipo de presión se pueden utilizar para las conexiones subterráneas (ver selección de conexiones).

Los circuitos abiertos, en lugares expuestos inclusive, no se pueden detectar y no es práctico obviamente inspeccionar partes enterradas del SPT una vez sea instalado. Para más detalles de los métodos que se utilizaron para determinar la continuidad se incluye la prueba de integridad de la rejilla a tierra. Esas instalaciones que son más bien para suministrar o transportar una alta corriente, del tanque del interruptor, de los bastidores y las pistas de los pararrayos deben conectarse a la rejilla con más de un terminal de componente a tierra del interruptor.

3.7 Selección de los conductores y conexiones

Al evaluar que material y que calibre del conductor ó que límite máximo permisible de temperatura se necesita aplicar en situaciones individuales de diseño, la elección

final siempre debe reflejar las consideraciones delineadas desde los requisitos básicos (capítulo 3.7.1) hasta la selección de las conexiones (capítulo 3.7.4).

3.7.1 Requisitos básicos

Cada elemento del SPT, incluyendo los conductores de la rejilla, conectores, terminales de conexión y todos los electrodos primarios, se deben diseñar para el supuesto tiempo de duración de la instalación, además el elemento tendrá que:

- Poseer suficiente conductividad, así no contribuirá principalmente a la diferencia de los voltajes locales.
- Resistir la fusión y el deterioro mecánico bajo las combinaciones más adversas de magnitud y duración de una falla.
- Ser mecánicamente confiable y con alto grado de resistencia.
- Ser capaz de mantener sus funciones, inclusive cuando este expuesto a la corrosión ó abuso físico.

3.7.2 Selección de los materiales para conductores y problemas relacionados a la corrosión.

a) El cobre:

El cobre es un material comúnmente usado para los SPT. Los conductores de cobre, además de una alta conductividad, tienen la ventaja de ser resistentes a la

mayor parte de la corrosión subterránea ya que el cobre es catódico con respecto a la mayoría de los otros metales que son igualmente enterrados en la zona.

b) El acero con revestimiento de cobre:

El acero con revestimiento de cobre se usa comúnmente en varillas subterráneas y ocasionalmente en rejillas a tierra. Por lo tanto, el uso del cobre ó acero con revestimiento de cobre de menor grado, asegura que la integridad de una red subterránea será conservada por años, siempre que los conductores sean del calibre adecuado y no estén dañados y que las condiciones del suelo no sean corrosivas con el material que se esté usando.

c) El aluminio:

El aluminio se usa con menos frecuencia en rejillas a tierra. El aluminio tiene las siguientes desventajas que debemos considerar:

- El mismo aluminio se puede corroer en ciertos suelos. La capa del material corroído de aluminio es mal conductora para todos los propósitos prácticos de puesta a tierra.
- La corrosión gradual causada por corrientes alternas también puede ser un problema, bajo ciertas condiciones.

Así, el Aluminio solamente se debe usar después de una completa investigación de todas las circunstancias, a pesar del hecho que, como el acero, este alivia el problema de contribuir a la corrosión de otros objetos enterrados. Sin embargo, el aluminio es anódico para muchos metales, incluyendo el acero y si es

interconectado a uno de estos metales en la presencia de un electrolito, el aluminio se sacrificará así mismo para proteger al otro metal. Si se utiliza el aluminio, se recomiendan utilizar conductores eléctricos con altos niveles de pureza, por ser más confiable que la mayoría de las aleaciones.

d) El acero:

El acero se puede utilizar en los conductores de las rejillas a tierra. Por supuesto que tal diseño requiere poner mayor atención a la corrosión del acero. El uso del acero galvanizado ó el uso de acero resistente a la corrosión, en combinación con protección catódica, es común para los SPT (Mahonar y Nagar [B32]).

e) Otras consideraciones:

Una rejilla de cobre ó acero con revestimiento de cobre forma una celda galvánica con estructuras de acero enterrado, tuberías, y cualquiera de las aleaciones con base de plomo que podría estar presente en la envoltura del cable. Esta celda galvánica puede acelerar la corrosión de la última. Se ha intentado cubrir con estaño el cobre para alguna de las utilidades. Esto reduce el potencial de la celda con respecto al Acero y al Zinc, alrededor del 50% y prácticamente elimina este potencial con respecto al plomo (el estaño se sacrifica más que el plomo). La desventaja de usar un conductor de cobre estañado, es que acelera y concentra la corrosión natural del cobre en cualquier área pequeña descubierta, causado por los químicos en el suelo. El tema de la corrosión subterránea y la protección catódica es complejo. Muchos estudios se han hecho y mucho se ha publicado concerniente a este tema. La discusión detallada de este fenómeno está más allá del alcance del presente trabajo.

3.7.3 Factores del dimensionamiento de los conductores

3.7.3.1 Corrientes simétricas

El tiempo corto del aumento de temperatura en un conductor de tierra ó el calibre del conductor que se requiere en función de la corriente del mismo, se obtiene de la ecuación (36) a la ecuación (41), la cual se ha tomado de la derivación de Sverak [B40]. Estas ecuaciones evalúan la ampacidad de cualquier conductor para el cual la constante del material se conoce ó se pueden determinar por cálculo. Las constantes de los materiales que comúnmente se utilizan para un SPT, están registradas en la *tabla 3.1*. La ecuación (36) hasta la ecuación (41) se deriva de la corriente simétrica (sin compensación DC offset).

$$I = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (36)$$

Donde:

I : Es el valor RMS de la corriente en Kiloamperios.

A_{mm^2} : Es la sección transversal del conductor en mm^2 .

T_m : Es la temperatura máxima permisible en °C.

T_a : Es la temperatura ambiente en °C.

T_r : Es la temperatura de referencia para la constante de los materiales en °C.

α_0 : Es el coeficiente térmico de resistividad a 0 °C en $1/°C$.

α_r : Es el coeficiente térmico de resistividad a la temperatura T_r en $1/°C$.

ρ_r : Es la resistividad del conductor a tierra a la temperatura T_r en $\mu\Omega\text{-cm}$.

K_0 : Es $1/\alpha_0$ ó $1/\alpha_0 - T_r$ en °C.

t_c : Es la duración de la corriente en segundos.

TCAP es la capacidad térmica por unidad de volumen de la *tabla 3.1* en $J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$

Se debe notar que α_r y ρ_r se encuentran a la misma temperatura de referencia de T_r $^\circ C$. La *tabla 3.1* provee los valores para α_r y ρ_r a 20 $^\circ C$.

Si el calibre del conductor esta dado en Kcmils ($mm^2 \times 1,974 =$ Kcmils), la ecuación (36) llega a ser:

$$I = 5,07 \cdot 10^{-3} A_{Kcmil} \sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (37)$$

La ecuación (36) y la ecuación (37), en conjunto con la ecuación (38) (la cual define el TCAP), reflejan las dos suposiciones básicas.

- Todo el calor será retenido en el conductor (Proceso adiabático)
- El producto del calor específico (SH) y el peso específico (SW), TCAP, es aproximadamente constante porque el SH aumenta y el SW se reduce al mismo porcentaje. Para la mayoría de metales, estos valores son aplicables sobre un amplio rango de temperatura, dentro de los segundos a lo largo de la duración de la falla.

Tabla 3.1 – Constantes de los materiales

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor α_r a 20°C (1/°C)	K_0 en °C	Temperatura de fusión ^(a) T_m (°C)	ρ_r 20°C ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Capacidad Térmica $TCAP$ [$\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$]
Cobre, destemplado de suave –trazado	100,0	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre, comercial de duro-trazado	97,0	0,00381	242	1084	1,78	3,42
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	40,0	0,00378	245	1084	4,40	3,85
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	30,0	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Varilla ^(b) de Acero con revestimiento de Cobre	20,0	0,0078	245	1084	8,62	3,85
Aluminio de grado EC	61,0	0,00403	228	657	2,86	2,56
Aleación de Aluminio 5005	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,60
Aleación de Aluminio 6201	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,60
Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio	20,3	0,00360	258	657	8,48	3,58
Acero 1020	10,8	0,00160	605	1510	15,90	3,28
Varilla ^(c) de acero con revestimiento Inoxidable	9,8	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Varilla de acero con capa de Zinc	8,6	0,00320	293	419	20,10	3,93
Acero Inoxidable 304	2,4	0,00130	749	1400	72,00	4,03

(a) De los estándares ASTM

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

(c) Varillas de Acero con revestimiento Inoxidable en 0,508 mm. N° 304 con espesor del Acero Inoxidable sobre el núcleo del Acero 1020.

a) Sustitución de fórmulas

El TCAP se puede calcular para materiales que no se muestran en la *Tabla 3.1* por medio del calor específico y peso específico. El calor específico, SH, en cal/(gramos x °C) y el peso específico, SW, en gramos/cm³ están relacionados a la capacidad térmica por unidad de volumen en J/cm³.°C de la siguiente forma:

$$4,184 \text{ J} = 1 \text{ Caloría}$$

Por lo tanto, el TCAP se define por:

$$\text{TCAP [cal/ cm}^3 \text{ x } ^\circ\text{C}] = \text{SH [cal/ (gramos x } ^\circ\text{C)]} \cdot \text{SW (gramos/cm}^3\text{)} \quad (38)$$

ó

$$\text{TCAP [J/ (cm}^3 \text{ x } ^\circ\text{C)]} = 4,184 \text{ (J/cal)} \cdot \text{SH [cal/ (gramos x } ^\circ\text{C)]} \cdot \text{SW (Gramos/cm}^3\text{)}$$

Una vez está determinado el TCAP, la ecuación (36) y la ecuación (37) se pueden usar para determinar la ampacidad del conductor.

La ecuación (36) y la ecuación (37) se pueden ordenar para dar el calibre del conductor requerido como una función de la corriente en el conductor.

$$A_{mm^2} = I \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (39)$$

$$A_{kcmil} = I \cdot \frac{197,4}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (40)$$

Por ejemplo: se puede hacer una tabulación utilizando la ecuación (40) y la *Tabla 3.1* para obtener los datos para un acero con revestimiento de cobre del 30% y 40% y para conductores de cobre del 100% y 97%. Por ejemplo, para calcular el calibre de un conductor de acero con revestimiento de cobre, se obtiene:

$$t_C = 1, \alpha_{20} = 0,00378, \rho_{20} = 5,86, \text{TCAP} = 1084, T_a = 40, K_0 = 245$$

Así, para $I = 1$ KA y usando la ecuación (39)

$$A_{mm^2} = \frac{1}{\sqrt{0,0267}} = 6,12 \text{ mm}^2 \text{ ó } 6,12 \text{ mm}^2/\text{KA}$$

b) Simplificación de fórmulas

La fórmula se puede simplificar como sigue:

$$A_{mm^2} = 0,506 \cdot I \cdot K_f \cdot \sqrt{t_C} \quad (41)$$

Donde:

I : Es el valor RMS de la corriente de falla en Kiloamperios.

t_C : Es la duración de la corriente en segundos.

K_f : Es la constante de la *Tabla 3.2* para los materiales de varios valores de T_m (Temperatura de fusión o la temperatura limitada del conductor establecido en el tema 10.3.3) y utilizando la temperatura ambiente (T_a) de 40 °C.

Ejemplos: Utilizando la ecuación (41) para 20 KA, con una falla de 3 s.

- Para el Cobre de suave trenzado

$$A_{mm^2} = 0,506 (20)(7)\sqrt{3} = 122,84 \text{ mm}^2$$

- Para una conductividad del 40% de un conductor de Acero con revestimiento de Cobre.

$$A_{kcmil} = 0,506 (20)(10,45)\sqrt{3} = 183,17 \text{ mm}^2.$$

- Para un conductor de Acero.

$$A_{kcmil} = 0,506 (20)(15,95)\sqrt{3} = 279 \text{ mm}^2.$$

También, se pueden comparar las corrientes de fusión de un conductor de calibre establecido para diferentes intervalos de tiempo. Utilizando como ejemplo el cobre de suave trenzado de sección nominal 107.2 mm^2 .

$$\text{Sí ; } t_c = 0,5 \text{ s ; } I = 107,2 / (0,506 \cdot 7 \cdot \sqrt{0,5}) = 42,7 \text{ KA}$$

$$\text{Sí ; } t_c = 1,0 \text{ s ; } I = 107,2 / (0,506 \cdot 7 \cdot \sqrt{1}) = 30,2 \text{ KA}$$

$$\text{Sí ; } t_c = 3,0 \text{ s ; } I = 107,2 / (0,506 \cdot 7 \cdot \sqrt{3}) = 17,5 \text{ KA}$$

Tabla 3.2 – Constantes de los materiales

Material	Conductividad (%)	T_m^a (°C)	K_f
Cobre destemplado con suave trazado	100,0	1083	7,00
Cobre comercial con duro trazado	97,0	1084	7,06
Cobre comercial con duro trazado	97,0	250	11,78
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	40,0	1084	10,45
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	30,0	1084	12,06
Varilla de Acero con revestimiento de Cobre	20,0	1084	14,64
Aluminio grado EC	61,0	657	12,12
Aleación de Aluminio 5005	53,5	652	12,41
Aleación de Aluminio 6201	52,5	654	12,47
Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio	200,3	657	17,2
Acero 1020	10,8	1510	15,95
Varilla de Acero con revestimiento Inoxidable	9,8	1400	14,72
Varilla de Acero con capa de Zinc	8,6	419	28,96
Acero Inoxidable 304	2,4	1400	30,05

^a Ver el tema factores secundarios del tamaño del conductor para comentarios que interesan para la selección del material (capítulo 4.1)

El calibre del conductor que se elige comúnmente es más grande que los que se establecen en la fusión debido a los siguientes factores:

- El conductor debe tener la fuerza para soportar cualquier abuso mecánico ó corrosivo durante la vida útil para lo que se diseño la instalación.
- El conductor debe tener una conductancia suficiente para prevenir cualquier caída de voltaje peligrosa posible durante una falla, en la vida útil de la instalación.
- La necesidad de limitar la temperatura del conductor (ver capítulo 3.7.3.3 Factores secundarios del tamaño del conductor).
- Un factor de seguridad se debe aplicar al SPT, así, como a otros componentes eléctricos.

3.7.3.2 Corrientes Asimétricas

a) Utilizando un factor de reducción

En algunos casos donde se puede contar con un componente de compensación de DC offset, el valor efectivo de una corriente asimétrica I_F integrada sobre la duración total de falla t_C , se puede determinar como una función de X/R usando el factor de reducción D_f , antes de aplicar las ecuaciones 36 al 41.

$$I_F = I_f \cdot D_f \quad (42)$$

El valor resultante de I_F siempre es más grande que I_f debido a que el factor de decremento se basa en una suposición que las componentes de AC no decaen con el tiempo, pero permanece constante en su valor subtransitorio inicial.

b) Utilizando las tablas de corrientes asimétricas

Debido a la compensación DC offset en la corriente de falla causará al conductor un incremento de temperatura para las mismas condiciones de falla (duración y magnitud de la corriente de falla), la ecuación (42) determina un valor equivalente de la corriente simétrica en la presencia de la compensación DC. Además, si está presente, la compensación DC resultará en una fuerza mecánica y energía absorbida, siendo esta casi cuatro veces el valor que para un caso de corriente simétrica equivalente. Sin embargo, el efecto de la compensación DC se puede despreciar si la duración de la corriente es más grande ó igual que 1 segundo ó la relación X/R es menor que 5 segundos en el lugar de la falla.

Las características de fusión de varios calibres de conductores de cobre con varios niveles de compensación DC se muestran en la *Tabla 3.3* hasta la *Tabla 3.6*. Estas características de fusión se han derivado teóricamente y luego se han verificado extensamente a través de experimentos (Reichman, Vainberg y Kiffel [B38]).

Tabla 3.3 – Capacidad de corriente para cables de cobre de SPT; la corriente son valores RMS, para frecuencias de 60 Hertz, X/R = 40; corriente en kiloamperios.

Tamaño del cable, AWG	Sección transversal nominal, mm^2	6 Ciclos (100 ms)	15 Ciclos (250 ms)	30 Ciclos (500 ms)	45 Ciclos (750 ms)	60 Ciclos (1 s)	180 Ciclos (3 s)
# 2	33,63	22	16	12	10	9	5
#1	42,41	28	21	16	13	11	7
1/0	53,48	36	26	20	17	14	8
2/0	67,42	45	33	25	21	18	11
3/0	85,03	57	42	32	27	23	14
4/0	107,20	72	53	40	34	30	17
250 kcmil	126,65	85	62	47	40	35	21
350 kcmil	177,36	119	87	67	56	49	29

Tabla 3.4 - Capacidad de corriente para cables de cobre de SPT; la corriente son valores RMS, para frecuencias de 60 Hertz, X/R = 20; corriente en kiloamperios.

Tamaño del cable, AWG	Sección transversal nominal, mm^2	6 Ciclos (100 ms)	15 Ciclos (250 ms)	30 Ciclos (500 ms)	45 Ciclos (750 ms)	60 Ciclos (1 s)	180 Ciclos (3 s)
# 2	33,63	25	18	13	11	9	5
#1	42,41	32	22	16	13	12	7
1/0	53,48	40	28	21	17	15	9
2/0	67,42	51	36	26	22	19	11
3/0	85,03	64	45	33	27	24	14
4/0	107,20	81	57	42	35	30	18
250 kcmil	126,65	95	67	50	41	36	21
350 kcmil	177,36	134	94	70	58	50	29

Tabla 3.5 - Capacidad de corriente para cables de cobre de SPT; la corriente son valores RMS, para frecuencias de 60 Hertz, X/R = 10; corriente en kiloamperios.

Tamaño del cable, AWG	Sección transversal nominal, mm^2	6 Ciclos (100 ms)	15 Ciclos (250 ms)	30 Ciclos (500 ms)	45 Ciclos (750 ms)	60 Ciclos (1 s)	180 Ciclos (3 s)
# 2	33,63	27	19	13	11	9	5
#1	42,41	35	23	17	14	12	7
1/0	53,48	44	30	21	17	15	9
2/0	67,42	56	38	27	22	19	11
3/0	85,03	70	48	34	28	24	14
4/0	107,20	89	60	43	36	31	18
250 kcmil	126,65	105	71	51	42	36	21
350 kcmil	177,36	147	99	72	59	51	30

Tabla 3.6 - Capacidad de corriente para cables de cobre de SPT; la corriente son valores RMS, para frecuencias de 60 Hertz, X/R = 0; corriente en kiloamperios.

Tamaño del cable, AWG	Sección transversal nominal, mm^2	6 Ciclos (100 ms)	15 Ciclos (250 ms)	30 Ciclos (500 ms)	45 Ciclos (750 ms)	60 Ciclos (1 s)	180 Ciclos (3 s)
# 2	33,63	31	19	14	11	9	5
#1	42,41	39	24	17	14	12	7
1/0	53,48	49	31	22	18	15	9
2/0	67,42	62	39	28	22	19	11
3/0	85,03	79	50	35	28	25	14
4/0	107,20	99	63	44	36	31	18
250 kcmil	126,65	117	74	52	43	37	21
350 kcmil	177,36	165	104	73	60	52	30

Notas:

- Los valores de corriente que se muestran desde la *Tabla 3.3* hasta la *Tabla 3.6* se calcularon por medio del programa de computadora RTGC (Reichman, Vainberg y Kuffel [B74]). Este programa de computadora se puede usar directamente para determinar los requisitos de calibre del cable de SPT para una relación X/R y del tiempo de limpieza de la falla.
- La corriente se calcula para la máxima compensación DC.
- La temperatura inicial del conductor = 40°C; y la temperatura final del conductor = 1083 °C.
- Los valores métricos son conversiones manejables. La conversión es un cálculo directo del área, en unidades métricas, del tamaño AWG.

3.7.3.3 Factores secundarios del calibre del conductor

El diseñador debe tomar precauciones para garantizar que la temperatura de cualquier conductor y la conexión en la instalación del SPT, no ponga en peligro la seguridad de operación de la subestación de energía eléctrica. Por ejemplo:

- Comúnmente, los conductores y las conexiones cerca de materiales inflamables deben estar sujetos limitaciones más rigurosas de temperatura.
- Sí la fuerza del Cobre de suave trenzado se requiere por razones mecánicas, entonces se recomienda no excederse de los 250°C para evitar el destemplado de los conductores.

La posible exposición a un ambiente corrosivo se debe examinar cuidadosamente. Cuando el calibre del conductor y el método de unión que se escoge ha cumplido todos los requisitos de la prueba de acuerdo a la IEEE Std. 837-1989, es aconsejable escoger un conductor de calibre más grande para compensar alguna reducción gradual en la sección transversal del conductor, donde el ambiente del suelo promueve a originar la corrosión.

Los terminales inferiores del equipo hacia la rejilla se pueden exponer a la corriente de falla total dentro de la rejilla, mientras la rejilla divide esta corriente y por lo que cada segmento del conductor en la rejilla está expuesto solamente a una pequeña fracción de la corriente de falla total. Así, los terminales de la parte inferior deberán ser más grandes que los conductores de la rejilla ó deben ser múltiples conductores desde el equipo hacia la rejilla para tener suficiente capacidad para la corriente de falla total.

Los conductores de terminales a tierra que dirigen la corriente de los rayos, rara vez requieren mayor consideración. El calibre del conductor, el cual es seleccionado de acuerdo a los requisitos de la corriente de falla, comúnmente es también adecuado para cargar una sobre tensión por un tiempo corto causado por los rayos (Bellashi [B3]).

En la realidad, los requisitos en la fiabilidad mecánica colocarán el calibre mínimo del conductor. Mientras podría considerarse apropiado para el diseñador establecer los calibres mínimos de acuerdo a las condiciones del lugar, Algunas de estas razones específicas son:

- El mal funcionamiento de los relevadores puede resultar en una duración de la falla excesiva para los tiempos de limpieza. El tiempo de respaldo para eliminar la falla es generalmente proporcionado por el calibre del conductor. Para subestaciones muy pequeñas, esto se puede acercar a un tiempo de 3 segundos ó más. Sin embargo, debido a las grandes subestaciones comúnmente tienen un esquema de protección complejo ó redundante, la falla se despejara generalmente en 1 segundo ó en menor tiempo.

- El último valor de corriente que se utiliza para determinar el calibre del conductor, debe tomar en cuenta con la posibilidad un incremento futuro. Es menos costoso incluir un margen adecuado en el calibre del conductor durante el diseño inicial, que intentar reforzar un número de terminales de tierra en una fecha posterior.

3.7.4 Selección de las conexiones

Todas las conexiones hechas en un SPT por encima y debajo de la tierra, se deben evaluar para conocer los requisitos generales de un conductor que se utiliza; nombre, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, capacidad de la corriente de carga y la fuerza mecánica. Estas conexiones deben ser lo bastante sólidas para mantener el incremento de temperatura debajo de la temperatura del conductor y poder soportar el efecto del calentamiento. Las conexiones deben ser también lo suficientemente fuertes para soportar las fuerzas mecánicas causadas por las fuerzas electromagnéticas de las máximas corrientes de fallas y estar preparadas para resistir la corrosión a lo largo de la vida útil de la instalación.

El IEEE Std. 837-1989 proporciona información individualizada en la aplicación y prueba de las conexiones permanentes para el uso de SPT en subestaciones de energía eléctrica. Las conexiones de tierra que pasan el IEEE Std. 837-1989 para un material y calibre de conductor en particular, deben satisfacer todos los criterios tales como: Conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, capacidad de la corriente de carga y la fuerza mecánica, se seleccionan para la misma categoría el calibre del conductor y su material.

CAPÍTULO IV

CARACTERÍSTICAS, ESTRUCTURA Y SELECCIÓN DEL MODELO DE SUELO

4.1 Características del suelo

4.1.1 Modelo de suelo

El comportamiento de un electrodo a tierra que se entierra en el suelo se puede analizar por medio del circuito que se expone en la *figura 4.1*. Tal como se muestra en la figura, la mayoría de los suelos se comportan como un conductor de resistencia “ r ” y como un dieléctrico. Excepto para ondas de alta frecuencia y de frente escarpado que penetran el suelo de un material muy resistivo, la corriente de carga es indiferente en comparación con la corriente de fuga y la tierra se puede representar por una resistencia pura.

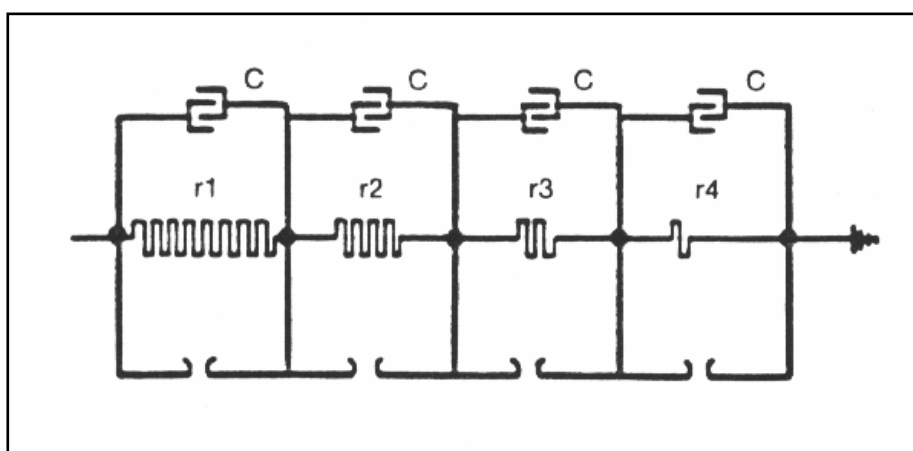


Figura 4.1 – Modelo de suelo

4.1.2 El efecto del gradiente de voltaje

La resistividad del suelo no se afecta por el gradiente de voltaje a menos que posteriormente exceda un valor crítico. El valor cambia un poco con el material del suelo, pero comúnmente este tiene la magnitud de varios kilovoltios por centímetro. Una vez se exceda, se desarrollarán arcos eléctricos en la superficie del electrodo y avanzarán hacia el interior del planeta, así como, para incrementar la capacidad efectiva del electrodo hasta que los gradientes se reduzcan a valores que el material del suelo pueda soportar. Esta condición se ilustra por la presencia de aberturas en la *Figura 4.1*. Debido a que el SPT de la subestación normalmente está diseñado para cumplir con más criterios que los límites del voltaje de paso y de toque, el gradiente se asume siempre que este abajo del rango crítico.

4.1.3 Efecto de la magnitud de la corriente.

La resistividad del suelo en las cercanías de los electrodos a tierra se puede afectar por la circulación de corriente desde los electrodos hacia dentro del suelo adyacente. Las características térmicas y el contenido de humedad del suelo determinarán si una corriente de magnitud y duración dada causarán una aridez (sequedad) significativa y así incrementar la resistividad efectiva del suelo.

Según Armstrong [B50] no se debe exceder el valor promedio de la densidad de corriente de $200 \text{ A}/\text{m}^2$ por segundo.

4.1.4 El efecto de la humedad, temperatura y contenido químico.

La conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica. Por esta razón en la mayoría de los suelos aumenta abruptamente siempre que el contenido de humedad sea menor del 15% del peso del suelo. La cantidad de humedad depende

del tamaño del grano, la solidez y la variabilidad de los tamaños del grano. Sin embargo, tal como nos muestra la curva 2 de la *figura 4.2* una vez el contenido de humedad exceda el 22% la resistividad se verá un poco afectada, según El IEEE Std. 142-1991.

El efecto de la temperatura en la resistividad del suelo, es casi despreciable para temperaturas por encima del punto de congelamiento. El agua que contiene el suelo comienza a congelarse a los 0° C y la resistividad aumenta rápidamente. La curva 3 ilustra la variación característica para un suelo de tierra arenosa que contenga el 15,2 % de humedad por peso.

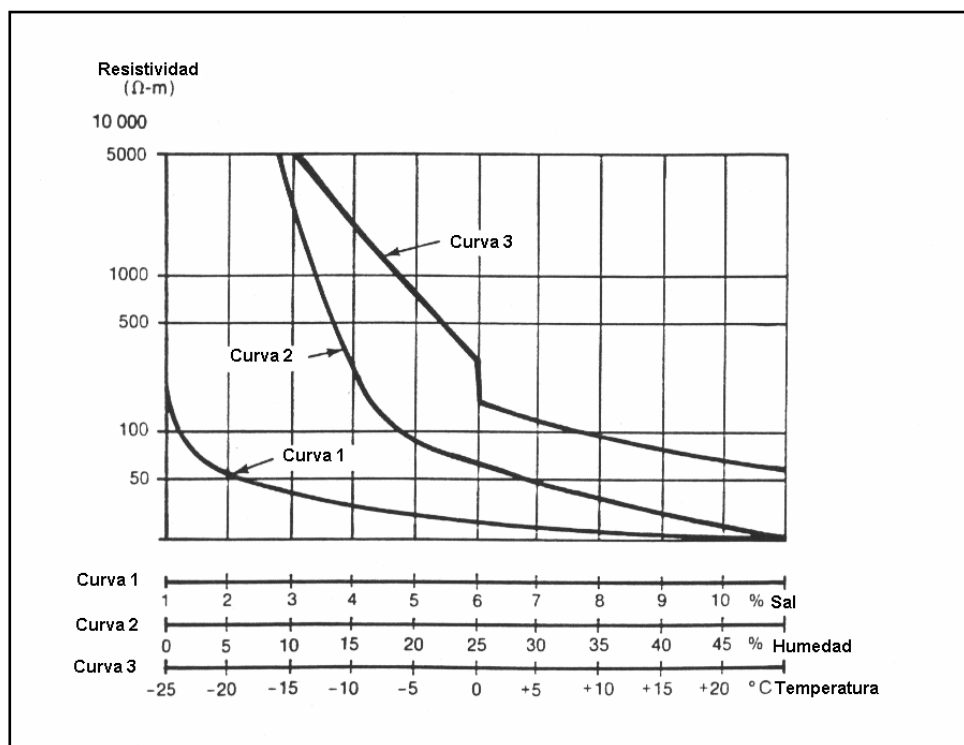


Figura 4.2 – El efecto de la humedad, temperatura y sal, sobre la resistividad del suelo.

La composición y la cantidad presente de sales solubles, ácidas ó alcalinas en el suelo pueden afectar considerablemente su resistividad. En la curva 1 de la *figura 4.2* se ilustra una característica de la resistividad de un suelo que contiene un 30 % de humedad por peso, al utilizar la sal (cloruro de sodio), (Towne [B51]).

4.1.5 El uso de capas del material superficial.

La grava ó la capa de material superficial, se utiliza comúnmente con una profundidad de 0,08 - 0,15 metros, para retardar la evaporación de la humedad y así, limitar que la capa superior del suelo se seque en la estación seca del año durante un periodo prolongado. El cubrir la superficie con un material de alta resistividad es muy valioso para reducir las descargas de corriente, así como se trató anteriormente el efecto de una capa delgada de material superficial. El valor de esta capa en reducir la descarga de corrientes no siempre se realiza completamente. Las pruebas que realizó Bodier [B8] en Francia en una subestación de energía eléctrica, mostraron que la acumulación de grava utilizada como un cerco superficial estando húmeda dio el valor de $5000 \Omega \cdot m$. Una capa gruesa de 0,1 - 0,15 metros reduce el factor de peligro por una relación de 10:1 (relación del cuerpo a la corriente de corto-circuito), tal como se compara con la humedad natural de tierra. En las pruebas que realizó en Alemania Langer [B52] se compararon las corrientes corporales cuando una persona está tocando un hidrante mientras está de pié en una grava húmeda áspera de resistividad $6000 \Omega \cdot m$ con las corrientes corporales cuando está en un suelo seco. En el caso del suelo seco el valor de la corriente fue 20 veces más grande que en grava húmeda áspera. Hay pruebas que confirman estos beneficios (Elek [B46]; EPRI TR-100863 [B28]).

Basándose en los cálculos, si no se remueve cuidadosamente en algunas áreas el asentamiento de polvo, se deben tomar ciertas consideraciones en el uso de una capa de material superficial limpio ó cascajo, como la posibilidad de que el aislamiento no se dañe en parte a través de los espacios vacíos por compresión de las capas más profundas de grava por debajo del suelo con materiales de excavaciones subsecuentes.

El rango de los valores de la resistividad para la capa del material superficial depende de muchos factores, alguno de los cuales son tipos de piedra, tamaño, la condición de la piedra (limpia ó fina), el tipo del contenido de humedad, la contaminación atmosférica, etc. La *tabla 4.1* nos indica que la resistividad del agua con la cual la roca se humedece tiene una influencia considerable en la medición de la resistividad de la capa del material superficial. Así, el material superficial expuesto a la espuma de mar puede tener una resistividad más baja que el material superficial que se utiliza en ambientes áridos. Las condiciones locales, tamaño y tipo de piedra, etc. que se indica en la *tabla 4.1* pueden afectar el valor de la resistividad. Así, es importante que se tomen las mediciones de resistividad de las muestras del tipo roca, que se ha estado utilizando en algún área específica.

La *tabla 4.1* muestra los valores característicos de la resistividad para los diferentes tipos de material superficial, que se obtienen en muchas partes y en regiones diferentes (Abledu y Laird[B1]; EPRI TR-100863[B28]; Hammond y Robson[B29]; Thompson[B44][B45]). Estos valores no son válidos para todos los tipos de suelos y el tamaño del material que se encuentre en cierta región de estudio. Ya que, se deben realizar las pruebas correspondientes para determinar la resistividad del suelo debido a su degradación.

Tabla 4.1 – Resistividad de materiales superficiales característicos

Item	Descripción del material de superficie	Resistividad de la muestra $\Omega.m$	
		Seco	Húmedo
1	Granito	140×10^6	1300 (agua superficial, 45 $\Omega.m$)
2	Granito molido. (0,04 m.)	4000	1200 (agua llovida)
3	Granito molido (0,02 – 0,025 m.)	-----	6513 (10 min. después de drenar agua a 45 $\Omega.m$)
4	Granito limpio (0,025 – 0,05 m.)	$1,5 \times 10^6$ a $4,5 \times 10^6$	5000 (agua de lluvia, 100 $\Omega.m$)
5	Granito limpio (0,05 – 0,1 m.)	$2,6 \times 10^6$ a 3×10^6	10,000 (agua de lluvia, 100 $\Omega.m$)
6	Piedra caliza	7×10^6	2000-3000 (agua superficial 45 $\Omega.m$)
7	Granito limpio similar a la grava (0,02 m.)	2×10^6	10,000
8	Granito lavado	10×10^6	5,000
9	Granito lavado #57 (0,02 m.)	190×10^6	800 (agua superficial, 45 $\Omega.m$)
10	Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10,000 a 6×10^6
11	Concreto	1×10^6 a 1×10^9	21 a 100

4.2 Estructura del suelo y selección del modelo de suelo

4.2.1 Investigación de la estructura del suelo

Es indispensable hacer investigaciones de resistividad en el sitio de una subestación de energía eléctrica para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. Las pruebas de perforación y otras investigaciones geológicas proveen a menudo información importante de la presencia de diferentes capas y la naturaleza del material del suelo, obteniendo algunas ideas del rango de la resistividad del sitio.

4.2.2 Clasificación de los suelos y rango de resistividad

Existe un gran número de tablas que muestran los rangos de resistividad para varios tipos de suelos y rocas. Existe información más detallada en libros y publicaciones de ingeniería (por ejemplo, Sunde [B39] y Wenner [B47]). Ver *tabla 4.2*.

4.2.3 Mediciones de la resistividad

Estimaciones que se basan en la clasificación de los suelos proporcionan una aproximación general de la resistividad. Por lo tanto, es imprescindible hacer pruebas de resistividad. Estas se deben hacer en diferentes lugares dentro del sitio. Raramente se encuentran suelos con resistividad uniforme y a una profundidad considerable dentro de la zona de una subestación. Normalmente, se encuentran diferentes capas, cada una con diferente resistividad. A menudo suelen ocurrir cambios laterales, pero en comparación con los verticales, los cambios suelen ser aún más graduales. Se pueden hacer pruebas de resistividad en el suelo para determinar si existe alguna variación importante de resistividad con la profundidad.

Cuando las variaciones son grandes se deben tomar aún más lecturas, especialmente si las lecturas son tan altas que indican problemas de seguridad.

Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, a menudo es deseable hacer pruebas a diferentes distancias para obtener un estimado de la resistividad de las capas más profundas. Esto es posible, ya que a medida se incrementa la distancia de las pruebas, las corrientes de prueba penetran a áreas más distantes, en direcciones verticales y horizontales, sin importar cuán se desvíe la trayectoria de la corriente debido a la variación de las condiciones del suelo. (Manual de pruebas de resistencia a tierra [B53]).

Tabla 4.2 – Rangos de resistividad de la tierra

Tipo de tierra	Resistividad promedio ($\Omega.m$)
Suelo orgánico húmedo	10
Suelo húmedo	100
Suelo seco	1 000
Roca	10 000

Un gran número de técnicas de medición se describen con detalle en el Estándar 81-1983 del IEEE. El método de cuatro electrodos de Werner, como se muestra en la *figura 4.3*, generalmente es la técnica que más se utiliza. En resumen, se realizan cuatro pruebas dentro de la tierra a lo largo de una línea estrecha, a una distancia igual "*a*" una de la otra, y a una profundidad "*b*". Se mide el voltaje entre los dos electrodos (de potencial) internos y luego es dividido entre la corriente de los electrodos (de corriente) externos, para así, dar el valor de la resistencia *R*.

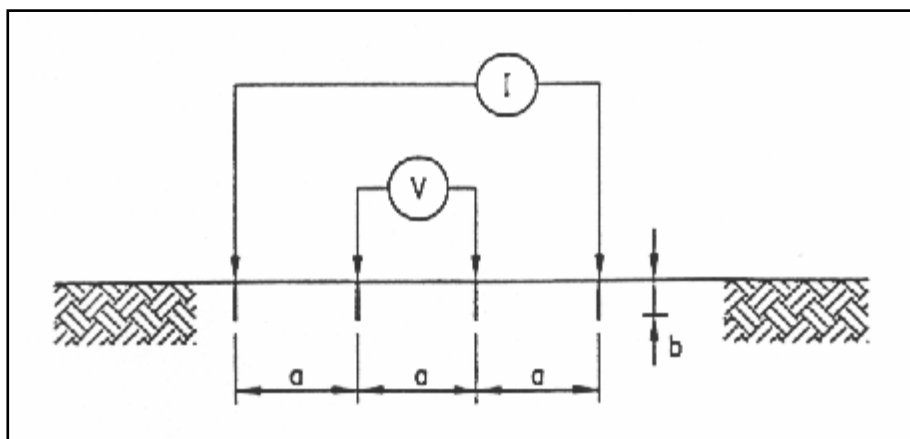


Figura 4.3 – Método de Wenner de cuatro pines

Luego,

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (43)$$

Donde:

ρ_a : es la resistividad aparente del suelo en $\Omega \cdot m$

R : es la medición de la resistencia en Ω

a : es la distancia entre los electrodos adyacentes en m

b : es la profundidad de los electrodos en m.

Si b es pequeño comparado con a , implica que la distancia entre electrodos auxiliares es grande comparada con la profundidad a la que se entierran, y la ecuación (43) se puede reducir a:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (44)$$

La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pruebas en espacios pequeños, mientras que la mayoría de la corriente penetra más adentro del suelo para distancias más grandes. Se puede asumir, con aproximaciones razonables una resistividad aparente que se toman de las pruebas de medida de resistividad a una distancia dada, a una profundidad " b " cuando los contrastes de la resistividad de las capas de los suelos no son excesivos. La ecuación (43) y ecuación (44) se pueden utilizar para determinar la resistividad aparente ρ_a a una profundidad " b ".

El método de Schlumberger-Palmer [B36] es una versión modificada del método de Wenner; este método nos da una mejor sensibilidad para pruebas a distancias mayores, tal como se describe en el estándar 81-1983 del IEEE.

Otro método de medida de resistividad del suelo, como se muestra en la *figura 4.4* y descrita en el estándar 81-1983 del IEEE es el método de la barra conductora o método de caída de potencial, basada en tres electrodos (Blattner [B5][B6]: Purdy [B37]). En este método, la profundidad L_r de la barra conductora localizada en el suelo a ser medido es variable. Las otras dos barras, conocidas como barras de referencia, se introducen a poca profundidad en el suelo y en línea recta. La ubicación del electrodo de voltaje varía entre el electrodo de prueba y el electrodo de corriente. Alternativamente, el electrodo de voltaje puede ser ubicado al lado opuesto del electrodo de corriente. La ecuación de la corriente aparente es:

$$\rho_a = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (45)$$

Donde:

L_r : es la longitud de la barra en metros.

d : es el diámetro de la barra en metros.

Una gráfica del valor medido de la resistividad aparente ρ_a contra la longitud de la barra L_r nos proporciona una ayuda visual para determinar las variaciones de la resistividad del suelo con la profundidad.

Pruebas realizadas en la Universidad de Ohio (B54) demuestran que cualquiera de los dos métodos vistos anteriormente, nos puede dar la información necesaria para revelar la estructura del suelo.

El método de cuatro electrodos de Wenner, es el método más utilizado en la actualidad, debido a muchas razones. El método de cuatro electrodos obtiene datos de la resistividad del suelo de capas más profundas, sin tener que introducir los electrodos hasta esas capas. No se necesita equipo pesado para ejecutar la prueba de cuatro electrodos. Los resultados no serán afectados grandemente por la resistencia de los electrodos a tierra o de los orificios creados por los electrodos de prueba al ser introducidos al suelo.

Una ventaja del método de tres barras, aunque no necesariamente relacionada con las mediciones, es la capacidad de determinar a qué profundidad se pueden introducir las barras. Conociendo la profundidad a la que se pueden introducir las barras dentro de la tierra, se puede ahorrar la necesidad de rediseñar una rejilla a tierra. A menudo, debido a las capas duras de suelo tales como rocas, arcilla dura, etc. se hace imposible introducir el electrodo de prueba lo que resulta en obtener

datos insuficientes. Una técnica para predecir la resistividad del suelo a una profundidad 10 veces mayor de la profundidad de un valor de resistividad conocido se desarrolló por Blattner [B5]. Esta técnica se puede utilizar efectivamente en lugares donde los electrodos no se puedan introducir profundamente. De cualquier manera se recomienda al usuario revisar las limitaciones de este método antes de utilizarlo. Una desventaja del método de la barra conductora es que cuando se introduce en lo profundo de la tierra, muchas veces pierde contacto con el suelo debido a la vibración y al gran diámetro de las conexiones y resulta en mediciones de resistencia de valores altos. Una rejilla a tierra diseñada con estos valores altos de resistividad será inconveniente. El método de la barra conductora nos da cierta incertidumbre en los valores de resistencia. La regla del 62% es válida solamente para una separación grande entre electrodos y suelo uniforme. En suelos poco uniformes, esta suposición puede afectar los resultados de las lecturas. La parte plana de la curva se utiliza para determinar la resistencia del electrodo de prueba, pero podría no darnos la resistencia correcta en un suelo no uniforme. Esta parte plana no se podrá obtener al menos que la separación de las barras de prueba y de corriente sea grande. (Dawalibi y Mukhedkar [B54] [B15]).

Los registros de la medida de la resistividad deben incluir datos de la temperatura e información acerca de la humedad del suelo en el momento que se hace la medición. Todos los datos disponibles u objetos conductivos enterrados deben ser registrados.

Los objetos conductivos que se entierran y están en contacto con el suelo, pueden distorsionar las lecturas hechas con los métodos descritos si estos están suficientemente cerca para alterar el patrón del flujo de corriente. Esto es

particularmente cierto para objetos grandes ó largos. Por esta razón, es que las mediciones de la resistividad del suelo se distorsionan fácilmente en áreas donde se han instalado los conductores de la rejilla, excepto para mediciones a poca profundidad en o cerca del centro de una malla rectangular grande. En algunos casos, se pueden tomar algunas medidas aproximadas a una distancia corta fuera de la rejilla, con los electrodos alejados para minimizar los efectos de la rejilla en el patrón del flujo de corriente.

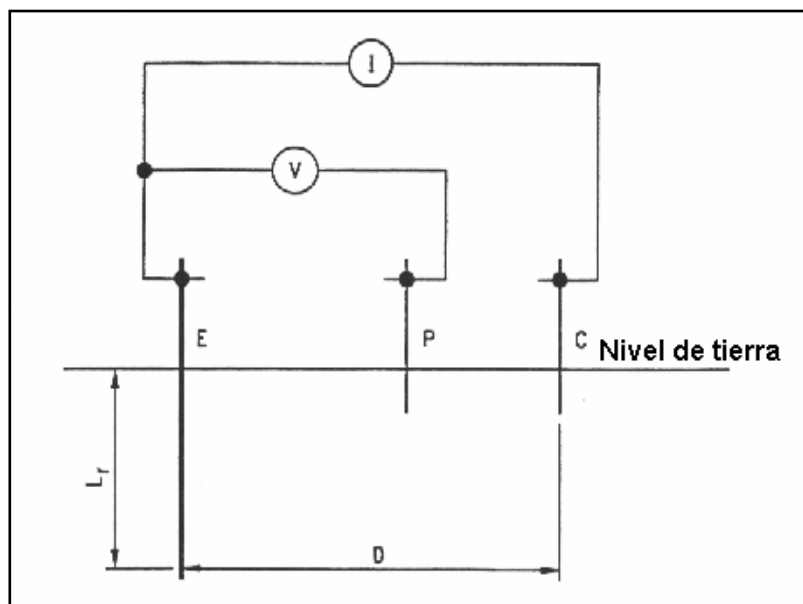


Figura 4.4 – Diagrama del circuito de tres pines ó el método de la varilla

4.2.4 Interpretación de las medidas de resistividad del suelo.

La interpretación de la resistividad obtenida en el campo es quizá la parte más difícil del programa de medición. El objetivo básico es obtener un modelo del suelo que sea aproximadamente igual al suelo existente. La resistividad del suelo varía lateralmente y con respecto a la profundidad y depende también de los estratos del suelo. Pueden ocurrir variaciones temporales en la resistividad del suelo de acuerdo

a las variaciones del clima tal como se describe en EPRI TR100863 [B56]. Se debe reconocer que el modelo del suelo es solamente una aproximación de las condiciones del suelo en el momento de hacer las mediciones.

Los modelos de resistividad del suelo más comúnmente utilizados son el modelo de suelo uniforme y el modelo de suelo de dos capas. El modelo del suelo de dos capas es a menudo un aproximado de muchas estructuras del suelo, mientras que los modelos de suelo de múltiples capas son utilizados para suelos en condiciones más complejas. La interpretación de las mediciones de resistividad del suelo se pueden determinar por técnicas de análisis manuales o utilizando computadores, tal como lo describen Blattner y Dawalibi [B7]; Blattner [B5][B6]; Endrenyi [B24]; EPRI TR-100622 [B27]; EPRI EL-3982 [B26]:

Un modelo de suelo uniforme se utiliza solo cuando existe una variación moderada en la resistividad aparente. Para suelos con condiciones homogéneas, que en la práctica raramente sucede, el modelo de suelo uniforme es razonablemente preciso. Si hay una variación grande en la medición de la resistividad aparente, el modelo de suelo uniforme es poco probable que nos dé un resultado preciso.

Una representación más exacta de las condiciones presentes en el suelo se obtiene utilizando el modelo de dos capas. El modelo de dos capas consiste en una capa superior de profundidad finita y con una resistividad diferente a una capa inferior de espesor infinito. Existen muchas técnicas para determinar un modelo equivalente de dos capas de resistividad aparente, obtenidas de pruebas de campo. En muchos casos, el modelo de dos capas se puede aproximar por inspección visual de una gráfica de la resistividad aparente contra la profundidad de las medidas de la barra

conductora ó la resistividad aparente contra las mediciones de espaciamento del método de cuatro electrodos de Wenner. (Blattner [B4][B6]: IEEE Curso Tutorial 86 [B34]).

Programas de computadora disponibles en la industria, se utilizan para determinar el modelo de dos capas y el modelo de múltiples capas (Dawalibi y Barbeito [B11]; EPRI TR-100622 [B25]; Orellara y Money [B34]).

En muchos casos la variación de la resistividad del suelo puede mostrar mínimos y máximos, así como el equivalente de dos capas podría no darnos un modelo preciso.

En ambos casos, se requiere un modelo de suelo diferente como el modelo de múltiples capas, tal como lo describe Dawalibi. Ma y Southey [B17] y Dawalibi y Barbeito [B11].

4.2.4.1 Suposición de suelo uniforme.

Un modelo de suelo uniforme se puede utilizar en vez del modelo de suelo de múltiples capas, cada vez que las herramientas de cálculo del modelo de dos capas ó el modelo de múltiples capas no estén disponibles. Desafortunadamente, es muy difícil estimar un mayor salto de error en todos los parámetros relevantes del SPT, pero cuando el contraste entre las diferentes resistividades de las capas es moderado, se utiliza un valor promedio de la resistividad del suelo como primera aproximación o para establecer orden en las magnitudes. Un aproximado de la resistividad de un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de la medición de la resistividad aparente, como se muestra en la ecuación (46)

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (46)$$

Donde:

El numerador es el dato de la resistividad aparente obtenida a diferentes distancias, en el método de cuatro electrodos, ó a diferentes profundidades en el método de la barra conductora, en $\Omega.m$

n : es el total de número de mediciones.

En la mayoría de suelos no se reconoce el criterio de la ecuación (46). Es difícil revelar un modelo de suelo uniforme cuando la resistividad del suelo varía significativamente. Ya que las ecuaciones del voltaje de toque y voltaje de paso del presente trabajo se basan en un modelo de suelo uniforme, se intentará dar un lineamiento para aproximar un suelo no uniforme a un suelo uniforme. Los datos de la resistividad aparente del suelo se obtienen utilizando el método de cuatro electrodos en varias localizaciones geográficas diferentes. Los datos en cada situación se aproximan con tres diferentes modelos de suelo equivalentes. Estos modelos consisten en, un modelo de dos capas y dos modelos de suelo uniforme, los cuales se generan con computadora (EPRI TR 100622 [B27]). Los modelos de suelo uniforme se determinan a partir de la resistividad aparente obtenida en la ecuación (46) y (47). En el siguiente paso, se calcula la resistencia y los voltajes de toque y de paso para una rejilla de 76,2 x 76,2 metros con un total de 64 barras distribuidas uniformemente, con un programa de computadora (EPRI TR-100622 [B27]). La profundidad de las barras a tierra depende del modelo de suelo utilizado.

Por ejemplo, en el caso de un modelo de dos capas, las barras a tierra deben penetrar la capa más profunda.

Finalmente, los parámetros del SPT que se han calculado para el modelo de dos capas se comparan con los calculados utilizando los modelos de suelo uniforme. Los parámetros que se calculan, utilizando el modelo de suelo uniforme de la ecuación (49) se comparan con los calculados en el modelo de dos capas.

$$\rho_{2(av2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2} \quad (47)$$

Donde:

$\rho_{a(max)}$: es el valor máximo de la resistividad aparente medido en $\Omega.m$.

$\rho_{a(min)}$: es el valor mínimo de la resistividad aparente medido en $\Omega.m$.

Encontramos un gran número de suposiciones sobre este estudio. Como resultado, la ecuación (47) se debe utilizar con precaución. Por ejemplo, el uso de la ecuación (47) no se recomienda para rejillas sin barras a tierra (Dawalibi, Ma, y Southey [B18]). Además, si la resistividad uniforme del suelo se determina utilizando la ecuación (47) y es utilizada para diseñar una rejilla a tierra, las barras a tierra por lo menos deben alcanzar la profundidad donde la resistividad medida corresponda al valor calculado de $\rho_{a(av2)}$.

Hay muchos métodos sugeridos por diferentes autores para aproximar un modelo no uniforme con un modelo uniforme. Uno de estos métodos incluye el promedio de la resistividad aparente de la capa superior para los cálculos de voltaje de toque y de

paso y el promedio de la resistividad aparente de la capa inferior para el cálculo de la resistencia del SPT.

4.2.4.2 Suposiciones del suelo no uniforme.

Otra propuesta para situaciones en las cuales la resistividad varía notablemente con la profundidad es recomendada por Sunde [B39] además de otros libros de geofísica a los cuales él se refiere. Por ejemplo, frecuentemente es posible con las medidas que se toman de un terreno con un amplio rango de período de pruebas deducir la estratificación de la tierra en dos ó más capas con un espesor adecuado que cuente con las variaciones reales de prueba. (Moore [B33]).

a) Modelo de suelo de dos capas (general)

Un modelo de suelo de dos capas se puede representar por una capa superior de profundidad finita sobre una capa inferior de profundidad infinita. El cambio brusco de la resistividad en los límites de cada capa del suelo se puede describir por medio de un factor de reflexión. El factor de reflexión, K , se define por la ecuación (48)

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (48)$$

Donde:

ρ_1 : es la resistividad de la capa superior, en Ω -m.

ρ_2 : es la resistividad de la capa inferior, en Ω -m.

Mientras la representación más precisa de un SPT se debe basar en las variaciones reales de la resistividad del suelo, raramente será económicamente justificable ó

técnicamente viable enseñar todas las variaciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la representación de un electrodo a tierra fundamentado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar con seguridad un SPT.

El estándar IEEE Std.81-1983 provee los métodos para determinar las resistividades equivalentes de la capa superior e inferior del suelo y el peso de la capa superior de los modelos.

Hay otros métodos que incluyen la determinación de un modelo de dos capas. Estos estudios pueden proveer al diseñador más información acerca de la interpretación de los suelos y el impacto de las capas múltiples, capas dobles y modelos uniformes (Dawalibi, Ma y Southey [B17]; Dawalibi y Barbeito[B11]; Thapar y Gerez [B41]).

b) Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico

Un suelo modelo de dos capas se puede aproximar por los métodos que describen Blattner y Dawalibi [B7]; Endrenyi [B24]; Tagg [B55]; Roman [B56]; y Sunde [B39]. El método gráfico de Sunde lo describimos en el párrafo siguiente:

En el método de Sunde, el gráfico de la *figura 4.5* se utiliza para **aproximar un suelo modelo de dos capas.**

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por la inspección de las mediciones de resistividad (referirse a la *figura 4.6*). Solamente “ h ” se obtiene por el método gráfico de Sunde, de la forma siguiente:

- Hacer una gráfica de resistividad aparente ρ_a en el eje **Y** vs. el espaciamiento de los electrodos de prueba en el eje **X**.
- Estimar una densidad ρ_1 y ρ_2 del gráfico . La ρ_a es lo que corresponde a un espacio pequeño del espaciamiento del electrodo de prueba ρ_1 y ρ_2 corresponde a para un espacio grande. Esto amplía la resistividad aparente del gráfico en ambos extremos para obtener los valores si los datos de campo no son suficientes.
- Determinar ρ_2/ρ_1 y seleccionar una curva en la gráfica de Sunde (*Figura 4.5*), la cual casi coincide ó interpola y dibuja una nueva curva en la gráfica.
- Seleccionar el valor en el eje **Y** de ρ_a/ρ_1 dentro de la región con desniveles de la curva apropiada de ρ_2/ρ_1 de la *figura 4.5*.
- Leer los valores correspondientes de a/h en el eje **X**.
- Calcular ρ_a al multiplicar los valores seleccionados, ρ_a/ρ_1 .
- Leer el espacio de sondeo (eje **X**) correspondiente del gráfico de la resistividad aparente.
- Calcular “ h ”, la profundidad del nivel superior, utilizando los espacios de separación “ a ” en forma apropiada (eje **X**).

Utilizando los datos de suelo del tipo 1 en la tabla E.2 proporcionado en el anexo E, se puede dibujar una gráfica de la resistividad vs. el espaciamiento de los electrodos de prueba (Ver *figura 4.6*) ρ_1 y ρ_2 se pueden determinar por inspección visual. Suponiendo que $\rho_1 = 100\Omega.m$ y $\rho_2 = 300\Omega.m$, para ilustrar el método de Sunde mostramos el siguiente ejemplo:

- Gráfico de la *figura 4.6*.
- Seleccionamos $\rho_1 = 100\Omega.m$ y $\rho_2 = 300\Omega.m$
- $\rho_2/\rho_1 = 300/100 = 3$. es la curva dibujada en la *figura 4.5*. Ver *figura 4.7*
- Seleccionar $\rho_a/\rho_1 = 2$
- Leer $a/h = 2,7$ de la *figura 4.7* para $\rho_a/\rho_1 = 2$
- Calcular ρ_a : $\rho_a = 2 \cdot \rho_1 = 2(100) = 200 \Omega.m$
- Leer $a = 19$ en la curva de la resistividad aparente en la *figura 4.8* para $\rho_a = 200 \Omega.m$
- Calcular $h = (a)/(a/h) = 7,0$ metros.

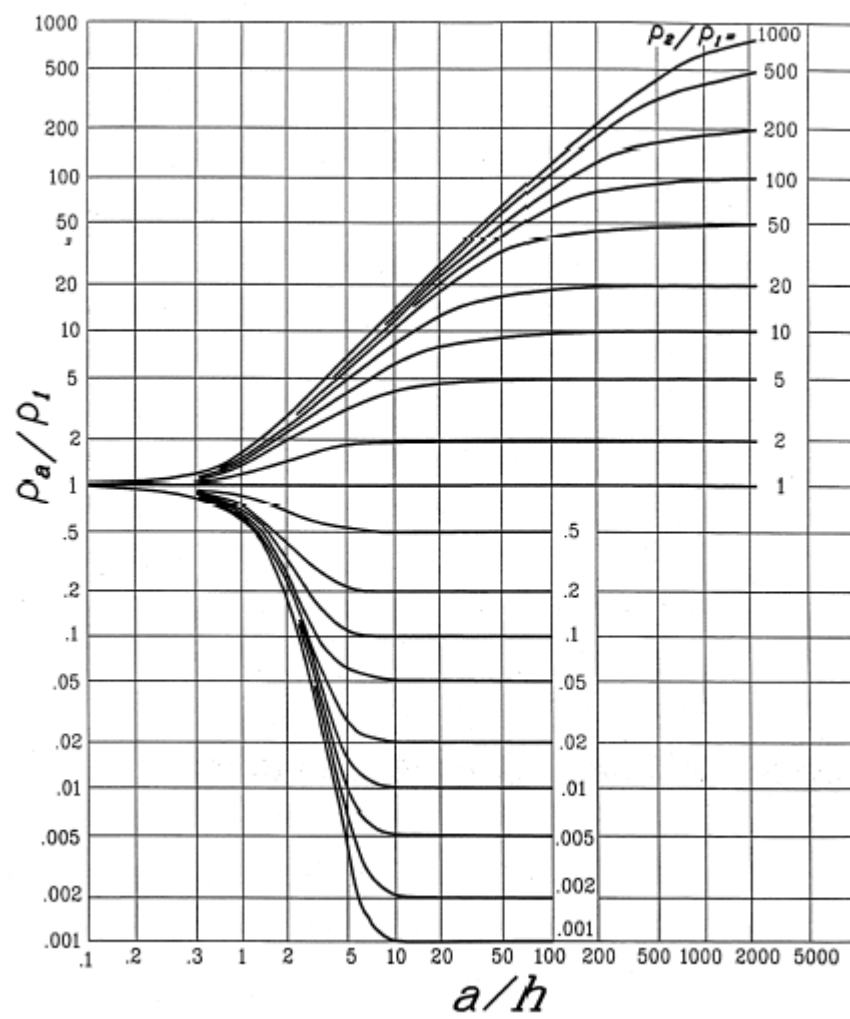


Figura 4.5 – Método gráfico de Sunde

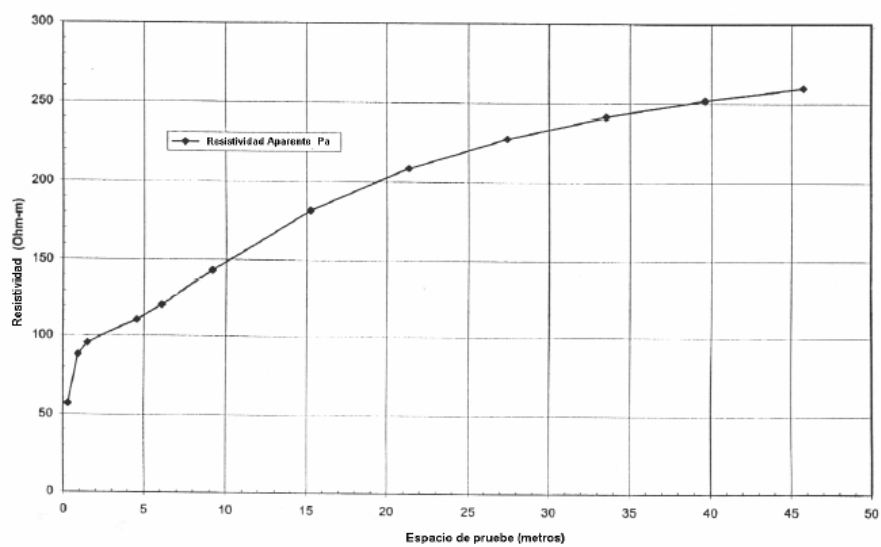


Figura 4.6 – Gráfica de resistividad de los datos del tipo de suelo 1, tabla E2.

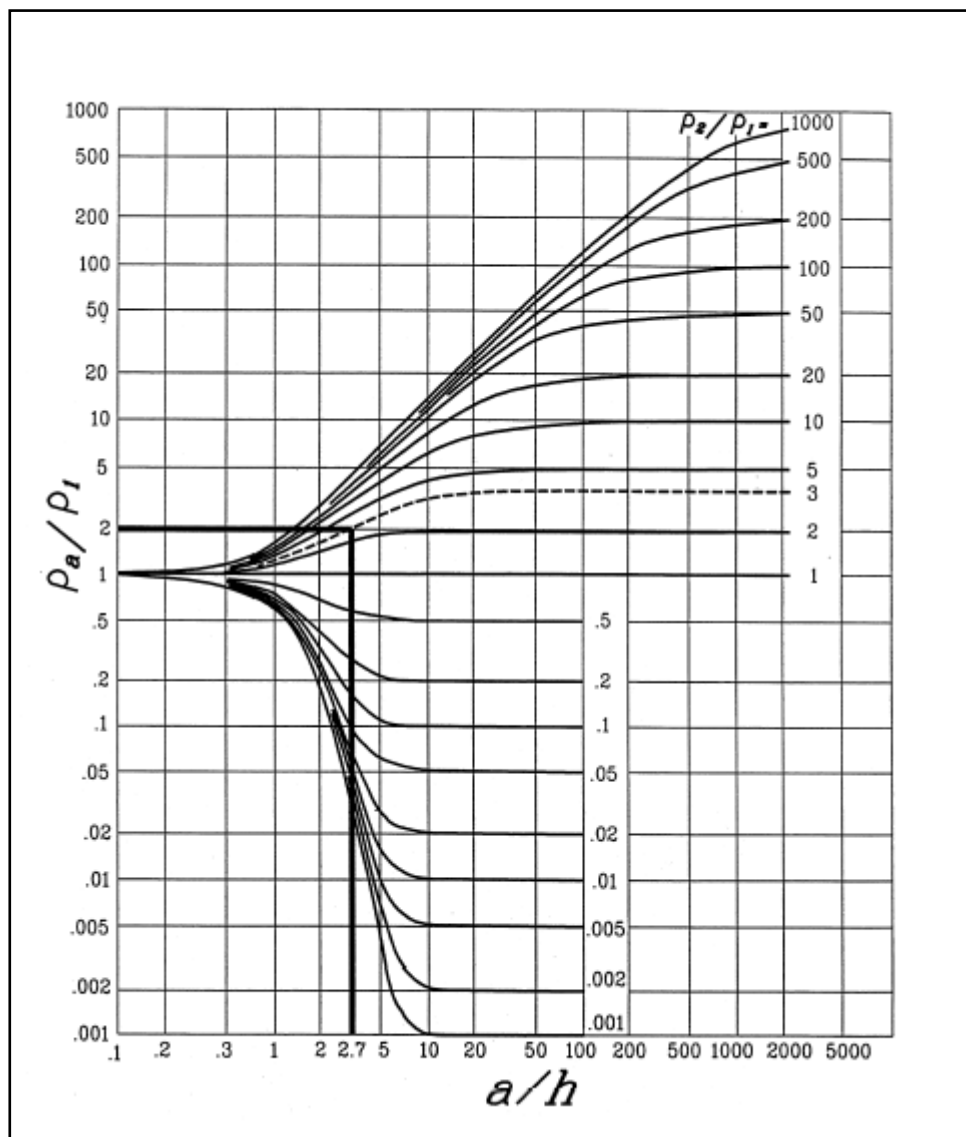


Figura 4.7 – Ejemplo del método gráfico de Sunde.

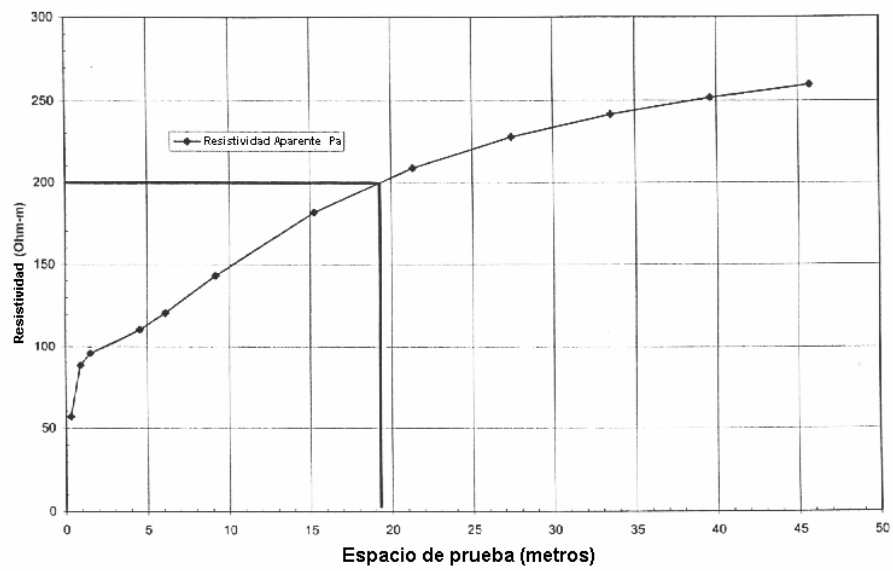


Figura 4.8 – Ejemplo para determinar “a” de la curva de resistividad aparente.

c) La comparación de un modelo de suelo uniforme y de dos capas.

Se ha encontrado que un suelo de dos capas es mucho más exacto que un modelo de suelo uniforme. Un SPT en ambiente de suelo de dos capas se comporta diferente al compararlo en un suelo uniforme.

Generalmente, para un SPT en suelo uniforme ó en un suelo de dos capas con ρ_1 menor que ρ_2 (la resistividad de la capa superior del suelo es menor que la resistividad de la capa inferior del suelo, que es un factor de reflexión positivo), la densidad de corriente es más alta en los conductores de los bordes exteriores de la rejilla a tierra. En un suelo de dos capas con ρ_1 mayor que ρ_2 (la resistividad de la capa superior del suelo es mayor que la resistividad que la capa inferior del suelo, que es una factor de reflexión negativo), la densidad de corriente es más uniforme en todos los conductores del SPT. Esto lo provoca la tendencia de la corriente de rejilla que baja hacia la capa de menor resistividad, es preferible que arriba ó exterior a la capa superior más resistiva. Los estudios hechos por Thapar y Gross [B52] y Dawalibi [B12] [B14] [B19] proveen una amplia información con respecto a este tema.

- Las variaciones en la resistividad del suelo tienen una influencia considerable en el rendimiento de la mayoría de SPT, afectando tanto el valor de la resistencia a tierra, el incremento del potencial a tierra y los voltajes superficiales de paso y de toque. Por lo general, para valores negativos de K (la capa superior es más resistiva que la capa inferior), la resistencia es menor que la que tiene el SPT en un suelo uniforme con resistividad ρ_1 . A diferencia, para valores positivos de K , la resistencia generalmente es más grande que en un suelo uniforme y de resistividad ρ_1 . Existe una relación

muy similar para los voltajes de paso y de toque que se producen en la superficie de un suelo de dos capas vs. la superficie de un suelo uniforme. Para valores negativos de K , generalmente los voltajes de paso y de toque son más bajos que los voltajes para un mismo SPT en un suelo uniforme de resistividad ρ_1 . Para valores positivos de K , también los voltajes de paso y de toque son comúnmente más grandes que en un suelo uniforme.

- Otros parámetros, como la altura de la capa superior h , afecta también las diferencias en el rendimiento de los electrodos a tierra en un ambiente de dos capas y en condiciones de un suelo uniforme. La regla general es: que cuando la altura de la capa superior " h ", llega a ser considerablemente más grande que las propias dimensiones del electrodo, el rendimiento del electrodo se aproxima al rendimiento del mismo electrodo en un suelo uniforme de resistividad ρ_1 .
- Se debe reconocer también que las características que se mencionan arriba se fundamentan en el indicio de una fuente constante de corriente de falla.

Las corrientes existentes en el SPT cambiarán de caso en caso como una función de ρ_1 y ρ_2 , reflejando los cambios relativos locales a todas las trayectorias de las corrientes de falla a tierra que se predeterminan por la localización de la falla. La división de la corriente se estudiara en la determinación de la corriente máxima de rejilla. Por lo tanto, en ciertos casos algunas suposiciones que se mostraron anteriormente no siempre se cumplirán.

Para aplicaciones de diseño, relativamente se involucran arreglos sencillos de electrodos enterrados en un suelo uniforme razonable, los métodos aproximados proporcionados en otros temas del presente trabajo serán adecuados para obtener un diseño realista con los márgenes de seguridad adecuados. Sin embargo, para diseños que involucra un área grande, rejillas de forma irregular ó donde la resistividad del suelo es claramente muy uniforme, el ingeniero responsable del diseño debe decidir si son necesarios métodos más sofisticados (Zaborsky [B48]).

d) Modelo de suelo de capas múltiples

Se pueden encontrar condiciones de suelo altamente no uniformes. Como condiciones de suelo que requieren el uso de técnicas de modelos de múltiples capas, si no es viable el modelo de suelo de dos capas. El modelo de suelo de múltiples capas puede incluir varias capas horizontales ó verticales. Las técnicas para interpretar la resistividad de los suelos altamente no uniforme requieren el uso de computadoras ó de métodos gráficos (Dawalibi, Ma y Southey [B17]; Dawalibi y Barbeito [B11]; EPRI TR-100622 [B27]; EPRI EL-2699 [B25]; Orellana y Money [B34]).

Las ecuaciones que rigen el rendimiento de un SPT en un suelo de capas múltiples se pueden obtener al resolver la ecuación de Laplace para un punto de la fuente de corriente ó por el método de imágenes, el cual nos da los mismos resultados. Al utilizar otros métodos para determinar el potencial de la tierra provocado por un punto de la fuente de corriente resulta en una serie infinita de términos que representan las contribuciones de cada imagen consecuente del punto de la fuente de corriente. La formulación exacta de las ecuaciones que incluyen estos efectos se encuentran en Dawalibi y Mudhedkar [B13]; y Sunde [B32].

CAPÍTULO V

IMPLEMENTACIÓN DEL EJECUTABLE JAVA – MÓDULO 1

5.1 Introducción

Este capítulo está orientado en asistir al ingeniero de diseño en obtener el modelo de suelo más adecuado a partir de la toma de mediciones de campo. En la *figura 5.1* presentamos el comportamiento de la gráfica de resistividades para un suelo de una, dos y tres capas.

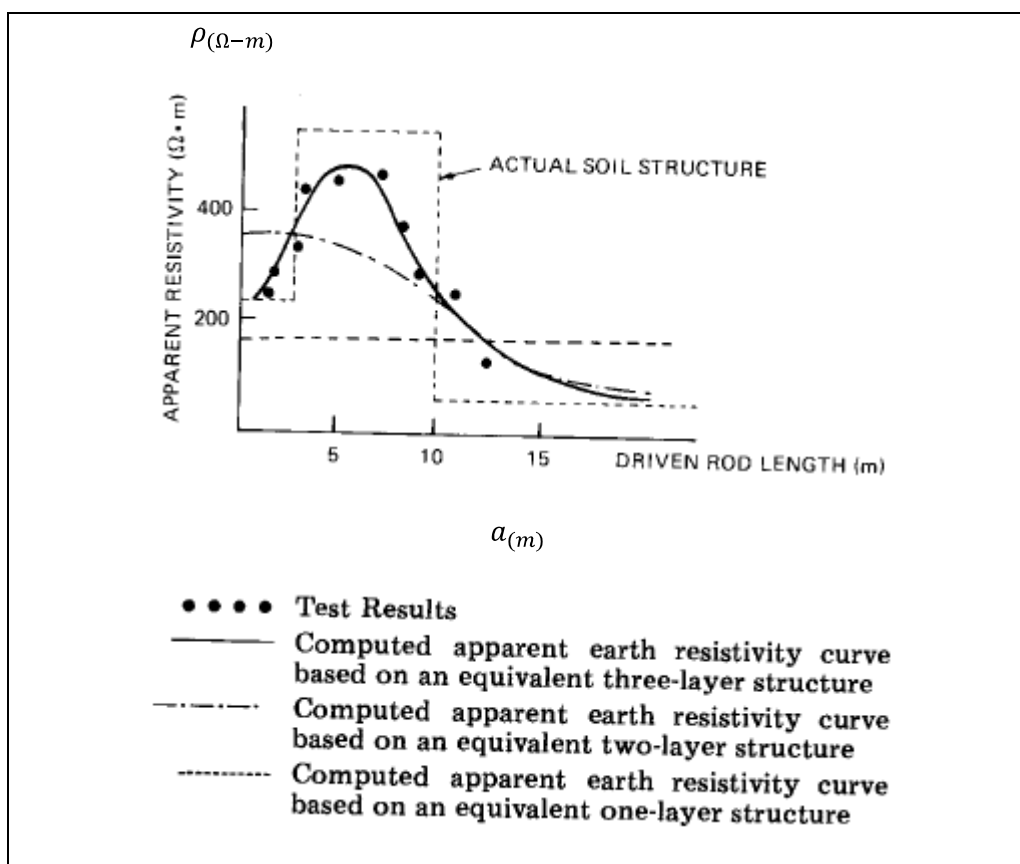


Figura 5.1 – Resistividad aparente Vs. Espaciamiento de electrodo

De la figura anterior efectuaremos los cálculos para un modelo de suelo de dos capas que es el propósito del presente trabajo. Ver *figura 5.2*.

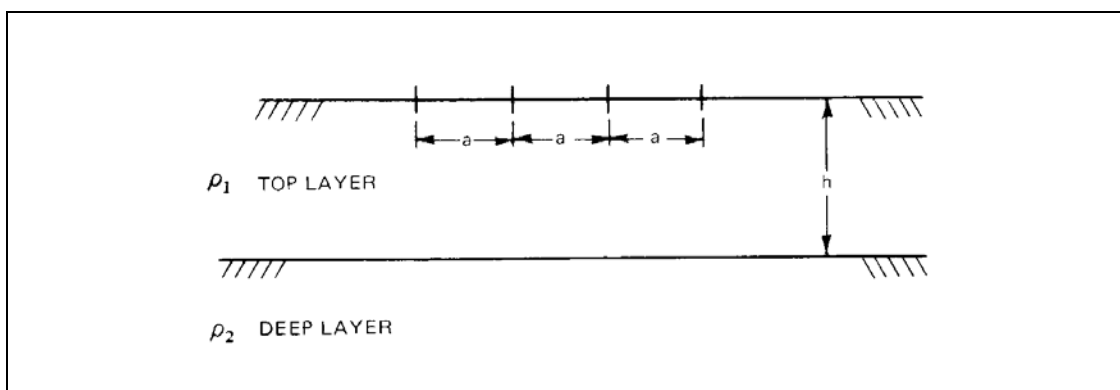


Figura 5.2 – Modelo para suelo de dos capas

Donde:

ρ_1 : Resistividad de la primera capa del suelo

ρ_2 : Resistividad de la segunda capa del suelo

a : Espaciamiento equidistante de electrodos

h : Espesor de la primera capa del suelo

K : Factor de Deflexión

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

El valor de la resistividad aparente, ρ^o es obtenido por el método de las cuatro probetas o método Wenner y ρ es la resistividad aparente teorica asumiendo que el suelo es de dos capas. Ambos ρ^o y ρ son funciones del espaciamiento de probeta.

$$\rho^o(a) = 2\pi a R$$

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

$$\Psi(\rho_1, \rho_2, h) = \sum_{m=1}^N \left[\frac{\rho_m^o - \rho_m}{\rho_m^o} \right]^2$$

La función $\Psi(\rho_1, K, h)$ muestra el error entre las resistividades antes descritas.

Obteniendo la dependencia por variable derivamos parcialmente la función anterior

$\Psi(\rho_1, \rho_2, h)$.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \rho_1} = -2 \sum_1^N \left[\frac{\rho^o - \rho}{\rho^o} \right] \frac{\partial \rho}{\partial \rho_1}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \rho_2} = -2 \sum_1^N \left[\frac{\rho^o - \rho}{\rho^o} \right] \frac{\partial \rho}{\partial \rho_2}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial h} = -2 \sum_1^N \left[\frac{\rho^o - \rho}{\rho^o} \right] \frac{\partial \rho}{\partial h}$$

Obtenemos

$$\Delta \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1 + \frac{\partial \Psi}{\partial \rho_2} \Delta \rho_2 + \frac{\partial \Psi}{\partial h} \Delta h$$

Del mismo modo para

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_1}, \frac{\partial \rho}{\partial \rho_2}, \frac{\partial \rho}{\partial h}$$

Por definición:

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

Derivando con respecto a ρ_1 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \rho_1} &= 1 + 4\rho_1 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{-nK^{n-1}}{\sqrt{1 + \left(2n\frac{h}{a}\right)^2}} \left(\frac{1+K}{\rho_2 + \rho_1} \right) + \frac{nK^{n-1}}{\sqrt{4 + \left(2n\frac{h}{a}\right)^2}} \left(\frac{1+K}{\rho_2 + \rho_1} \right) \right) \\ &\quad + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n\frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n\frac{h}{a}\right)^2}} \right) \end{aligned}$$

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

Factor de Deflexión

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

$$\frac{2\rho_1 K}{1 - K} = \rho_2 - \rho_1$$

Reemplazando:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 - \frac{n(1 - K^2)}{2K} \right) \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n\frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n\frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right]$$

Derivando con respecto a ρ_2 :

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right]$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_2} = 4\rho_1 \sum_{n=1} \left[\frac{nK^{n-1}}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \left(\frac{1-K}{\rho_2 + \rho_1} \right) - \frac{nK^{n-1}}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \left(\frac{1-K}{\rho_2 + \rho_1} \right) \right]$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_2} = 4\rho_1 \sum_{n=1} \left[\frac{n}{K} \left(\frac{1-K}{\rho_2 + \rho_1} \right) \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right]$$

Reemplazando:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_2} = \sum_{n=1} \left[\left(\frac{2n(1-K)^2}{K} \right) \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right]$$

Derivando con respecto a h :

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right]$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} = 4\rho_1 \sum_{n=1} \left[\left(\frac{-K^n}{2 \left[1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2 \right]^{1.5}} \left(\frac{8hn^2}{a^2} \right) + \frac{K^n}{2 \left[4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2 \right]^{1.5}} \left(\frac{8hn^2}{a^2} \right) \right) \right]$$

Reemplazando:

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} = \frac{16\rho_1 h}{a^2} \sum_{n=1} \left[(n^2) \left(\frac{K^n}{\sqrt{\left[4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2\right]^3}} - \frac{K^n}{\sqrt{\left[1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2\right]^3}} \right) \right]$$

Resumiendo

$$\Psi(\rho_1, K, h) = \sum_{m=1}^N \left[\frac{\rho_m^o - \rho_m}{\rho_m^o} \right]^2$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \rho_1} = -2 \sum_{m=1}^N \left[\frac{\rho^o - \rho}{\rho^o} \right] \frac{\partial \rho}{\partial \rho_1}$$

Obtenemos finalmente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1} \left[\left(1 - \frac{n(1-K^2)}{2K} \right) \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right) \right]$$

La última ecuación podemos iterarla para cada variable $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$, Δh con el objetivo de obtener la mínima diferencia entre las resistividades aparentes de medición y de cálculo.

$$\Delta\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial \rho_1} \Delta\rho_1 + \frac{\partial \Psi}{\partial \rho_2} \Delta\rho_2 + \frac{\partial \Psi}{\partial h} \Delta h$$

$$\rho_1^{(x)} = \rho_1^{(x \pm 1)} + \Delta\rho_1$$

$$\rho_2^{(y)} = \rho_2^{(y \pm 1)} + \Delta\rho_2$$

$$h^{(z)} = h^{(z \pm 1)} + \Delta h$$

Para muestra estrictamente didáctica mostraremos en Excel el Ejemplo 5.1 que luego se implementará en un EJECUTABLE JAVA ya sin la necesidad de realizar iteraciones, matrices y sumatorias como sí se necesitan en el Excel.

5.2 EJEMPLO 5.1 :

Cálculo de resistividades para suelo de 2 capas.

Hallar las resistividades aparentes del suelo y espesor de la capa superficial a partir de las siguientes mediciones:

- Separación de electrodos (m) : 0,5
Resistencia (ohm): 630
- Separación de electrodos (m) : 1
Resistencia (ohm): 181
- Separación de electrodos (m) : 2
Resistencia (ohm): 102
- Separación de electrodos (m) : 4
Resistencia (ohm): 48
- Separación de electrodos (m) : 6
Resistencia (ohm): 31

En la *figura 5.3* se muestra los datos de ingreso en color amarillo y los resultados parciales para cada iteración de variable en color naranja. La aplicación de la ecuación de LAPLACE es para las resistividades aparentes teóricas.

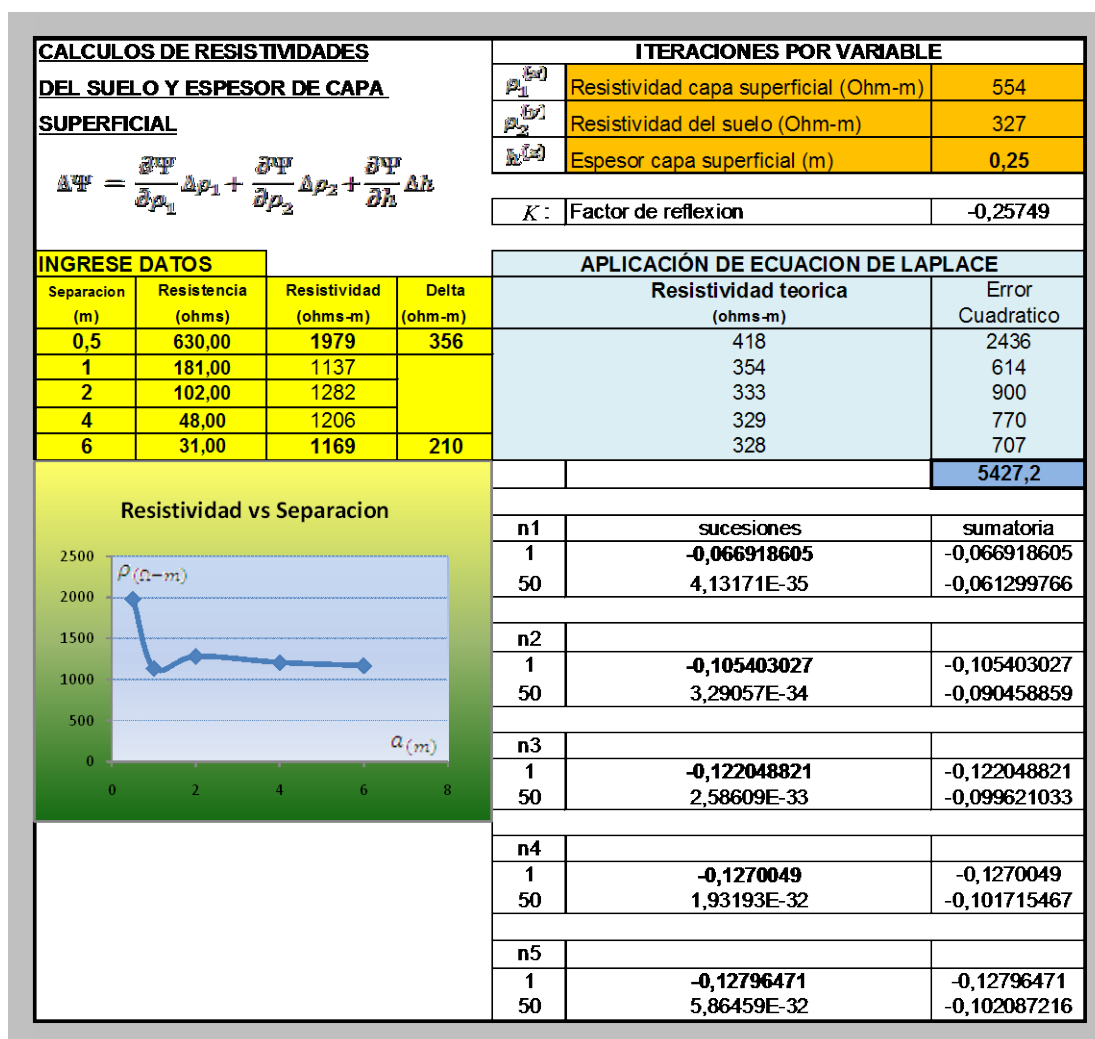


Figura 5.3 – Cálculo de resistividades de suelo y espesor de capa superficial.

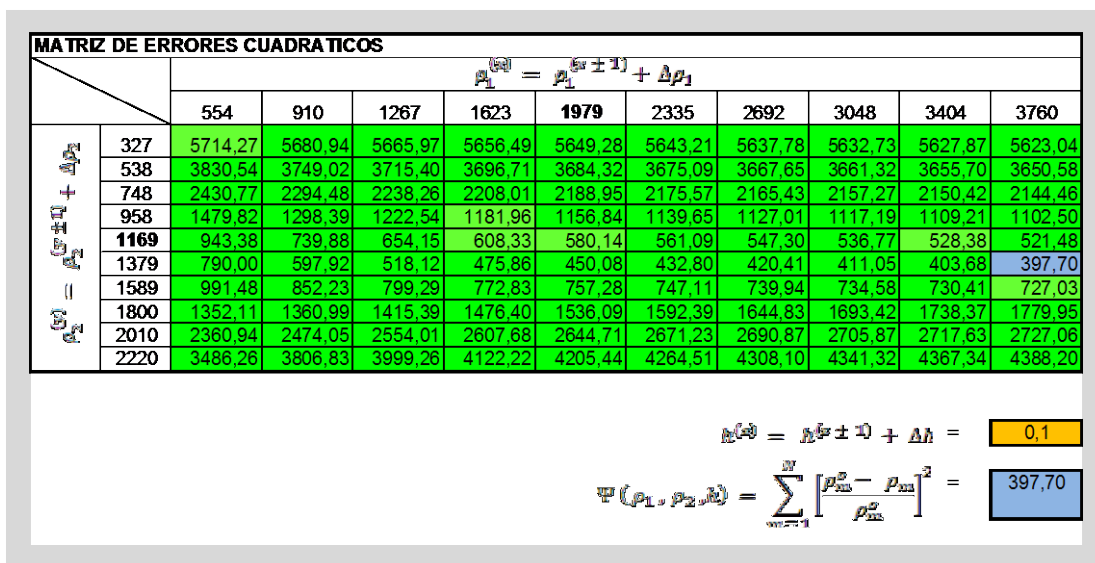


Figura 5.4 – Matriz de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta\rho_1, \Delta\rho_2$ y $\Delta h = 0,1$ metros.

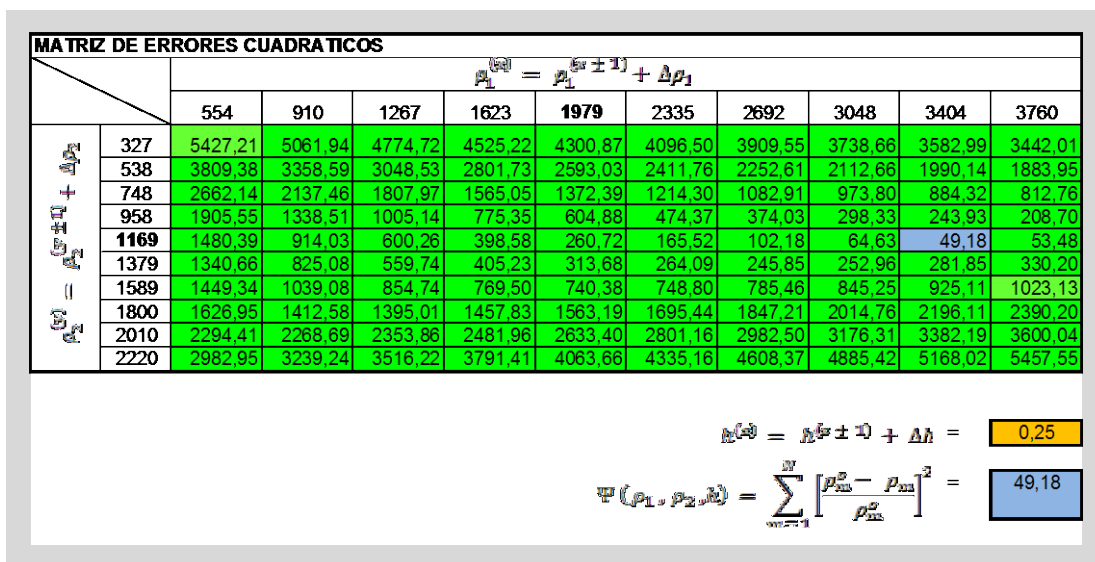


Figura 5.5 – Matriz de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta\rho_1, \Delta\rho_2$ y $\Delta h = 0,25$ metros.

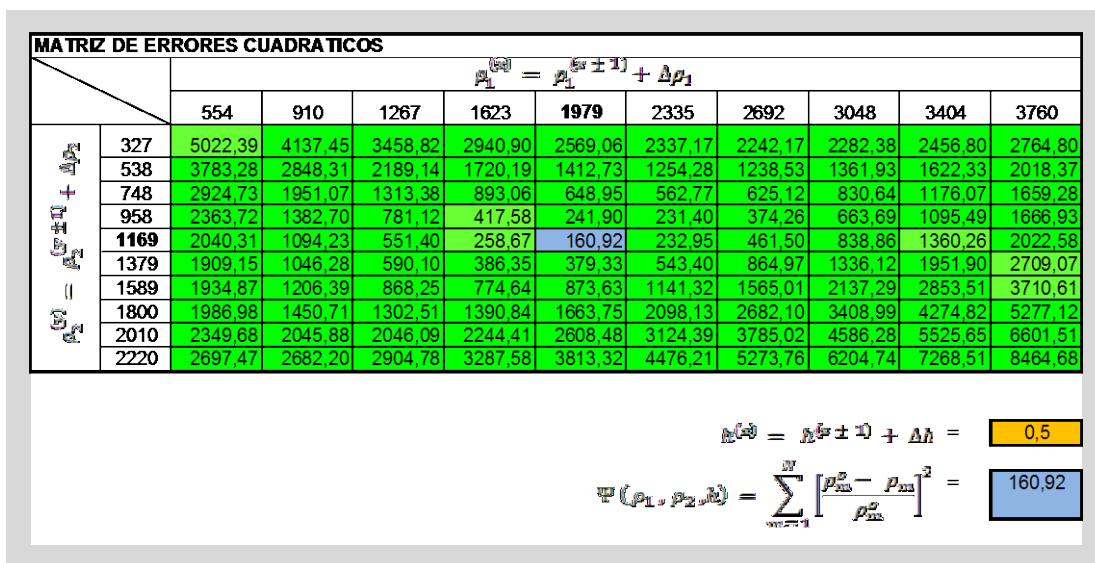


Figura 5.6 – Matriz de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta p_1, \Delta p_2$ y $\Delta h = 0,5$ metros.

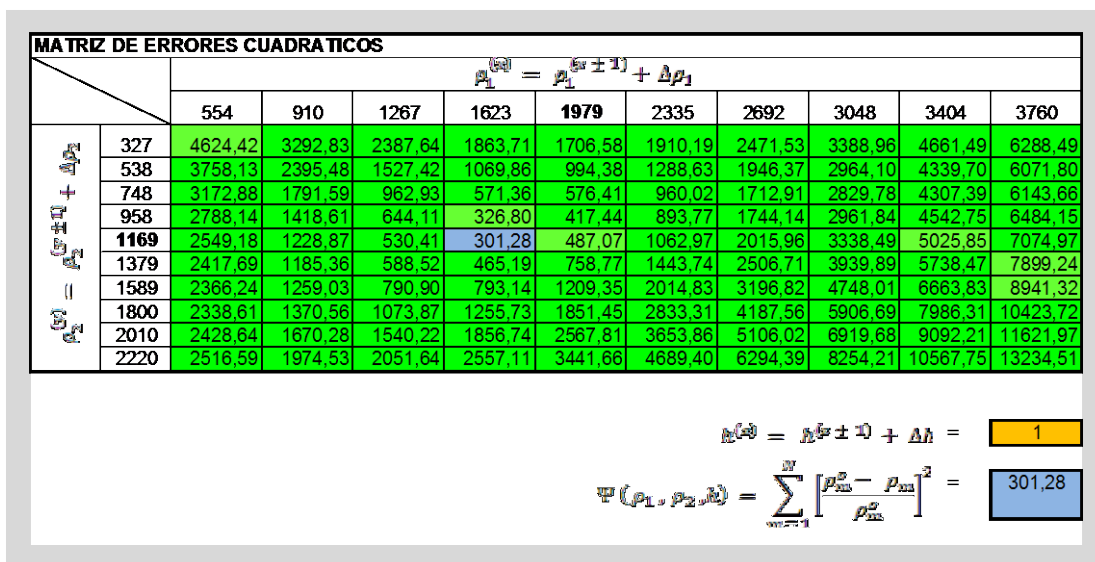


Figura 5.7 – Matriz de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta p_1, \Delta p_2$ y $\Delta h = 1$ metro.

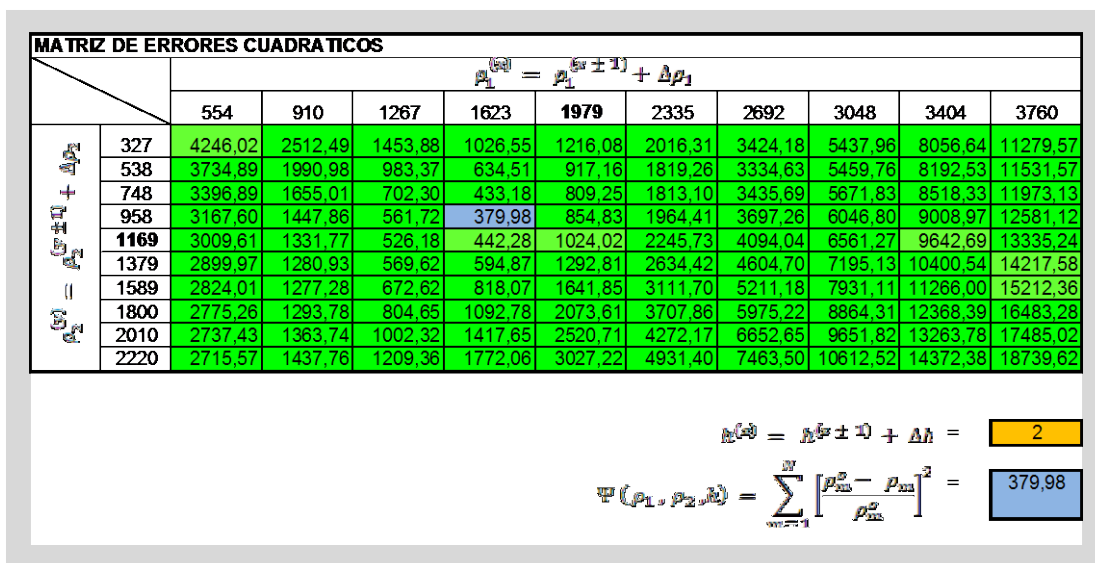


Figura 5.8 – Matriz de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta \rho_1, \Delta \rho_2$ y $\Delta h = 2$ metros.

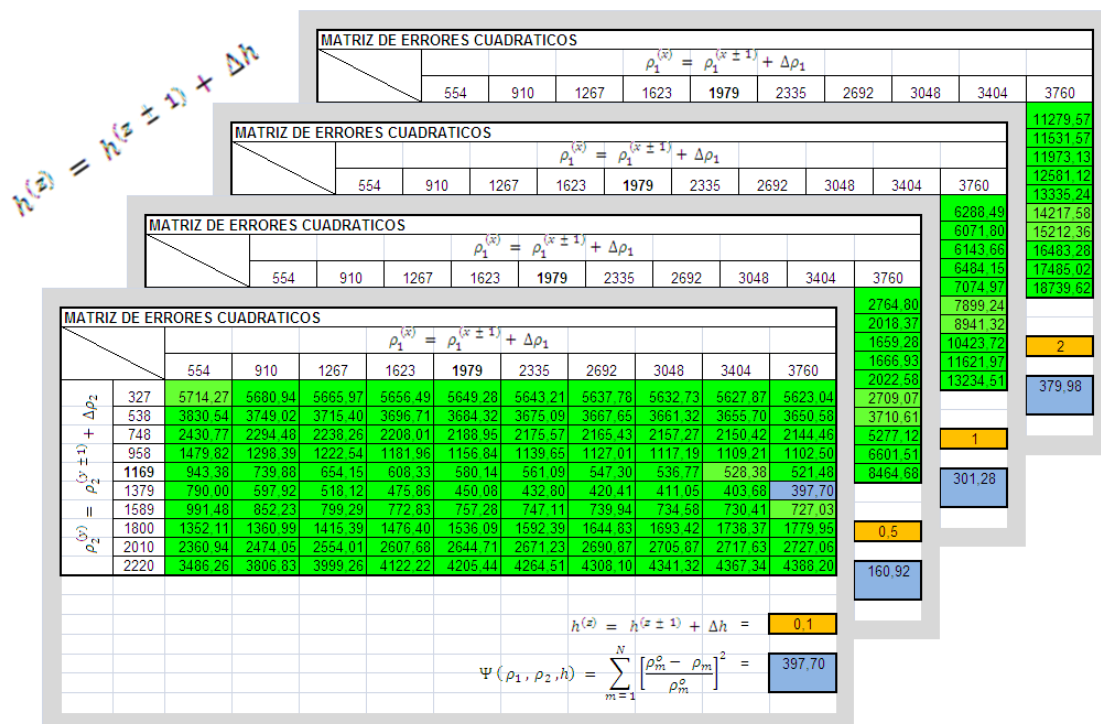


Figura 5.9 – Familia de matrices de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta \rho_1, \Delta \rho_2$ y Δh .

5.3 Implementación del Ejecutable Java- Módulo 1

Con la Implementación del ejecutable Java la ventaja sustancial es que no hay necesidad de realizar matrices, sumatorias e iteraciones como sí se necesitan en el Excel. Toma menos de un minuto dependiendo de la cantidad de mediciones de campo (máximo 10 mediciones).

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional _Modulo 1.exe

CALCULO DE RESISTIVIDADES PARA DOS CAPAS DE SUELO POR EL METODO WENNER

Ingrese numero de mediciones(preferible menor o igual a 10)= 5
Ingrese la SEPARACION de electrodos (1) en metros es = 0.5
Ingrese la SEPARACION de electrodos (2) en metros es = 1
Ingrese la SEPARACION de electrodos (3) en metros es = 2
Ingrese la SEPARACION de electrodos (4) en metros es = 4
Ingrese la SEPARACION de electrodos (5) en metros es = 6

Ingrese la RESISTENCIA (1) en ohmios es = 630
Ingrese la RESISTENCIA (2) en ohmios es = 181
Ingrese la RESISTENCIA (3) en ohmios es = 182
Ingrese la RESISTENCIA (4) en ohmios es = 48
Ingrese la RESISTENCIA (5) en ohmios es = 31

RESULTADOS PREVIOS
...Espere unos segundos por favor...

El error minimo matricial para h(m) = 0.5 es = 149.295
El error minimo matricial para h(m) = 1 es = 283.633
El error minimo matricial para h(m) = 1.5 es = 336.419
El error minimo matricial para h(m) = 2 es = 361.674
El error minimo matricial para h(m) = 2.5 es = 377.91
El error minimo matricial para h(m) = 3 es = 386.645
El error minimo matricial para h(m) = 3.5 es = 393.21
El error minimo matricial para h(m) = 4 es = 398.598
El error minimo matricial para h(m) = 4.5 es = 402.887
El error minimo matricial para h(m) = 5 es = 406.457
El error minimo matricial para h(m) = 5.5 es = 409.397
El error minimo matricial para h(m) = 6 es = 411.822
El error minimo matricial para h(m) = 6.5 es = 413.399
El error minimo matricial para h(m) = 7 es = 414.553
El error minimo matricial para h(m) = 7.5 es = 416.982
El error minimo matricial para h(m) = 8 es = 422.325
El error minimo matricial para h(m) = 8.5 es = 429.178
El error minimo matricial para h(m) = 9 es = 436.643
El error minimo matricial para h(m) = 9.5 es = 441.187
El error minimo matricial para h(m) = 10 es = 445.681

El error convergente es = 149.295
...Y se halla para h(m) = 0.5

```

Figura 5.10 – Resultados previos muestra la familia de matrices de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$ y Δh , obteniendo un error mínimo para $h=0,5$ m.

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional _Modulo 1.exe
Para concluir exploraremos en rango de 0(m) hasta 1(m)
RESULTADOS FINALES
...Espere unos segundos por favor...
El minino error matricial para este rango es = 47.1552
..Y se precisa para un h(m) = 0.25
La fila es (matriz :79x79) = 39
La columna es (matriz :79x79) = 73
El coeficiente de reflexion K es = -0.520381

La resistividad de la primera capa es (ohm-m) = 3612.05
La resistividad de la segunda capa es (ohm-m) = 1139.46

La resistividad aparente teorica (1) en ohmio-metro es = 1960.98
La resistividad aparente teorica (2) en ohmio-metro es = 1311.07
La resistividad aparente teorica (3) en ohmio-metro es = 1170.57
La resistividad aparente teorica (4) en ohmio-metro es = 1146.63
La resistividad aparente teorica (5) en ohmio-metro es = 1142.6

La resistividad aparente medida (1) en ohmio-metro es = 1979.2
La resistividad aparente medida (2) en ohmio-metro es = 1137.26
La resistividad aparente medida (3) en ohmio-metro es = 1201.77
La resistividad aparente medida (4) en ohmio-metro es = 1206.37
La resistividad aparente medida (5) en ohmio-metro es = 1168.67

El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (1) es = 0.332007
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (2) es = 30.2103
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (3) es = 12.3645
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (4) es = 3.56876
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (5) es = 0.679534

....FINALIZACION DEL MODULO 1 ....

```

Figura 5.11 – Luego de explorar +/- 0,5 metros la variable $h=0,5$ m. Los resultados finales muestra los valores de espesor de la primera capa $h= 0,25$ m. y resistividades de la primera $\rho_1= 3612$ ohm-m. y segunda capa $\rho_2= 1139$ ohm-m.

5.3.1 Lenguaje del Ejecutable Java - Módulo 1

```

#include<iostream.h>
#include<conio.h>
#include<iomanip.h>
#include<ctype.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>
#include<stdio.h>

void main()

{int a,i,p,q,y,n,f,c;
float h,s,sum,men,min,u,t;
float
d[10],R[10],rr[10],r1[80],r2[80],K[80][80],z[50],rt[10],e[10],E[80][80],W[20],tr[10
],ee[10];

cout<<"\n CALCULO DE RESISTIVIDADES PARA DOS CAPAS DE SUELO
";
cout<<"\n -----";
cout<<"\n\n Ingrese numero de mediciones(preferible menor o igual a 10)=
";cin>>a;

if(a<11)

{cout<<"\n";
    for (i=1;i<a+1;i++)

        {cout<<"Ingrese la SEPARACION de electrodos ("<i<<") en metros es
= ";cin>>d[i];}
        cout<<"\n";
        for (i=1;i<a+1;i++)

            {cout<<"Ingrese la RESISTENCIA ("<i<<") en ohmios es =
";cin>>R[i];}

cout<<"\n\n RESULTADOS PREVIOS";
cout<<"\n -----";

cout<<"\n...Espere unos segundos por favor....";
cout<<"\n";
    for (i=1;i<a+1;i++)
        {rr[i]=2*3.141592*R[i]*d[i];
        }
    for (i=1;i<80;i++)
        {

```

```

        r1[i]=rr[1]-(40-i)*rr[1]*0.025;
        r2[i]=rr[a]-(40-i)*rr[a]*0.025;
    }
    for (p=1;p<80;p++)
    {
        for(q=1;q<80;q++)
        {

            K[p][q]=(r2[p]-r1[q])/(r2[p]+r1[q]);
        }
    }

for (y=1;y<21;y++)
{h=0.5*y;
  for (p=1;p<80;p++)
    {for (q=1;q<80;q++)
      {for (i=1;i<a+1;i++)
        { for (n=1;n<51;n++)

          {z[n]=(pow(K[p][q],n))/(pow(1+pow(2*n*h/d[i],2),0.5))-
            (pow(K[p][q],n))/(pow(4+pow(2*n*h/d[i],2),0.5));
            }
          s=0;
          for (n=1;n<51;n++)
            { s=s+z[n];
          }

          rt[i]=r1[q]*(1+4*s);
          e[i]=(pow(rr[i]-rt[i],2))/1000;

          }
          sum=0;
          for (i=1;i<a+1;i++)
            {sum=sum+e[i];}
          E[p][q]=sum;
        } }
    }
  men=10000;
  for (p=1;p<80;p++)
    {for (q=1;q<80;q++)
      {if (E[p][q]<men)
        {men=E[p][q];}
      }
    }
  W[y]=men;
}
min=10000;
for (y=1;y<21;y++)
{if(W[y]<min)
{min=W[y];
}}
}

```

```

for (y=1;y<21;y++)
{h=0.5*y;
if(W[y]==min)
{t=h;}}

for (y=1;y<21;y++)
{h=0.5*y;

cout<<"\n El error minimo matricial para h(m) = "<<h<<" es = "<<W[y]; }

cout<<"\n\n El error convergente es = "<<min;

cout<<"\n\n ....Y se halla para h(m) = "<<t;

cout<<"\n\n Para concluir exploraremos en rango de "<<(t-0.5)<<"(m) hasta
"<<(t+0.5)<<"(m)";

cout<<"\n\n RESULTADOS FINALES";
cout<<"\n -----";

cout<<"\n....Espere unos segundos por favor....";

for (y=1;y<21;y++)

{h=t-0.5+0.05*y;

for (p=1;p<80;p++)

    {for (q=1;q<80;q++)
        {for (i=1;i<a+1;i++)
            { for (n=1;n<51;n++)

                {z[n]=(pow(K[p][q],n))/(pow(1+pow(2*n*h/d[i],2),0.5))-
                (pow(K[p][q],n))/(pow(4+pow(2*n*h/d[i],2),0.5));}

                    s=0;
                    for (n=1;n<51;n++)
                    { s=s+z[n]; }

                        rt[i]=r1[q]*(1+4*s);
                        e[i]=(pow(rr[i]-rt[i],2))/1000;}
                    sum=0;
                    for (i=1;i<a+1;i++)
                    {sum=sum+e[i];}
                    E[p][q]=sum;
                }}
            men=10000;

```

```

        for (p=1;p<80;p++)
        {for (q=1;q<80;q++)
        {if (E[p][q]<men)
        {men=E[p][q];}
        }}

    W[y]=men;}
min=10000;
for (y=1;y<21;y++)
{if(W[y]<min)
{min=W[y];
}}

cout<<"\n\n El minimo error matricial para este rango es = "<<min;

for (y=1;y<21;y++)
{h=t-0.5+0.05*y;
if(W[y]==min)
{u=h;}}
for (p=1;p<80;p++)
    {for (q=1;q<80;q++)
        {for (i=1;i<a+1;i++)
            { for (n=1;n<51;n++)
                {z[n]=(pow(K[p][q],n))/(pow(1+pow(2*n*u/d[i],2),0.5))-
                (pow(K[p][q],n))/(pow(4+pow(2*n*u/d[i],2),0.5));}
                s=0;
                for (n=1;n<51;n++)

{ s=s+z[n];
}
rt[i]=r1[q]*(1+4*s);
e[i]=(pow(rr[i]-rt[i],2))/1000;}
sum=0;
for (i=1;i<a+1;i++)
{sum=sum+e[i]; }
E[p][q]=sum;
if(E[p][q]==min)
    {f=p;
    c=q;}}}

cout<<"\n ..Y se precisa para un h(m)           = "<<u;

cout<<"\n La fila es   (matriz :79x79)           = "<<f;

cout<<"\n La columna es (matriz :79x79)           = "<<c;

cout<<"\n El coeficiente de reflexion K es       = "<<K[f][c];

```

```

for (i=1;i<a+1;i++)

{ for (n=1;n<51;n++)
{z[n]=(pow(K[f][c],n))/(pow(1+pow(2*n*u/d[i],2),0.5))-
(pow(K[f][c],n))/(pow(4+pow(2*n*u/d[i],2),0.5));}

                s=0;
                for (n=1;n<51;n++)
                { s=s+z[n];}
                rt[i]=r1[c]*(1+4*s);
                e[i]=(pow(rr[i]-rt[i],2))/1000;

tr[i]=rt[i];
ee[i]=e[i]; }

cout<<"\n\n La resistividad de la primera capa es (ohm-m) = "<<r1[c];

cout<<"\n La resistividad de la segunda capa es (ohm-m) = "<<r2[f];
cout<<"\n";
for (i=1;i<a+1;i++)

{cout<<"\n La resistividad aparente teorica ("<<i<<") en ohmio-metro es =
"<<tr[i];}
cout<<"\n";
for (i=1;i<a+1;i++)

{cout<<"\n La resistividad aparente medida ("<<i<<") en ohmio-metro es =
"<<rr[i];}
cout<<"\n";
for (i=1;i<a+1;i++)

{cout<<"\n El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion ("<<i<<") es =
"<<ee[i];}

cout<<"\n\n\n\n ....FINALIZACION DEL MODULO 1 ....";}
if(a>10)

{cout<<"\n\n NOTA: ¡¡¡EL ALGORITMO COMO MAXIMO EJECUTA HASTA
10 MEDICIONES!!!";}

getch();
}

```


5.3.2 EJEMPLO 5.2

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional _Modulo 1.exe
-----
CALCULO DE RESISTIVIDADES PARA DOS CAPAS DE SUELO POR EL METODO WENNER
-----
Ingrese numero de mediciones<preferible menor o igual a 10>= 5
Ingrese la SEPARACION de electrodos (1) en metros es = 2
Ingrese la SEPARACION de electrodos (2) en metros es = 4
Ingrese la SEPARACION de electrodos (3) en metros es = 6
Ingrese la SEPARACION de electrodos (4) en metros es = 8
Ingrese la SEPARACION de electrodos (5) en metros es = 12
Ingrese la RESISTENCIA (1) en ohmios es = 9.32
Ingrese la RESISTENCIA (2) en ohmios es = 3.55
Ingrese la RESISTENCIA (3) en ohmios es = 1.88
Ingrese la RESISTENCIA (4) en ohmios es = 1.35
Ingrese la RESISTENCIA (5) en ohmios es = 0.88

RESULTADOS PREVIOS
-----
...Espere unos segundos por favor...

El error minimo matricial para h(m) = 0.5 es = 1.16778
El error minimo matricial para h(m) = 1 es = 0.123642
El error minimo matricial para h(m) = 1.5 es = 0.0349232
El error minimo matricial para h(m) = 2 es = 0.0175144
El error minimo matricial para h(m) = 2.5 es = 0.0595376
El error minimo matricial para h(m) = 3 es = 0.132166
El error minimo matricial para h(m) = 3.5 es = 0.219343
El error minimo matricial para h(m) = 4 es = 0.308824
El error minimo matricial para h(m) = 4.5 es = 0.394446
El error minimo matricial para h(m) = 5 es = 0.473949
El error minimo matricial para h(m) = 5.5 es = 0.54628
El error minimo matricial para h(m) = 6 es = 0.60615
El error minimo matricial para h(m) = 6.5 es = 0.663052
El error minimo matricial para h(m) = 7 es = 0.711146
El error minimo matricial para h(m) = 7.5 es = 0.752432
El error minimo matricial para h(m) = 8 es = 0.791505
El error minimo matricial para h(m) = 8.5 es = 0.827538
El error minimo matricial para h(m) = 9 es = 0.853845
El error minimo matricial para h(m) = 9.5 es = 0.878627
El error minimo matricial para h(m) = 10 es = 0.900978

El error convergente es = 0.0175144
....Y se halla para h(m) = 2
Para concluir exploraremos en rango de 1.5(m) hasta 2.5(m)

```

Figura 5.12 – Resultados previos muestra la familia de matrices de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$ y Δh , obteniendo un error mínimo para $h = 2$ m.

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional _Modulo 1.exe
RESULTADOS FINALES
...Espere unos segundos por favor...
El minimo error matricial para este rango es = 0.0160104
..Y se precisa para un h(m) = 1.8
La fila es <matriz :79x79> = 38
La columna es <matriz :79x79> = 48
El coeficiente de reflexion K es = -0.380741

La resistividad de la primera capa es <ohm-m> = 140.542
La resistividad de la segunda capa es <ohm-m> = 63.0329

La resistividad aparente teorica <1> en ohmio-metro es = 117.941
La resistividad aparente teorica <2> en ohmio-metro es = 87.0316
La resistividad aparente teorica <3> en ohmio-metro es = 73.826
La resistividad aparente teorica <4> en ohmio-metro es = 68.6515
La resistividad aparente teorica <5> en ohmio-metro es = 65.2555

La resistividad aparente medida <1> en ohmio-metro es = 117.119
La resistividad aparente medida <2> en ohmio-metro es = 89.2212
La resistividad aparente medida <3> en ohmio-metro es = 70.8743
La resistividad aparente medida <4> en ohmio-metro es = 67.8584
La resistividad aparente medida <5> en ohmio-metro es = 66.3504

El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion <1> es = 0.000676033
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion <2> es = 0.00479441
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion <3> es = 0.00871216
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion <4> es = 0.000628981
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion <5> es = 0.00119881

....FINALIZACION DEL MODULO 1 ....

```

Figura 5.13 – Luego de explorar +/- 0,5 metros la variable $h=2$ m.

Los resultados finales muestra los valores de espesor de la primera capa $h= 1,8$ m. y resistividades de la primera $\rho_1= 140$ ohm-m. y segunda capa $\rho_2= 63$ ohm-m.

5.3.3 EJEMPLO 5.3

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional _Modulo 1.exe
-----
CALCULO DE RESISTIVIDADES PARA DOS CAPAS DE SUELO POR EL METODO WENNER
-----
Ingrese numero de mediciones<preferible menor o igual a 10>= 6
Ingrese la SEPARACION de electrodos <1> en metros es = 0.5
Ingrese la SEPARACION de electrodos <2> en metros es = 1
Ingrese la SEPARACION de electrodos <3> en metros es = 2
Ingrese la SEPARACION de electrodos <4> en metros es = 4
Ingrese la SEPARACION de electrodos <5> en metros es = 6
Ingrese la SEPARACION de electrodos <6> en metros es = 8

Ingrese la RESISTENCIA <1> en ohmios es = 3.03
Ingrese la RESISTENCIA <2> en ohmios es = 1.94
Ingrese la RESISTENCIA <3> en ohmios es = 1.41
Ingrese la RESISTENCIA <4> en ohmios es = 1.20
Ingrese la RESISTENCIA <5> en ohmios es = 1.23
Ingrese la RESISTENCIA <6> en ohmios es = 1.08

RESULTADOS PREVIOS
-----
...Espere unos segundos por favor...

El error minimo matricial para h(m) = 0.5 es = 0.0346788
El error minimo matricial para h(m) = 1 es = 0.0217072
El error minimo matricial para h(m) = 1.5 es = 0.036634
El error minimo matricial para h(m) = 2 es = 0.0930328
El error minimo matricial para h(m) = 2.5 es = 0.185389
El error minimo matricial para h(m) = 3 es = 0.309233
El error minimo matricial para h(m) = 3.5 es = 0.485364
El error minimo matricial para h(m) = 4 es = 0.677975
El error minimo matricial para h(m) = 4.5 es = 0.864947
El error minimo matricial para h(m) = 5 es = 1.03688
El error minimo matricial para h(m) = 5.5 es = 1.19052
El error minimo matricial para h(m) = 6 es = 1.32563
El error minimo matricial para h(m) = 6.5 es = 1.44333
El error minimo matricial para h(m) = 7 es = 1.54534
El error minimo matricial para h(m) = 7.5 es = 1.63353
El error minimo matricial para h(m) = 8 es = 1.7097
El error minimo matricial para h(m) = 8.5 es = 1.77553
El error minimo matricial para h(m) = 9 es = 1.83248
El error minimo matricial para h(m) = 9.5 es = 1.88183
El error minimo matricial para h(m) = 10 es = 1.9247

```

Figura 5.14 – Resultados previos muestra la familia de matrices de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$ y Δh , obteniendo un error mínimo para $h=1$ m.

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional _Modulo 1.exe
El error convergente es = 0.0217072
....Y se halla para h(m) = 1
Para concluir exploraremos en rango de 0.5(m) hasta 1.5(m)
RESULTADOS FINALES
-----
....Espere unos segundos por favor....
El minimo error matricial para este rango es = 0.0216338
..Y se precisa para un h(m) = 1.05
La fila es (matriz :79x79) = 79
La columna es (matriz :79x79) = 37
El coeficiente de reflexion K es = 0.848216
La resistividad de la primera capa es (ohm-m) = 8.8051
La resistividad de la segunda capa es (ohm-m) = 107.216
La resistividad aparente teorica (1) en ohmio-metro es = 9.3903
La resistividad aparente teorica (2) en ohmio-metro es = 11.9733
La resistividad aparente teorica (3) en ohmio-metro es = 19.7001
La resistividad aparente teorica (4) en ohmio-metro es = 33.6749
La resistividad aparente teorica (5) en ohmio-metro es = 44.4666
La resistividad aparente teorica (6) en ohmio-metro es = 52.9974
La resistividad aparente medida (1) en ohmio-metro es = 9.51902
La resistividad aparente medida (2) en ohmio-metro es = 12.1894
La resistividad aparente medida (3) en ohmio-metro es = 17.7186
La resistividad aparente medida (4) en ohmio-metro es = 30.1593
La resistividad aparente medida (5) en ohmio-metro es = 46.3699
La resistividad aparente medida (6) en ohmio-metro es = 54.2867
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (1) es = 1.65699e-05
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (2) es = 4.67078e-05
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (3) es = 0.0039265
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (4) es = 0.0123592
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (5) es = 0.00362237
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (6) es = 0.00166245
....FINALIZACION DEL MODULO 1 ....

```

Figura 5.15 – Luego de explorar +/- 0,5 metros la variable $h=1$ m. Los resultados finales muestra los valores de espesor de la primera capa $h= 1,05$ m. y resistividades de la primera $\rho_1= 8$ ohm-m. y segunda capa $\rho_2= 107$ ohm-m.

5.3.4 EJEMPLO 5.4

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional _Modulo 1.exe
-----
CALCULO DE RESISTIVIDADES PARA DOS CAPAS DE SUELO POR EL METODO WENNER
-----
Ingrese numero de mediciones<preferible menor o igual a 10>= 7
Ingrese la SEPARACION de electrodos <1> en metros es = 0.5
Ingrese la SEPARACION de electrodos <2> en metros es = 1
Ingrese la SEPARACION de electrodos <3> en metros es = 2
Ingrese la SEPARACION de electrodos <4> en metros es = 4
Ingrese la SEPARACION de electrodos <5> en metros es = 6
Ingrese la SEPARACION de electrodos <6> en metros es = 8
Ingrese la SEPARACION de electrodos <7> en metros es = 12
Ingrese la RESISTENCIA <1> en ohmios es = 18.39
Ingrese la RESISTENCIA <2> en ohmios es = 10.28
Ingrese la RESISTENCIA <3> en ohmios es = 7.77
Ingrese la RESISTENCIA <4> en ohmios es = 5.42
Ingrese la RESISTENCIA <5> en ohmios es = 4.33
Ingrese la RESISTENCIA <6> en ohmios es = 3.94
Ingrese la RESISTENCIA <7> en ohmios es = 3.09
-----
RESULTADOS PREVIOS
-----
...Espere unos segundos por favor...
El error minimo matricial para h(m) = 0.5 es = 0.997912
El error minimo matricial para h(m) = 1 es = 0.388807
El error minimo matricial para h(m) = 1.5 es = 0.164286
El error minimo matricial para h(m) = 2 es = 0.306165
El error minimo matricial para h(m) = 2.5 es = 0.665215
El error minimo matricial para h(m) = 3 es = 1.1435
El error minimo matricial para h(m) = 3.5 es = 1.88832
El error minimo matricial para h(m) = 4 es = 2.92341
El error minimo matricial para h(m) = 4.5 es = 4.14243
El error minimo matricial para h(m) = 5 es = 5.4631
El error minimo matricial para h(m) = 5.5 es = 6.8283
El error minimo matricial para h(m) = 6 es = 8.19013
El error minimo matricial para h(m) = 6.5 es = 9.51734
El error minimo matricial para h(m) = 7 es = 10.8573
El error minimo matricial para h(m) = 7.5 es = 12.1998
El error minimo matricial para h(m) = 8 es = 13.5049
El error minimo matricial para h(m) = 8.5 es = 14.7489
El error minimo matricial para h(m) = 9 es = 15.9192
El error minimo matricial para h(m) = 9.5 es = 17.0101
El error minimo matricial para h(m) = 10 es = 18.0204

```

Figura 5.16 – Resultados previos muestra la familia de matrices de errores cuadráticos para cada iteración de variable $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$ y Δh , obteniendo un error mínimo para $h=1,5$ m.

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional _Modulo 1.exe
El error convergente es = 0.164286
....Y se halla para h(m) = 1.5
Para concluir exploraremos en rango de 1(m) hasta 2(m)
RESULTADOS FINALES
-----
...Espere unos segundos por favor....
El mínimo error matricial para este rango es = 0.164286
..Y se precisa para un h(m) = 1.5
La fila es (matriz :79x79) = 53
La columna es (matriz :79x79) = 40
El coeficiente de reflexion K es = 0.684703
La resistividad de la primera capa es (ohm-m) = 57.7739
La resistividad de la segunda capa es (ohm-m) = 308.699
La resistividad aparente teorica (1) en ohmio-metro es = 58.8877
La resistividad aparente teorica (2) en ohmio-metro es = 64.8216
La resistividad aparente teorica (3) en ohmio-metro es = 88.014
La resistividad aparente teorica (4) en ohmio-metro es = 135.901
La resistividad aparente teorica (5) en ohmio-metro es = 170.786
La resistividad aparente teorica (6) en ohmio-metro es = 196.155
La resistividad aparente teorica (7) en ohmio-metro es = 229.874
La resistividad aparente medida (1) en ohmio-metro es = 57.7739
La resistividad aparente medida (2) en ohmio-metro es = 64.5911
La resistividad aparente medida (3) en ohmio-metro es = 97.6407
La resistividad aparente medida (4) en ohmio-metro es = 136.219
La resistividad aparente medida (5) en ohmio-metro es = 163.237
La resistividad aparente medida (6) en ohmio-metro es = 198.046
La resistividad aparente medida (7) en ohmio-metro es = 232.98
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (1) es = 0.00124058
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (2) es = 5.31194e-05
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (3) es = 0.0926737
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (4) es = 0.000101567
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (5) es = 0.0569929
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (6) es = 0.00357683
El error [(medida-teorica)^2/1000] para la medicion (7) es = 0.00964782
....FINALIZACION DEL MODULO 1 ....

```

Figura 5.17 – Luego de explorar +/- 0,5 metros la variable $h=1,5$ m. Los resultados finales muestra los valores de espesor de la primera capa $h= 1,5$ m. y resistividades de la primera $\rho_1= 57$ ohm-m. y segunda capa $\rho_2= 308$ ohm-m.

CAPÍTULO VI

IMPLEMENTACIÓN DEL EJECUTABLE JAVA – MÓDULO 2

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analiza los potenciales eléctricos y la resistencia de dispersión de la subestación de energía eléctrica respetando todas las normas del Institute of Electrical and Electronics Engineers y el Código Nacional Electrico citados en capítulo I. El diagrama de bloques que se presenta en la figura 6.1 ilustra los pasos a seguir para obtener un diseño adecuado.

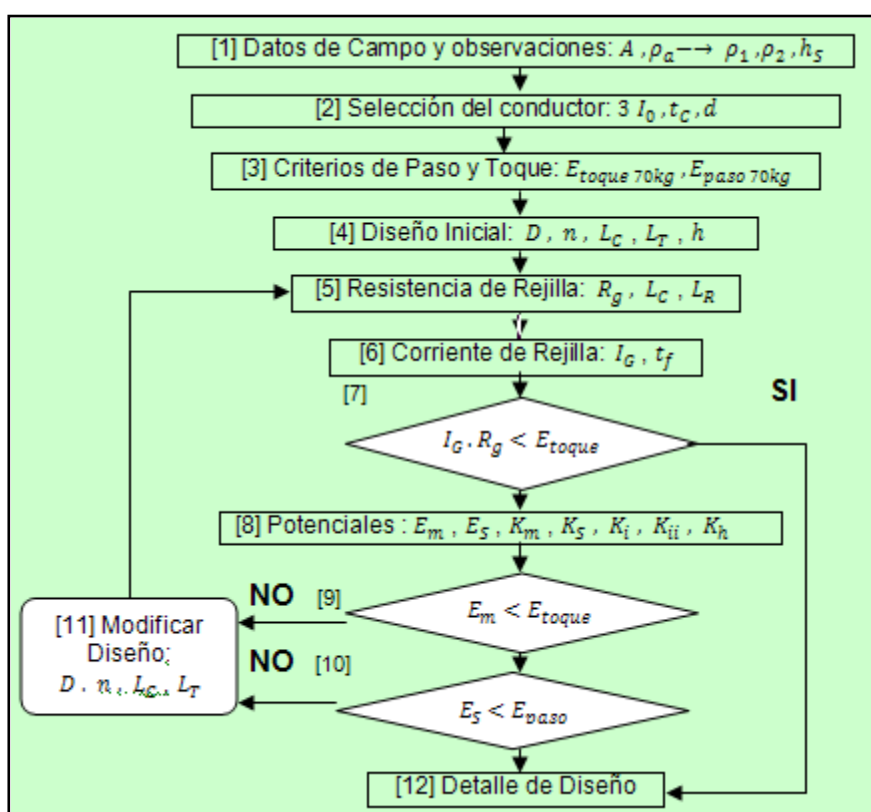


Figura 6.1 –Diagrama de bloques para el procedimiento del diseño.

6.2 IMPLEMENTACIÓN DEL EJECUTABLE JAVA – MÓDULO 2

La implementación del módulo 2 tiene por objetivo diseñar un SPT con seguridad a partir del análisis de los potenciales eléctricos y resistencia de dispersión. Aplicaremos El Módulo 2 en dos ejemplos, el primero considerando un diseño de rejilla sin varillas y el otro considerando las varillas.

6.2.1 EJEMPLO 6.1

Considerando un diseño de rejilla sin varillas, tomaremos como base el ejemplo B.1 (anexo B). En esta etapa Paso 1 y Paso 2 se deben ingresar los datos de campo y las variables que definirán la dimensión del conductor.

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_Modulo 2.exe

DISEÑO DE REJILLA CUADRADA CON VARILLAS

PASO 1 : DATOS DE CAMPO

Necesitamos el plano general de la localizacion de la subestacion.
Un estudio de la resistividad del suelo, que se describe en la
estructura del suelo y seleccion del modelo de suelo.

Ingrese Area de la S.E.(m2)                = 4900
Ingrese Resistividad de grava humeda (ohm-m) = 2500
Ingrese Espesor de la superficie de grava hc(m) = 0.102
Ingrese Resistividad del suelo (ohm-m)      = 400

PASO 2 : DIMENSION DEL CONDUCTOR

El calibre del conductor se determina por la corriente de falla
y el tiempo maximo de limpieza. La corriente de falla debe ser
la maxima esperada del sistema en un futuro
la cual sera conducida por medio de cualquier conductor
en el sistema, y el tiempo debere reflejar
el tiempo maximo de limpieza incluyendo
el respaldo o protecciones.

Ingrese voltaje de linea-linea en el lugar de la falla (v) = 115000
Ingrese el voltaje del secundario del transformador (v)    = 13800
Ingrese tiempo de falla en segundos                        = 0.5

Ingrese la impedancia de secuencia positiva :
r1 = 4
x1 = 10

Ingrese la impedancia de secuencia cero :
r0 = 10
x0 = 40

Ingrese la impedancia del Transformador :
rt = 0.834
xt = 1.014

La corriente de falla en alta tension es = 3179.66
La relacion (KxR) en alta tension es   = 3.33333

La corriente de falla en baja tension es = 6814.99
La relacion (KxR) en baja tension es    = 16.1463

```

Figura 6.2 – Muestra los datos iniciales de campo

C:\ Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_ Modulo 2.exe

Tabla 18: Valores típicos de DF.

Duración de falla, t_f		Factor de decremento, DF			
Segundos	Ciclos a 60Hz	K/R=10	K/R=20	K/R=30	K/R=40
0.00033	0.5	1.576	1.640	1.675	1.680
0.05	3	1.232	1.370	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.370
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Ingrese Df = 1

Figura 6.3 – Muestra la tabla de valores típicos para el factor de decremento.

C:\ Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_ Modulo 2.exe

Determinación del calibre del conductor, metodo simplificado (Tabla 2)

Tabla 2: Constantes de los materiales

Material	Conductividad(σ)	T_m (C)	Kf
Cobre destemplado con suave trazado	100.0	1003	7.00
Cobre comercial con duro trazado	97.0	1004	7.06
Alambre de acero con revestimiento de Cobre	40.0	1004	10.45
Alambre de acero con revestimiento de Cobre	30.0	1004	12.06
Varilla de acero con revestimiento de Cobre	20.0	1004	14.64
Aluminio grado EC	61.0	657	12.12
Aleacion de Aluminio 5805	53.5	652	12.41
Aleacion de Aluminio 6201	52.5	654	12.47
Alambre de acero con revestimiento de Aluminio	200.3	657	17.2
Acero 1020	10.0	1510	15.95
Varilla de acero con revestimiento Inoxidable	9.0	1400	14.72
Varilla de acero con capa de Zinc	0.6	419	20.96
Acero Inoxidable 304	2.4	1400	30.85

Figura 6.4 – La tabla 3.2 muestra las constantes de los materiales para obtener el calibre del conductor según el método simplificado (Kf).

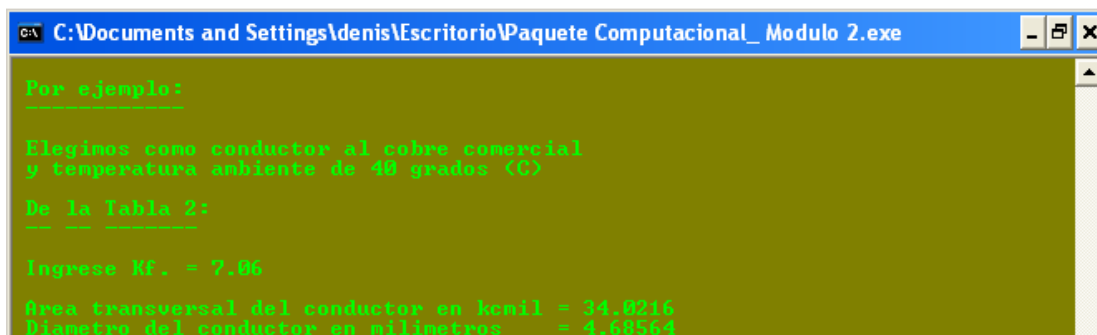


Figura 6.5 – Obtención del área transversal del conductor seleccionado según el método simplificado

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_ Modulo 2.exe

Determinación del calibre del conductor, metodo SVERAK (Tabla 1)

Tabla 1: Constantes de los materiales

Descripción	Conductividad del material (C)	Factor a 20C (1/C)	No en (C)	Temperatura de fusión Tm (C)	resist. 20 (C)	Capacidad Termica TCRP [J/cm ³ .C]
Cobre, destemplado de suave -trazado	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre, comercial de duro-trazado	97.0	0.00381	242	1084	1.70	3.42
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	40.0	0.00370	245	1084	4.40	3.85
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	30.0	0.00370	245	1084	5.06	3.85
Varilla de Acero con revestimiento de Cobre	20.0	0.0070	245	1084	0.62	3.85
Aluminio de grado EC	61.0	0.00483	220	657	2.86	2.56
Alcacion de Aluminio 5005	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Alcacion de Aluminio 6201	52.5	0.00347	260	654	3.20	2.60

Figura 6.6 – La tabla 3.1 muestra las constantes de los materiales para obtener el calibre del conductor según el método SVERAK.

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_ Modulo 2.exe

Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio	20.3	0.00360	258	657	8.40	3.50
Acero 1020	10.0	0.00160	685	1510	15.90	3.20
Varillac de acero con revestimiento Inoxidable	9.0	0.00160	685	1400	17.50	4.44
Varilla de acero con capa de Zinc	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Acero Inoxidable 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

En esta secuencia se puede optar por seleccionar otro tipo de conductor y/o la imposición de una máxima temperatura de fusión.

Por Ejemplo:

Un cable de acero con revestimiento de cobre menos conductivo (30%) y una temperatura límite de 700C

De la tabla 1:

Ingrese Capacidad termica TCAP (J/cm ³ -C)	= 3.85
Ingrese coeficiente termico (1/C)	= 0.00170
Ingrese la resistividad del conductor(ohm-cm/10 ⁻⁶)	= 5.862
Ingrese R0 (C)	= 245
Ingrese T0 (C)	= 700
Ingrese Ta (C)	= 40
Area transversal del conductor en mm ²	= 65.9145
Diametro del conductor en milímetros	= 6.52202

En esta secuencia debemos elegir el

DIAMETRO NOMINAL DEL CONDUCTOR DE REJILLA en metros

Ingrese Diametro (m)	= 0.01
----------------------	--------

Figura 6.7 – Obtención del área transversal nominal del conductor seleccionado según el método SVERAK.

En esta etapa (Paso 3, 4, 5, 6, 7 y 8) analizaremos el voltaje de malla y paso, seleccionaremos el diseño inicial de la rejilla de tierra, obtendremos el valor del ohmiaje de la rejilla de tierra, la corriente máxima de rejilla y el aumento de potencial de tierra (GPR).

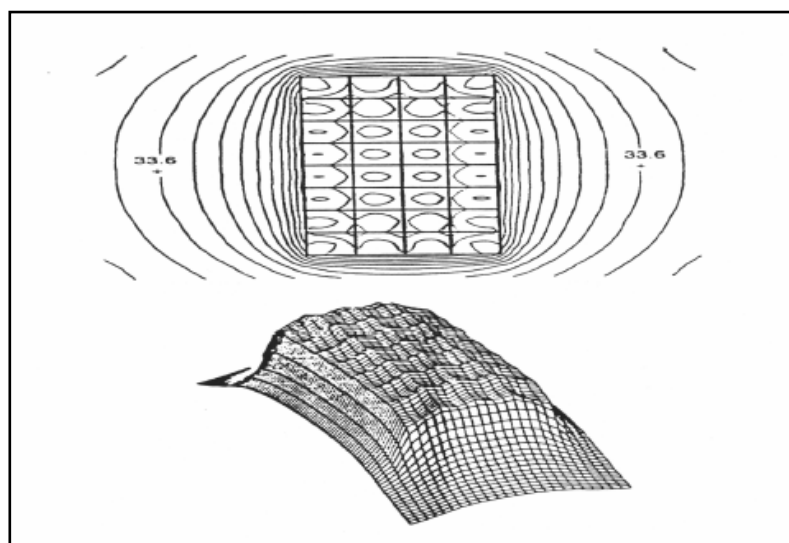


Figura 6.8 – Aumento de potencial de tierra GPR de la rejilla a tierra. Del capítulo 2.1 condiciones de riesgo (figura 2.2).

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_Modulo 2.exe
PASO 3 : VOLTAJE DE PASO Y DE TOQUE
-----
Factor de reflexion entre capas de suelo K.          = -0.724130
Factor de decremento de la capa superficial Cs.     = 0.742857
Voltaje de paso tolerable Ep70.(v)                = 2696.1
Voltaje de toque tolerable Et70.(v)               = 840.548

PASO 4 : DISEÑO INICIAL
-----
Ingrese espaciamento entre conductores D.(m)      = 2
Ingrese profundidad de rejilla en tierra h.(m)     = 0.5
Ingrese longitud total de conductores de rejilla LT.(m) = 1540

PASO 5 : RESISTENCIA DE LA REJILLA
-----
Rg.(ohm) = 2.77569

PASO 6 : CORRIENTE MAXIMA DE REJILLA
-----
Ingrese factor de division de corriente Sf = 0.6
IG.(A) = 1987.8

PASO 7 : AUMENTO DEL POTENCIAL DE TIERRA
-----
GPR.(V) = 5295.46
GPR>Et70 por lo tanto son necesarias mas evaluaciones para el diseño

```

Figura 6.9 – Obtención del Aumento de potencial de tierra GPR de la rejilla a tierra de 4900 m^2 .

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_Modulo 2.exe
PASO 8 : VOLTAJE DE MALLA Y DE PASO
-----
Ingrese longitud del perimetro de rejilla Lp.(m)    = 280
Ingrese longitud maxima de rejilla en direccion Lx.(m) = 70
Ingrese longitud maxima de rejilla en direccion Ly.(m) = 70
Ingrese distancia maxima entre 2 puntos de rejilla Dm.(m) = 98.99

Kh = 1.22474
na = 11
nb = 1
nc = 1
nd = 0.99995
n = 10.9994
K11 = 0.578053
Km = 0.862697
K1 = 2.27192

EL VOLTAJE DE MALLA Em.(v) = 971.231
Em>Et70 por lo tanto se debe modificar el diseño (diam,LC,LR)

```

Figura 6.10 – Obtención del voltaje malla y paso. El Ejecutable se detiene en el Paso 8 por no cumplir los criterios de diseño.

El diseño obtenido no cumple con los potenciales eléctricos máximos permisibles por lo tanto se debe de rediseñar la rejilla a tierra. En el siguiente ejemplo se efectuará los cambios respectivos en el diseño de la rejilla.

6.2.2 EJEMPLO 6.2

Aplicaremos nuevamente el ejecutable módulo 2, pero con varillas, con el objetivo de limitar los potenciales eléctricos.

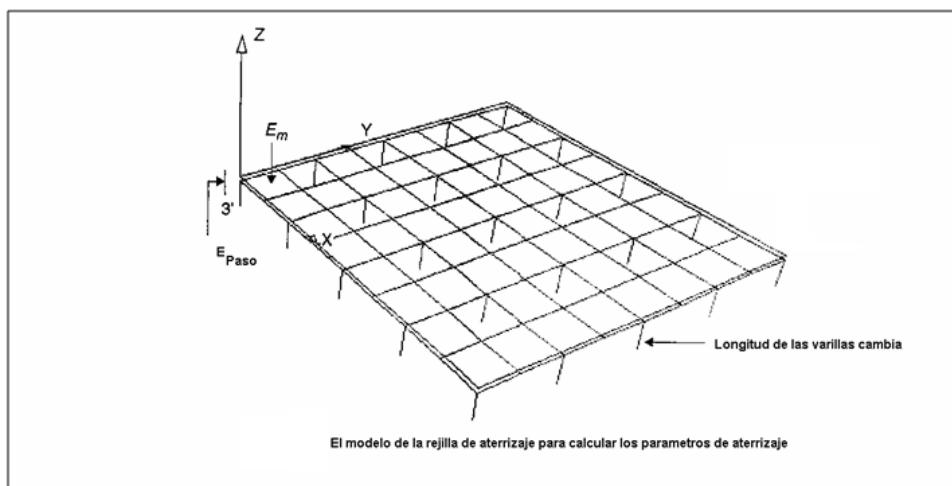


Figura 6.11 – Considerando un diseño de rejilla a tierra con varillas de forma equidistante.

Continuaremos con las variables iniciales de campo del Ejemplo 6.1 y nos concentraremos sólo en el efecto que produce las varillas.


```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_Modulo 2.exe

Por Ejemplo:

Si se aumenta 20 varillas de medida 7.5m
al perimetro de la Rejilla de forma equidistante.
...Rediseñando a partir de la resistencia de la Rejilla...
PASO 5 : RESISTENCIA DE LA REJILLA
-----
Ingrese la cantidad de varillas conductoras           = 20
Ingrese la longitud de cada varilla conductora (m)= 7.5

Rg.(ohm) = 2.75264
PASO 6 : CORRIENTE MAXIMA DE REJILLA
-----
Consideramos la corriente calculada anteriormente

```

Figura 6.12 – Aumento equidistante de 20 varillas de 7,5 m. a la rejilla a tierra.

```

C:\Documents and Settings\denis\Escritorio\Paquete Computacional_Modulo 2.exe

PASO 7 : AUMENTO DEL POTENCIAL DE TIERRA
-----
GPR.(v) = 5251.48
GPR>Ect70 por lo tanto es necesario evaluar el Voltaje de Malla
PASO 8 : VOLTAJE DE MALLA Y DE PASO
-----
Rejilla sin varillas, Rii = 0.578853
Rejilla con varillas, Rii = 1
EL VOLTAJE DE MALLA Em.(v) = 722.88
EL VOLTAJE DE PASO Es.(v) = 549.049
Paso 9: Verificar que Em<Ect70
-----
Se cumple Em<Ect70, 722.88 < 840.548
Paso 10: Verificar que Es<Ept70
-----
Se cumple Es<Ept70, 549.049 < 2696.1
...SE OBTUVO UN DISEÑO SEGURO...
... FINAL DEL MODULO 2 ...

```

Figura 6.13 – Obtención del GPR, voltaje malla y paso. El Ejecutable finaliza satisfactoriamente al cumplir todos los criterios de diseño.

La implementación del módulo 2 cumple su objetivo de diseñar un SPT con seguridad a partir del análisis de los potenciales eléctricos y resistencia de dispersión. Para ello se necesitó las varillas o electrodos a tierra para no sobrepasar los límites permisibles de potenciales eléctricos.

6.2.3 LENGUAJE DEL EJECUTABLE JAVA - MÓDULO 2

```
#include<iostream.h>
#include<conio.h>
#include<iomanip.h>
#include<ctype.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>
#include<stdio.h>
#include<complex.h>

void main()
{cout<<"\n DISEÑO DE REJILLA CUADRADA CON VARILLAS DE ATERRIZAJE";
cout<<"\n ----- -- ----- ----- -- -----";

cout<<"\n\n PASO 1 : DATOS DE CAMPO";
cout<<"\n ---- -";
cout<<"\n Necesitamos el plano general de la localizacion de la subestacion.";
cout<<"\n Un estudio de la resistividad del suelo, que se describe en la";
cout<<"\n estructura del suelo y seleccion del modelo de suelo.";

float A,rs,hs,rg,r0,x0,r1,x1,rt,xt,vp,vs,tf;

cout<<"\n\n Ingrese Area de aterrizaje de la S.E.(m2)    = ";cin>>A;
cout<<" Ingrese Resistividad de grava humeda (ohm-m)  = ";cin>>rg;
cout<<" Ingrese Espesor de la superficie de grava hs(m) = ";cin>>hs;
cout<<" Ingrese Resistividad del suelo (ohm-m)         = ";cin>>rs;

cout<<"\n\n PASO 2 : DIMENSION DEL CONDUCTOR";
cout<<"\n ---- -";

cout<<"\n El calibre del conductor se determina por la corriente de falla";
cout<<"\n y el tiempo maximo de limpieza. La corriente de falla debe ser";
cout<<"\n la maxima esperada del sistema en un futuro";
cout<<"\n la cual sera conducida por medio de cualquier conductor";
cout<<"\n en el sistema de aterrizaje, y el tiempo debera reflejar";
cout<<"\n el tiempo maximo de limpieza incluyendo";
cout<<"\n el respaldo o protecciones.";

cout<<"\n\n Ingrese voltaje de linea-linea en el lugar de la falla (v)= ";cin>>vp;
cout<<" Ingrese el voltaje del secundario del transformador (v) = ";cin>>vs;
```

```

cout<<" Ingrese tiempo de falla en segundos          = ";cin>>tf;

cout<<"\n\n Ingrese la Impedancia de secuencia positiva : ";
cout<<"\n r1 = ";cin>>r1;
cout<<" x1 = ";cin>>x1;

cout<<"\n Ingrese la Impedancia de secuencia cero : ";
cout<<"\n r0 = ";cin>>r0;
cout<<" x0 = ";cin>>x0;

cout<<"\n Ingrese la Impedancia del Transformador : ";
cout<<"\n rt = ";cin>>rt;
cout<<" xt = ";cin>>xt;

complex z1(r1,x1);
complex z0(r0,x0);
complex zt(rt,xt);

float I03_alta,XR_alta,I03_baja,XR_baja;
I03_alta=abs(1.732*vp/(2*z1+z0));
XR_alta=imag(1.732*vp/(2*z1+z0))/real(1.732*vp/(2*z1+z0));
XR_alta=pow(XR_alta*XR_alta,0.5);
cout<<"\n La corriente de falla en alta tension es = "<<I03_alta;
cout<<"\n La relacion |X%R| en alta tension es    = "<<XR_alta;

I03_baja=abs(1.732*vs/(2*((vs/vp)*(vs/vp)*z1+zt)+zt));
XR_baja=imag(1.732*vs/(2*((vs/vp)*(vs/vp)*z1+zt)+zt))/real(1.732*vs/(2*((vs/vp)*(vs/vp)*z1+zt)+zt));
XR_baja=pow(XR_baja*XR_baja,0.5);
cout<<"\n\n La corriente de falla en baja tension es = "<<I03_baja;
cout<<"\n La relacion |X%R| en baja tension es    = "<<XR_baja;

float Kf,tc,Akcmil_1,Df;
float dmm_1;
cout<<"\n\n Tabla 10: Valores tipicos de Df.";
cout<<"\n -----";
cout<<"\n\n ";
cout<<"Duracion de falla,tf          Factor de decremento,Df";
cout<<"\n\n ";
cout<<"Segundos Ciclos a 60Hz  X/R=10 X/R=20 X/R=30 X/R=40";
cout<<"\n ";
cout<<"0.00833      0.5      1.576  1.648  1.675  1.688";
cout<<"\n ";
cout<<"0.05         3         1.232  1.378  1.462  1.515";
cout<<"\n ";
cout<<"0.10         6         1.125  1.232  1.316  1.378";
cout<<"\n ";
cout<<"0.20         12        1.064  1.125  1.181  1.232";
cout<<"\n ";
cout<<"0.30         18        1.043  1.085  1.125  1.163";
cout<<"\n ";

```

```

cout<<"0.40      24      1.033  1.064  1.095  1.125";
cout<<"\n ";
cout<<"0.50      30      1.026  1.052  1.077  1.101";
cout<<"\n ";
cout<<"0.75      45      1.018  1.035  1.052  1.068";
cout<<"\n ";
cout<<"1.00      60      1.013  1.026  1.039  1.052";

```

```

cout<<"\n\n Ingrese Df = ";cin>>Df;
cout<<"\n\n Determinacion del calibre del conductor, metodo simplificado (Tabla 2)";
cout<<"\n\n Tabla 2: Constantes de los materiales";
cout<<"\n -----";
cout<<"\n\n";
cout<<" Material          Conductividad(%)  Tm(C)   Kf";
cout<<"\n\n";
cout<<" Cobre destemplado      100.0      1083    7.00";
cout<<"\n";
cout<<" con suave trazado";
cout<<"\n\n";
cout<<" Cobre comercial con     97.0      1084    7.06";
cout<<"\n";
cout<<" duro trazado  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Alambre de Acero con     40.0      1084    10.45";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento de Cobre  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Alambre de Acero con     30.0      1084    12.06";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento de Cobre  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Varilla de Acero con     20.0      1084    14.64";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento de Cobre  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Aluminio grado EC        61.0      657     12.12";
cout<<"\n\n";
cout<<" Aleacion de Aluminio     53.5      652     12.41";
cout<<"\n";
cout<<" 5005  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Aleacion de Aluminio     52.5      654     12.47";
cout<<"\n";
cout<<" 6201  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Alambre de Acero con     200.3      657     17.2";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento de  ";
cout<<"\n";
cout<<" Aluminio  ";
cout<<"\n\n";

```

```

cout<<" Acero 1020          10.8      1510    15.95";
cout<<"\n\n";
cout<<" Varilla de Acero con    9.8      1400    14.72";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento  ";
cout<<"\n";
cout<<" Inoxidable  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Varilla de Acero con    8.6      419     28.96";
cout<<"\n";
cout<<" capa de Zinc  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Acero Inoxidable 304    2.4      1400    30.05";
cout<<"\n\n";

cout<<"\n\n Por ejemplo: ";
cout<<"\n -----";
cout<<"\n\n Elegimos como conductor al cobre comercial";
cout<<"\n y temperatura ambiente de 40 grados (C)";
cout<<"\n\n De la Tabla 2:";
cout<<"\n -- -- -----";
cout<<"\n\n Ingrese Kf. = ";cin>>Kf;
tc=tf;
Akcmil_1=0.001*I03_baja*Kf*pow(tc,0.5);
cout<<"\n Area transversal del conductor en kcmil = "<<Akcmil_1;
dmm_1=pow(4*(Akcmil_1/1.974)/3.14,0.5);
cout<<"\n Diametro del conductor en milimetros  = "<<dmm_1;

cout<<"\n\n Determinacion del calibre del conductor, metodo SVERAK (Tabla 1)";
float TCAP,alfa,rc,K0,Tm,Ta,Akcmil_2;
float dmm_2,d;
cout<<"\n\n Tabla 1: Constantes de los materiales";
cout<<"\n ----- -- ----- -- --- -----";
cout<<"\n\n";
cout<<" Descripcion  Conductividad  Factor  Ko  Temperatura resist.
Capacidad";
cout<<"          del material  a    en  de fusion  20    Termica";
cout<<"          (%)          20C  (C)  Tm (C)  (C)  TCAP";
cout<<"          (1/C)          (C)          [J/cm3.C]";
cout<<"\n\n";
cout<<" Cobre,          100.0    0.00393  234    1083    1.72    3.42";
cout<<"\n";
cout<<" destemplado de  ";
cout<<"\n";
cout<<" suave -trazado  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Cobre,          97.0    0.00381  242    1084    1.78    3.42";
cout<<"\n";
cout<<" comercial de  ";
cout<<"\n";
cout<<" duro-trazado  ";

```

```

cout<<"\n\n";
cout<<" Alambre de      40.0      0.00378  245    1084    4.40    3.85";
cout<<"\n";
cout<<" Acero con  ";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento  ";
cout<<"\n";
cout<<" de Cobre  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Alambre de      30.0      0.00378  245    1084    5.86    3.85";
cout<<"\n";
cout<<" Acero con  ";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento  ";
cout<<"\n";
cout<<" de Cobre  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Varilla de     20.0      0.0078   245    1084    8.62    3.85";
cout<<"\n";
cout<<" Acero con  ";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento  ";
cout<<"\n";
cout<<" de Cobre  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Aluminio de     61.0      0.00403  228    657     2.86    2.56";
cout<<"\n";
cout<<" grado EC  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Aleacion de     53.5      0.00353  263    652     3.22    2.60";
cout<<"\n";
cout<<" Aluminio 5005  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Aleacion de     52.5      0.00347  268    654     3.28    2.60";
cout<<"\n";
cout<<" Aluminio 6201  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Alambre de     20.3      0.00360  258    657     8.48    3.58";
cout<<"\n";
cout<<" Acero con  ";
cout<<"\n";
cout<<" revestimiento  ";
cout<<"\n";
cout<<" de Aluminio  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Acero 1020     10.8      0.00160  605    1510    15.90    3.28";
cout<<"\n\n";
cout<<" Varillac de     9.8       0.00160  605    1400    17.50    4.44";
cout<<"\n";
cout<<" acero con  ";
cout<<"\n";

```

```

cout<<" revestimiento ";
cout<<"\n";
cout<<" Inoxidable ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Varilla de acero  8.6      0.00320  293    419    20.10    3.93";
cout<<"\n";
cout<<" con capa de  ";
cout<<"\n";
cout<<" Zinc  ";
cout<<"\n\n";
cout<<" Acero          2.4      0.00130  749    1400    72.00    4.03";
cout<<"\n";
cout<<" Inoxidable 304  ";

cout<<"\n\n En esta secuencia se puede obter por seleccionar otro tipo ";
cout<<"\n de conductor y/o la imposicion de una maxima temperatura de fusion.";
cout<<"\n\n Por Ejemplo:";
cout<<"\n -----";
cout<<"\n\n Un cable de acero con revestimiento de cobre ";
cout<<"\n menos conductivo (30%) y una Temperatura limite de 700C";
cout<<"\n\n De la Tabla 1:";
cout<<"\n -- -- -----";
cout<<"\n\n Ingrese Capacidad termica TCAP (J/cm3-C)          = ";cin>>TCAP;
cout<<" Ingrese coeficiente termico (1/C)                  = ";cin>>alfa;
cout<<" Ingrese la resistividad del conductor(ohm-cm/10^6) = ";cin>>rc;
cout<<" Ingrese K0 (C)                                       = ";cin>>K0;
cout<<" Ingrese Tm (C)                                       = ";cin>>Tm;
cout<<" Ingrese Ta (C)                                       = ";cin>>Ta;

Akcmil_2=0.001*I03_baja*197.4/(pow(TCAP*log((K0+Tm)/(K0+Ta))/(tc*alfa*rc),0.5));
cout<<"\n Area transversal del conductor en kcmil          = "<<Akcmil_2;
dmm_2=pow(4*(Akcmil_2/1.974)/3.14,0.5);
cout<<"\n Diametro del conductor en milimetros              = "<<dmm_2;
cout<<"\n\n En esta secuencia debemos elegir el";
cout<<"\n\n DIAMETRO NOMINAL DEL CONDUCTOR DE REJILLA en metros";
cout<<"\n\n Ingrese Diametro (m)                               = ";cin>>d;

cout<<"\n\n PASO 3 : VOLTAJE DE PASO Y DE TOQUE";
cout<<"\n ---- -";
float ts,K,Cs,Ep70,Et70;
ts=tf;
K=(rs-rg)/(rs+rg);
Cs=1-0.09*(1-rs/rg)/(2*hs+0.09);
Ep70=(1000+6*Cs*rg)*0.157/pow(ts,0.5);
Et70=(1000+1.5*Cs*rg)*0.157/pow(ts,0.5);

cout<<"\n Factor de reflexion entre capas de suelo K.          = "<<K;
cout<<"\n Factor de decremento de la capa superficial Cs. = "<<Cs;
cout<<"\n Voltaje de paso tolerable Ep70.(v)                  = "<<Ep70;
cout<<"\n Voltaje de toque tolerable Et70.(v)                  = "<<Et70;

```

```

cout<<"\n\n PASO 4 : DISENO INICIAL";
cout<<"\n ---- -";
float D,h,LT;

cout<<"\n\n Ingrese espaciamiento entre conductores D.(m)      = ";cin>>D;
cout<<" Ingrese profundidad de rejilla en tierra h.(m)          = ";cin>>h;
cout<<" Ingrese longitud total de conductores de rejilla LT.(m) = ";cin>>LT;
cout<<"\n PASO 5 : RESISTENCIA DE LA REJILLA";
cout<<"\n ---- -";
float Rg;
Rg=rs*(1/LT+(1/pow(20*A,0.5))*(1+1/(1+h*pow(20/A,0.5))));
cout<<"\n\n Rg.(ohm) = "<<Rg;
cout<<"\n\n PASO 6 : CORRIENTE MAXIMA DE REJILLA";
cout<<"\n ---- -";
float Sf,IG;
cout<<"\n\n Ingrese factor de division de corriente Sf = ";cin>>Sf;
IG=Df*Sf*103_alta;
cout<<" IG.(A) = "<<IG;
cout<<"\n\n PASO 7 : AUMENTO DEL POTENCIAL DE TIERRA";
cout<<"\n ---- -";
float GPR;
GPR=IG*Rg;
cout<<"\n\n GPR.(V) = "<<GPR;
    if(GPR<Et70)
    { cout<<"\n\n Se cumple GPR<Et70 "<<GPR<<" < "<<Et70;
      cout<<"\n\n No son necesarias mas evaluaciones";
      cout<<"\n\n      ...SE OBTUVO UN DISENO SEGURO..."; }
    else
    { cout<<"\n\n GPR>Et70 por lo tanto son necesarias mas evaluaciones para el
      diseno";

cout<<"\n\n PASO 8 : VOLTAJE DE MALLA Y DE PASO";
cout<<"\n ---- -";
float Lp,Lx,Ly,Dm;
float na,nb,nc,nd,n,Kh,Kii,Km;
float Ki,Em;
cout<<"\n\n Ingrese longitud del perimetro de rejilla Lp.(m)      = ";cin>>Lp;
cout<<" Ingrese longitud maxima de rejilla en direccion Lx.(m) = ";cin>>Lx;
cout<<" Ingrese longitud maxima de rejilla en direccion Ly.(m) = ";cin>>Ly;
cout<<" Ingrese distancia maxima entre 2 puntos de rejilla Dm.(m)= ";cin>>Dm;
Kh=pow(1+h,0.5);
na=2*LT/Lp;
nb=pow(Lp/(4*pow(A,0.5)),0.5);
nc=pow(Lx*Ly/A,0.7*A/(Lx*Ly));
nd=Dm/pow(Lx*Lx+Ly*Ly,0.5);
n=na*nb*nc*nd;
Kii=1/(pow(2*n,2/n));
Km=(1/(2*3.1415))*(log(D*D/(16*h*d)+(D+2+h)*(D+2+h)/(8*D*h)-
h/(4*d)+(Kii/Kh)*log(8/(3.1415*(2*n-1))));
Ki=0.644+0.148*n;
Em=rs*IG*Km*Ki/LT;

```



```

cout<<"\n Kh = "<<Kh;
cout<<"\n na = "<<na;
cout<<"\n nb = "<<nb;
cout<<"\n nc = "<<nc;
cout<<"\n nd = "<<nd;
cout<<"\n n = "<<n;
cout<<"\n Kii = "<<Kii;
cout<<"\n Km = "<<Km;
cout<<"\n Ki = "<<Ki;

cout<<"\n\n EL VOLTAJE DE MALLA Em.(v) = "<<Em;
float Ks,Es;
if(Em<Et70)
  { cout<<"\n\n Paso 9: Verificar que Em<Et70";
    cout<<"\n ---- -";
    cout<<"\n\n Se cumple Em<Et70, "<<Em<<" < "<<Et70;

    cout<<"\n\n Paso 10: Verificar que Es<Ep70";
    cout<<"\n ---- -";
    Ks= (1/3.1415)*(1/(2*h)+1/(D+h)+1/D*(1-pow(0.5,n-2)));
    cout<<"\n\n Ks = "<<Ks;
    Es=rs*IG*Ks*Ki/(0.75*LT);
    cout<<"\n\n Es = "<<Es;
    if(Es<Ep70)
      { cout<<"\n\n Se cumple Es<Ep70, "<<Es<<" < "<<Ep70;
        cout<<"\n\n      ...SE OBTUVO UN DISENO SEGURO..."; }
      else
        { cout<<"\n\n Es>Ep70, modificar el diseno(diam,LT,LC) desde la Resistencia
de Rejilla";
          } }
    else
      {cout<<"\n\n Em>Et70 por lo tanto se debe modificar el diseno (diam,LC,LR)";
        cout<<"\n\n Por Ejemplo:";
        cout<<"\n -----";
        cout<<"\n\n Si se aumenta 20 varillas de medida 7.5m";
        cout<<"\n al perimetro de la Rejilla de forma equidistante.";
        cout<<"\n\n ...Rediseando a partir de la resistencia de la Rejilla...";

float nvar;
float LC,LR,Lr;
cout<<"\n PASO 5 : RESISTENCIA DE LA REJILLA";
cout<<"\n ---- -";
cout<<"\n\n Ingrese la cantidad de varillas conductoras      = ";cin>>nvar;
cout<<" Ingrese la longitud de cada varilla conductora (m)= ";cin>>Lr;
LC=LT;
LR=nvar*Lr;
LT=LC+LR;
Rg=rs*(1/LT+(1/pow(20*A,0.5))*(1+1/(1+h*pow(20/A,0.5))));
cout<<"\n\n Rg.(ohm) = "<<Rg;

cout<<"\n\n PASO 6 : CORRIENTE MAXIMA DE REJILLA";
cout<<"\n ---- -";

```

```

cout<<"\n\n Consideramos la corriente calculada anteriormente ";
cout<<"\n\n PASO 7 : AUMENTO DEL POTENCIAL DE TIERRA";
cout<<"\n ---- -";
GPR=IG*Rg;
cout<<"\n\n GPR.(V)          = "<<GPR;
if(GPR<Et70)
    { cout<<"\n\n Se cumple GPR<Et70 "<<GPR<<" < "<<Et70;
      cout<<"\n\n No son necesarias mas evaluaciones";
      cout<<"\n\n      ...SE OBTUVO UN DISENO SEGURO..."; }
    else
    {cout<<"\n\n GPR>Et70 por lo tanto es necesario evaluar el Voltaje de Malla";
     cout<<"\n\n PASO 8 : VOLTAJE DE MALLA Y DE PASO";
     cout<<"\n ---- -";
     cout<<"\n\n Rejilla sin varillas, Kii          = "<<Kii;
     Kii=1;
     cout<<"\n\n Rejilla con varillas, Kii          = "<<Kii;
     Km=(1/(2*3.1415))*(log(D*D/(16*h*d)+(D+2+h)*(D+2+h)/(8*D*h)-
     h/(4*d)+(Kii/Kh)*log(8/(3.1415*(2*n-1)))));

     Em=rs*IG*Km*Ki/(LC+LR*(1.55+1.22*(Lr/pow(Lx*Lx+Ly*Ly,0.5)))));
     cout<<"\n\n EL VOLTAJE DE MALLA Em.(v) = "<<Em;
     Ks= (1/3.1415)*(1/(2*h)+1/(D+h)+1/D*(1-pow(0.5,n-2)));
     Es=rs*IG*Ks*Ki/(0.75*LC+0.85*LR);
     cout<<"\n\n EL VOLTAJE DE PASO Es.(v) = "<<Es;
     cout<<"\n\n Paso 9: Verificar que Em<Et70";
     cout<<"\n ---- -";

     if(Em<Et70)
     { cout<<"\n\n Se cumple Em<Et70, "<<Em<<" < "<<Et70;
       if(Es<Ep70)
       { cout<<"\n\n Paso 10: Verificar que Es<Ep70";
         cout<<"\n ---- -";
         cout<<"\n\n Se cumple Es<Ep70, "<<Es<<" < "<<Ep70;
         cout<<"\n\n      ...SE OBTUVO UN DISENO SEGURO..."; }
       else
       {cout<<"\n\n Es>Ep70, modificar el diseno(diam,LT,LC) desde la Resistencia de
       Rejilla";}}
     else
     {cout<<"\n\n No se cumple el Paso 9";
      cout<<"\n\n Se debe modificar el diseno(diam,LT,LC) hasta la Resistencia de
      Rejilla";}}}}
     cout<<"\n\n      ... FINAL DEL MODULO 2 ...";
     cout<<"\n\n";
     getch();
     }

```

CAPÍTULO VII

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISPERSIÓN

7.1 Necesidades usuales

Un buen SPT provee una baja resistencia hacia la tierra remota para minimizar el incremento de potencial a tierra. Para la mayoría de subestaciones de energía eléctrica de transmisión y otras más grandes, la resistencia a tierra es comúnmente de 1 Ω ó menos. En subestaciones de distribución más pequeñas, el rango que comúnmente se acepta es desde 1 Ω hasta 5 Ω , dependiendo de las condiciones del lugar.

7.2 Cálculos simplificados

Estimar la resistencia total hacia la Tierra remota es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño del SPT. La resistencia depende principalmente del área a utilizar, la cual se conoce comúnmente en la primera etapa del diseño. Como una primera aproximación, se puede estimar un valor mínimo de la resistencia en un suelo uniforme, por medio de la fórmula de una placa metálica circular a una profundidad cero:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (49)$$

Donde:

R_g : es la resistencia a tierra de la subestación de energía eléctrica en Ω .

ρ : es la resistividad del suelo en $\Omega.m$

A : es el área que utiliza la rejilla a tierra en m^2 .

A continuación, se puede obtener un límite superior de la resistencia a tierra de la subestación al agregar un segundo término en la fórmula (49), según Laurent [B66] y Niemann [B71].

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (50)$$

Donde:

L_T : es la longitud total de los conductores enterrados en metros.

En el caso de una rejilla con varilla en un suelo uniforme, una combinación de longitud de conductores horizontales y las varillas nos proporcionará el valor estimado de L_T , ya que las varillas normalmente son más efectivas en una longitud base en por unidad.

El segundo término reconoce el hecho de que la resistencia a tierra, que consiste en un número de conductores, es más grande que la resistencia de una placa sólida metálica. La diferencia disminuirá con el incremento de la longitud de los conductores enterrados y se aproximará a cero para L_T infinito, cuando se alcance la condición de una placa sólida.

Sverak [B80] amplió la ecuación (50) para tomar en cuenta la profundidad de la rejilla.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (51)$$

Donde:

h : es la profundidad de la rejilla en metros.

Para rejillas sin varillas, esta fórmula se ha probado y proporciona resultados que son prácticamente idénticos con los que se obtienen de la ecuación de Schwarz (55) [B77], que se describe en el tema de las ecuaciones de Schwarz.

La siguiente tabulación de Kinyon [B63] ofrece alguna idea de cómo se compara la resistencia que se ha calculado y la resistencia que se ha medido de cinco subestaciones diferentes. La ecuación 50 se utilizó para calcular la resistencia de rejilla (Tabla 7.1).

Un promedio de todos los valores que se midieron de la resistividad, frecuentemente, se sustituye por la resistividad de un suelo uniforme en la ecuación (50). Si se utiliza la resistividad promedio, la ecuación (50) comúnmente origina una resistencia que es más grande que el valor que resultaría de una medición directa de la resistencia. Los valores que se midieron y se calcularon de la resistencia, se muestran en la tabla 7.1 la cual no refleja esta tendencia, debido a que Kinyon [B63] fundamentó sus cálculos en el “valor promedio más bajo de la resistividad que se midió en ese lugar.”

Tabla 7.1 – Resistencias de rejilla típicas

Parámetro del suelo	Sub 1 Arena y Grava	Sub 2 Arenilla	Sub 3 Arena y Arcilla	Sub 4 Arena y Gravilla	Sub 5 Tierra y Arcilla
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	2000	800	200	1300	28
Área de rejilla (m^2)	1408	5660	1750	1464	5711
Longitud Enterrada (ft)	950	2895	541	1164	915
R_g (Ω calculado)	25,7	4,97	2,55	16,15	0,19
R_g (Ω medido)	39,0	4,10	3,65	18,20	0,21

7.3 Ecuaciones de Schwarz

Schwarz [B77] desarrolló el siguiente juego de ecuaciones para determinar la resistencia total de un SPT, en un suelo homogéneo que consiste de electrodos horizontales (rejilla) y verticales (varillas). Las ecuaciones de Schwarz se han ampliado aceptando las ecuaciones de un alambre horizontal recto para representar la resistencia a tierra R_1 , de una rejilla que consiste de conductores entrelazados y una esfera embebida en la tierra para representar varillas R_2 . Schwarz también introdujo una ecuación para la resistencia mutua a tierra R_m entre la rejilla y la cama de varilla.

Schwarz utilizó la siguiente ecuación, la cual introdujo Sunde [B79] y Rüdénberg [B76] para combinar la resistencia de la rejilla, varillas y la resistencia mutua a tierra, y de esta forma calcular la resistencia total R_g .

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_m} \quad (52)$$

Donde:

R_1 : es el valor de la resistencia a tierra de los conductores de rejilla en Ω .

R_2 : es el valor de la resistencia a tierra de todas las varillas en Ω .

R_m : es el valor mutuo de la resistencia a tierra entre el grupo de los conductores de rejilla R_1 , y el grupo de varillas R_2 , en Ω .

Resistencia a tierra de la rejilla:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_C} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_C}{a'} \right) + \frac{K_1 \cdot L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (53)$$

Donde:

ρ : es el valor de la resistividad del suelo en $\Omega \cdot m$

L_C : es el valor de la longitud total en m. de todos los conductores de rejilla a tierra.

a' : es $\sqrt{(a2h)}$ para todos los conductores que se entierran a profundidad "h" en m.

$2a$: es el valor del diámetro del conductor en metros.

A : es el área cubierta por los conductores en m^2 .

K_1 y K_2 : son los coeficientes [según figura 7.1]

Resistencia a tierra de la varillas de apoyo.

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n_R \cdot L_R} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2 \cdot K_1 \cdot L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (54)$$

Donde:

L_r : es el valor de la longitud de cada varilla en metros.

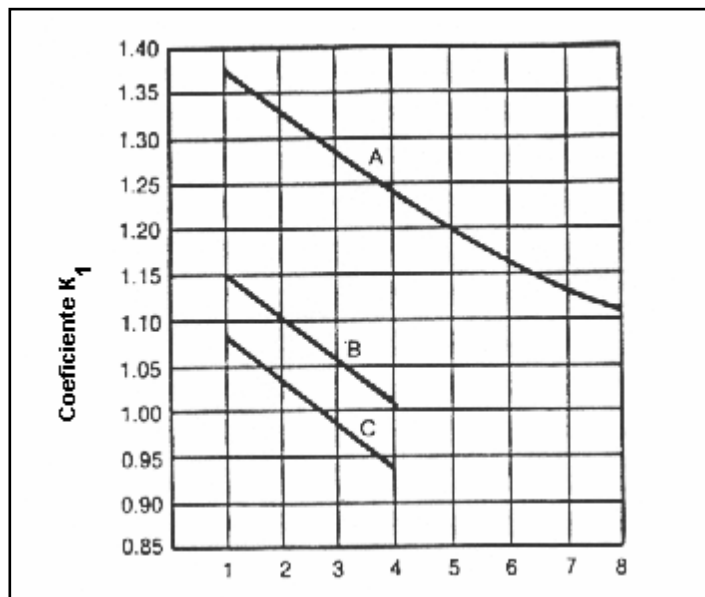
$2b$: es el diámetro de la varilla en metros.

n_R : es el número de varillas que se colocan en el área A.

Resistencia a tierra mutua entre la rejilla y las varillas de apoyo.

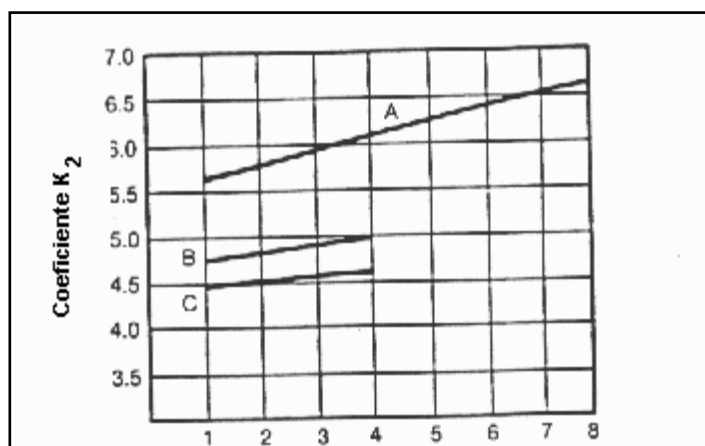
$$R_2 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_C} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_C}{L_r} \right) + \frac{K_1 \cdot L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (55)$$

La combinación de la resistencia a tierra de la rejilla y la cama de varilla será de menor valor que la resistencia a tierra de los componentes individuales, pero será de un valor más alto que las de una combinación en paralelo.



K1 : Eje x de la relación $\left(\frac{L_r}{h}\right)$

(a)



K2 : Eje x de la relación $\left(\frac{L_r}{h}\right)$

(b)

Figura 7.1 – Coeficientes K_1 y K_2 de la fórmula de Schwarz: (a) coeficiente K_1 , (b) coeficiente K_2 .

7.4 Notas sobre la resistencia de los electrodos principales.

En general, la resistencia a tierra de cualquier electrodo principal depende de la resistividad del suelo, el calibre y del tipo de arreglo de todos los conductores individuales que constituyen el electrodo a tierra. En arreglos más complejos que involucran alambres entrelazados y un gran número de varillas en la misma área, la resistencia mutua desarrolla un papel muy importante entre los elementos individuales.

7.5 Tratamiento del suelo para bajar la resistividad.

Comúnmente es imposible lograr la reducción que se desea en la resistencia a tierra al agregar más conductores de rejilla ó varillas. Una solución alterna efectiva es, incrementar el diámetro de los electrodos, al modificar el suelo alrededor del electrodo. La capa interna del suelo más cercana al electrodo, normalmente comprende la mayor parte de la resistencia a tierra del electrodo hacia la Tierra remota. Este fenómeno se utiliza como una ventaja, de la siguiente manera:

- El uso de cloruro de sodio, magnesio y sulfato de cobre ó cloruro de calcio incrementa la conductividad del suelo inmediatamente alrededor del electrodo. El estado o las autoridades encargadas no permiten este método porque se da una lixiviación (tratamiento del suelo con una sustancia compleja, para separar sus partes solubles de las insolubles.) en los alrededores. Además, el tratamiento de sal se debe renovar periódicamente.
- El uso de bentonita, una arcilla natural que contiene el mineral montmorillonita, el cual se formó por la acción volcánica hace muchos años. No es corrosivo, es estable y tiene una resistividad de 2,5 $\Omega \cdot m$ en una

humedad del 300%. La baja resistividad resulta principalmente de un proceso electrolítico entre el agua, Na_2O (soda), K_2O (potasio), CaO (lima), Mg (magnesia) y otras sales minerales que ionizan formando un electrolito fuerte con un rango de pH entre 8 y 10. Este electrolito se unirá gradualmente, como parte de la arcilla misma. Provista con una cantidad suficiente de agua, este incrementa hasta 13 veces su volumen seco y se adherirá a cualquier superficie que contacto. Debido a su naturaleza higroscópica, este actúa como un agente de secado que atrae cualquier humedad disponible del ambiente que lo rodea. La bentonita necesita agua para obtener y mantener sus características favorables. Su contenido de humedad inicial se obtiene en una instalación cuando se prepara la mezcla. Una vez esté instalado, la bentonita cuenta con la presencia de una humedad para mantener sus características. La mayoría de los suelos tienen suficiente humedad, por lo tanto, la resequedad no es un problema. La naturaleza higroscópica de la bentonita se aprovechará de la disponibilidad de agua para mantener su condición. Si se expone directamente a la luz solar, esta tiende a aislarse, previniendo que el proceso de resequedad penetre mucho más. Esto no podría funcionar en un ambiente totalmente seco, debido a que la mezcla se puede contraer y agrietarse; de esta manera pierde contacto con el electrodo, incrementando la resistencia del mismo. (Jones [B62]).

- Los electrodos de tipo químico consisten de un tubo de cobre lleno de sal. Los agujeros en el tubo permiten que entre humedad, disuelva la sal y que permita que la solución de sal llegue hacia el interior de la tierra. Estos

electrodos se instalan en agujeros y comúnmente se rellenan con un mejorador de suelo.

- Los materiales mejoradores de suelos, algunos con una resistividad menor de $0,12 \Omega \cdot m$ (más o menos el 5% de la resistividad de la bentonita), se colocan comúnmente alrededor de la varilla o alrededor de los conductores de la rejilla que se encuentran en una zanja, en una forma seca o en un compuesto pre-mezclado. Algunos de estos materiales son permanentes y no derramarán ningún químico dentro del planeta. Otros materiales mejoradores de suelos disponibles se mezclan con la tierra del lugar en diferentes cantidades y lo derramará lentamente en el suelo, disminuyendo su resistividad.

CAPÍTULO VIII

DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE MÁXIMA DE REJILLA

8.1 Definiciones

8.1.1 Compensación de corriente continua (DC offset): es la diferencia entre la onda simétrica de corriente y la onda real de corriente durante una condición transitoria del sistema de potencia. Matemáticamente, la corriente real de falla se puede separar en dos partes, una componente alterna simétrica y una componente unidireccional (CD). La componente unidireccional puede ser de cualquier polaridad, pero no cambia de polaridad y decrecerá a alguna velocidad predeterminada.

8.1.2 Factor de decremento: es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de SPT orientados con seguridad. Determina el equivalente RMS de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada, t_f tomado en cuenta para el efecto del "DC offset" inicial y su atenuación durante la falla.

8.1.3 Factor de división de la corriente de falla: es un factor que representa al inverso de la relación de la corriente simétrica de falla a la parte de la corriente que fluye entre la rejilla a tierra y en los alrededores del planeta.

$$S_f = \frac{I_g}{3 \cdot I_0} \quad (56)$$

Donde:

S_f es el factor de división de la corriente de falla.

I_g es el valor de la corriente simétrica de rejilla en amperios.

I_0 es la secuencia cero de la corriente de falla en amperios.

8.1.4 Corriente de rejilla máxima: es un valor de diseño de la corriente de rejilla máxima, se define como sigue:

$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (57)$$

Donde:

I_G : es la corriente de rejilla máxima en amperios.

D_f : es el factor de decremento de la duración completa de la falla en segundos.

I_g : es el valor RMS simétrico de la corriente de rejilla en amperios.

8.1.5 Reactancia Subtransitoria: es la reactancia de un generador al inicio de una falla. Esta reactancia se usa en los cálculos de la corriente de falla simétrica inicial. La corriente decrece continuamente, pero se asume que se llegará a estabilizar a este valor como en la primera etapa, tardando aproximadamente 0,05 segundos después de una falla.

8.1.6 Corriente simétrica de rejilla: es la parte de la corriente de falla a tierra simétrica la cual fluye entre la rejilla y la tierra circundante, esto se puede expresar como:

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad (58)$$

Donde:

I_g : es el valor RMS de la corriente de rejilla simétrica en amperios.

I_f : es el valor RMS de la corriente de falla a tierra simétrica en amperios.

S_f : es el factor de división de la corriente de falla.

8.1.7 Reactancia sincrónica: es la reactancia de estado estable de un generador durante las condiciones de falla que se utilizan para calcular la corriente de falla de estado estable. La corriente que se calcula excluye el efecto del regulador de voltaje automático.

8.1.8 Reactancia Transitoria: es la reactancia de un generador entre los estados subtransientes y síncronos. Esta reactancia se utiliza para el cálculo de la corriente simétrica de falla durante el periodo entre los estados subtransientes y estables. La corriente disminuye continuamente durante este periodo, pero se asume que es estable a este valor alrededor de los 0,25 segundos.

8.1.9 Relación X/R: es la relación entre la reactancia y la resistencia del sistema. Esto es un indicador de la disminución en el valor de cualquier compensación de DC. Un valor grande de X/R corresponde a una constante de tiempo grande y a una razón ó velocidad baja de su disminución.

8.2 Procedimiento.

En la mayoría de los casos, el valor más grande de la corriente de rejilla resultará en la condición más peligrosa. Para estos casos, se involucran los siguientes pasos para determinar el valor correcto de diseño de la corriente de rejilla máxima I_G , para utilizarlo en los cálculos de SPT de subestaciones de energía eléctrica:

a) Determinar la ubicación y el tipo de falla a tierra que es lo que probablemente produce grandes flujos de corriente entre la rejilla a tierra y en sus alrededores, y por consiguiente los incrementos más grandes de potencia a tierra y grandes gradientes de potencial superficial en el área de la subestación.

b) Determinar por medio de cálculos, el factor de división de la corriente de falla S_f , para las fallas que se seleccionaron en el literal a), y establecer los valores correspondientes de la corriente simétrica de rejilla.

c) Por cada falla, basándonos en su tiempo de duración t_f se determina el valor del factor de decremento D_f permitido para los efectos de asimetría de la onda de corriente de falla.

d) Seleccionar el valor más grande del producto $(D_f)(I_g)$ y por consiguiente la peor condición de falla.

8.3 Tipos de fallas a tierra.

En el sistema pueden ocurrir diferentes tipos de falla. Desafortunadamente, puede ser difícil determinar qué tipo de falla y que ubicación tendrá el flujo más grande de corriente entre la rejilla a tierra y sus alrededores debido a que no se aplica una regla específica. Desde la *figura 8.1* hasta la *figura 8.4* se muestra, la corriente máxima de rejilla I_G , para varias configuraciones del sistema y localizaciones de la falla.

Al determinar los tipos de falla aplicables, debemos considerar a la probabilidad de que ocurra la falla. No es necesario considerar múltiples fallas simultáneas, aunque puedan resultar en corrientes a tierra muy altas, si la probabilidad que ocurre es despreciable, pero se recomienda, por razones prácticas, que la investigación se limite a fallas de línea a tierra y de línea a línea a tierra.

En el caso de una falla línea a línea a tierra, la corriente de falla de secuencia cero se muestra en la siguiente ecuación (59):

$$I_o = \frac{E \cdot (R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1) \cdot [R_o + R_2 + 3R_f + j(X_o + X_2)] + (R_2 + jX_2) \cdot (R_o + 3R_f + jX_o)}$$

Donde:

I_o : es el valor RMS simétrico de la corriente de falla de secuencia cero en amperios.

E : es el valor del voltaje de fase-neutro en voltios.

R_f : es el valor de la resistencia estimada de la falla en ohmios (normalmente se asume $R_f = 0$).

R_1 : es la secuencia positiva de la resistencia del sistema equivalente en ohmios.

R_2 : es la secuencia negativa de la resistencia del sistema equivalente en ohmios.

R_0 : es la resistencia del sistema equivalente de la secuencia cero en ohmios.

X_1 : es la reactancia del sistema equivalente de la secuencia positiva en ohmios.

X_2 : es la reactancia del sistema equivalente de la secuencia negativa en ohmios.

X_0 : es la reactancia del sistema equivalente de la secuencia cero en ohmios.

Los valores R_1 , R_2 , R_0 , X_1 , X_2 y X_0 se calculan observando el sistema desde el punto de falla. En el caso de una falla simple de línea a tierra, la corriente de secuencia cero de la de falla es:

$$I_o = \frac{E}{3R_f + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (60)$$

En muchos casos, el efecto de los términos de la resistencia es insignificante en la ecuación (60). Para propósitos prácticos, las siguientes ecuaciones simplificadas son lo suficientemente precisas y convenientes.

La corriente de secuencia cero para una falla de línea-línea-tierra es:

$$I_o = \frac{(E)(X_2)}{X_1(X_0 + X_2) + (X_2 + X_0)} \quad (61)$$

La corriente de secuencia cero para una falla de línea-tierra es:

$$I_o = \frac{E}{(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (62)$$

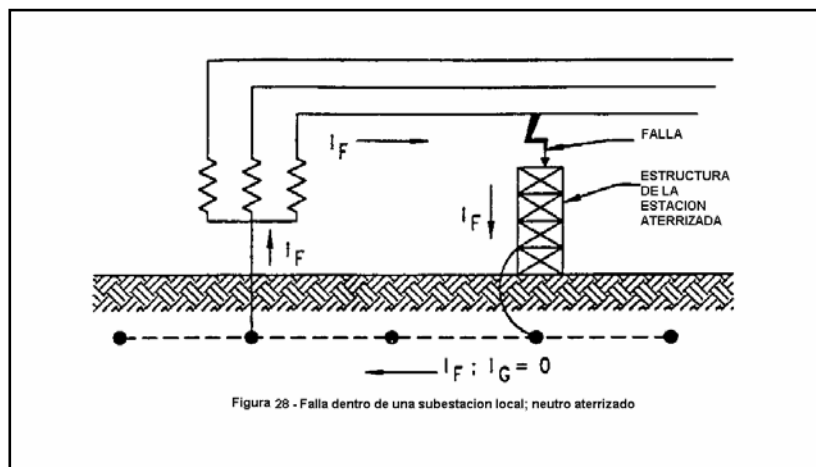


Figura 8.1 - Falla dentro del lugar de la subestación; descarga del neutro local.

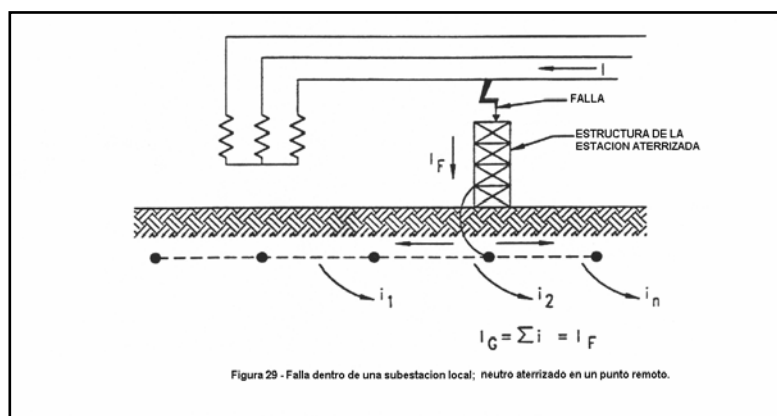


Figura 8.2 - Falla dentro del lugar de la subestación; descarga del neutro en un lugar remoto.

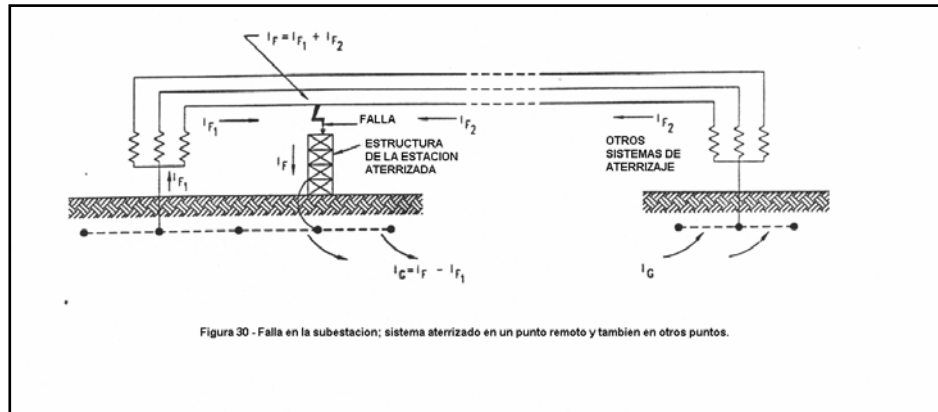


Figura 30 - Falla en la subestación; sistema aterrizado en un punto remoto y también en otros puntos.

Figura 8.3 - Falla en la subestación; descarga en la subestación local y en otros puntos del sistema.

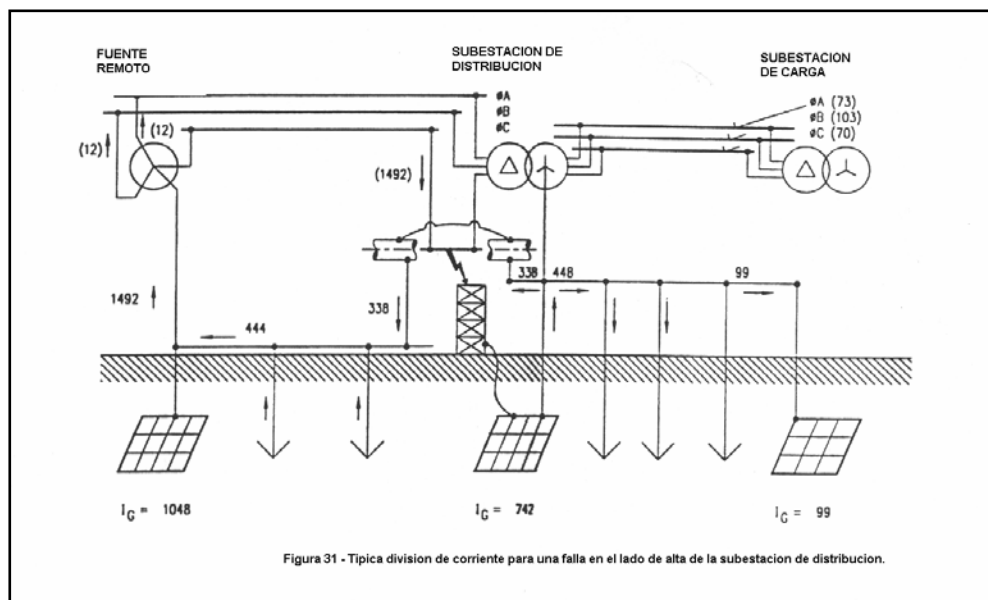


Figura 31 - Típica división de corriente para una falla en el lado de alta de la subestación de distribución.

Figura 8.4 – División de corriente típica para una falla del lado de alta de la subestación de distribución.

8.4 El efecto de la resistencia a tierra de la subestación

En la mayoría de los casos, es suficiente derivar la corriente máxima de rejilla I_G , tal como se mencionó anteriormente en el procedimiento y los tipos de falla a tierra, despreciando la resistencia del sistema, la resistencia a tierra de la subestación y la resistencia a la hora de la falla. El valor del error que se ingresa comúnmente es pequeño y está siempre a favor de la seguridad. Sin embargo, se pueden dar casos extraños, donde la resistencia a tierra de la subestación es tan grande, en relación a la reactancia del sistema, que vale la pena tener la resistencia en cuenta e incluirla dentro de la ecuación (59) o la ecuación (60) las cuales son más exactas. Esto representa un problema debido a que el sistema a tierra de la subestación aún no se ha diseñado y no se conoce su resistencia. Sin embargo, la resistencia se puede estimar utilizando las fórmulas que se mencionaron anteriormente en los cálculos simplificados y las ecuaciones de Schwarz. La resistencia que se estima generalmente nos da suficiente precisión para determinar la corriente I_g y por consiguiente I_G .

8.5 El efecto de la resistencia de falla.

Si la falla significa una ruptura del aislamiento dentro del lugar de la subestación, la única suposición segura es que la resistencia de la falla se asuma cero (ver desde *figura 8.1* hasta la *figura 8.4*).

En el caso de una falla que se dé fuera del área de la subestación, en una línea conectada al bus de la subestación (*figura 8.4*), es permisible, si se puede asignar un valor estimado (mínimo) de la resistencia de falla R_f , para utilizarlo en los cálculos de la corriente de falla a tierra. Esto se hace al multiplicar R_f por 3 y lo

agregamos a los términos de la otra resistencia tal como se indica en el denominador de la ecuación (59) y la ecuación (60). Sí, por consiguiente, la resistencia de falla real no se mantiene a un valor al menos tan grande como el de R_f utilizado en los cálculos, entonces debe ignorarse la resistencia de falla. Cualquier error al despreciar el valor de R_f , estará en el lado de seguridad.

8.6 Efecto del cable de guarda y del conductor neutro.

Cuando el cable de guarda o el conductor neutro de las líneas de transmisión se conectan a la rejilla de la subestación, una parte considerable de la corriente de falla a tierra se desvía lejos de la rejilla de la subestación. Cuando existe este tipo de situación se debe considerar para el diseño de la rejilla de tierra, el cable de guarda o el conductor neutro.

Al conectar a la rejilla de la subestación el cable de guarda o el conductor neutro, ó ambos y ellos a su vez hacia las estructuras de líneas de transmisión o postes de distribución, regularmente tendrá un efecto de incrementar el gradiente de potencial en las bases de las torres, mientras se reduce en la subestación. Esto se debe a que cada torre que se encuentra cerca de la subestación compartirá el incremento del GPR en cada incremento de voltaje de la plataforma de la subestación, cualquiera que sea la causa, en lugar de afectarse solo por una falla aislada en el lugar o por una descarga disruptiva en una de la torres. Por el contrario, cuando ocurre una falla en una torre, el efecto del SPT debe disminuir la magnitud de los gradientes cercanos a la base de la torre.

8.7 Efecto de tuberías y cables enterrados directamente.

Cables enterrados con sus forros o armaduras en contacto efectivo con la tierra, y tuberías metálicas enterradas tendrán de alguna forma un efecto similar cuando se unan al SPT de la subestación, pero más allá de su perímetro. Ya que al dirigir parte de la corriente de falla a tierra lejos de la subestación, se reducirá de alguna forma el aumento de potencial de la rejilla durante la falla y los gradientes del lugar en la subestación.

Debido a la complejidad y a las incertidumbres en el patrón del flujo de corriente, normalmente el efecto es difícil de calcular. Algunas directrices para el cálculo de la impedancia de entrada de la trayectoria de la corriente como tal alejándose de la subestación lo suministra Rudenberg [B75] y Laurent [B66]. Un estudio más reciente de este tipo de problema se presentó en el EPRI EL-904 [B51], el cual provee métodos para calcular la impedancia tanto para tuberías en la superficie como para tuberías enterradas. Se puede determinar de estos valores un cálculo aproximado de la división de la corriente a tierra entre esas trayectorias, el SPT de la subestación y cualquier alambre elevado que esté conectado a tierra.

8.8 Peores tipos de fallas y ubicación.

El peor tipo de falla en un SPT es comúnmente el que resulta en el valor más alto de la corriente máxima de rejilla I_G . Debido que, la corriente es proporcional a la secuencia cero o a la corriente de falla a tierra y al factor de división de la corriente, y debido a que la división de corriente es casi independiente del tipo de falla, el peor tipo de falla se puede definir como el único resultado de la alta secuencia cero o el flujo de la corriente de falla hacia el planeta $3.I_0$. En un lugar específico, una falla simple de línea a tierra será el peor tipo si $Z_1 Z_0 > Z_2^2$ en el punto de falla y la falla

línea a línea a tierra será el peor tipo de falla si $Z_1 Z_0 < Z_2^2$. En el caso frecuente donde Z_2 se asume igual a Z_1 , las comparaciones antes mencionadas se reducen a $Z_0 > Z_1$ y $Z_0 < Z_2$; Z_1, Z_2 y Z_0 se define como:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (63)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (64)$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (65)$$

La pregunta que si la ubicación de la falla produce la corriente máxima de rejilla I_G , involucra muchas consideraciones. La peor ubicación de la falla también se puede dar en el lado de alto voltaje o en el lado de bajo voltaje y en cualquiera de los casos puede ser también dentro de la subestación o exterior sobre una línea, a cierta distancia de la subestación. Una falla se clasifica como dentro de la subestación si se relaciona con una estructura metálica que esta eléctricamente conectada a la rejilla a tierra de la subestación a través de una impedancia insignificante. No hay reglas universales para determinar la localización de la peor falla. La siguiente discusión relaciona algunas, pero no significa todas las posibilidades.

Para las subestaciones de distribución con el transformador conectado al SPT sólo en el lado de distribución, la corriente máxima de rejilla I_G comúnmente ocurre de una falla a tierra en los terminales del lado de alta del transformador. Sin embargo, si el origen de la corriente de falla a tierra es débil en el lado de alta o si una operación en paralelo de varios transformadores resultan en una fuente de corriente

de falla a tierra grande en el lado de baja, se puede dar la corriente máxima de rejilla para una falla a tierra en cualquier parte del circuito de distribución.

Para fallas a tierra en los terminales del lado de baja de un transformador secundario conectado al SPT, la contribución de los transformadores a la falla, circula en el conductor de la rejilla de la subestación con una fuga de corriente insignificante hacia el planeta y así, no tiene un efecto en el aumento de potencial a tierra (ver *figura 8.1*).

Para fallas a tierra fuera de la subestación en un alimentador de distribución (lo suficientemente lejos para ser una tierra remota con respecto a la rejilla de la subestación), una gran parte de la corriente de falla regresará a su origen (el transformador neutro) a través de la rejilla de la subestación, así contribuirá al aumento del potencial de tierra de la subestación.

En subestaciones de transmisión con transformadores de tres devanados o auto transformadores, el problema es más complejo. Puede ocurrir la corriente máxima de rejilla I_G por una corriente de falla ya sea en el lado de alta o de baja del transformador; se deben estudiar ambas situaciones. En cualquiera de los casos, se puede asumir que la ubicación de la peor falla es en los terminales del transformador dentro de la subestación, si la contribución del sistema a la corriente de falla es más grande que la de los transformadores de la subestación. Contrario a esto, la ubicación de la peor falla puede ser fuera de la subestación en una línea de transmisión, si predomina la contribución del transformador.

Claro que existen excepciones a las generalidades vistas anteriormente. Por lo tanto, se deben considerar para un sistema específico varias ubicaciones de falla para la corriente máxima de rejilla. Por cada elección, se debe establecer el valor que se aplica de la corriente de secuencia cero I_0 (corriente de falla a tierra).

En pocos casos, surge una complicación adicional. La duración de la falla depende en el tipo de protección que se utilizó, la ubicación de la falla y la alternativa de usar los tiempos de limpieza principales o de respaldo para la duración de la falla (golpe eléctrico). La duración de la falla no solamente afecta el factor de decremento, D_f también afecta a los voltajes tolerables. Si el tiempo de limpieza e falla, para una falla en particular es relativamente grande, los voltajes tolerables correspondientes se pueden reducir a valores que hagan que esta condición de falla sea el peor caso, aunque para este caso la corriente de rejilla no sea el valor máximo. Este caso ocurre donde un transformador Delta- Estrella conectado al SPT se alimenta de una fuente relativamente débil de corriente de falla y la falla ocurra a cierta distancia debajo del alimentador de distribución rural. En este caso, la corriente de falla del lado de alta (Delta) puede ser relativamente baja y las fallas del alimentador del lado de baja (Estrella conectado al SPT) se determinan principalmente por las impedancias del transformador y el alimentador. Si se considera el respaldo de limpieza, una falla en el alimentador muchos kilómetros lejos de él, depende del dispositivo de limpieza del lado de alta para respaldar la falla en el disyuntor del alimentador, la cual tomará muchos segundos para poder limpiar la falla. El voltaje tolerable para este caso puede ser significativamente más bajo que para la falla en el lado de alta, haciendo la falla del alimentador del lado de baja el peor caso para el diseño de la rejilla. Así, se debe tomar en cuenta el tipo y lugar de la peor falla, no

solo el máximo valor de la corriente de rejilla I_G , sino también los voltajes tolerables que se basan en el tiempo de limpieza de falla.

8.9 Cálculo de la división de corriente.

Para la suposición de un flujo sostenido de la corriente de falla a tierra inicial, la corriente simétrica de rejilla se expresa de la siguiente forma:

$$I_g = S_f \cdot (3 \cdot I_0) \quad (66)$$

Para determinar I_G , se debe calcular el factor de división de corriente S_f .

El proceso de cálculo consiste en derivar la representación equivalente de los cables de guarda, neutros, etc. conectados a la rejilla y luego se soluciona el equivalente para determinar que fracción del total de la corriente de falla que circula entre la rejilla y el planeta, y que fracción circula a través de los cables a tierra o neutros S_f depende de muchos parámetros, los cuales son:

- El lugar de la falla.
- La magnitud de la impedancia de la rejilla de la subestación.
- Las tuberías enterradas y los cables en las cercanías de o directamente conectadas a la rejilla de la subestación.
- Los cables de guarda, neutros u otras trayectorias de retorno a tierra.

Debido a S_f , la corriente simétrica de rejilla I_g , y por lo tanto, también I_G , están relacionados de una manera muy cercana al lugar de la falla.

Esto solamente se refiere a cables de guarda y a conductores neutros, aunque los principios que se involucran también aplican a las tuberías enterradas, cables o cualquier otra trayectoria de circulación conectada a la rejilla. Las líneas de transmisión de alto voltaje son comúnmente provistas con cables estáticos aéreos, a lo largo de su longitud o para distancias cortas entre cada subestación. Estas deben conectarse al SPT en cada torre a lo largo de la línea o se pueden aislar de las torres y utilizarse para propósitos de comunicación. Hay muchas fuentes que proveen ayuda para determinar la impedancia efectiva de un cable estático desde el punto de la falla (Carson[B17]; Clem[B19];EEI y sistemas telefónicos Bell[B20]; CCITT Study Group V[B24];Desieno, Marchenko y Vassel[B43];Laurel [B66]; Patel [B73]; y Verna y mukhedkar [B87]). Sin embargo, muchos de estos métodos pueden ser difíciles para aplicar por la ingeniería de diseño. Ya que esta fuera del alcance del presente trabajo tratar detalladamente la aplicación de cada método en todas las configuraciones posibles, solo se dará una breve descripción de los métodos más recientes.

Endrenyi [B49][B47] presenta una aproximación en el cual, para una serie de spans idénticos, las impedancias de las torres o los cables de guarda se reducen a una impedancia equivalente. Excepto para los propósitos que se estiman, Endreyi recomienda incluir los mutuos entre los conductores múltiples e introduce un factor de acoplamiento que tenga en cuenta la impedancia mutua entre los conductores neutros y los conductores de fase.

En el método de matriz de cascada de Sebo [B78], se deriva una matriz de impedancias para cada span2 de la línea y las matrices span3 individuales están en cascada dentro de una matriz resultante que representa la línea entera. Esta técnica permite a una persona tomar en cuenta las impedancias propias, las impedancias mutuas, la ubicación y el tipo de falla. Se sugiere una corrección para los efectos finales de la línea, utilizando un factor de protección modificado.

Con algunas limitaciones en la aplicación y la precisión, la técnica de cálculo span4 por span5 se puede simplificar considerablemente. Una aproximación típica, en la cual se ignoran todos los acoples mutuos entre el conductor neutral y los conductores de fase y entre los conductores neutrales, lo describe Garret [B57]. En esta técnica, cada conductor neutro es ejemplificado por la impedancia de cada span6 y la impedancia equivalente de cada torre para formar una red que parece una escalera. Esta red de escalera se reduce entonces, al utilizar técnicas de reducción de red simple, para una impedancia de entrada como se vé desde el punto de falla. La impedancia de entrada de cada circuito se combina con la resistencia a tierra y tres veces este valor resultante se incluye en la secuencia cero de la impedancia de falla equivalente. El factor de la división de corriente S_f se calcula al aplicar la ley de las corrientes de Kirchoff para obtener la división de corriente entre la resistencia de rejilla y la impedancia de entrada de cada circuito. Aunque esto ó las aproximaciones similares, se limitan en aplicación y precisión, en muchos casos se provee una estimación razonable de la influencia de los cables de guarda y los neutros en la resistencia del SPT y la relación de la división de corriente.

Dawalibi [B31] provee algoritmos para derivar ecuaciones simples para resolver las corrientes en las rejillas y en cada torre. Estas ecuaciones se obtienen de uno o ambos extremos de cada línea y no demanda grandes requerimientos de almacenaje de una computadora de las técnicas que modela cada span⁷ en forma individual. Dawalibi también dirige los efectos de la estructura del suelo (que son, las resistividades de múltiples capas) en las impedancias propias y las impedancias mutuas de los conductores y en la relación de la división de corriente.

Meliopoulos y otros [B68] introdujeron un conductor equivalente para representar los efectos del planeta utilizando la fórmula de Carson. Cada span⁸ en cada línea se modela y la red que resulta se resuelve por flujos de corriente. A partir de esta solución, se calcula la relación de la división de corriente. El número de líneas y las subestaciones diseñadas se limitan solo por la computadora que se utiliza para resolver la red (EPRITR-100622[B55]).

Garret y Patel [B58] utilizan el método de Meliopoulos [B68] para realizar un análisis paramétrico de los parámetros que afectan a S_f y para desarrollar un juego de curvas de S_f vs. la resistencia de la rejilla para algunos de los parámetros más críticos. Esto provee un método rápido y sencillo para estimar la división de corriente que evita la necesidad de algunas suposiciones simplificadas de otros métodos de aproximación, como si los resultados son solo aproximaciones.

Obviamente, las técnicas que modelan los cables estáticos, conductores de fase, torres, etc., darán en detalle la mejor evaluación del factor de división de corriente S_f . Sin embargo, los métodos de aproximación que se discutieron en los

párrafos anteriores se han comparado con los métodos detallados y se encontraron respuestas que se pueden comparar con muchos ejemplos sencillos. Así, la elección del método que se utilizó para determinar S_f dependerá de la complejidad del sistema que se conecta a la subestación y el grado de precisión que se desea.

8.10 Efecto de la asimetría

En el diseño de una rejilla a tierra se debe considerar la corriente asimétrica. Un factor de decremento, D_f se derivará para tomar en cuenta el efecto de la compensación de DC offset. En general, la corriente asimétrica de falla incluye los subtransientes, transientes y componentes de estado estable de AC y la componente de la compensación de DC. Ambos componentes de AC transientes y subtransientes como el componente de compensación de DC decaen exponencialmente, teniendo cada uno un porcentaje diferente de atenuación.

Sin embargo, para aplicaciones comunes del presente trabajo, se asume que la componente de AC no decae con el tiempo, sino permanece en su valor inicial. Así, como una función periódica del tiempo “ t ”, la corriente asimétrica de falla se expresa de la siguiente forma:

$$i_{f(t)} = \sqrt{2} \cdot E \cdot Y_{ac} [\text{sen}(wt + \alpha - \theta) - e^{-t/T_a} \cdot \text{sen}(\alpha - \theta)] \quad (67)$$

Donde:

$i_{f(t)}$: es el valor de la corriente asimétrica de falla, en amperios, en cualquier instante “ t ”, donde “ t ” está en segundos.

E : es el voltaje RMS de la prefalla en voltios, línea a neutro.

ω : es la frecuencia del sistema en radianes / segundos.

α : es el ángulo del voltaje de la corriente de iniciación en radianes.

θ : es el ángulo de fase del circuito en radianes.

Y_{ac} : es la admitancia del sistema equivalente de AC en mhos.

T_a : es el valor de la constante de tiempo de la compensación de DC en segundos

$$[T_a = X/(\omega R), 60 \text{ Hz}; T_a = X/(120\pi R)]$$

La relación X/R que se utiliza, es la porción X/R del sistema en el lugar de la falla para un tipo de falla dado. Las componentes X y R de la impedancia de falla del sistema subtransiente deben utilizarse para determinar la porción de X/R.

En la realidad, las fallas ocurren rara vez con respecto a las ondas de voltaje. Sin embargo, la descarga al contacto existe en el momento que inicia la falla. De aquí que, para permitir las condiciones más severas, es necesario asumir que la compensación máxima de DC posible se presenta en el momento de una descarga accidental.

La compensación máxima ocurre cuando $(\alpha - \theta) = -\pi/2$

Entonces la ecuación (67) cambia a la siguiente ecuación:

$$i_{f(t)} = \sqrt{2} \cdot E \cdot Y_{ac} [e^{-t/T_a} - \cos(\omega t)] \quad (68)$$

Ya que, los datos experimentales en el umbral de fibrilación se basan en el contenido de energía de una onda seno simétrico de amplitud constante, es necesario establecer un valor RMS equivalente de la onda de corriente asimétrica

para el tiempo máximo de exposición posible a la descarga. Este valor, de acuerdo con la definición de la corriente asimétrica de falla efectiva I_F , puede determinarse por la integración de la ecuación (68).

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (69)$$

Donde:

I_F : es el valor RMS efectivo de la corriente asimétrica de aproximación para duración total de la falla en amperios.

t_f : es el tiempo de duración de la falla en segundos.

t : es el tiempo (variable) después de la iniciación de la falla en segundos.

Al evaluar la integral de la ecuación (69) en términos de la ecuación (68) obtenemos.

$$I_F = I_f \cdot \sqrt{\frac{2}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (70)$$

Por lo tanto, el factor de decremento D_f se determina por la relación I_F/I_f , dando lugar a:

$$D_f = \frac{I_F}{I_f} \quad (71)$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-2.t_f/T_a})} \quad (72)$$

La ecuación (72) se puede utilizar para calcular el factor de decremento para las relaciones específicas de X/R y las duraciones de falla. Los valores comunes del factor de decremento para diferentes duraciones de fallas y relaciones X/R se muestran en la *tabla 8.1*.

Para duraciones de fallas relativamente grandes, el efecto de la compensación de DC se puede asumir que está más que compensado por la disminución de la componente subtransitoria de AC. Un factor de decremento de 1,0 se puede utilizar para duraciones de fallas de 30 ciclos o más.

Para descargas sucesivas a intervalos pequeños (posiblemente en los recierres) se sugiere calcular un factor de decremento utilizando la duración de falla más pequeña, aunque el tiempo t_f utilizado en otros cálculos se base en la suma de la duración individual de descarga. Sin embargo, la discusión anterior del factor de decremento de la corriente asimétrica de falla sugiere que se utilice la duración de falla más corta en conjunto con la duración de la descarga más grande, o la suma de las duraciones de descarga, pueden resultar en un SPT sobre diseñado. Esto es especialmente cierto para fallas de duración intermedia (que es, de 6 a 30 ciclos), donde el factor de decremento es relativamente grande y se asume la componente de corriente alterna para permanecer en su valor subtransitorio. Crawford y Griffith [B22] sugieren que la duración de la descarga y la duración de la falla se deben asumir iguales, la cual resultará en un diseño de rejilla suficiente para casos que involucran recierres no automáticos o descargas sucesivas (alta velocidad). Sin embargo, debido a que se han hecho o no pequeñas pruebas en los efectos de las descargas sucesivas separadas por unos pocos ciclos, el ingeniero de diseño debe juzgar si se debe utilizar o no la duración de descarga más grande para un tiempo t_S .

en otros cálculos y, la duración de la falla más corta para un tiempo t_f para calcular el factor de decremento con la ecuación (72).

Es importante que los valores del factor de decremento que se muestran en la *tabla 8.1* no se confundan con los factores de multiplicación. El factor de decremento es D_f y se utiliza para determinar la corriente efectiva durante un intervalo de tiempo determinado después del inicio de una falla, mientras que los factores de multiplicación se utilizan para determinar la corriente RMS al final de este intervalo. Ya que de la disminución de las componentes transitorias de AC y DC con el tiempo, los factores de decremento que se determinaron por medio de la ecuación (72) son un poco más altas que los factores para la fallas y duraciones de descarga cortas.

Tabla 8.1 - Valores típicos de D_f .

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

8.11 Efecto de los cambios futuros.

Es una práctica común en ciertos lugares, para corrientes máximas de falla incrementar la capacidad del sistema agregando o haciendo nuevas conexiones a la rejilla. Mientras, un aumento en la capacidad del sistema incrementará la corriente máxima de falla que se desea I_F nuevas conexiones pueden aumentar o disminuir la corriente máxima de rejilla I_G .

Un caso en el cual la corriente de rejilla puede disminuir con las nuevas conexiones es cuando se añaden nuevas líneas de transmisión con cables puesta a tierra, neutros o ambos. En general, si no se incluye un margen para el aumento de I_G en el diseño original del SPT, el diseño puede llegar a ser peligroso. También, adiciones subsecuentes serán comúnmente mucho menos convenientes y más caras. Esta práctica se ha aceptado ampliamente para asumir la corriente de falla total I_F entre la rejilla y los alrededores del planeta (ignorando cualquier división de corriente) en un intento para permitir el incremento del sistema. Mientras, esta suposición sea excesivamente pesimista para condiciones del presente año, este no debe exceder la corriente I_G que se calculó, considerando la división de corriente y el incremento del sistema.

Si el incremento del sistema se toma en cuenta y se ignora la división de corriente, el resultado será una rejilla sobre diseñada. Un estimado de las condiciones futuras del sistema se obtiene al incluir todas las adiciones del sistema que se han pronosticado.

Se debe tener precaución cuando cambios futuros involucren cambios del diseño, como la desconexión de los cables de guarda que llegan a las subestaciones de

energía eléctrica. Tales cambios pueden tener un efecto en las corrientes de falla a tierra y puede resultar en un SPT inadecuado. Sin embargo, los cambios futuros como la adición de cables de guarda que llegue a la subestación, pueden disminuir la relación de la división de corriente, lo que resultaría un SPT sobre diseñado.

CAPÍTULO IX

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO SEGURO DE SISTEMAS PUESTA A TIERRA

9.1 Criterios de diseño.

Como se mencionó en el problema básico de la seguridad en el diseño del SPT, existen dos objetivos fundamentales que se deben lograr tanto en condiciones normales como de falla. Estos objetivos son:

- Proporcionar medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de los equipos.

- Asegurarse que cualquier persona en las cercanías de las instalaciones conectadas al SPT no se exponga al peligro de un golpe eléctrico.

Los procedimientos de diseño que se describen en las siguientes sub-cláusulas están dirigidos para lograr la protección de los voltajes peligrosos de toque y de paso dentro de una subestación de energía eléctrica. Se indicó en las situaciones típicas de choque (capítulo 8.2) que para potenciales transferidos, es posible exceder el GPR de una subestación durante las condiciones de falla. De esta manera, el procedimiento de diseño descrito acá se basa en asegurar la seguridad ante voltajes de paso y de toque peligrosos dentro e inmediatamente fuera del cerco de la subestación. Debido a que el voltaje de malla es, normalmente, el peor voltaje

de toque posible dentro de la subestación (excluyendo potenciales transferidos), éste se utilizará como la base del procedimiento de diseño.

Los voltajes de paso son inherentemente menos peligrosos que los voltajes de malla. Sin embargo, si la seguridad dentro del área del SPT se logra con la ayuda de una capa superficial de alta resistividad (material superficial), la cual no se extienda fuera de la cerca, entonces los voltajes de paso pueden ser peligrosos. En cualquier caso, el voltaje de paso que se calculó se debe comparar con el voltaje de paso permisible después de diseñarse la rejilla satisfaciendo el criterio del voltaje de toque.

Para rejillas a tierra igualmente espaciadas, el voltaje de malla se incrementará a lo largo de las mallas desde el centro hasta la esquina de la rejilla. El rango de este incremento dependerá del tamaño de la rejilla, número y localización de las barras a tierra, el espacio de los conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores, y la resistividad del contorno del suelo. En el estudio de tres rejillas típicas a tierra en un suelo con resistividad uniforme, se obtuvieron los valores de la *tabla 9.1*. A estas rejillas se les dió una forma simétrica cuadrada, sin barras a tierras e igual espaciamiento entre conductores paralelos. La esquina E_m fue calculada en el centro de la esquina de la malla. El peor caso sucede cuando E_m está un poco fuera del centro (hacia la esquina de la rejilla), pero es solamente un poco más alto que E_m al centro de la malla.

Como se indica en la *tabla 9.1* el voltaje de la esquina de la malla es mucho más alto que el del centro de ella. Eso será cierto al menos que la rejilla sea asimétrica (con salientes, en forma "L", etc.), tenga barras a tierra que se ubican en o cerca de

su perímetro, o tenga espaciamentos completamente no uniformes entre conductores. De cualquier manera, en la ecuación para el voltaje de malla E_m que se darán en el cálculo de los voltajes máximo de malla y de paso (capítulo 15.5), solamente se utiliza como base para el procedimiento de diseño, el voltaje de malla al centro de la esquina de la malla. Algunos análisis que se basan en programas de computadora, que se describen en “El uso del análisis de computadora en el diseño de rejilla” (capítulo 15.8), se puede utilizar este valor aproximado de voltaje de malla en la esquina; el valor real del voltaje de malla en las esquinas, o el valor real del peor caso de voltaje de toque encontrado en cualquier lugar dentro del área del SPT como base del procedimiento de diseño. En cualquier caso, el criterio inicial para un diseño seguro es limitar la malla que se cálculo ó el voltaje de toque para bajar el voltaje de toque tolerable de la ecuación (32) o la ecuación (33).

A menos que se especifique de otra manera, se utilizará el término voltaje de malla (E_m) para designar el voltaje de toque al centro de la esquina de la malla. De cualquier manera, el voltaje de malla puede no ser el peor caso de voltaje de toque, si las barras a tierra se encuentran localizadas cerca del perímetro, o si el espaciamento de la malla cerca de perímetro es pequeño. En estos casos, el voltaje de toque en la esquina de la rejilla puede sobrepasar el voltaje de malla de la esquina.

Tabla 9.1 – Relación típica de voltaje de malla de esquina a esquina

Numero de Rejilla	Número de Mallas	E_m esquina/centro
1	10 x 10	2,71
2	20 x 20	5,55
3	30 x 30	8,85

9.2 Parámetros Críticos

Los siguientes parámetros sitio-dependientes se buscaron para tener un impacto considerable en el diseño de la rejilla: Corriente máxima de rejilla I_G , duración de la falla t_f , duración de la descarga t_s , resistividad del suelo ρ , resistividad del material de superficie ρ_s , y la geometría de la rejilla. Muchos parámetros definen la geometría de la rejilla, pero el área del SPT, el espaciamiento del conductor, y la profundidad de la rejilla a tierra son los que tienen mayor impacto en el voltaje de malla, mientras los parámetros como el diámetro del conductor y el espesor del material superficial tienen menor impacto. (Dawalibi, Bauchard y Mukhedkar [B37]; Dawalibi y Mukhedkar [B35]).

9.2.1 Corriente máxima de rejilla (I_G)

La evaluación del valor máximo de diseño de una corriente de falla a tierra que fluye dentro de la tierra a través de la rejilla de la subestación, I_G , se trató en el Cap. 8 "Determinación de la corriente máxima de rejilla". Para determinar la corriente máxima I_G , por medio de la ecuación (57) debemos tener en cuenta la resistencia de la rejilla a tierra, la división de la corriente de falla a tierra entre las diferentes trayectorias de retorno y la rejilla, y el factor de decremento.

9.2.2 Duración de la falla y duración de la descarga

La duración de la falla y la duración de la descarga se asumen normalmente iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de descargas sucesivas, tal como los recierres. La selección de t_f , debe reflejar un tiempo rápido de limpieza para subestaciones de transmisión y tiempos de limpieza lentos para subestaciones de distribución e industriales. La selección de t_f y t_s resultan en la combinación más

pesimista del factor de decremento de corriente de falla y la corriente permisible por el cuerpo humano. Los rangos más comunes para t_f y t_S están entre 0,25 a 1,0 s.

9.2.3 Resistividad del suelo (ρ)

La resistencia de la rejilla y el gradiente de voltaje dentro de una subestación son directamente dependientes de la resistividad del suelo. Debido a que en realidad la resistividad del suelo varía tanto horizontalmente como verticalmente, debemos reunir suficiente información del área de la subestación. De acuerdo a las mediciones de la resistividad (capítulo 4.2.3) el método de Wenner es el más ampliamente utilizado.

Debido a que las ecuaciones para E_m y E_S proporcionadas en el Cap. 9.5 “Cálculo de los voltajes de escalón máximo y de malla” asumen un suelo con resistividad uniforme, estas pueden emplear solamente un único valor para la resistividad.

9.2.4 Resistividad de la capa superficial (ρ_s)

Una capa de material superficial ayuda a limitar la corriente corporal añadiendo resistencia a la resistencia corporal equivalente.

9.2.5 Geometría de la rejilla.

En general, la limitación de los parámetros físicos de una rejilla a tierra se basa en las limitantes económicas y físicas de la instalación. La limitación económica es obvia. Es impráctico instalar una placa de cobre como un SPT. Entre las limitaciones que se encuentran en la instalación de una rejilla podemos mencionar por ejemplo cuando se excavan las zanjas en las cuales se pondrá el conductor, se limita el espacio del mismo a aproximadamente 2 metros o más. Los rangos comunes para

el espaciamiento de los conductores son de 3 a 15 metros, mientras el rango de profundidad promedio de la rejilla es de 0,5 a 1,5 metros. El voltaje de malla tiene un efecto insignificante para los conductores que se encuentran entre 67 mm^2 y 253 mm^2 . El área del SPT es simplemente el factor geométrico más importante para determinar la resistencia de la rejilla. Entre más grande es el área del SPT, más baja será la resistencia de la rejilla, por lo tanto, el valor del GPR será menor.

9.3 Índice de parámetros de diseño.

La *tabla 9.2* contiene un resumen de los parámetros de diseño utilizados en el procedimiento de diseño.

9.4 Procedimiento de diseño

El diagrama de bloques de la *figura 9.1* ilustra la secuencia a seguir. Los parámetros que se muestran en la *figura 9.1* se identifican en la *tabla 9.2*. A continuación detallamos el procedimiento:

- **Paso 1:** El mapa apropiado y el plano general de la localización de la subestación nos deben dar un buen estimado del área a ser utilizado para el SPT. Un estudio de la resistividad del suelo, que se describe en la estructura del suelo y selección del modelo de suelo (capítulo 4.2), determinará el perfil de la resistividad y el modelo de suelo que se necesite (esto es, modelo uniforme ó modelo de dos capas).

- **Paso 2:** El calibre del conductor se determina por las ecuaciones presentadas en los factores del tamaño de conductores (capítulo 3.7.3). La corriente de falla $3.I_0$ debe ser la corriente máxima de falla esperada en un futuro, la cual será conducida por medio de cualquier conductor del SPT, y el tiempo t_C , deberá reflejar el tiempo máximo de limpieza (incluyendo el respaldo ó protecciones).

- **Paso 3:** Los valores tolerables de toque y de paso se determinan por las ecuaciones que se proporcionaron en el criterio del voltaje tolerable (Cap. 2.5.3 y 2.5.4). La selección del tiempo, t_S , se basa en el juicio del ingeniero de diseño, guiándose con los capítulos 2.2.2 – 2.3.3.

- **Paso 4:** En el diseño preliminar incluirá un lazo conductor que rodee toda el área del SPT, además adecuar conductores cruzados para suministrar un acceso conveniente. Los estimados iniciales del espaciamiento entre conductores y ubicación de las varillas se basan en la corriente I_G y el área del SPT.

- **Paso 5:** Los estimados de la resistencia preliminar del SPT en suelo uniforme se determinará por las ecuaciones que se proporcionaron en los cálculos simplificados y las ecuaciones de Schwarz (capítulo 7.2 y 7.3). Para el diseño final, es deseable tener estimaciones mucho más precisas. Un análisis computarizado que se basa en modelar los componentes del SPT a detalle, puede calcular la resistencia con un alto grado de precisión, asumiendo que el modelo de suelo se escoja correctamente.

- **Paso 6:** La corriente I_G se determina por las ecuaciones que se proporcionan en la determinación de la corriente máxima de rejilla (capítulo 8). Para prevenir un sobre diseño del SPT se tomara en cuenta, para el diseño de la rejilla, solamente la porción de la corriente de falla $3.I_0$ que fluye desde la rejilla a una tierra remota. La corriente I_G debe, de cualquier manera, reflejar el peor tipo de falla y su localización, el factor de decremento, y cualquier expansión futura del mismo.

- **Paso 7:** Si el GPR del diseño preliminar está por debajo del voltaje de paso tolerable, no se necesitará un análisis adicional. Solamente será necesario dejar conductores adicionales para dar acceso a los terminales a tierra de los equipos.

- **Paso 8:** Los cálculos de la malla y voltaje de paso para las rejillas, tal como se han diseñado, podrán estar terminados siguiendo las técnicas y el análisis para suelos uniformes que se describe en el capítulo 9.5 ó por medio de técnicas más precisas de cálculo, como se demostrara en el capítulo 9.8.

- **Paso 9:** Si el voltaje de malla calculado está por debajo del voltaje de paso tolerado, el diseño pueda que este completo (ver paso 10). Si el voltaje de malla

calculado es mayor que el voltaje de toque tolerable, el diseño preliminar deberá ser revisado (ver paso 11).

- **Paso 10:** Si el voltaje de paso y el voltaje de toque calculados están por debajo de los voltajes tolerables, el diseño requerirá solamente de ciertos refinamientos requeridos para dar acceso a las terminales a tierra de los equipos. Si no, el diseño preliminar se debe revisar (ver paso 11).

- **Paso 11:** Si se exceden los límites del voltaje de toque ó del voltaje de paso tolerables, se requerirá de una revisión del diseño de la rejilla. Esta revisión debe incluir pequeños espaciamientos entre conductores, electrodos a tierra adicionales, etc. Se discutirá un poco más acerca de la revisión del diseño de la rejilla para satisfacer los límites del voltaje de toque y de paso, en el capítulo 9.6.

- **Paso 12:** Antes de satisfacer los requerimientos del voltaje de toque y de paso, probablemente se requieran varillas y rejillas adicionales. El diseño final también se debe revisar para eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y los riesgos asociados para casos especiales que corresponden al tema.

9.5 Cálculo de voltajes máximos de malla y de paso

En el EPRI TR-100622 se desarrollaron algoritmos para determinar la resistencia de la rejilla y los voltajes de toque y de paso de la malla. Estos algoritmos requerían de una gran capacidad de almacenamiento y eran difíciles de ejecutar y además muy caros, pero las mejoras en la solución de algoritmos y la proliferación de computadoras mucho más poderosas han aliviado la mayoría de estos asuntos.

En algunos casos, no es económicamente justificable utilizar estos cálculos de algoritmos y además el diseñador podría no tener acceso a una computadora con las propiedades requeridas.

9.5.1 Voltaje de malla

Los valores del voltaje de malla se obtienen como un producto del factor geométrico K_m ; un factor correctivo K_i , el cual toma en cuenta algunos de los errores que se introdujeron en las suposiciones hechas al derivar K_m ; la resistividad del suelo ρ ; y la corriente promedio en por unidad de la longitud efectiva del conductor del SPT debidamente enterrado (I_G/L_M).

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (73)$$

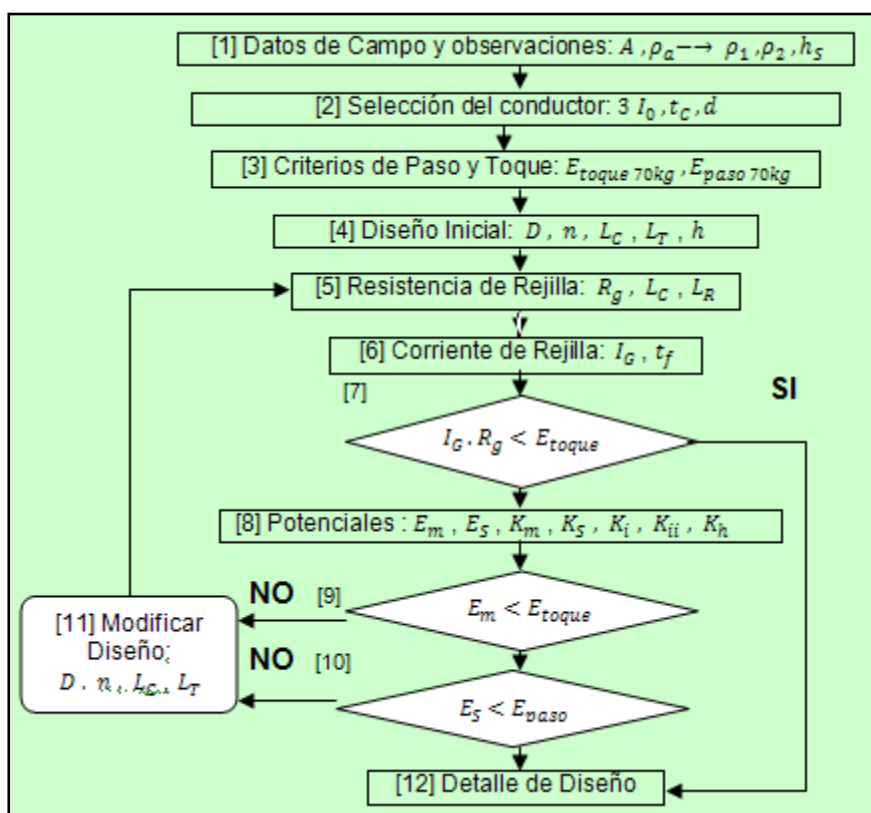


Figura 9.1- Diagrama de bloques para el procedimiento del diseño.

El factor geométrico K_m se determina de la siguiente manera:

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right) \right] \quad (74)$$

Para rejillas con varillas a lo largo de su perímetro, o para rejillas con varillas en sus esquinas, o ambos.

Para rejillas sin varillas o rejillas con pocas varillas $K_{ii} = 1$, ninguna de ellas se coloca en las esquinas o en el perímetro.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{2/n}} \quad (75)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (76)$$

h : Profundidad de referencia de la rejilla.

$h_0 = 1m$.

El número efectivo de conductores paralelos en una rejilla dada n , la cual se puede aplicar a rejillas de forma rectangular ó de forma irregular, representa el número de conductores paralelos en una rejilla rectangular equivalente.

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (77)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_P} \quad (78)$$

$n_b = 1$ para rejillas cuadradas

$n_c = 1$ para rejillas cuadradas y rectangulares

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

De otra forma:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (79)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0,7 \cdot A / L_x \cdot L_y} \quad (80)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (81)$$

L_C : es la longitud total del conductor en una rejilla horizontal en m.

L_P : es la longitud perimetral de la rejilla en m.

A : es el área de la rejilla en m^2 .

L_x : es la longitud máxima de la rejilla en la dirección de x, en m.

L_y : es la longitud máxima de la rejilla en la dirección de y, en m.

D_m : es la distancia máxima que pueda existir entre dos puntos de la rejilla.

Y D , h y d se definen en la *tabla 9.2*.

El factor de irregularidad K_{ii} , utilizado junto con el factor “ n ” anteriormente definido, es:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (82)$$

Para rejillas sin varillas o rejillas con tan solo algunas varillas dispersas a lo largo de la rejilla, pero ninguna colocada en las esquinas o sobre todo el perímetro de la rejilla, la longitud enterrada efectiva L_M es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (83)$$

Donde:

L_R : es la longitud total de todas las varillas en metros.

Para rejillas con varillas en las esquinas, así como a lo largo de su perímetro y sobre toda la rejilla, la longitud enterrada efectiva L_M es:

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (84)$$

Donde:

L_r : es la longitud de cada varilla en metros.

9.5.2 Voltaje de paso (E_s)

Los valores de voltaje de paso se obtienen como producto del factor geométrico K_S ; el factor correctivo K_i ; la resistividad del suelo ρ y la corriente promedio en por unidad de la longitud del conductor del SPT enterrado (I_G/L_S).

$$E_S = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (85)$$

Para rejillas con varillas o sin varillas, la longitud enterrada efectiva L_S es:

$$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (86)$$

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

$$K_S = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (87)$$

9.6 Refinamiento del diseño preliminar

Si los cálculos que se basan en el diseño preliminar indican que pueden existir peligrosas diferencias de potencial dentro de la subestación, debemos estudiar los siguientes remedios posibles y aplicarlos en donde sea necesario:

a) *Decremento total de la resistencia de la rejilla:* Un decremento en la resistencia total de una rejilla hará que disminuya el valor máximo de GPR, y de aquí, el valor máximo de voltaje de transferencia. El método más efectivo para disminuir la resistencia de una rejilla a tierra es incrementar el área ocupada por la rejilla. Pueden utilizarse pozos ó varillas colocadas a gran profundidad si el área disponible es limitada y las varillas penetran las capas de suelo con poca resistividad. Un decremento en la resistencia de la subestación podría o no disminuir apreciablemente los gradientes del lugar, dependiendo del método que se utilice.

b) *Los espaciamientos pequeños en la rejilla:* Utilizando un espaciamiento pequeño entre los conductores de la rejilla, podemos aprovechar la condición de una placa continua. Los potenciales peligrosos dentro de la subestación pueden eliminarse de esta manera. El problema en el perímetro puede ser más dificultoso, especialmente en subestaciones pequeñas en donde la resistividad es muy alta. De cualquier manera, enterrando los conductores de la rejilla fuera de la línea de la cerca, es posible que los gradientes de paso inmediatamente fuera del perímetro de la rejilla no contribuyan a contactos de toque más peligrosos. Otra forma efectiva y económica para controlar gradientes es incrementar la densidad de las varillas en el perímetro. La densidad puede disminuir hacia el centro de la rejilla. Otra propuesta para controlar los gradientes en el perímetro y los potenciales de paso, es enterrando dos o más conductores paralelos alrededor del perímetro a una profundidad sucesiva como a la distancia que se extiende la subestación. Otra propuesta es variar la separación de los conductores de la rejilla con conductores más cercanos cerca del perímetro.

c) *Desviar una gran parte de la corriente de falla a otras trayectorias:* parte de la corriente de falla se desviará de la rejilla conectando cables de guarda de las líneas de transmisión o disminuyendo la resistencia de los cimientos de la torre en las cercanías de la subestación. En relación a la última, de cualquier manera, se debería probar el efecto de los gradientes de falla cerca de los cimientos.

d) *Limitar la corriente de falla total:* Si es viable, limitar el total de la corriente de falla (por medio de protecciones), disminuirá el GPR y todos los gradientes en proporción.

e) *Restringir accesos a áreas limitadas:* Restringir accesos a ciertas áreas, donde sea práctico, reducirá la probabilidad de riesgo al personal.

9.7 Aplicación de ecuaciones para E_m y E_s

Varias suposiciones simplificadas se hacen para derivar las ecuaciones para E_m y E_s . Las ecuaciones se compararon con los resultados más exactos de casos con rejillas de diferentes formas, tamaños de mallas, número y tamaños de varillas, y se encontró que es más consistente que las ecuaciones anteriores. Estos casos incluyen rejillas cuadradas, rectangulares, triangulares, en forma de "T" y en forma de "L"; además se hicieron con varillas o sin varillas. La longitud total de la barras a tierra variaron con diferentes barras colocadas y sus diferentes longitudes. El área de las rejillas varió de 6,25 a 10,000 m^2 . El número de mallas a lo largo de uno de los lados varió de 1 a 40, El tamaño de la malla varió de 2,5 a 22,5 m. En todos los casos se asumió un modelo de suelo uniforme y una separación entre conductores uniforme. Se consideraron los ejemplos más prácticos en el diseño de las rejillas. En la comparación se encontró que la ecuación resultó con una precisión aceptable.

9.8 Uso del análisis por computador en el diseño de la rejilla.

Dawalibi y Mukhedkar describen un cálculo de algoritmos para hacer un modelo del SPT. En general, estos algoritmos se basan en:

- a) Modelar los componentes individuales que comprenden el SPT (conductores de la rejilla, varillas, etc.)
- b) Establecer un conjunto de ecuaciones que definan la interacción de esos componentes.
- c) Determinar la corriente de falla que fluye en cada componente dentro de la Tierra.
- d) Calcular el potencial en cualquier punto de la superficie debido a cualquier componente individual.

La precisión del cálculo de algoritmos depende de cuan bien el modelo de suelo y cualquier cambio físico reflejan las condiciones actuales del terreno.

Existen muchas razones importantes que justifican el uso de cálculos de algoritmos más exactos en el diseño de SPT, entre estas razones están:

- a) Parámetros que exceden las limitaciones de las ecuaciones.
- b) Es preferible un modelo de suelo de dos o múltiples capas debido a variaciones significativas en la resistividad del suelo.

- c) Cuando no se pueden analizar conductores de rejilla irregulares o la separación entre las varillas utilizando el método presentado en el capítulo 3.5.
- d) Más flexibilidad para determinar los puntos de peligro en el lugar.
- e) La presencia de estructuras metálicas enterradas o conductores no conectados al SPT, los cuales dan complejidad al mismo.

CAPÍTULO X

PRUEBAS DE CAMPO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA YA CONSTRUIDO

10.1 Mediciones de la impedancia

Como se ha indicado, solo se pueden esperar resultados aproximados de un precálculo de la impedancia a tierra de la subestación. Por lo tanto, se desea una medición cuidadosa de la impedancia de la instalación, aunque no siempre práctica, si se conecta la rejilla o se afecta por otras estructuras metálicas enterradas.

En esta parte sólo se tratarán los métodos más generales. El valor óhmico se refiere como una resistencia, se debe recordar que hay un componente reactivo que se debe considerar cuando el valor óhmico de la tierra bajo prueba, es menor que 0,5 Ω y que el área sea relativamente extensa. Esta componente reactiva tiene un efecto pequeño en tierras con una impedancia mayor de 0,5 Ω .

10.1.1 El método de dos puntos

Este método mide la resistencia total del SPT y otro auxiliar. Este método está sujeto a grandes errores para un valor bajo de la resistencia del SPT o cuando los otros auxiliares están cerca uno del otro, pero esto puede ser útil con un tipo de prueba “funciona o no funciona”, es todo lo que se necesita.

10.1.2 El método de los tres puntos

Este método requiere el uso de dos electrodos de pruebas con sus resistencias designadas como r_2 y r_3 y con el electrodo que se va a medir que se designó como r_1 . La resistencia entre cada par de electrodos se mide y se designa como r_{12} , r_{13} , r_{23} donde $r_{12} = r_1 + r_2$, etc.

$$r_1 = \frac{(r_{12}) + (r_{13}) - (r_{23})}{2} \quad (88)$$

Por lo tanto, medir la resistencia de cada par de electrodos a tierra en serie y al sustituir estos valores en la ecuación (88), se puede determinar el valor de r_1 .

Si los dos electrodos de pruebas tienen resistencias sustancialmente mayores que el electrodo bajo prueba, los errores de las mediciones individuales aumentarán grandemente en los resultados finales. Además, este método puede dar valores erróneos, tal como una resistencia cero o negativa, si los electrodos no se separan por una distancia lo suficientemente grande. Consecuentemente, este método es difícil para subestaciones grandes.

10.1.3 Relación del método

Este método compara la resistencia del electrodo bajo prueba, con la resistencia que ya se conoce, generalmente por la misma configuración del electrodo como en el método de caída de potencial. Ya que es un método de comparación, las lecturas óhmicas son independientes de la magnitud de la corriente de prueba siempre que, la corriente de prueba sea lo suficientemente alta para dar la sensibilidad adecuada.

10.1.4 Pruebas de las etapas de falla.

Puede ser necesario llevar a cabo una prueba de alta corriente donde se desea la información específica para un diseño particular. Esta prueba dará también cantidades a partir de las cuales la impedancia del SPT se podría determinar.

Este tipo de prueba requiere el uso de un osciloscopio que registrará el voltaje entre los puntos que se han seleccionado. Sin embargo, la magnitud de voltaje podría ser relativamente grande y requerirá un transformador de potencia para bajar el voltaje a un nivel manejable. El máximo voltaje y la relación del transformador de potencia se deben determinar antes de obtener las pruebas de la etapa de falla, de esa manera el equipo de prueba no es muy importante. La prueba de la caída de potencial se puede utilizar para determinar el voltaje que se requiere de una prueba de la etapa de falla.

10.1.5 Método de la caída de potencial

Este método tiene muchas variaciones y se aplica a todos los tipos de mediciones de resistencia a tierra (*figura 10.1*). Básicamente, las mediciones de la resistencia a tierra consisten en medir la resistencia con respecto al electrodo a tierra remoto. El electrodo remoto está teóricamente a una distancia infinita desde el SPT donde la densidad de corriente de la tierra se aproxima a cero. Mientras el método de la caída de potencial se utiliza universalmente, este presenta muchas dificultades y fuentes de error cuando se utiliza para medir la resistencia de grandes SPT. Estas dificultades ocurren primeramente debido al tamaño y a la configuración del SPT y la heterogeneidad del suelo.

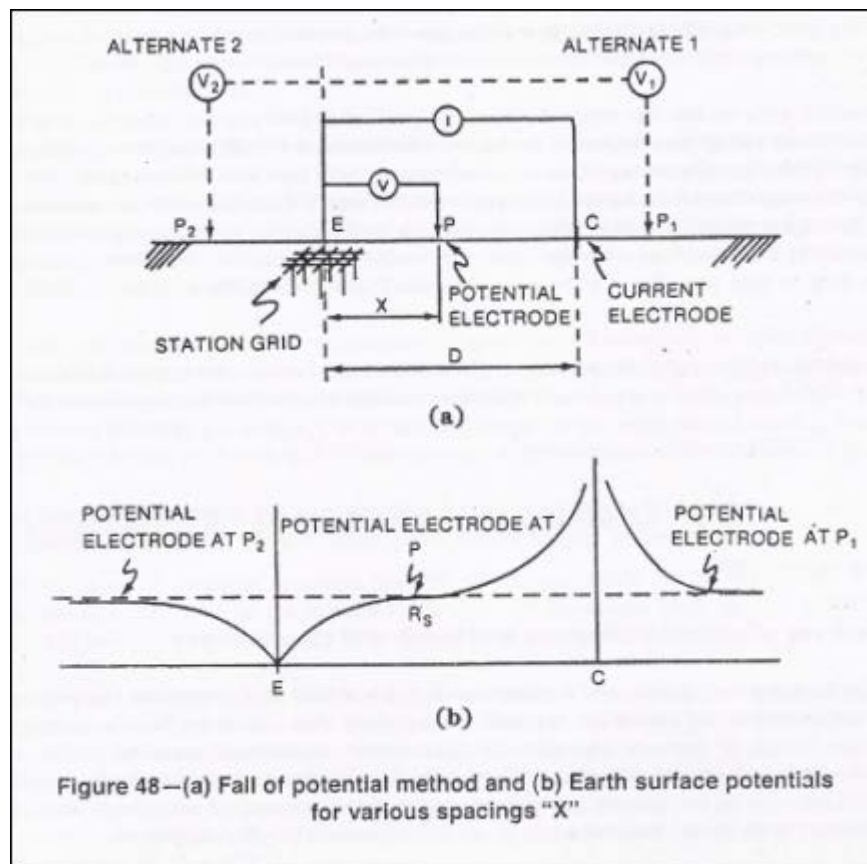


Figura 10.1 - Método de la caída de potencial

Si la distancia "D" es lo suficientemente grande con respecto al SPT, la parte central de la curva de la caída de potencial tiende a estar cerca de la parte horizontal, pero puede parecer que es así debido a la falta de sensibilidad de los instrumentos que se utilizan. Esto se acepta comúnmente, aunque no siempre correctamente, que la sección cercana a la horizontal de la curva de la resistencia R_g . Para SPT más grandes, mayores distancias "D" no son prácticas o si son posibles se tiene como resultado que la sección cercana a la horizontal de la curva no existirá. En este caso, no se obtendrán mediciones correctas a menos que se tenga una buena idea de la posición exacta de "P".

Para medir la resistencia, la fuente de corriente se conecta entre la malla a tierra de la subestación "E" y un electrodo de corriente que se encuentra a una distancia de varios cientos de metros de la subestación. El circuito de medición de potencial se conecta entonces entre la malla de la subestación "E" y un electrodo potencial "P", con mediciones que se hacen en varias localizaciones del electrodo afuera de la subestación. Este electrodo de potencial se puede mover hacia el electrodo de corriente en aumentos iguales de distancia, comenzando cerca de la subestación, y las lecturas de las resistencias obtenidas en las diferentes localizaciones se pueden trazar contra las distancias de la subestación. Desde "E" hasta "P", el voltaje por amperio de la corriente de prueba aumenta, pero el gradiente de voltaje disminuye alcanzando un mínimo en "P". Si continuamos hacia "C", el efecto de la corriente que converge en las investigaciones de la pruebas de corriente llega a ser aparente y se observa un incremento del gradiente de voltaje tal como se aproxima la prueba de corriente.

Desafortunadamente, el lugar exacto del electrodo de potencial se define muy bien solo para algunos casos ideales tal como un hemisferio o electrodos muy pequeños enterrados en un suelo uniforme o en un suelo de dos capas (Dawalibi y Mukhedkar [B32][B36]. Curdts y Tagg analizaron el caso de un SPT grande enterrado en un suelo uniforme suponiendo una distribución de densidad de corriente uniforme [B23][B81][B82][B83]. En la práctica, sin embargo, los SPT consisten de un arreglo complejo de varillas a tierra verticales y conductores horizontales, que se entierran comúnmente en suelos no uniformes.

Para rejillas a tierra grandes los espacios que se requieren pueden no ser prácticos o incluso posibles, especialmente donde la línea de transmisión arriba de los cables a tierra y los neutros que se conectan al SPT de la subestación efectivamente ampliará el área de influencia. Consecuentemente, la parte plana de la curva no se obtendrá y se deben utilizar otros métodos de interpretación. El trabajo anterior muestra que cuando el suelo no es uniforme y la separación no es muy grande comparado con las dimensiones del SPT, el 61,8%, que corresponde a la llamada porción plana de la curva, pueda que no se aplique más (Dawalibi y Mukhedkar [B32][B36]).

Se debe notar que al colocar el punto "P" en el lado contrario con respecto al electrodo "C" (P2) resultará siempre en una medición de resistencia aparente más pequeña que la resistencia actual. Además, Cuando el punto "P" esta en el mismo lugar que "C" (P1) hay un lugar en particular que nos da la resistencia actual.

La primera ventaja del método de la caída de potencia es que los electrodos de potencial y corriente tendrán sustancialmente una resistencia muy alta que el SPT que se está evaluando sin afectar significativamente la precisión de las mediciones.

10.2 Investigación de campo de los contornos de potencial y voltajes de toque y de paso.

La mejor certeza de que una subestación es segura viene de las pruebas de campo actuales del voltaje de paso y de toque con una fuerte carga de corriente en la malla a tierra. Debido al presupuesto, pocas utilidades son semejantes para hacer estas pruebas como una práctica de rutina. Ahora, sin embargo, grandes discrepancias entre la resistencia que se midió y que se cálculo o anomalías que se conocen en las resistividades a tierra dieron lugar a la duda de los voltajes de paso y de toque que se calcularon.

En algunas situaciones, vale la pena cargar el SPT con una prueba de corriente (preferiblemente en el rango de los 100 Amperios) y tomar mediciones de los gradientes de potencial en lugares que se seleccionaron en toda la subestación y alrededor de su perímetro. Un proyecto EPRI (EPRI TR- 100622[B55] que incluye una prueba de campo hace comparaciones de los resultados que se obtienen por computadora. Este método de medición se encontró confiable y que da buenos resultados (Patel[B73]; Meliopoulos, Patel y Cokkonides [B69]).

El método básico para las mediciones de gradientes incluye pasar una corriente de prueba a través de la rejilla de la subestación vía un electrodo de corriente, como en las mediciones de la resistencia a tierra de la subestación y midiendo el resultado

del voltaje de paso y de toque. Para obtener los potenciales que existen bajo condiciones de falla actual, los valores de la prueba se multiplican por la relación de la corriente de falla a tierra actual con la corriente prueba.

Las resistencias de alto contacto que se involucraron, generalmente descartan el uso de instrumentos que se diseñaron para mediciones de resistencia a tierra desde que estos operan sobre un rango limitado de resistencia de prueba de potencial. Para utilizar un método de voltímetro y amperímetro, es necesario tener un voltímetro de alta-impedancia y utilizar pruebas de corrientes lo suficientemente altas para vencer los efectos de las corrientes a tierra residuales.

Se pueden utilizar varios métodos de medición y registro de voltajes. Utilizando un voltímetro de alta impedancia, podemos graficar perfiles y contornos de los voltajes de contacto de circuito abierto para la subestación completa. Al asumir apropiadamente los valores de resistencias de cuerpo y pié a tierra, y una corriente corporal segura, podemos determinar el valor máximo seguro para voltajes de contacto de circuito abierto y ubicar en el mapa de potencial los voltajes de paso y de toque más peligrosos.

Langer [B65] y Bodier [B15] describen técnicas de medición en la cual se simula el efecto del contacto real y la resistencia corporal. El operador utiliza guantes de goma y botas con suela de goma, equipados con una superficie de contacto de malla metálica. Los voltajes entre estas superficies de contacto metálicas se miden con un voltímetro de tubos al vacío desviado por una resistencia igual a un valor supuesto de la resistencia corporal y la corriente se mide con un miliamperímetro.

Al incluir las resistencias de contacto pié-tierra como una parte del procedimiento de prueba, se toma en cuenta el efecto de las variaciones de la conductividad de la superficie. Así, se incluye en los resultados de la prueba, el factor de seguridad adicional que se proporcionó al cubrir la superficie con material superficial, pavimento, etc.

10.3 Valoración de las mediciones de campo para el diseño seguro.

La resistencia que se midió no provee un medio directo para re-verificar los potenciales de paso y de toque que se calcularon, ya que estos que se derivan de la resistividad. Sin embargo, si la diferencia entre el cálculo y la medición de la rejilla de la subestación es muy grande, la resistencia o la resistividad que se supone pueden estar bajo sospecha, esta última, en general es, el menos confiable. Cada caso tendrá que juzgarse por sus propios méritos para determinar si la discrepancia es tal, como para justificar más investigaciones o mediciones de las resistividades.

10.4 Prueba de integridad de la rejilla a tierra.

Muchas veces, los relevadores de estado sólido, equipo telefónico, circuitos de grabación o unidades de fuentes de voltaje en la caseta de control se dañan debido a las descargas eléctricas o a una falla si la subestación tiene un mal SPT. Comúnmente, la prueba de integridad de la rejilla a tierra se lleva a cabo seguido de un evento. La evaluación de las rejillas a tierra muy antiguas utilizan esta prueba, también es común en las instalaciones industriales. Esta prueba se lleva a cabo para asegurar la integridad de la rejilla a tierra antes de que se apruebe la operación de la subestación. Esta prueba es una necesaria para detectar cualquier circuito abierto o estructura aislada o equipo en una subestación.

Un juego de pruebas típico consta de una fuente variable de voltaje (0-35 voltios, 0-300 amperios), dispositivos de medición de voltaje y corriente, y dos puntas de prueba. Una de las dos puntas se conecta a una referencia a tierra, generalmente la toma a tierra de la carcasa del transformador. La otra punta se conecta al elemento del SPT a ser evaluado. La prueba consiste en dejar circular 300 amperios entre los elementos que se conectaron y medir la caída de voltaje a través del circuito del SPT incluyendo las puntas de prueba. Utilizando un amperímetro de tenaza, la medición de la división de corriente provee datos adicionales para evaluar la trayectoria a tierra. Manteniendo el elemento de referencia conectado anteriormente, la segunda punta de prueba se traslada alrededor para evaluar los elementos en otros equipos u estructuras hasta que se ha evaluado la subestación totalmente.

Frecuentemente, un cable localizador se emplea para localizar un conductor a tierra roto o desconocido. El cable localizador detecta el campo magnético producido por la corriente de prueba y genera un ruido equivalente, el cual se puede escuchar por medio de audífonos. La ausencia del ruido indica un cable a tierra roto o una conexión abierta.

Es necesario determinar la caída de voltaje de las puntas de prueba al circular 300 amperios en el lazo de corriente. Esta medición única proporciona las impedancias en serie de las puntas de prueba. Para obtener un valor correcto de la impedancia, la impedancia de la punta de prueba se extrae de la impedancia que se mide entre los elementos.

Llevar a cabo la prueba de integridad es una forma práctica y conveniente. Uno puede evaluar también una rejilla a tierra comparando la caída de voltaje con un

valor de referencia conocido (comúnmente 0.98 V/m entre elementos) y determinar uniones débiles entre los elementos. Las mediciones de las divisiones de corriente indican si hay una alta impedancia o una trayectoria abierta en cualquier dirección [B61].

10.5 Verificaciones periódicas de los SPT que se instalan.

Algunos servicios se verifican periódicamente, como la resistencia a tierra de la subestación después de terminar la construcción. También, se aconseja revisar las condiciones del sistema que pueden afectar el valor máximo de la corriente a tierra, así como extensiones a la misma subestación o las diferencias de potencial local.

CONCLUSIONES

- a) Con el apoyo de la implementación de ejecutables java se estableció los límites seguros de las diferencias de potencial que puedan existir en una subestación y sistemas eléctricos. Así las personas y sistemas eléctricos no estarán expuestos al peligro bajo condiciones de falla.
- b) Se revisó las normas internacionales de sistemas puesta a tierra de subestaciones y sistemas eléctricos con referencia especial a la seguridad y criterios para el diseño, estas revisiones originó más de una conclusión y que se mencionan a partir del inciso f) hasta el inciso j).
- c) Se construyó el procedimiento técnico que consta de 12 etapas ó pasos muy bien detallados mediante el diagrama de bloques para el diseño seguro del sistema puesta a tierra en base a los criterios de diseño descritos en el capítulo 3. El diagrama de bloques del procedimiento técnico se ilustra en el capítulo 9.
- d) Se implementó un método analítico por computador denominado Módulo 1 mediante Ejecutables Java para asistir al ingeniero de diseño en obtener el modelo de suelo más adecuado a partir de la toma de mediciones de campo. La implementación del mismo se ilustra en el capítulo 5 con sus respectivos ejemplos de aplicación.

- e) Se implementó un método analítico por computador denominado Módulo 2 mediante Ejecutables Java para asistir al ingeniero de diseño en lograr un sistema puesta a tierra seguro a partir del análisis de los potenciales eléctricos y de la geometría de la resistencia de dispersión. La implementación del mismo se ilustra en el capítulo 6 con sus respectivos ejemplos de aplicación.

- f) Se puede invertir tanto dinero como se desee en un sistema puesta a tierra, tratando de proporcionar a las personas y a los equipos eléctricos una seguridad apropiada, además de un buen funcionamiento y una vida útil prolongada. Sin embargo, con los criterios técnicos demostrado en el presente trabajo, se reduce la inversión y se evita el sobre diseño de los sistemas de puesta a tierra, claro está, sin que esto afecte la seguridad de las personas y equipos eléctricos.

- g) Las varillas penetrando el suelo de baja resistividad son hasta ahora más efectivas en disipar corrientes de falla, claro está, siempre que se le reconozca (ubique) en un suelo de dos capas mediante las implementaciones del Java. Las capas superiores del suelo tienen una resistividad mucho más alta que las capas inferiores. Para otras instalaciones de espacio limitado, ésta última condición llega a ser de hecho la más deseable que suceda.

- h) Si las varillas se instalan predominantemente a lo largo del perímetro de la rejilla en condiciones alto-bajo o suelos uniforme, las varillas moderarán

considerablemente el incremento escarpado del gradiente de la superficie cerca de los acoplamientos periféricos.

- i) La altura de la capa superior “ h ”, afecta también las diferencias en el rendimiento de los electrodos a tierra en un ambiente de dos capas y en condiciones de un suelo uniforme. La regla general es que cuando “ h ”, llega a ser considerablemente más grande que las propias dimensiones del electrodo, el rendimiento de éste se aproxima como en un suelo uniforme de resistividad ρ_1 .

- j) El área del sistema puesta a tierra es simplemente el factor geométrico más importante para determinar la resistencia de la rejilla. Entre más grande es el área, más baja será la resistencia de la rejilla, por lo tanto, el valor del GPR será menor.

RECOMENDACIONES

- a) Es indispensable hacer investigaciones de resistividad en el sitio de una subestación para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. Las pruebas de perforación y otras investigaciones geológicas proveen información importante de la presencia de diferentes capas y la naturaleza del material del suelo, obteniendo algunas ideas del rango de la resistividad del sitio.
- b) Hay muchos métodos sugeridos por diferentes autores para aproximar un modelo no uniforme con un modelo uniforme. Uno de estos métodos incluye el promedio de la resistividad aparente de la capa superior para los cálculos de voltaje de toque y de paso y el promedio de la resistividad aparente de la capa inferior para el cálculo de la resistencia del sistema puesta a tierra.
- c) En subestaciones un electrodo sencillo es, por sí mismo, inadecuado en dar un sistema puesta a tierra seguro. En vista de ello, cuando varios electrodos, tal como las varillas se conectan entre ellos y a todo los neutros, marcos y estructuras son conectados al sistema puesta a tierra, el resultado es substancialmente un arreglo de rejillas.
- d) Mientras que los conductores horizontales (rejilla) son más efectivos en reducir el peligro de un alto voltaje de paso y toque en la superficie de la

tierra, con tal que la rejilla este instalada en una hondura poco profunda [comúnmente 0,3 - 0,5 metros debajo del nivel], las varillas bastante grandes estabilizarán el funcionamiento de semejante sistema combinado. Para muchas instalaciones esto es muy importante, porque el congelamiento o la sequedad de las capas superiores del suelo podrían variar la resistividad del suelo con las estaciones del año, mientras que la resistividad de las capas inferiores del suelo permanece casi constante.

- e) Solamente el espesor de la capa superficial “*h*” se obtiene por el método gráfico de Sunde, que está ilustrado en el capítulo 4.2 “Estructura del suelo y selección del modelo de suelo”.
- f) La Implementación del Ejecutable Java – Módulo 1 está orientado a un modelo de dos capas, sin embargo de ingresarse datos correspondientes a un terreno de tres capas, este daría los parámetros de un modelo de dos capas que mejor se ajusta a un modelo de tres capas.
- g) La Implementación del Ejecutable Java – Módulo 1 está intencionado para mediciones de resistividades de campo igual o menor a 10. En los resultados previos realiza cálculos matriciales de 80 x 80 y sumatorias de 50 terminos para cada elemento de matriz.
- h) Con el objetivo de optimizar los parámetros de diseño la Implementación del Ejecutable Java – Módulo 1 en los resultados finales selecciona escalones de espesor de primera capa por cada 0.5 m. para pasar a escalones de 0.05 m. (mejor precisión).

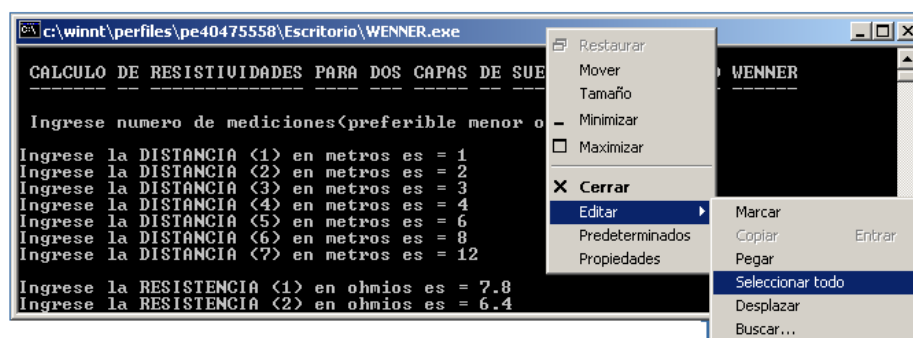
En resumen los resultados finales muestran:

- Un espesor de primera capa más preciso.
 - Las resistividades de la primera y segunda capa con menor error.
 - Las resistividades medidas de campo y las obtenidas por computador.
 - Los errores cuadráticos que existe entre las resistividades medidas y las obtenidas por computador.
- i) Es importante mencionar las ventajas que se obtuvieron con la implementación de los ejecutables Java, y es por lo siguiente:
- Es automático, no hay necesidad de realizar cálculos numéricos.
 - Es inteligente, muestra mensajes de error.
 - Es portátil e independiente de cualquier software.
 - Es Libre de contraseñas y licencias.
 - Es Derivable para archivos planos.

j) Para derivar resultados se recomienda la siguiente secuencia:

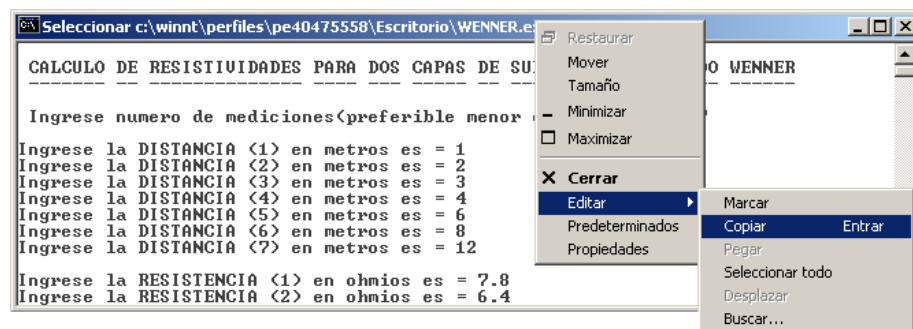
➤ Click derecho en el encabezado - Editar - Seleccionar todo.

Automáticamente la pantalla de la consola adquiere un color blanco.



➤ Luego, click derecho nuevamente en el encabezado - Editar – Copiar.

Y por último abrir un archivo plano y “Control + v” .



➤ Tener presente que la consola no reconoce los acentos y por defecto maneja un tipo de letra mono espaciado (tipo courier 9) y al derivar los resultados de los módulos computacionales a un archivo plano debemos verificar el tipo de letra estándar del programa de texto usado.

ANEXO A**NUMERACIÓN BIBLIOGRÁFICA**

[B1] ABB Power Systems, Inc., Electrical transmission and distribution reference book, 4th Edition, 12th printing, 1964.

[B2] Abledu, K. O., and Laird, D. N., "Measurement of substation rock resistivity," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, no. 1, pp. 295-300, Enero 1992.

[B3] AIEE Working group on substation grounding Practices, "application guide on methods of substation grounding," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, no. 11, pp. 271-278, Abril 1954.

[B4] Armstrong, H. R., "Grounding electrode characteristics from model tests," AIEE Transaction on Power Apparatus and Systems, pp. 1301-1306, December. 1953.

[B5] Armstrong, H.R., and Simpkin, L.K., "Grounding electrode potential gradients from model tests," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 618 - 623, Oct. 1960.

[B6] Bellashi, P. L., " Lightning current in field and laboratory," AIEE Transactions, Vol. 54, pp. 837-843, 1935.

[B7] Biegelmeier, U.G.;, " Die Bedeatung der Z-Schwelle des Herzkammerfilimmerns fur die Festlegung von Berührungsspannungs greuzeu bei den Schutzma Bradhmer gegen elektrische Unfate," E&M, Vol. 93, no. 1, pp. 1-8, 1976.

[B8] Biegelmeier, U.G., and Rotter, K., " Elektrische Widerstrande und Strome in Merischchlicken Korper," E&M, Vol. 89, pp. 104-109, 1971.

[B9] Biegelmeier, U.G., and Lee, W.R., "New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for AC shocks at 50-60 Hertz," Proceedings of the IEEE, Vol. 127, pp. 103-110,1980.

[B10] Blattner, C.J., " Analysis of soil resistivity test methods in two-layer earth," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, no. 3603-3608, Dic. 1985.

[B11] Blattner, C.J., " Prediction of soil resistivity and ground rod resistance for deep ground electrodes," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no 5, pp. 1758-1763, Sept./ Oct. 1980.

[B12] Blattner, C. J., " Study of driven ground rods and four point soil resistivity data," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, no. 8, pp. 2837-2850, Agosto 1982.

[B13] Blattner, C.J., and Dawalibi, F., " Earth resistivity measurement interpretation techniques," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 2 pp. 374-382, Feb. 1984.

[B14] Bodier, M.G., " La Secrites des Personnes et la Question des Mises a la Terre dans les Postes de Distribution," Bulletin de la Societe' Francaise des Electriciens, ser 6th, Vol. VII, no. 74,pp. 545-562, Oct. 1947.

[B15] Bodier, M.G., " Systematic investigation of potential gradients in and around a transformation substation, Bulletin de la societe' Francaise Des Electriciens, Jul. 1951.

[B16] Bogajwesji, W.,Dawalibi, F. Gervais, Y., And Mukhedkar, D., "Effects of sustained ground fault current on concrete poles," IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2686-2693, Agosto 1982.

[B17] Carson, J. R., " Wave propagation in overhead wires with ground return," Bell Systems Technical Journal," vol. 5, 1926.

[B18] CIGRÉ Working Group 33/13-09, "Very fast phenomena associated with gas-insulated substation," 1988 Session of CIGRÉ, paper 33-13,1988.

[B19] Clem, J.E.," Reactance of transmission lines with ground return" AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 50, pp. 901-918, Sept. 1931.

[B20] "Computation of zero sequence impedances of power lines and cables" Engineering Report no. 37, Joint Subcommittee on Development and Research of EEI and Bell Telephone Systems, Jul. 22, 1936.

[B21] Conversion Subcommittee of AIEE Substations Committee, " Recommended grounding practices for singles polarity DC structures," Paper no. 57-719, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 76, part III, 1957.

[B22] Crawford, E., and Griffith, M., " A closer look at " The facts of life in ground mat design," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. IA-15, no. 3, pp. 241-250, May / June 1979.

[B23] Curdts, E.B., "Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Part I, vol. 77, pp. 767-770, Nov. 1958.

[B24] "Currents in earth wires at the top of pylons and their effect on the potentials of the pylons and stations in the neighborhood of a point of short-circuit to earth," Contribution no. 78, CCITT, study Group V, Nov. 1963.

[B25] Dalziel, C.F., "A study of the hazards of impulse currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 72, part III, pp. 1032-1043, Oct. 1953.

[B26] Dalziel, C.F., "Dangerous electric currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 65, pp. 579-585, 1123-1124, 1946.

[B27] Dalziel, C.F., "Effect of wave form on let-go currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 62, pp. 739-744, 1946.

[B28] Dalziel, C.F., "Electric shock hazard," IEEE Spectrum, pp. 41-50, Feb. 1972.

[B29] Dalziel, C.F., and Massogilia, F.P., "Let-go currents and voltages," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 75, part II, pp. 49-56, 1956.

[B30] Dalziel, C.F., Ogden, E., and Abbott, C.E., "Effect of frequency on let-go currents," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 62, pp. 745-750 and 1000, Dec. 1943.

[B31] Dawalibi, F., "Ground faults current distribution between soil and neutral conductors," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 2, pp. 452-461, Mar./Apr. 1980.

[B32] Dawalibi, F.P., and Mukehedkar, D., "Ground electrode resistance measurements in non-uniform soils," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 1, pp. 109-116, Jan. 1974.

[B33] Dawalibi, F., and Mukehedkar, D., "Influence of ground rods on grounding systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2089-2098, Nov./Dic. 1979.

[B34] Dawalibi, F., and Mukehedkar, D., "Optimum design of substations grounding in two-layer earth structure; part I- Analytical study, part II Comparison between Theoretical and experimental results, and Part III- Study of grounding grids performance and new electrodes configuration," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 2, pp. 252-261, 262-266, 267-272, Mar./Abr. 1975.

[B35] Dawalibi, F., and Mukehdkar, D., " Parametric analysis of grounding systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 5, pp. 1659-1668, Sept./ Oct. 1979.

[B36] Dawalibi, F., and Mukehdkar, D., " Resistance measurement of large grounding systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2348-2354, Nov./Dic. 1979.

[B37] Dawalibi, F. Bauchard, M., and Mukehdkar, D., " Survey on power grounding design practices," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-99, no. 4, pp. 1396-1405, Jul / Ago. 1980.

[B38] Dawalibi, F., Ma, J., and Southey, R.D., " Behavior of grounding systems in multilayer soils: A parametric analysis," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 9, no. 1, 334-342, Ene.1994.

[B39] Dawalibi, F.P., Ma, J., And Southey, R.D., " Equivalence of uniform and two-layer soils to multilayer soils in the analysis of grounding systems," IEEE Proceedings-Generation, transmission, Distribution, vol. 143, no. 1, pp. 49-55, Ene. 1996.

[B40] Dawalibi, F. Mukehdkar, D., and Benstend, D., " Soil effects on ground fault currents," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS- 100, pp. 3442, Jul. 1982.

[B41] Dawalibi, F. P. Southey, R. D. and Baishiki, R. S., " Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric Shocks," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp. 613-626, 1990.

[B42] Dawalibi, F. P., Xiong, W., and Ma, J., " Effects of deteriorated and contaminated substation surface covering layers on foot resistance calculations," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 104-113, Enero. 1993.

[B43] Desieno, C. F., Marchenko, P.P., and Vassel, G. S., " General equations for fault currents in transmission line ground wires," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, pp. 1891-1900, Nov. / Dic. 1970.

[B44] Dick, E.P., Fujimoto, N., Ford, G. L., and Harvey, S., " transient ground potential rise in gas-insulated substation-problems identification and mitigation," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 10, pp. 3610-3619, Oct. 1982.

[B45] Dick, W. K., and Holliday, H.R., "Impulse and Alternating current tests on grounding electrodes in soil environment," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 1, pp. 102-108, Ene. /Feb.1978.

[B46] Elek. A., " Hazards of electric shock at stations during fault and method of reduction," Ontario Hydro Research News, vol. 10, no. 1, pp. 1-6, 1958.

[B47] Endrenyi, J., "Analysis of transmission tower potentials during ground faults ," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems," vol. PAS-86, pp. 1274-1283, Oct. 1967.

[B48] Endrenyi, J., " Evaluation of resistivity test for design of station grounds in non-uniform soil ," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. 84, pp. 996-970, Dic. 1963.

[B49] Endrenyi, J., " Fault current analysis for substation grounding design," Ontario Research Quarterly, 2nd Quarter, 1967.

[B50] EPRI, *EPRI Transmission line reference book 345 kV and above*. Electric power Research Institute, Palo Alto, Calif. 1975.

[B51] EPRI EL-904, *Mutual design considerations for overhead AC transmission lines and gas transmission pipelines*, vols. 1 y 2, Sept. 1978.

[B52] EPRI EL-2699, *Transmission line grounding, Chapter 4, (Resistivity) and Chapter 9 (Field measurement Techniques)*, Safe Engineering Services, Oct.1982.

[B53] EPRI el-3099, *Substation grounding scale model tests*, Ohio State University, May 1985.

[B54] EPRI EL-3982, *Soil resistivity tests using modeling techniques*, Ohio State University, Mayo 1985.

[B55] EPRI TR-100622, *Substation grounding programs*, vols. 1-5, Mayo 1992.

[B56] EPRI TR-100863, *seasonal variations of grounding parameters by field tests*. SEI/Georgia power Research Center, Jul. 1992.

[B57] Garret, D. L., "Determination of maximum ground fault current through substation grounding system considering effects of static wires and feeder neutrals," *Proceedings of Southeastern Electric Exchange*, Atlanta, Ga., 1981.

[B58] Garret, D. L., Mayers, J., and Patel, S., " Determination of maximum substation grounding system fault current using graphical analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. POWRD-2, no. 3, pp. 725-732, Jul. 1987.

[B59] Geddes, L. A., and Baker, L. E., "response of passage of electric current through the body," *Journal of Association for the Advancement of Medical Instruments*, vol. 2, pp. 13-18, Feb. 1971.

[B60] Gieiges, K. S., "Electric shock hazard analysis," *AIEE Transactions on Power Apparatus and systems*, vol. 75, part III, pp. 1329-1331, 1956.

[B61] Gill, A. S., "High-current method of testing ground integrity," *NETA WORLD*, International Testing Association, vol. 10, no. 2, Winter 1988-1989.

[B62] Jones, W. R., "Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils," *IEEE Transactions on Power Apparatus*, vol. PAS-99, no.4, pp. 1343- 1346, July/Aug. 1980.

[B63] Kynion, A. L., "Earth resistivity measurements for groundings grids," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 20, pp. 795-800, Dec. 1961.

[B64] Kiselev, "Research into electric shock," *Electrical Review*, vol. 31, Dec. 1965.

[B65] Langer, H., "Messungen von Erderspannungen in einem 220 kv Umspanwerk," *Electrotechnische Zeitschrift*, vol. 75, no. 4, pp. 97-105, Feb. 1954 (Traducción en Inglés disponible en EI AIEE No. 80-1961, Apéndice V, pp. 91- 102).

[B66] Laurent, p. G., "Les Bases Generales de la Technique des Mises a la Terre dans les installations Electriques," *Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens*, vol. 1, ser. 7, pp. 368-402, Julio 1951.

[B67] Loucks, W. W., "A new approach to substation grounding," *Electrical News and Engineering*, Mayo 15, 1954.

[B68] Melipoulos, A. P., Papalexopoulos, A. And Webb, R. P., "Interpretations of soil resistivity measurement experience with the model SOMIP," *IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-1, no. 4, pp. 142-151, Octubre 1986.

[B69] Melipoulos, A. P., Patel, S., and Cokkonides, G. J., "A new method and instrument for touch and step voltage measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 4, pp. 1850-1860, Octubre 1994.

[B70] Melipoulos, A. P., S., Xia, F., Joy, E. B., Cokkonides, G. J., "An advanced computer model for grounding systems analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 8, no. 1, pp. 13-23, Enero 1993.

[B71] Nieman, J., "Unstellung von Hoschtspannungs-Erdungsalagen Aufden Betrieb Mitt Starr Geerdetem Sternpunkt," *Electrotechnische Zeitschrift*, vol. 73, no. 10, pp. 333-337, Mayo 1952.

[B72] Osypka, P., "Quantitative investigation of current strength and routing in AC electrocution accident involving human beings and animals," Technische Hochschule Braunschweig, Brunswick, West Germany, 1966/SLA Translation Center TT-6611470.

[B73] Patel, S. G., "a complete field analysis of substation ground grid by applying continuous low voltage fault," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 8, pp. 2238-2243, Agosto 1985.

[B74] Reichman, J., Vainberg, M., and Kuffel, J., " Short-circuit capacity of temporary grounding cables," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 260-271, Enero 1989.

[B75] Rüdénberg, R., " Basic considerations concerning systems," Electrotechnische Zeitschrift, Vol. 11 y 12, 1926.

[B76] Rüdénberg, R., " Grounding principles and practices-Part 1. Fundamental considerations on grounding currents," Electrical Engineering, Vol. 64, pp. 1-13, Enero 1945.

[B77] Schwarz, S. J., "Analytical expression for resistance of grounding systems," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 73, no. 13, part III-B, pp. 1011-1016. Enero 1945.

[B78] Sebo, S. A., " Zero sequence current distribution along transmission lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, pp. 910-919, Junio 1969.

[B79] Sunde, E. D., Earth conduction effects in transmission systems, New York: McMillan, 1968.

[B80] Sverak, J. G., " Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid: Part I-How good is the present IEEE method?" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 1, pp. 7-25, Enero 1984

[B81] Tagg, G. F., " Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering large area," Proceedings of IEE, Vol. 111, no. 12, pp. 2118-2130, 1974.

[B82] Tagg, G. F., " Measurements of the resistance of an earth-electrode systems covering large area," Proceedings of IEE, Vol. 116, no. 3, pp. 475-479, Marzo 1969.

[B83] Tagg, G. F., "Measurements of the resistance of physically large earthelectrode systems," Proceedings of IEE, Vol. 117, no. 11, pp. 2185-2190, Nov. 1970.

[B84] Thapar, B., Gerz, V., and Emmanuel, P., "Ground resistance of the foot in substation yards," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 1-6, Enero 1993.

[B85] Thapar, B., Gerz, V., Kejriwal, H., "Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, no. 1, pp. 360-368, Enero 1994.

[B86] Verma, R., Merand, A., and Barberau, P., "design of low resistance grounding system for hydroelectric plant located on highly resistive soils," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 5, pp. 10760- 1768, Sept./ Oct. 1978.

[B87] Verma, R., and Mukhedkar, D., "Ground fault current distribution in substation, towers and ground wire," IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, vol. PAS-98, pp. 724-730, Mayo/Junio 1979.