

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



**ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA COMPUTARIZADO PARA EL  
CÁLCULO ELÉCTRICO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA  
SUBESTACIONES BASADOS EN LA NORMA IEEE 80-2000**

Realizado por:

**MIGUEL ANGEL MESA GONZALEZ**

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE  
ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

BARCELONA, Junio de 2010

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



**ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA COMPUTARIZADO PARA EL  
CÁLCULO ELÉCTRICO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA  
SUBESTACIONES BASADOS EN LA NORMA IEEE 80-2000**

El Jurado hace constar que ha asignado a esta Tesis la calificación de:

---

**Ing. Melquíades  
Bermúdez**

---

**Ing. Luís Suárez  
Jurado Principal**

---

**Ing. Verena Mercado  
Jurado Principal**

BARCELONA, Junio de 2010

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo N° 41 del Reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario”, para su autorización.

## **DEDICATORIA**

A Dios Todopoderoso por ayudarme a concluir con este proyecto, a pesar de todos los obstáculos que se encontraron en mi camino.

A mi madre

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios Todopoderoso por ayudarme a concluir con este proyecto, a pesar de todos los obstáculos que se encontraron en mi camino.

Agradezco, también a mis padres, por su infinito apoyo y ayuda brindada en cualquier momento y etapa de mi vida, a mis hermanos y demás familiares. De manera muy especial agradezco a mi madre, quien con toda paciencia y constancia, colocó en mis manos las herramientas y bases necesarias para salir adelante.

Al profesor Melquíades Bermúdez, por brindarme su apoyo al aceptar ser mi asesor académico y prestarme su ayuda para encaminar y culminar este importante logro.

Quiero agradecer a mis amigos Cheo Figueroa, Renzo del Rió, Neal Arvelaez, Carlos Fuentes, Kamal Arreaza, weibull Madrigal, guillote Casaldelrey.

A todos, Gracias.

## RESUMEN

Los cálculos eléctricos para el diseño de una malla de puesta a tierra son muy complejos y extensos, es por esto que se desarrolló un programa computarizado capaz de realizar los cálculos eléctricos de los parámetros necesarios para el diseño de la malla de puesta a tierra a instalar en suelos homogéneos de una manera rápida, efectiva y automatizada, dado la resistividad del terreno, las dimensiones que ocupará la malla de tierra, la corriente de falla, el tiempo de duración de la falla, el factor de expansión futura, la relación de impedancias del sistema, el tipo de material a utilizar en el conductor. Permitiendo calcular los voltajes de paso y toque tolerables por el cuerpo humano, el calibre del conductor, la resistencia de la malla de tierra utilizando la ecuación de sveraks o la de schwarz, el máximo gradiente de potencial, los voltajes de toque y paso en la periferia de la malla. Éste programa fue creado mediante el programa Gamba (software libre), que permite a través de un ambiente gráfico, el desarrollo de aplicaciones avanzadas, además permite la modificación y mejoras del programa desarrollado ya que la licencia de este programa es de libre acceso, sin restricciones al código fuente. El ambiente grafico del programa desarrollado posee similitud con programas desarrollados bajo el sistema operativo Microsoft Windows, permitiendo que el usuario se adapte de forma rápida.

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un programa computacional para el cálculo eléctrico de una malla de puesta a tierra en subestaciones, para así, minimizar las horas-hombre en la selección de una malla adecuada, según la topología del terreno donde será instalada, además de la cantidad de electrodo, en normas tanto nacionales como internacionales como son la norma IEEE 80-2000, Código Eléctrico Nacional y CADAPE (actualmente Corpoelec).

## INDICE GENERAL

<b>RESOLUCIÓN .....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>INDICE GENERAL.....</b>	<b>VII</b>
<b>INDICE DE FIGURA.....</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>21</b>
<b>EL PROBLEMA .....</b>	<b>21</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA .....	21
1.2 OBJETIVOS.....	23
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	23
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	23
1.3 ALCANCE .....	24
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	24
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>26</b>
<b>SISTEMA DE PUESTA A TIERRA .....</b>	<b>26</b>
2.1 SISTEMA DE TIERRA. ....	26
2.2 OBJETIVOS FUNDAMENTALES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. ....	26
2.3 PUESTA A TIERRA.....	27
2.3.1 <i>Características de la Puesta a Tierra.</i> .....	28
2.3.2 <i>Objetivos de un Sistema de Puesta a Tierra.</i> .....	29
2.4 PUESTA A TIERRA CON ELECTRODOS. ....	30
2.4.1 <i>Tipos de Electrodos.</i> .....	31
2.4.2 <i>Configuraciones de Electrodos.</i> .....	39

2.4.3 Puesta a Tierra con Electrodo Verticales.....	40
2.4.4 Puesta a Tierra con Electrodo Horizontales. ....	40
2.4.5 Ventajas de una Barra o Electrodo de Puesta A Tierra...	41
2.5 MALLA DE TIERRA. ....	41
2.5.1 Objetivos de una Malla de Tierra.....	41
2.5.2 Característica de una Malla de Tierra. ....	42
2.5.3 Ventajas de una Malla de Tierra.....	43
2.6 FACTORES CONSIDERADOS EN EL DISEÑO DE MALLA DE TIERRA.	44
2.6.1 Niveles Máximos de Cortocircuito. ....	44
2.6.2 Tipos Posibles de Falla a Tierra.....	44
2.6.2.1 Falla de una Línea a Tierra o Falla Monofásica.....	45
2.6.2.2 Falla Bifásica o de Línea a Línea.....	45
2.7 MALLA EQUIPOTENCIAL.....	46
2.8 MÉTODOS DE PUESTA A TIERRA EN SISTEMAS DE POTENCIA.....	46
2.8.1 Sistema Aislado.....	46
2.8.2 Sistema Solidamente Aterrado.....	47
2.8.3 Puesta a Tierra a Través de una Resistencia.....	48
2.8.4 Sistema de Puesta a Tierra a Través de una Bobina de Petersen. ....	49
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>50</b>
<b>MEDICION DE RESISTIVIDAD.....</b>	<b>50</b>
3.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO .....	50
3.2 INFLUENCIAS EN EL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SUELO ..	52
3.3 ASPECTOS RELACIONADOS CON LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO .....	52
3.3.1 Corrosividad del Suelo .....	52
3.4 FACTORES QUE DETERMINAN LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS .	56
3.4.1 La Estratificación del Terreno.....	56
3.4.2 La Compactación del Terreno .....	57
3.4.3 Naturaleza de los Suelos.....	58



3.4.4 Humedad.....	59
3.4.5 La Temperatura del Terreno.....	60
3.4.6 La Concentración de las Sales Disueltas .....	61
3.5 GENERALIDADES DE LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD .....	62
3.6 FINALIDAD DE LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD .....	62
3.7 MÉTODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD.....	63
3.7.1 El Método de Información Geológica y Muestras de Suelo	
.....	64
3.7.2 Método de los Dos Puntos. ....	64
3.7.3 Método de los Tres Puntos.....	64
3.7.4 Método de los Cuatro Puntos o Electrodo. ....	65
3.7.4.1 Configuración Wenner. ....	67
3.7.4.2 Configuración Schlumberger. ....	68
3.7.4.3 Procedimiento y Recomendaciones.....	69
3.8 LA MODELIZACIÓN DEL SUELO .....	71
3.8.1 El Suelo Homogéneo .....	71
3.8.2 Los Suelos Heterogéneos .....	72
3.8.2.1 El Suelo Biestratificado .....	72
3.8.2.1.1 El Suelo Biestratificado con $\rho_1 < \rho_2$ .....	73
3.8.2.1.2 El Modelo Biestratificado con $\rho_1 > \rho_2$ .....	74
3.8.2.2 El Suelo Multiestratificado.....	75
3.8.3 Los Métodos de Modelización de los Suelos Heterogéneos	
.....	76
3.8.3.1 El Método de Sunde .....	76
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>78</b>
<b>PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE UNA</b>	
<b>MALLA DE PUESTA A TIERRA EN UNA SUBESTACION .....</b>	<b>78</b>
4.1 PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES .....	78
4.1.1 Voltaje de Paso .....	79
4.1.2 Voltaje de Toque .....	79

4.1.3 Voltaje de Malla.....	80
4.1.4 Voltaje Transferido .....	80
4.2 DETERMINACION DE LA MÁXIMA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA O CORRIENTE DE MALLA .....	83
4.2.1 Factor de Reducción o División de Corrientes de Falla ( $S_f$ ). .....	83
4.2.2 Factor de Corrección o Decrecimiento de la Corriente de Falla Asimétrica ( $D_f$ ). .....	84
4.2.3 Factor de Corrección para el Crecimiento del Sistema a Futuro $C_p$ . .....	86
4.2.4 Valor RMS de la Corriente Simétrica de Falla a Tierra....	86
4.3 VOLTAJE DE TOQUE PELIGROSO EN LA PERIFERIA (EM) .....	88
4.3.1 Factor De Espaciamiento Para El Voltaje De Toque ( $K_m$ ) 88	
4.3.2 Factor de corrección de irregularidad ( $K_i$ ).....	91
4.4 VOLTAJE DE PASO PELIGROSO EN LA PERIFERIA (ES) .....	92
4.4.1 Factor de Espaciamiento para el Voltaje de Paso ( $K_s$ ) ...	93
4.5 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA (RG). .....	93
4.5.1 Resistencia de Sverak´s.....	94
4.5.2 Resistencia de Schwarz .....	95
4.6 DETERMINACIÓN DE LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR .....	98
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>100</b>
<b>DESARROLLO DEL PROGRAMA.....</b>	<b>100</b>
5.1 DIAGRAMA DE FLUJOS .....	100
5.2 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA .....	101
5.2.1 Diagrama de Datos del Proyecto y Cálculo del Calibre del Conductor por la norma IEEE 80-2000.....	103
5.2.2 Diagrama de Cálculo de los Voltajes de Toque y Paso Máximo Tolerables por la norma IEEE 80-2000 .....	105
5.2.3 Diagrama de Cálculo de la Resistencia de la Malla, GPR, Voltajes de Toque y de Paso por la norma IEEE 80-2000.....	106

5.2.4 Criterios de Diseño de una Malla de Puesta a Tierra <i>Utilizado por la Norma CADAPE y IEEE 80-2000</i> .....	107
5.3 DESARROLLO DEL SOFTWARE .....	107
5.5 EL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN GAMBAS .....	108
5.6 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE.....	110
5.7 CONOCIMIENTOS BASICOS PARA LA UTILIZACION DEL SOFTWARE .....	111
5.8 ESTRUCTURA DEL SOFTWARE .....	112
5.8.1 Datos del Terreno.....	112
5.8.2 Datos de la Corriente de Falla.....	113
5.8.3 Datos de la Geometría de la Malla y Barras de Tierra ..	114
5.8.4 Datos de la Profundidad y el Espaciamiento entre Conductores de la Malla .....	115
5.8.5 Resultados del Calibre del Conductor a Utilizar en la Construcción de la Malla de Tierra .....	116
5.8.6 Voltajes de Toque y Paso Permisibles .....	117
5.8.7 Resistencia de la Malla de Tierra y el Máximo Potencial a Tierra (GPR) .....	118
5.8.8 Voltajes de Toque y Paso en la Periferia de la Malla ....	119
5.8.9 Mensajes de Error Emitido por Valores Negativos y Ceros .....	120
5.8.10 Mensajes de Error Emitido por una Doble Selección ..	121
<b>CAPITULO VI.....</b>	<b>123</b>
<b>VALIDACION DEL PROGRAMA.....</b>	<b>123</b>
<b>RESULTADOS, MANUALES Y DATOS COMPUTARIZADOS... 123</b>	
6.1 DESARROLLO DE CÁLCULOS MANUALES .....	123
6.1.1 Valores Utilizados en el Ejemplo 1 .....	123
6.1.2 Valores Utilizados en el Ejemplo 2 .....	125
6.1.3 Valores Utilizados en el Ejemplo 3.....	126
6.2 RESULTADOS COMPUTARIZADOS .....	128

6.2.1 Ejemplo N° 1: Entrada de Datos.....	128
6.2.2 Ejemplo N° 1: Resultados.....	129
6.2.3 Ejemplo N° 1: Ventana del Programa, datos y resultados .....	130
6.2.4 Ejemplo N° 2: Entrada de Datos.....	131
6.2.5 Ejemplo N° 2: Resultados.....	132
6.2.6 Ejemplo N° 2: Ventana del Programa, Datos y Resultados .....	133
6.2.7 Ejemplo N° 3: Entrada de Datos.....	134
6.2.8 Ejemplo N° 3: Resultados.....	135
6.2.9 Ejemplo N° 3: Ventana del Programa.....	136
6.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	137
6.4 REDISEÑO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL EJEMPLO 1 VARIANDO EL ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES Y LA PROFUNDIDAD DE LA MALLA.....	138
6.4.1 Resultados Obtenidos con el Programa para las Diferentes Separaciones entre Conductores y Profundidades de la Malla de Puesta a Tierra .....	139
6.4.2 Comparación y Análisis de Resultados .....	144
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>148</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>150</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>151</b>
<b>METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....</b>	<b>153</b>

## INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL VALOR RESISTIVO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CONFIGURACIÓN, P.45, SUAREZ (2007). .....	40
TABLA 3.1 TIPO DE SUELO DE ACUERDO AL PORCENTAJE DE ACIDEZ, P47, CEDEÑO (2009). .....	55
TABLA 3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DE ACUERDO A LA CORROSIVIDAD, P48, CEDEÑO (2009). .....	55
TABLA 3.3 VALORES DE RESISTIVIDAD DE ALGUNOS SUELOS, P.55, SUAREZ (2007). .....	58
TABLA 4.2 VALORES TÍPICOS DE CP, P72, CEDEÑO (2009). ....	86
TABLA 4.3 CONSTANTES DE LOS MATERIALES P.44, IEEE 80 (2000). .....	99
TABLA 5.1 SÍMBOLOS BÁSICOS NORMALIZADOS DE LOS DIAGRAMAS DE FLUJO .....	100
TABLA 5.2 PARÁMETROS DE LOS DIAGRAMAS UTILIZADOS EN LOS DIAGRAMAS DE FLUJOS. ....	102
TABLA 6.1 DATOS DEL EJEMPLO “REDISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN TIGRE I 230/115 KV DE LA EMPRESA CADAPE” .....	124
TABLA 6.2 RESULTADOS DEL EJEMPLO “REDISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN TIGRE I 230/115 KV DE LA EMPRESA CADAPE” .....	124
TABLA 6.3 DATOS DEL EJEMPLO “MALLA RECTANGULAR CON BARRAS DE PUESTA A TIERRA” .....	125

TABLA 6.4 RESULTADOS DEL EJEMPLO “MALLA RECTANGULAR CON BARRAS DE PUESTA A TIERRA” .....	126
TABLA 6.5 DATOS DEL EJEMPLO “MALLA EN FORMA DE L CON BARRAS DE PUESTA A TIERRA” .....	126
TABLA 6.6 RESULTADOS DEL EJEMPLO “MALLA EN FORMA DE L CON BARRAS DE PUESTA A TIERRA” .....	127
TABLA 6.7 – COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL EJEMPLO 1 .....	137
TABLA 6.8 – COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL EJEMPLO 2 .....	137
TABLA 6.9 – COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL EJEMPLO 3 .....	137
TABLA 6.5 DATOS Y RESULTADOS DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL EJEMPLO 1 (PARA UNA SEPARACIÓN ENTRE CONDUCTORES 3 M).....	139
TABLA 6.6 DATOS Y RESULTADOS DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL EJEMPLO 1 (PARA UNA SEPARACIÓN ENTRE CONDUCTORES 5 M).....	140
TABLA 6.7 DATOS Y RESULTADO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL EJEMPLO 1 (PARA UNA SEPARACIÓN ENTRE CONDUCTORES 10 M).....	141
TABLA 6.8 MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL EJEMPLO 1 (PARA UNA PROFUNDIDAD DE LA MALLA 0.5 M).....	142
TABLA 6.9 MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL EJEMPLO 1 (PARA UNA PROFUNDIDAD DE LA MALLA 0.8 M).....	143
TABLA 6.10 MALLA DE PUESTA A TIERRA DEL EJEMPLO 1 (PARA UNA PROFUNDIDAD DE LA MALLA 1.10 M).....	144

TABLA 6.11 COMPARACIÓN DE LOS DISTINTOS ESPACIAMIENTOS ENTRE CONDUCTORES .....	145
---	-----

TABLA 6.12 COMPARACIÓN DE LAS DISTINTAS PROFUNDIDADES DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA .....	146
---	-----

## INDICE DE FIGURA

FIGURA. 2.1 (A) RESISTENCIA DE DISPERSIÓN DE UN ELECTRODO. (B)DISPERSIÓN DE UNA CORRIENTE POR ELECTRODO, P.22, GIRAL (2006). .....	31
FIGURA. 2.2 VARILLAS, P.16, NELSON, (1999).....	32
FIGURA. 2.3 ELECTRODO DE BARRA, P.39, IZARRA, (2008)....	33
FIGURA. 2.4 BARRAS COPPERWELD, P.25, GIRAL (2006). .....	33
FIGURA. 2.5 ELECTRODOS DE PROFUNDIDAD, P35, BARAHONA (2003) .....	34
FIGURA. 2.6 ELECTRODOS TIPO ESTRELLA, P.30, GIRAL (2006). .....	35
FIGURA. 2.7 ELECTRODO RÍGIDO DE GRAFITO, P38, BARAHONA (2003). .....	35
FIGURA. 2.8 ESQUEMA DEL ELECTRODO RÍGIDO DE GRAFITO, P38, BARAHONA (2003). .....	36
FIGURA. 2.9 ELECTRODOS DE PLACAS ENTERRADAS, P.16, NELSON, (1999).....	37
FIGURA. 2.10 ELECTRODOS HORIZONTALES O CONTRAPESOS, P50, BARAHONA (2003).....	37
FIGURA. 2.11 MALLA DE TIERRA, P.28, GIRAL (2006).....	38
FIGURA. 2.12 INSTALACIÓN DE VARILLA COPPERWELD, P.40, GIRAL (2006).....	39
FIGURA. 2.13 FALLA MONOFÁSICA, P.41, GIRAL (2006).....	45
FIGURA. 2.14 FALLA BIFÁSICA, P.41, GIRAL (2006). .....	45
FIGURA. 2.15 SISTEMA CON NEUTRO AISLADO, P38, CEDEÑO (2009). .....	47



FIGURA. 2.16 SISTEMA CON NEUTRO PUESTO A TIERRA, P38, CEDEÑO (2009). .....	48
FIGURA. 3.1 RESISTIVIDAD DE UN CUBO DE TERRENO DE 1 M DE ARISTA, P5, IZARRA (2009). .....	50
FIGURA 3.2 INFLUENCIA DE LA ESTRATIFICACIÓN DEL TERRENO EN LA RESISTIVIDAD DEL MISMO, P.50, GIRAL (2006)....	57
FIGURA 3.3 VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN FUNCIÓN DE LA COMPACTACIÓN DEL MISMO, P.48, SUAREZ (2007). .....	57
FIGURA 3.4 VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN FUNCIÓN AL PORCENTAJE DE HUMEDAD, P25, BARAHONA (2003). .....	59
FIGURA 3.5 VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA, P52, CEDEÑO (2009). .....	60
FIGURA 3.6 VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN FUNCIÓN DEL %DE SAL, P53, CEDEÑO (2009). .....	61
FIGURA. 3.7 MÉTODO DE LOS 2 PUNTOS, P60, GIRAL (2006)..	64
FIGURA 3.8 MÉTODO DE LOS 3 PUNTOS, P61, GIRAL (2006)...	65
FIGURA. 3.9 MÉTODO DE LOS 4 PUNTOS, P62, GIRAL (2006)..	66
FIGURA. 3.10 CONFIGURACIÓN WENNER, P63, GIRAL (2006) .	68
FIGURA. 3.11 CONFIGURACIÓN SCHLUMBERGER, P10, IZARRA (2008) .....	69
FIGURA. 3.12 DIRECCIONES RECOMENDADAS PARA EFECTUAR LA MEDICIÓN .....	69
FIGURA 3.13 LA CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE EN FUNCIÓN CON LA SEPARACIÓN DE LOS ELECTRODOS PARA SUELOS ESTRATIFICADOS, P40, CHIRIBOGA (2008).....	72

FIGURA 3.14 EL MODELO DE DOS SUELOS CON $P_1 < P_2$ , P106, CHIRIBOGA (2008). .....	73
FIGURA 3.15 LA RESISTIVIDAD APARENTE $P_A$ , CUANDO $P_1 < P_2$ , P107, CHIRIBOGA (2008). .....	74
FIGURA 3.16 EL MODELO DE DOS SUELOS CON $P_1 > P_2$ , P107, CHIRIBOGA (2008). .....	74
FIGURA 3.17 LA RESISTIVIDAD APARENTE $P_A$ , CUANDO $P_1 > P_2$ , P108, CHIRIBOGA (2008). .....	75
FIGURA 3.18 EL TERRENO MULTIESTRATIFICADO, P12, IZARRA (2008). .....	75
FIGURA 3.19 EL MÉTODO DE SUNDE, P59, IEEE80 (2000).....	77
FIGURA 4.1 VOLTAJE DE PASO, P19, IEEE 80 (2000). .....	79
FIGURA 4.2 VOLTAJE DE PASO, P17, IEEE 80 (2000). .....	80
FIGURA 4.3 CURVA ESTÁNDAR PARA ESTIMAR EL VALOR DE CS, FUNCIÓN DEL FACTOR K Y DEL ESPESOR DE LA PIEDRA PICADA, P22, IEEE 80 (2000).....	82
FIGURA 4.4 CURVAS PARA DETERMINAR EL VALOR DE $S_F$ , P151, IEEE 80 (2000). .....	84
FIGURA 4.5 GRÁFICAS PARA DETERMINAR LAS CONSTANTES GEOMÉTRICAS $K_1$ Y $K_2$ , P67, IEEE 80 (2000). .....	97
FIGURA 5.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL DATOS DEL PROYECTO Y CALCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR UTILIZANDO LA NORMA IEEE 80-2000. FUENTE: [AUTOR].....	104
FIGURA 5.3 DIAGRAMA DEL FLUJO DEL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LA MALLA, GPR, VOLTAJES DE TOQUE UTILIZANDO LA NORMA IEEE80-2000. FUENTE:[AUTOR].....	106
FIGURA 5.7 ENTORNO DE PROGRAMACIÓN DE GAMBAS.....	109

FIGURA 5.8 VISTA DEL PROGRAMA INDICANDO EL LUGAR DONDE SE SELECCIONA LA CAPA SUPERFICIAL Y LA INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS DEL TERRENO .....	113
FIGURA 5.9 VISTA DEL PROGRAMA INDICANDO EL LUGAR DONDE SE SELECCIONA EL MATERIAL DEL CONDUCTOR A UTILIZAR Y LA INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA.....	114
FIGURA 5.10 VISTA DEL PROGRAMA INDICANDO EL LUGAR DONDE SE SELECCIONA EL LA GEOMETRÍA DE LA MALLA MATERIAL Y LA DISPOSICIÓN DE LAS BARRAS DE PUESTA A TIERRA.....	115
FIGURA 5.11 VISTA DEL PROGRAMA INDICANDO LAS CASILLAS DONDE SE INTRODUCE EL VALOR DEL ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES Y PROFUNDIDAD DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA.....	116
FIGURA 5.12 VISTA DEL PROGRAMA INDICANDO LA SECCIÓN DONDE SE MOSTRARAN LOS RESULTADOS DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL CONDUCTOR CALCULADO ...	117
FIGURA 5.13 VISTA DEL PROGRAMA INDICANDO EL LUGAR DONDE SE SELECCIONA EL PESO DE LA PERSONA A LA CUAL SE LE CALCULAN LOS VOLTAJES DE TOQUE Y PASO PERMISIBLES	118
FIGURA 5.14 VISTA DEL PROGRAMA INDICANDO LA SECCIÓN DONDE SE MOSTRARA LOS RESULTADOS DE RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA Y EL MÁXIMO POTENCIAL DE LA MALLA.....	119
FIGURA 5.15 VISTA DEL PROGRAMA INDICANDO LA SECCIÓN DONDE SE MOSTRARA LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LOS VOLTAJES DE TOQUE Y DE PASO EN LA PERIFERIA DE LA MALLA .....	120

FIGURA 5.16 VISTA DEL PROGRAMA ARROJANDO UN MENSAJE DE ERROR POR LA INTRODUCCIÓN DE UN PARÁMETRO NEGATIVO O CERO .....	121
FIGURA 5.18 VISTA DEL PROGRAMA ARROJANDO UN MENSAJE DE ERROR AL SELECCIONAR DOS OPCIONES AL MISMO TIEMPO .....	122
FIGURA 6.1 DATOS DE ENTRADA DEL EJEMPLO 1 EXTRAÍDOS DE LA TABLA 6.1 .....	128
FIGURA 6.2 RESULTADOS DEL EJEMPLO 1 ARROJADOS POR EL PROGRAMA.....	129
FIGURA 6.3 DATOS Y RESULTADOS DEL EJEMPLO 1, OBTENIDOS CON EL PROGRAMA DE PUESTA A TIERRA.....	130
FIGURA 6.4 DATOS DE ENTRADA DEL EJEMPLO 2 EXTRAÍDOS DE LA TABLA 6.3 .....	131
FIGURA 6.5 RESULTADOS DEL EJEMPLO 2 ARROJADOS POR EL PROGRAMA.....	132
FIGURA 6.6 DATOS Y RESULTADOS DEL EJEMPLO 2, OBTENIDOS CON EL PROGRAMA DE PUESTA A TIERRA.....	133
FIGURA 6.7 DATOS DE ENTRADA DEL EJEMPLO 3 EXTRAÍDOS DE LA TABLA 6.5 .....	134
FIGURA 6.8 RESULTADOS DEL EJEMPLO 3 ARROJADOS POR EL PROGRAMA.....	135
FIGURA 6.9 DATOS Y RESULTADOS DEL EJEMPLO 3, OBTENIDOS CON EL PROGRAMA DE PUESTA A TIERRA.....	136

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento De Problema**

Desde el mismo inicio de la Electrotecnia se sabe que la tierra (globo terrestre) mantiene constante su propio potencial, esto la faculta para absorber grandes cantidades de electricidad, debido a su baja resistencia óhmica. La tierra, por lo tanto, sirve para proteger equipos, personas y drenar corrientes hacia ella.

Las puestas a tierra se han generalizado debido a que todo sistema eléctrico debe referirse a un sistema de condiciones definidas, el cual se asume como base. Hoy en día, la tierra es usada principalmente para fijar el punto neutro del sistema eléctrico y es inevitable incluirla como parte del circuito.

Las puestas a tierra son componentes muy importantes del sistema, ya que deben ser diseñadas para permitir las descargas a tierra de cargas eléctricas originadas por rayos (descargas atmosféricas), fallas eventuales del sistema o electricidad estática, además deben tener gran capacidad de dispersión evitando la presencia de potenciales (Voltajes) peligrosos en la superficie del suelo, que puedan atentar contra personas o en contra de equipos muy costosos. No sólo el costo de estos equipos peligra sino también la valiosa información en muchos casos con mayor valor que los equipos.

El diseño de la malla de puesta a tierra involucra un gran número de parámetros y variables que hacen muy largo y engorroso su diseño,

por esta razón surge la necesidad de desarrollar una herramienta que permita

Optimizar al máximo el tiempo de elaboración del diseño y que a su vez permita entregar resultados confiables y precisos de la malla de puesta a tierra. Esta herramienta contendrá todo lo requerido para realizar el diseño de la malla de puesta a tierra como lo son el cálculo de las tensiones de paso, contacto y de malla según la topología del terreno, la selección del conductor de la malla, dimensionado de la retícula de la malla y la resistencia de puesta a tierra.

La herramienta se basará en el estudio y comprobación de las ecuaciones de la norma IEEE 80-2000 para el diseño de mallas de puesta a tierra para subestaciones, las cuales permiten realizar un diseño de la malla de puesta a tierra de forma rápida y precisa. Actualmente existen programas en el mercado, que realizan dichos cálculos pero la licencia de dichos programas es muy costosa, por lo que surge la necesidad de diseñar un programa que realice estos cálculos y que además cuente con una interfaz de comunicación con el usuario de fácil y rápida adaptación a través de un ambiente de entrada por pantalla, la programación se realizará en lenguaje Basic, mediante cualquier software de programación de código libre, evitando el desarrollo manual de los cálculos de los parámetros de diseño eléctrico de las mallas de puesta a tierra, los cuales en algunos casos pueden llegar a ser muy complejos, debido al alto nivel matemático que requieren.

La universidad de Oriente a través del desarrollo y la investigación crea soluciones técnicas adecuadas para temas que promuevan en sus futuros profesionales de la Ingeniería Eléctrica el desarrollo y la creación de estas herramientas computacionales con el fin de obtener soluciones

técnicas adecuadas para el diseño y Análisis de las mallas de puesta a tierra.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Elaborar un programa computarizado para el cálculo eléctrico de la malla de puesta a tierra para subestaciones basados en la norma IEEE 80-2000.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Describir los modelos de suelos utilizados en la norma IEEE 80-2000 para el cálculo eléctrico de la malla de puesta a tierra.
- Calcular los parámetros técnicos del conductor, los potenciales de toque y de paso permisibles, la resistencia de malla y el máximo potencial de malla (GPR).
- Obtener los voltajes máximos de toque y paso para las diferentes topologías del terreno (cuadrada, rectangular y en forma de L).
- Elaborar el algoritmo y programación del sistema bajo la herramienta computacional Gamba (software libre).
- Comprobar los cálculos eléctricos de una malla de puesta a tierra realizados por el programa, mediante la aplicación del mismo en estudios realizados en el departamento de electricidad.

### **1.3 Alcance**

El presente proyecto permitirá facilitar los cálculos eléctricos que se deben realizar para el diseño de una malla de puesta a tierra en subestaciones, agilizando el proceso de diseño a través de la herramienta computacional.

El programa se basará en la norma internacional IEEE 80-2000 teniendo como recomendaciones, y se adaptara a los reglamentos del país, las normas CADAFE (actualmente Corpoelec) y el código eléctrico nacional.

### **1.4 Justificación**

La electricidad es un factor muy importante en el desarrollo de nuestra sociedad, por esta razón el suministro de energía debe ser continuo, para ello es necesario que las subestaciones que son las encargadas de suministrar la energía a nuestros hogares permanezcan en continuo funcionamiento. Para ello es necesario que la subestación en su construcción cuente con un buen diseño de un sistema de puesta a tierra que drene las corrientes provenientes de fallas a tierra, para proteger los equipos instalados y brindarle seguridad al personal y así minimizar la probabilidad de corte eléctrico por fallas de este tipo.

La razón principal de este proyecto esta enfocado en el diseño de una malla de puesta a tierra considerando un suelo homogéneo, tomando en consideración las diferentes configuraciones de la malla de puesta a tierra (con electrodos y considerando la topología del terreno).

El análisis posterior abarca la determinación de la resistencia de puesta a tierra tomando en cuenta la norma IEEE 80-2000, y además



brindar información de voltaje de toque y paso, potencial de superficie (GPR), y otros datos de interés, mediante el programa computacional a elaborar.

## **CAPÍTULO II**

### **SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

#### **2.1 Sistema De Tierra.**

El sistema de tierra de una instalación está constituido por malla de tierra y puesta de tierra, se debe diseñar de manera que se disponga de las máximas condiciones de seguridad para el personal y los equipos instalados.

#### **2.2 Objetivos Fundamentales De Un Sistema De Puesta A Tierra.**

- Puesta a tierra para protección contra frentes de onda debido a operaciones del sistema de potencia y las descargas atmosféricas.
- Puesta a tierra de neutros para estabilizar los potenciales con respecto a tierra, y proporcionar los medios para la utilización de relés para la protección de falla a tierra.
- Asegurar que las partes metálicas que no lleven corriente, tales como armazones de equipos, estructuras y otros, estén siempre al potencial de tierra, aun en el caso de aislamiento.
- Reducir a un mínimo que no sea peligroso los gradientes de potencial en la superficie de la instalación durante las máximas condiciones de falla.
- Asegurar que el patio de la instalación tenga un potencial, lo mas uniforme posible. Durante las máximas condiciones de falla, la red no deberá experimentar un aumento de temperatura que sea peligroso a los conductores, uniones, soldadura del

sistema. Proteger la operación de sistemas electrónicos y de comunicaciones.

- Proteger contra carga estática.

### **2.3 Puesta a Tierra.**

La puesta a tierra en una determinada instalación, consiste en un conjunto de elementos que permiten un contacto eléctrico conductivo entre el medio (terreno en general) e instalaciones, equipos, estructuras, etc. A través de una unión intencional o casual a tierra, mediante la cual se pueda dispersar las corrientes producidas por anomalías en el sistema. Estas se disipan por medio de conductores, barras, plato, malla metálica en la superficie del suelo. A las tomas de tierra en forma de barra o plato se les llaman electrodos.

La tierra está compuesta por muchos materiales, los cuales pueden ser buenos o malos conductores de la electricidad, pero, la tierra como un todo es considerada como un buen conductor. Por esta razón y como punto de referencia, al potencial de tierra se le asume cero. La resistencia de un electrodo de tierra, medido en ohmios, determina que tan rápido, y a que potencial, la energía se equipara. De esta manera, la puesta a tierra es necesaria para mantener el potencial de los objetos al mismo nivel de tierra.

### 2.3.1 Características de la Puesta a Tierra.

- Conducir y dispersar en el terreno las corrientes de cualquier naturaleza que se puedan presentar ya sea por falla, frecuencia industrial, descargas atmosféricas o debidas a maniobras, sin provocar gradientes de potencial peligrosos sobre la superficie de un terreno o entre un punto del terreno y objetos conductores vecinos, para lo cual se debe presentar una resistencia eléctrica adecuada que represente una buena capacidad de conducción.
- Los diferentes elementos y electrodos que conforman el sistema de puesta a tierra deben ser capaces de conducir, durante el mayor tiempo posible, las corrientes de fallas sin sufrir calentamientos excesivos.
- Debe tener impedancia de onda de un valor bajo, de tal forma que al ocurrir descargas atmosféricas, no se produzcan arcos inversos entre las partes metálicas y los conductores energizados.
- Debe ser resistente al ataque corrosivo del terreno.
- El valor de la resistencia debe ser el adecuado para cada tipo de instalación.
- La variación de la resistencia eléctrica del terreno debida a cambios ambientales debe ser mínima, tal que en cualquier época del año, la corriente de falla a tierra sea capaz de producir la operación de los elementos de protección como son relés, fusibles, pararrayos, etc.
- Su vida útil debe ser mayor de 20 años.
- Debe permitir un mantenimiento periódico.
- Su costo debe ser lo más bajo posible, considerando los requerimientos de las normas y especificaciones.

### 2.3.2 Objetivos de un Sistema de Puesta a Tierra.

- Mantener una diferencia de potencial muy baja entre las diferentes estructuras metálicas con lo que se busca resguardar al personal de cualquier choque eléctrico.
- Contribuir a un mejor desempeño de los sistemas de protección.
- Evitar incendios provocados por materiales volátiles o la combustión de gases al proveer un camino efectivo y seguro para la circulación de corrientes de falla y descargas atmosféricas y estáticas y así eliminar los arcos y elevadas temperaturas en los equipos eléctricos.
- Buen desempeño de equipos.
- Mantener un potencial de referencia para la adecuada operación de instrumentos y equipos.
- Eliminación de ruidos eléctricos.
- Los sistemas de puesta a tierra varían ampliamente de acuerdo con el tipo de instalación y operación del sistema eléctrico.
- Cuando una corriente DC o AC de baja frecuencia es inyectada en un sistema de puesta a tierra, la corriente fluye por todos los conductores y pasa a la tierra a lo largo de la superficie de ellos. Dicha corriente encuentra una resistencia, la cual depende principalmente de la resistividad del suelo. Debido al efecto de una corriente fluyendo a través de una resistencia, el sistema de puesta a tierra y todas las estructuras metálicas conectadas a él sufrirán una elevación de potencial con respecto a un punto remoto. Esta elevación de potencial puede producir sobre la superficie del terreno gradientes de potencial que pueden resultar peligrosos para las personas. Por esto se hace necesario el análisis de algunas tensiones sobre la superficie del terreno (tensión de paso y tensión de toque).

## 2.4 Puesta A Tierra Con Electrodo.

La puesta a tierra de una barra o electrodo se mide por la resistencia del suelo que está a su alrededor. La barra se puede imaginar como rodeada de capas concéntricas de tierra o suelo, todas del mismo espesor. Las capas cercanas al electrodo al tener menor superficie aumentan su resistencia y viceversa, la distancia donde se encuentra el “área de resistencia efectiva” es directamente dependiente de la profundidad a la que se entierra el electrodo.

A partir de la disponibilidad de espacio y la resistividad de diseño, se establecen el tipo y la forma de instalación del electrodo de puesta a tierra, que deberá ser de cobre macizo por su alta resistencia a la corrosión, aunque en la actualidad existen barras electroquímicas que cumplen la función de un electrodo pero deben ser recargadas periódicamente (aproximadamente una vez al año). Se puede optimizar la geometría y capacidad de dispersión con el uso de un relleno neutro de baja resistividad ( $\rho_r$ ) de modo que su radio ( $r$ ) pueda ampliarse al máximo ( $r \rightarrow R$ ).

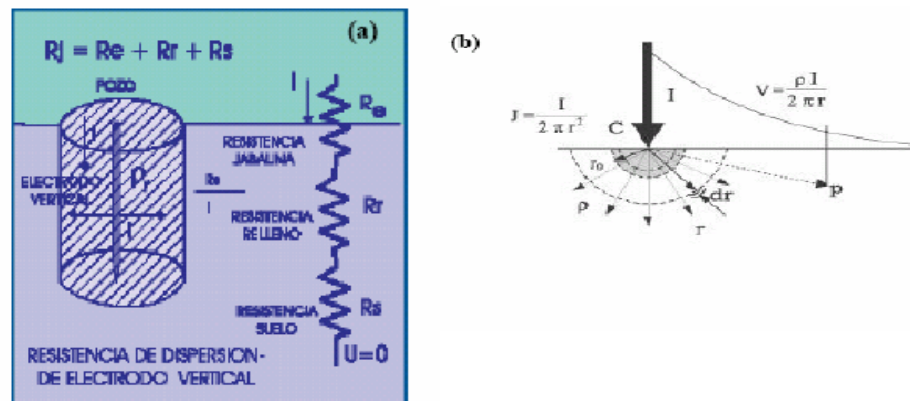
$\rho_r$ : Resistividad del relleno neutro.

$r$ : Radio del electrodo.

$R$ : Radio de dispersión.

Luego, la resistencia de la barra está dada por la siguiente fórmula:

$$R = \rho_r * \frac{D}{A} \quad (2.1)$$



**Figura. 2.1 (a) Resistencia de dispersión de un electrodo. (b) Dispersión de una corriente por electrodo, p.22, Giral (2006).**

En la figura 2.1(a), se observa que la resistencia de dispersión del electrodo está compuesta por la resistencia propia del electrodo, la resistencia eléctrica del suelo y la resistencia de los rellenos, la cual se obtiene agregando aditivos químicos alrededor del electrodo para lograr mejorar la conductividad eléctrica. En la figura 2.1 (b), se observa como se dispersa la corriente en forma radial del electrodo hacia el terreno.

#### 2.4.1 Tipos de Electroodos.

Entre los distintos tipos de electroodos o dispersores a tierra tenemos:

- **Varillas.**

Las Varillas, también llamadas barras, picas, jabalinas o estacas, son electroodos en los que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Su ventaja radica en la sencillez y rapidez de instalación. En la figura 2.2 se puede observar alguna de ellas.

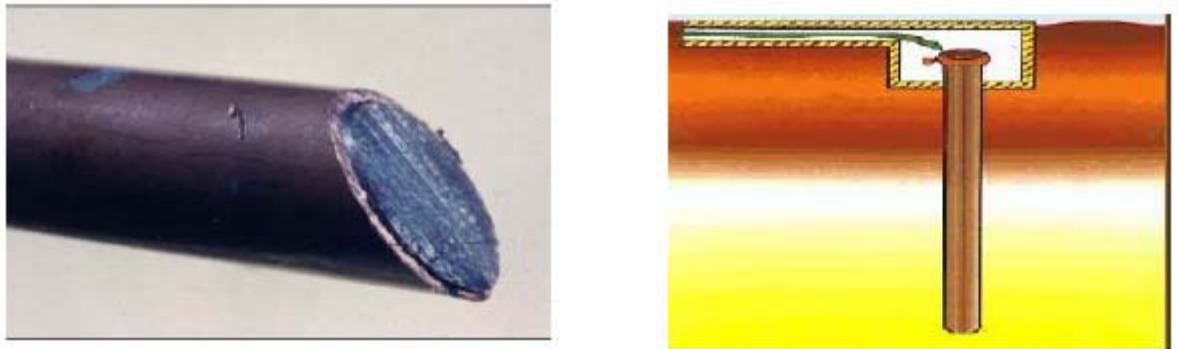


Figura. 2.2 Varillas, p.16, Nelson, (1999).

- **Electrodos de Barra.**

Se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanzan la profundidad adecuada. El CEN en su sección 250-83 realiza las siguientes indicaciones con respecto a los electrodos tipo barra.

- Estos electrodos no serán de menos de 2.40m de longitud.
- Los electrodos de barras de hierro o acero tendrán como mínimo un diámetro de 5/8”.
- Los electrodos se enterraran de manera que por lo menos 2.40m de su longitud esté en contacto con el suelo. Estos deben llegar a una profundidad de al menos 2.40m, a menos que se encuentren rocas en cuyo caso, el electrodo se enterrará en forma oblicua con un ángulo no mayor de 45° con la vertical o se enterrará en una zanja que tenga por lo menos 80cm de profundidad.

En el caso de los terrenos rocosos se colocan, tal como se indica en la figura 2.3.



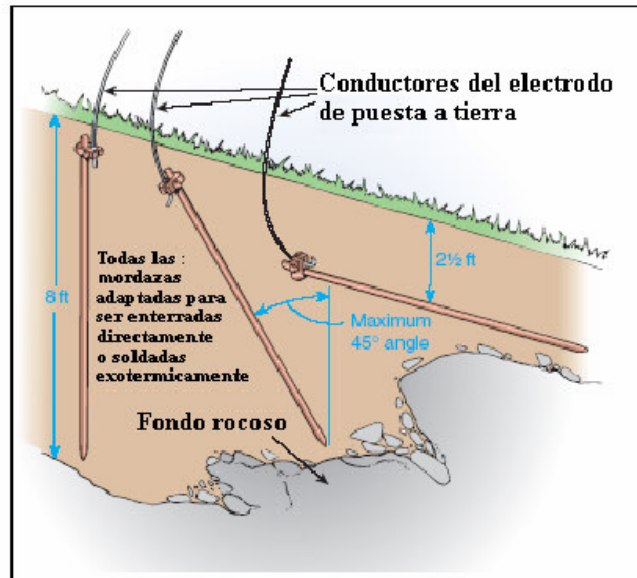


Figura. 2.3 Electrodo de Barra, p.39, Izarra, (2008)

- **Barras Copperweld.**

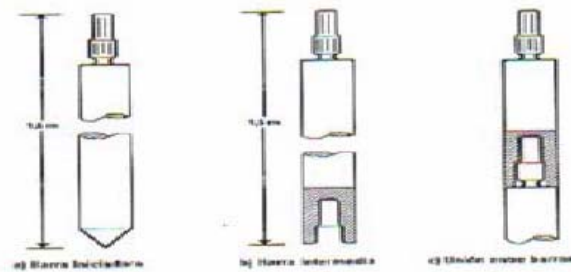
Esta barra es una de las más usadas, ya que es muy económica. Este tipo de electrodo está hecho de acero y recubierto de una capa de cobre, su longitud es de 2,44 metros y un diámetro de 5/8". Aceptadas prácticamente por todas las dependencias e instituciones, y reglamentada por el Código Eléctrico Nacional, la cual se aprecia en la figura 2.4.



Figura. 2.4 Barras Copperweld, p.25, Giral (2006).

- **Electrodos de Profundidad.**

Para tratar de cumplir con todas las características que debe tener un sistema de puesta a tierra se presenta la alternativa de jabalinas o barras autoempalmante. Con las barras autoempalmante se pueden realizar hincamientos de profundidad, alcanzando profundidades desde 20m hasta 40m. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo de ello.



**Figura. 2.5 Electrodos de Profundidad, p35, Barahona (2003)**

- **Placas-Estrellas, Planchas o Similares.**

Las puestas a tierra mediante placas-estrella, planchas o similares, tienen un sistema de construcción parecido, basado en la abertura de un pozo o zanja de 2 a 3 m<sup>3</sup> y relleno mediante tierra vegetal y otros aditivos para disminuir la resistividad del terreno.

Este tipo de electrodo es una placa que tiene varias puntas en su contorno, ésta se conecta por medio de una barra atornillable. Su principal ventaja es que ayuda a que se disipe la energía a través de sus puntas. En la figura 2.6 se puede observar su forma.



**Figura. 2.6 Electrodo Tipo Estrella, p.30, Giral (2006).**

- **Electrodos de Grafito Rígido.**

La conformación del electrodo de grafito rígido en forma de ánodo, con un activador-conductor de relleno para la mejora de la intimación con el terreno, hacen que el sistema de puesta a tierra, sea de alta fiabilidad. Al tratarse de un electrodo constituido enteramente por grafito, no se encuentra afectado intensamente por la corrosión a diferencia de lo que ocurre con los metales.

El electrodo de grafito rígido, es el ideal para puestas a tierras superficiales y profundas, ya que garantizan su larga durabilidad y un rendimiento más que aceptable. Como se puede ver en las figuras 2.7 y 2.8.



**Figura. 2.7 Electrodo Rígido de Grafito, p38, Barahona (2003).**

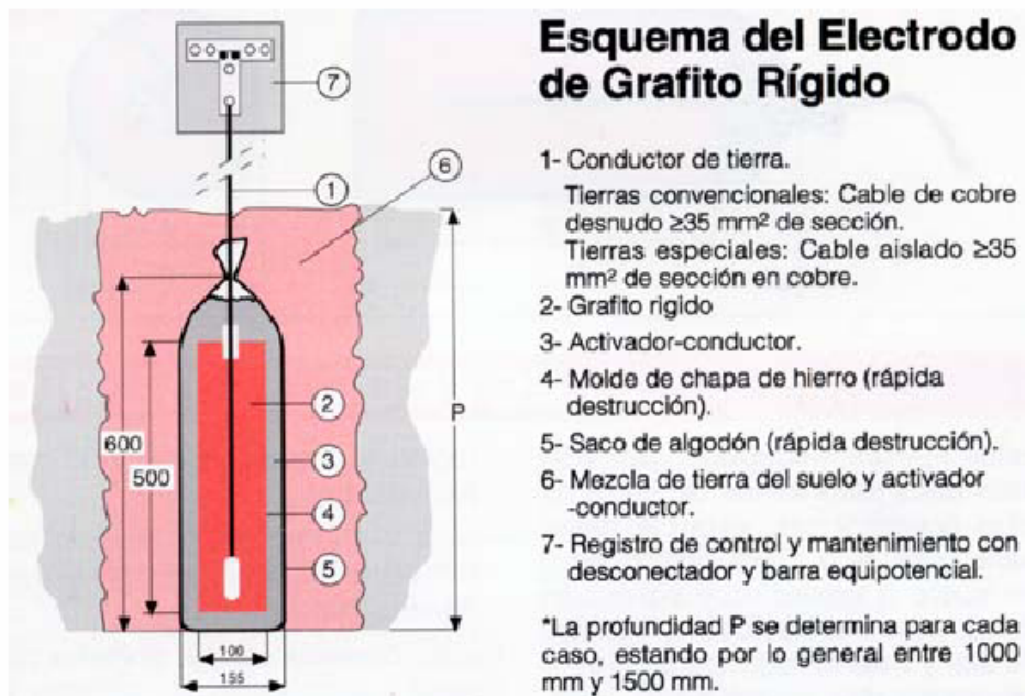


Figura. 2.8 Esquema del Electrodo Rígido de Grafito, p38, Barahona (2003).

- **Electrodos en Forma de Placas Enterradas.**

Este tipo de electrodo fue muy utilizado en terrenos donde la profundidad de la capa vegetal es importante (1 a 1.5m). El empleo de placas como electrodo es menos común porque la mayor parte de la corriente de paso se concreta en las aristas, que tiene una superficie total muy pequeña.

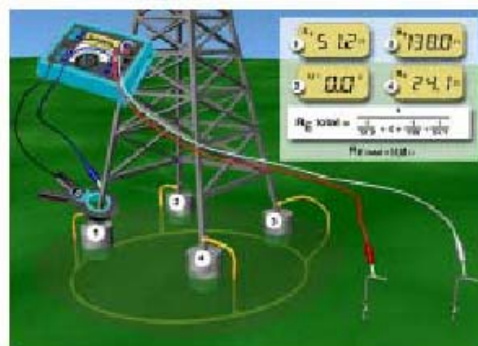
Este inconveniente puede remediarse, en parte, empleando capas perforadas para aumentar de esta forma la longitud de las aristas. Los electrodos de placa son de cobre o hierro fundido. En la figura 2.9 podemos observar su forma.



**Figura. 2.9 Electrodo de Placas Enterradas, p.16, Nelson, (1999).**

- **Electrodos Horizontales o Contrapesos.**

Los contrapesos serán constituidos por conductores desnudos enterrados a una cierta profundidad, generalmente 1.5 m; relativamente son fáciles de instalar, pero abarcan gran cantidad de terreno. Estos electrodos son utilizados frecuentemente en líneas de transmisión; donde, debido a que la mayoría de estas líneas se extienden en terrenos pocos poblados y son robados constantemente. En la figura 2.10 se observa como están colocados estos electrodos alrededor de una torre de líneas de transmisión.



**Figura. 2.10 Electrodo Horizontales o Contrapesos, p50, Barahona (2003).**

- **Mallas.**

La malla se hace armando una red de conductores de cobre desnudos, se puede mejorar con algunos electrodos. Es muy utilizada en las subestaciones eléctricas. En la figura 2.11 se muestra la estructura de ella de la malla.

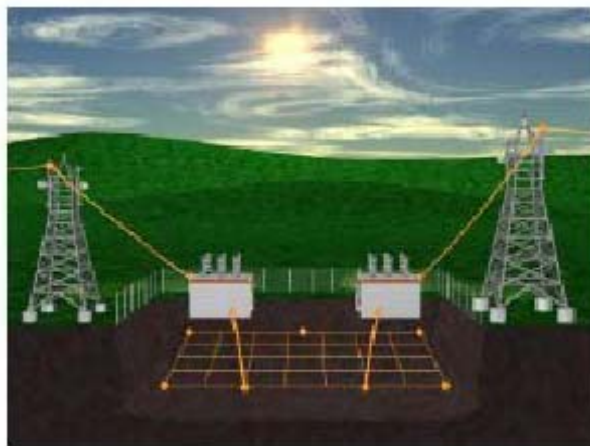


Figura. 2.11 Malla de Tierra, p.28, Giral (2006).

- **Electrodos de Anillo.**

Este electrodo consiste en una espira de cable de cobre desnudo, con un diámetro mínimo de 33.6 mm<sup>2</sup> y una longitud mínima de 6m en contacto con la tierra. El artículo 250-81 del CEN, establece que debe tener una profundidad de por lo menos 80cm, así como también dice que se le pueden conectar electrodos.

- **Electrodos Químicos.**

Los electrodos químicos son aquellos electrodos a los que se les adiciona algún compuesto químico para aumentar la conductividad y de esta forma disminuir el valor de resistencia.

De acuerdo a pruebas que se han realizado a los electrodos mencionados anteriormente se puede decir que el mas utilizado es la barra copperweld, gracias a su gran eficiencia y bajo costo de material e instalación.

#### 2.4.2 Configuraciones de Electrodo.

Como ya se mencionó, la barra Copperweld es el electrodo más utilizado debido a sus características. El objetivo de este electrodo es, el de estar en contacto con las capas húmedas de la tierra, y para lograrlo se recomienda instalarla en forma vertical, enterrada por lo menos 2.4m (figura 2.12), con esto se debe obtener un valor de resistencia bajo, si no se logra con una barra se pueden colocar mas barras conectadas por medio de conductor de cobre desnudo en diferentes configuraciones y un espaciado de por lo menos la longitud del electrodo.

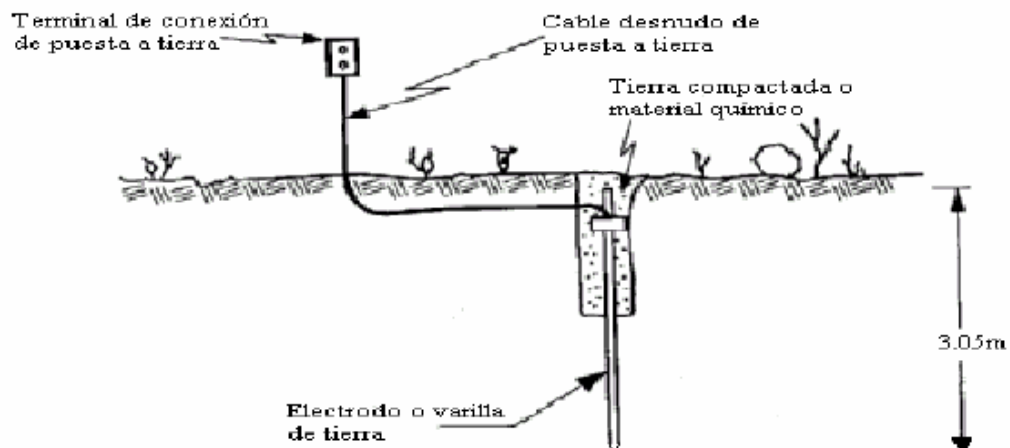


Figura. 2.12 Instalación de Varilla Copperweld, p.40, Giral (2006).

En la tabla 2.1 se muestra el porcentaje en que se disminuye el valor de resistencia de acuerdo a diferentes configuraciones de electrodos.

**Tabla 2.1 Porcentaje de Reducción del Valor Resistivo en Función del Tipo de Configuración, p.45, Suarez (2007).**

Numero de electrodos	Valor original	El valor original se reduce al
Un solo electrodo	100%	
Dos electrodos en línea		55%
Tres electrodo en línea		38%
Tres electrodos en triangulo		35%
Cuatro electrodo en simetría		28%
Ocho electrodo en simetría		16%

#### **2.4.3 Puesta a Tierra con Electrodo Verticales.**

Son las que más se aplican por el mínimo espacio que necesitan, se utiliza un electrodo simple tipo varilla de cobre y se clava de manera perpendicular a la superficie del suelo a una profundidad determinada para obtener un buen valor de resistencia de dispersión.

#### **2.4.4 Puesta a Tierra con Electrodo Horizontales.**

Se aplica poco, sólo cuando el subsuelo o segundo estrato es rocoso, se emplea un electrodo simple de cobre y se clava en forma paralela a la superficie del suelo a una profundidad determinada.



### **2.4.5 Ventajas de una Barra o Electrodo de Puesta A Tierra.**

Las barras es uno de los métodos más utilizados para realizar una puesta a tierra debido a sus múltiples ventajas, entre las cuales se pueden mencionar:

- Bajo costo y fácil instalación.
- La conexión entre el conductor de tierra y la barra puede hacerse fuera de la superficie del terreno, esto facilita la inspección de las conexiones y las mediciones de la resistencia de puesta a tierra.
- El área requerida para su instalación es pequeña, lo que constituye una gran ventaja en aquellas áreas de espacio reducido.
- Flexibilidad para obtener un valor de resistencia de puesta a tierra apropiada, ya que permite la aplicación de técnicas para el mejoramiento de la resistencia.

### **2.5 Malla De Tierra.**

Es un reticulado formado por la unión de conductores horizontales normalmente, según direcciones perpendiculares y espaciados uniformemente, incluyendo eventualmente barras horizontales. Se utiliza especialmente cuando el objetivo principal de la puesta a tierra es mantener un control de potenciales en la superficie del terreno, con un bajo valor de resistencia.

#### **2.5.1 Objetivos de una Malla de Tierra.**

- Proporcionar puesta a tierra para protección contra los frentes de ondas, debidos a operaciones del sistema de potencia y a descargas atmosféricas.

- Conducir a tierra corrientes de falla y/o atmosféricas, sin provocar gradientes de potencial peligrosos sobre la superficie del terreno o entre un punto del suelo y objetos conductores vecinos.
- Asegurar que las partes metálicas que no llevan corrientes, tales como cubiertas de equipos, estructuras, etc., estén siempre al potencial de tierra, aún en el caso de falla en el aislamiento.
- Deben tener una resistencia tal que en cualquier época del año, la corriente de falla a tierra sea capaz de producir la operación de los elementos de protección (relés, fusibles, etc.).
- Durante las máximas condiciones de fallas, la red de tierra no debe experimentar un aumento de temperatura que sea peligroso, para los conductores, uniones o soldaduras del sistema.

### **2.5.2 Característica de una Malla de Tierra.**

Los principales elementos que deben determinarse en la malla de tierra son los siguientes:

- Longitud y calibre del conductor.
- Longitud, calibre y cantidad de barras de tierra.
- Profundidad de enterramiento del conductor y barra de tierra.
- Espaciamiento de las filas de conductores de tierra y las barras de tierra.
- Tipo de conexión entre los conductores de tierra y las barras de tierra.
- Área ocupada por la malla de tierra.

### 2.5.3 Ventajas de una Malla de Tierra.

- En los sistemas eléctricos donde la corriente máxima de falla a tierra puede ser muy alta, rara vez es posible obtener una resistencia tan baja que garantice que el pico de voltaje de la puesta a tierra no alcanzará valores peligrosos al contacto humano, siendo este el caso, el peligro solo puede ser corregido mediante un control de los potenciales locales, una malla de puesta a tierra es la forma más práctica y económica de obtener esto.
- En una subestación de cualquier tamaño, una sola barra de puesta a tierra no satisface las necesidades de conductividad y capacidad de corriente. Sin embargo, cuando se conectan mutuamente varias barras, estructuras, marcos de máquinas y neutros eléctricos de equipos, el resultado necesariamente mejora con una malla, a pesar de los objetivos originales. Si esta malla, así formada es puesta a tierra en suelos de buena conductividad, esta sola malla por si misma puede proveer una excelente puesta a tierra.
- Mientras los conductores horizontales (malla) son más efectivos reduciendo los peligros de alto voltajes de toque y paso sobre la superficie de la tierra (por ello se recomienda instalarla a poca profundidad), las barras de tierra suficientemente largas, estabilizan el rendimiento de tal sistema combinado, para muchas instalaciones es importante, a causa de la variación en la resistividad del primer estrato, durante las distintas estaciones del año y el hecho de que la resistividad de las capas más profundas permanezca casi constantes.
- Barras penetrando resistividades del suelo más bajas, son más efectivas disipando corrientes de falla simple que se encuentran en un suelo de dos capas o multicapas y el estrato superior tiene

una resistividad mayor que la capa inferior. Para muchas subestaciones aisladas en gas y otras de poco espacio, esta condición es conveniente.

- Si las barras se instalan predominantemente a lo largo del perímetro de la malla, en condiciones de suelo altibajos o uniformes, éstas moderan considerablemente el excesivo incremento de gradientes en la superficie, cerca de la periferia de la malla.

## **2.6 Factores Considerados En El Diseño De Malla De Tierra.**

### **2.6.1 Niveles Máximos de Cortocircuito.**

Para determinar el valor correcto de cortocircuito de falla a tierra en un sistema de tierra, se necesita:

- Conocer el nivel de cortocircuito trifásico, bifásico y monofásico a tierra del lugar donde se van a construir la instalación, que produce la máxima corriente de falla a tierra.
- Comprobar manualmente o a través de software de computación los niveles de cortocircuito mencionados anteriormente.

### **2.6.2 Tipos Posibles de Falla a Tierra.**

En sistema de tierra se producen dos tipos de fallas: falla monofásica a tierra y falla bifásica a tierra. Dentro los casos más comunes, tenemos los siguientes:

### 2.6.2.1 Falla de una Línea a Tierra o Falla Monofásica.

Es la falla que se produce cuando hay un cortocircuito de línea a tierra en una de las fases del sistema de potencia. Es la más común en los sistemas industriales y viene representada en la figura 2.13.

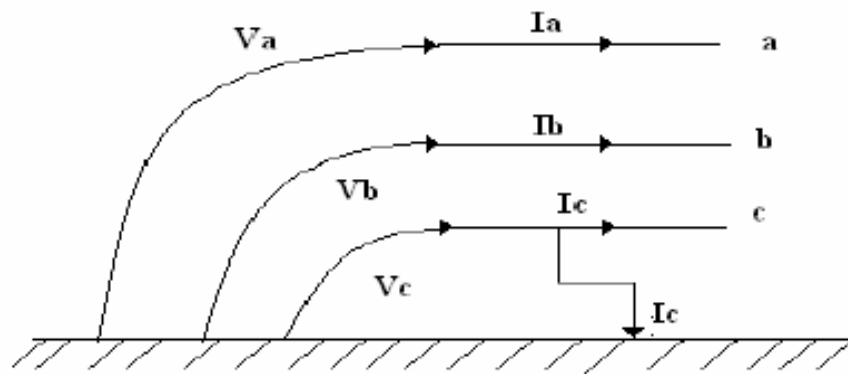


Figura. 2.13 Falla Monofásica, p.41, Giral (2006).

### 2.6.2.2 Falla Bifásica o de Línea a Línea.

Es la falla que se produce cuando hay un cortocircuito entre dos fases del sistema de potencia, tal como se indica en la figura 2.14.

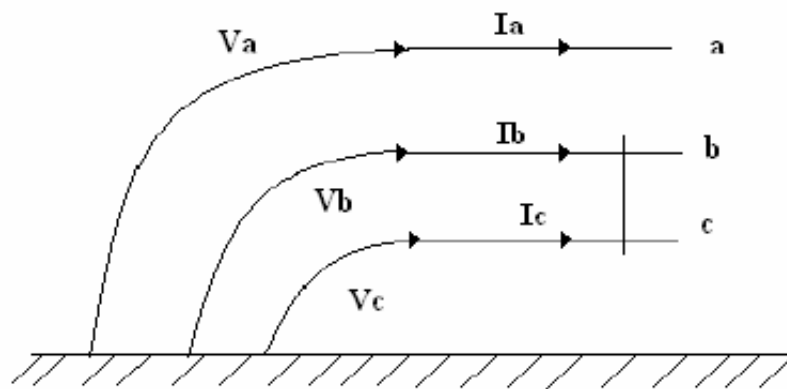


Figura. 2.14 Falla Bifásica, p.41, Giral (2006).

## **2.7 Malla Equipotencial.**

Una malla equipotencial es un conjunto de conductores desnudos ubicados sobre o bajo la tierra, conectados a una puesta a tierra para dar protección contra eventuales voltajes de contacto peligrosos. También es conocido como anillo de potencial, con esto se logra evitar que se produzca una diferencial de potencial entre equipos y estructuras metálicas cercanas siempre y cuando ambas se encuentren conectadas al mismo anillo de potencial.

## **2.8 Métodos De Puesta A Tierra En Sistemas De Potencia.**

Un sistema puesto a tierra es aquel en el cual el conductor o punto (punto neutro del transformador y/o generador) es intencionalmente conectado a tierra, ya sea directamente o a través de dispositivos limitadores de corriente.

De acuerdo al tratamiento que se le suministre a su neutro, un sistema eléctrico de potencia puede ser:

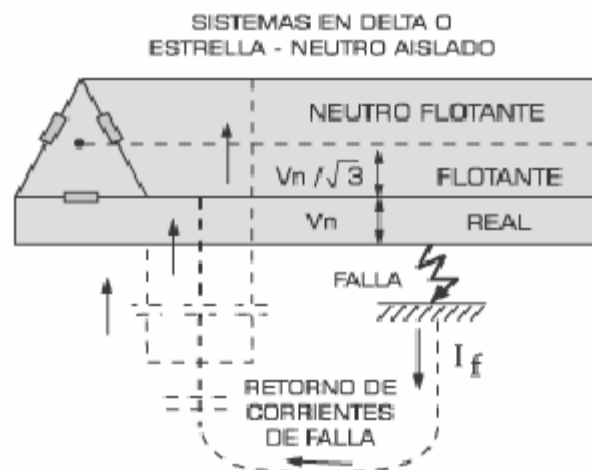
- Aislado, o puesta a tierra.
- Solidamente aterrado.
- A través de una resistencia.
- A través de una reactancia inductiva.
- A través de una bobina de Petersen.

### **2.8.1 Sistema Aislado.**

Es un sistema que no sostiene contacto intencional con tierra excepto a través de sus capacitancias distribuidas de fases y conductores. Un sistema aislado de tierra puede continuar operando con una falla a tierra, lo que representa una ventaja desde el punto de vista de

la continuidad del servicio. El problema se puede presentar si ocurre una segunda falla a tierra en otra fase diferente antes de haber ubicado y reparado la primera falla.

Las tensiones nominales ( $V_n$ ) de los alimentadores están directamente referidas al potencial de Tierra, a través de sus capacitancias parásitas ( $X_c$ ). De modo que cuando se produce una falla Fase-Tierra, a falta de puesta a tierra en el lado de la fuente, la corriente de falla retorna por el suelo al circuito, pasando a través de dichas capacitancias y aunque es de baja magnitud siempre será muy peligrosa. En la figura 2.15 se podemos ver de forma grafica lo expuesto anteriormente.

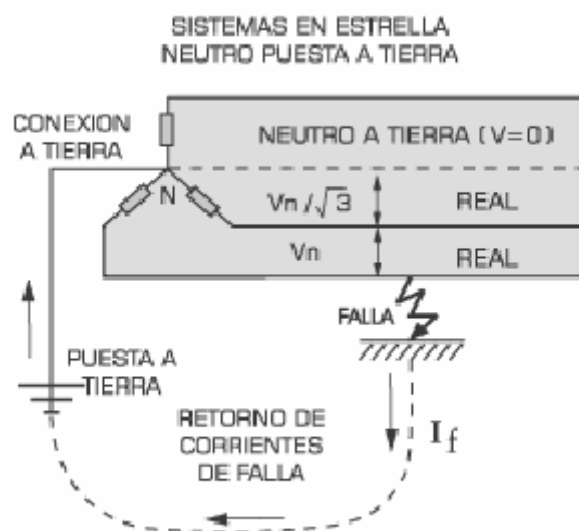


**Figura. 2.15 Sistema con Neutro Aislado, p38, Cedeño (2009).**

### 2.8.2 Sistema Solidamente Aterrado.

Un sistema solidamente aterrado es aquel en donde el neutro esta directamente a tierra, a través de conexiones sin ningún elemento reactivo o óhmico entre este y tierra.

Las tensiones nominales ( $V_n$ ) de los alimentadores están directamente referidas al potencial de tierra mediante la conexión sólida del punto neutro (N) con la puesta a tierra, de ese modo cuando se produce una falla Fase-Tierra, la mayor parte de la corriente de falla ( $I_f$ ) retorna por el suelo directamente a la fuente, atravesando la puesta a tierra hasta el punto neutro, siendo muy peligrosa. En la figura 2.16 podemos ver como esta conectado un sistema con neutro puesto a tierra.



**Figura. 2.16 Sistema con Neutro Puesto a Tierra, p38, Cedeño (2009).**

### **2.8.3 Puesta a Tierra a Través de una Resistencia.**

Consiste en conectar el neutro del sistema a tierra a través de una impedancia de naturaleza resistiva. Uno de los principales objetivos de este método es limitar, en mayor o menor grado, la magnitud de la corriente de falla a tierra, a fin de reducir los daños por calentamiento que pueden ser causados a los aislamientos de los conductores del equipo eléctrico correspondiente; reducir los esfuerzos mecánicos producidos por la corriente de falla y aumentar el nivel de seguridad ofrecido a los seres humanos eventualmente afectados.



#### **2.8.4 Sistema de Puesta a Tierra a Través de una Bobina de Petersen.**

La puesta a tierra de un sistema a través de una bobina de petersen o neutralizador de falla a tierra consiste en la conexión de un reactor (entre el neutro del sistema y tierra) cuya magnitud se basa en la resonancia entre las capacitancias a través del sistema y la inductancia de dicho reactor.

## CAPÍTULO III

### MEDICION DE RESISTIVIDAD

#### 3.1 Resistividad Del Suelo

Es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad y equivale a la resistencia que ofrece el terreno medida en las caras opuestas de un cubo de suelo de un 1 m de arista como se aprecia en la figura 3.1; se representa por la letra griega  $\rho$ .

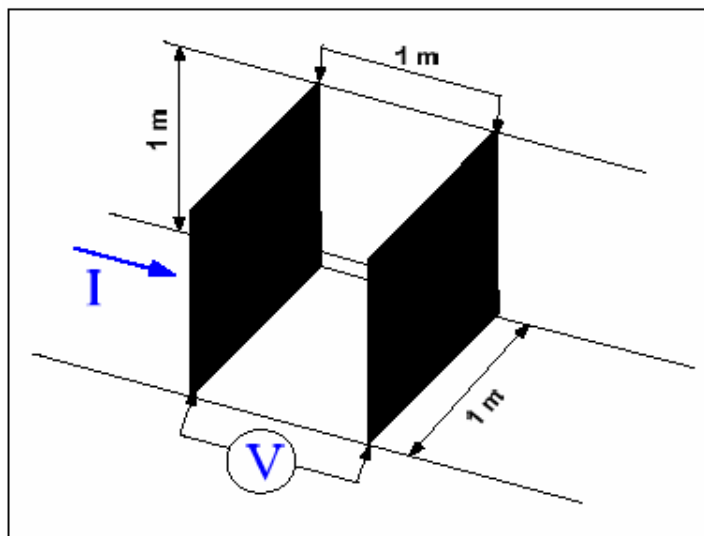


Figura. 3.1 resistividad de un cubo de terreno de 1 m de arista, p5, Izarra (2009).

El valor de la resistencia depende de la tensión y la corriente, cuya expresión es:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

A su vez, la resistencia también depende de la resistividad del material ( $\rho$ ) depende, de su longitud ( $L$ ) y del área de la sección ( $S$ ).

Donde:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (3.2)$$

Por lo tanto, si se considera el cubo de terreno de la figura 3.1, donde su longitud es de 1m y el área de su sección  $1\text{m}^2$  y despejando el valor de resistividad de la ecuación (3.2), se obtiene la equivalencia de la resistividad del suelo con la resistencia medida en un cubo de terreno:

$$\rho = \frac{R.S}{L} = R \frac{1\text{m}^2}{1\text{m}} = R(\Omega \cdot \text{m}) \quad (3.3)$$

Donde:

$R$  = Resistencia en ( $\Omega$ )

$\rho$  = Resistividad en ( $\Omega \cdot \text{m}$ )

$L$  = Longitud en (m)

$S$  = Sección en ( $\text{m}^2$ )

La resistividad del terreno depende de su naturaleza, estratificación (capas distinta composición), contenido de humedad, salinidad y temperatura. La resistividad de un terreno también se ve afectado por las variaciones estacionales.

Por otro lado, a medida que aumenta el tamaño de las partículas aumenta el valor de la resistividad, por ello la grava tiene mayor resistividad que la arena, y ésta mayor resistividad que la arcilla.

Debido que las capas no son uniformes en un terreno, cuando se mide la resistividad se está midiendo la resistividad aparente y por ello amerita determinar la resistividad de cada capa o estrato y sus espesores.

### **3.2 Influencias En El Comportamiento Eléctrico Del Suelo**

La tierra representa generalmente un mal conductor ya que esta compuesta por óxido de silicio y óxido de aluminio que son altamente resistivos pero gracias al amplio volumen disponible, se puede lograr a través de ella los niveles conductivos necesarios para su utilización auxiliar.

La conductividad representa un fenómeno esencialmente electroquímico o electrolítico, y por lo tanto, depende de la cantidad de agua depositada o el nivel de humidificación existente.

Los suelos están compuestos principalmente, por óxidos de silicio y óxidos de aluminio que son muy buenos aislantes; sin embargo la presencia de sales y agua contenida en ellos, mejora notablemente la conductividad de los mismos.

### **3.3 Aspectos Relacionados Con Las Características Del Suelo**

Uno de los aspectos relacionados con las características del suelo es la corrosividad.

#### **3.3.1 Corrosividad del Suelo**

El tipo de corrosión que se presenta en los suelos se puede denominar de manera genérica como corrosión electroquímica, la que se produce si existen las condiciones mínimas necesarias como son dos

materiales que puedan actuar como anodo y cátodo respectivamente y un electrolito encargado de la transmisión de corriente. El suelo es un elemento en que tales elementos se pueden presentar de manera simultánea.

La corrosividad del suelo es dependiente de diversos factores dentro de los que podemos citar los siguientes:

- **Porosidad**

Esta relacionada con la aireación que puede tener el suelo y es un factor dependiente de los tamaños de partículas (granulometría) y la composición mineralógica que el mismo tiene.

La porosidad del suelo es el elemento que viene a determinar la capacidad del suelo para retener agua, elemento que actuara como electrolito para los efectos de la corrosión. Así tendremos que la porosidad alta favorece la retención de agua y mayor aireación, lo que incrementa el efecto corrosivo, mientras que una estructura granular favorece el paso del agua y por ende la disminución de la concentración de sales y con ello la corrosión del suelo.

- **Concentración de materia orgánica**

Aquellos suelos con gran cantidad de materias orgánicas son capaces de retener gran cantidad de humedad y muy bajas o inexistentes cantidades de oxígeno. Cuando hay presencia de ácidos orgánicos, el suelo adquiere un carácter altamente corrosivo para metales como el hierro, cinc, plomo y cobre.

- **Sales disueltas**

Las sales que son solubles en el agua son formadas principalmente por los iones de sodio, potasio, magnesio y calcio ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{++}$  y  $Ca^{++}$ ) que se mezclan con las especies iónicas como  $Cl^-$ ,  $OH^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $CO_3^-$ ,  $SO_4^-$ , etc, que también se encuentran en el suelo. Estos productos iónicos tienen un efecto favorable para la corrosión de la estructura metálica enterrada, lo que será mayor a medida que aumenta la concentración de los mismos, dado que aumenta la conductividad del suelo.

- **Acidez (pH)**

Es una medida de la acidez del suelo. Aquellos suelos que tienen mayor acidez suelen ser más corrosivos que los suelos con carácter alcalino.

La acidez del suelo es medida con base en la concentración de hidrogeniones, que puede variar marcadamente en función de la humedad y afectar sustancialmente la capacidad de disolución de sales. El pH del suelo puede variar entre 3 y 9 normalmente y de acuerdo a la variación entre los mismos se puede obtener la siguiente clasificación mostrada en la tabla 3.1

**Tabla 3.1 Tipo de suelo de acuerdo al porcentaje de acidez, p47, Cedeño (2009).**

<b>pH</b>	<b>Tipo de suelo</b>
3-4	Muy acido
4-5	Acido
5-6	Moderadamente acido
6,0-6,8	Ligeramente acido
6,8-7,1	Neutro
7,1-8,0	Alcalino
8-9	Muy alcalino

- **La resistividad**

Este factor, conjuntamente con la humedad, es el más influyente en la capacidad corrosiva del suelo.

En líneas generales se afirma que un suelo será más corrosivo a medida que sea más conductor y lo mismo se incrementará a medida que aumente la humedad. En la tabla 3.2 se muestra una clasificación de los suelos según su resistividad.

**Tabla 3.2 Clasificación de los suelos de acuerdo a la corrosividad, p48, Cedeño (2009).**

<b>Resistividad (<math>\Omega/m</math>)</b>	<b>Característica</b>
0-10	Muy severamente corrosivo
10-30	Severamente corrosivo
30-100	Moderadamente corrosivo
100-500	Poco corrosivo
Mayor de 500	Baja probabilidad de corrosión

### **3.4 Factores Que Determinan La Resistividad De Los Suelos**

En la resistividad del terreno influyen los siguientes factores:

- La estratificación de los suelos
- La compactación del terreno.
- Naturaleza de los suelos.
- Humedad.
- La temperatura del terreno.
- La concentración de sales disueltas.

#### **3.4.1 La Estratificación del Terreno**

El suelo está formado por capas (estratos) que tienen diferentes resistividades y profundidades debido a la formación geológica que son generalmente horizontales y paralelas a la superficie.

Existen estratos que se presentan en forma inclinada o vertical, debido a fallas geológicas pero para los estudio se asume horizontales. El desconocimiento a priori de la resistividad de las capas inferiores obliga al estudio y medición de las mismas si se requiere conocer el valor de la puesta a tierra a una determinada profundidad.

En la figura 3.2 se observa que el comportamiento de la resistividad del terreno no es uniforme y depende de las características de los estratos y en un caso real se pueden dar terrenos con diferentes capas con resistividades y espesores diversos que pueden ser mayor a lo requerido, por lo tanto no tendría éxito la puesta a tierra en esta etapa.



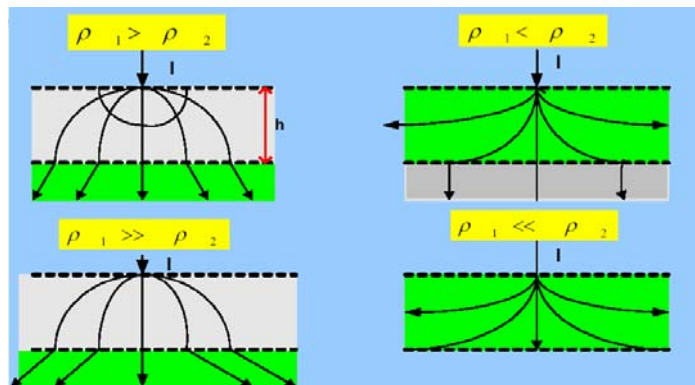


Figura 3.2 Influencia de la estratificación del terreno en la resistividad del mismo, p.50, Giral (2006).

### 3.4.2 La Compactación del Terreno

Cuando la compactación del terreno es grande disminuye la resistividad, por lo tanto es recomendable que exista un buen contacto entre el electrodo y el terreno y por ende es necesaria una compactación. En la figura 3.3 se muestra cualitativamente la influencia de la compactación del suelo, en la variación de la resistividad.

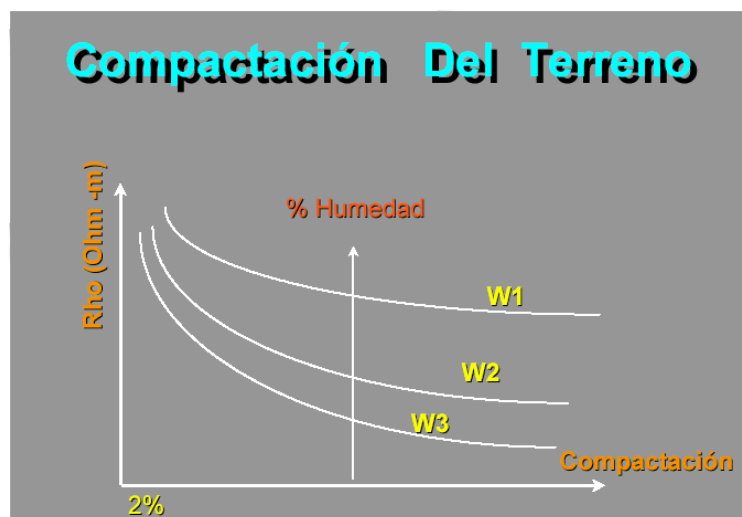


Figura 3.3 Variación de la resistividad del terreno en función de la compactación del mismo, p.48, Suarez (2007).

### 3.4.3 Naturaleza de los Suelos

Los suelos son buenos, regulares o malos conductores de la electricidad en función de su naturaleza. El análisis y conocimiento de esta naturaleza es el primer paso para la instalación adecuada del sistema de puesta a tierra. En la tabla 3.3 se muestra los valores característicos de la resistividad de los suelos

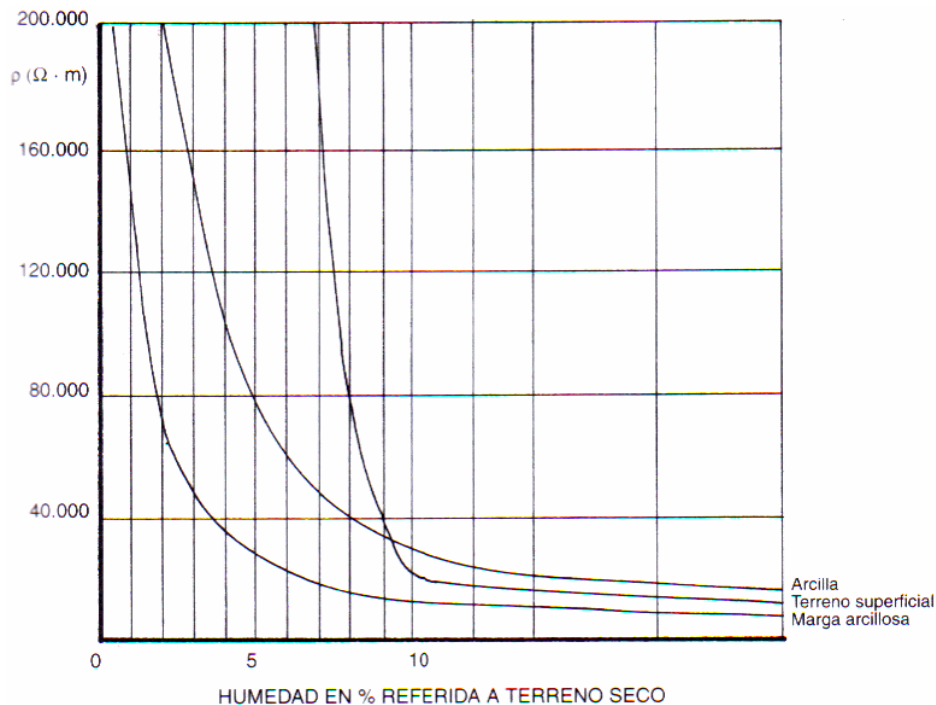
**Tabla 3.3 Valores de resistividad de algunos suelos, p.55, Suarez (2007).**

<b>Naturaleza del terreno</b>	<b>Resistividad (ohm*m)</b>
Agua de mar	2
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1.500 a 3.000
Calizas blancas	100 a 300
Calizas compactas	1.000 a 5.000
Calizas agrietadas	500 a 1.000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1.500 a 10.000

### 3.4.4 Humedad

La humedad es un factor que afecta inversamente la resistividad del suelo, a una mayor humedad menor es la resistividad del suelo; en otras palabras, los suelos secos presentan una alta resistividad, mientras que los suelos húmedos presentan una menor resistividad. Por lo tanto, sitios como riveras de ríos y costas marinas pueden presentar una baja resistividad del terreno.

En general, la humedad aumenta con la profundidad. Por otro lado, si el contenido de sales disueltas en el agua es bajo, no siempre una alta humedad en el suelo significa una baja resistividad. En la figura 3.4 se puede observar la variación de la resistividad en función de la humedad, en una muestra de arcilla roja, con el porcentaje de humedad contenida.



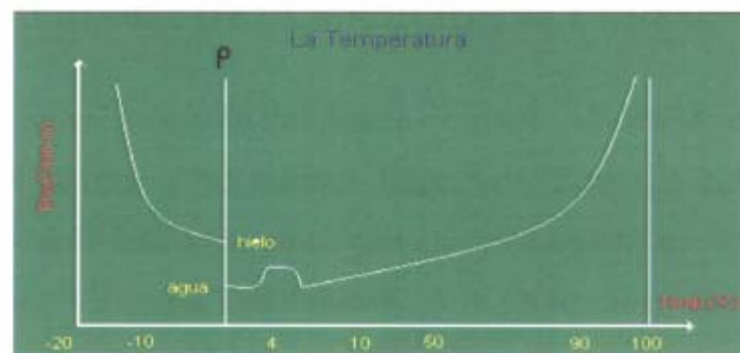
**Figura 3.4 Variación de la resistividad en función al porcentaje de humedad, p25, Barahona (2003).**

### 3.4.5 La Temperatura del Terreno

La resistividad del suelo también es influenciada por la temperatura, la cual afecta de dos formas distintas:

- Al aumentar la temperatura, disminuye la humedad del suelo aumentando la resistividad, sin embargo hay que tener en cuenta que este fenómeno afecta mas la superficie del suelo, en las capas inferiores del suelo la humedad es mas constante.
- Por otro lado, la disminución de la temperatura iguales o menores a cero incrementa considerablemente el valor de la resistividad debido a que el agua contenida en el suelo se congela y el hielo como ya sabemos es un mal conductor.

En la figura 3.5 se puede observar como aumenta la resistividad de un terreno en función del descenso de la temperatura.



**Figura 3.5 Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura, p52, Cedeño (2009).**

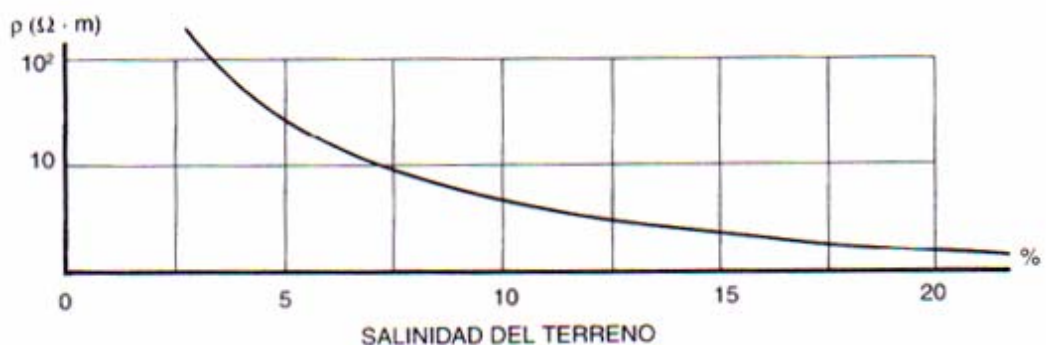
### 3.4.6 La Concentración de las Sales Disueltas

Al presentarse una mayor concentración de las sales disueltas en un terreno, mejora notablemente la conductividad y por lo tanto la resistividad.

El agua hace que las sales penetren hacia la parte profunda del terreno, hacia la capa de depósito, y que un riego excesivo o unas lluvias lavan el terreno y, por lo tanto, arrastras la sal que rodea los electrodos aumentando la resistividad.

Tampoco es aconsejable ubicar el electrodo cercano al cause del río porque son terrenos muy lavados y por lo tanto mas resistivos de lo normal.

En la figura se 3.6 muestra la variación de la resistividad de un terreno en función del porcentaje de sal presente.



**Figura 3.6 Variación de la resistividad del terreno en función del %de sal, p53, Cedeño (2009).**

### **3.5 Generalidades De La Medición De La Resistividad**

Para el diseño o estudio de una malla de tierra es necesario realizar mediciones de resistividad del terreno y conocer su espesor respectivo, que den una idea exacta no solo del valor de la resistividad promedio del terreno, sino de la resistividad de los estratos que puedan estar incluidos en la misma, y de esta manera poder conocer un bajo valor de resistencia de puesta a tierra; es por ello que debe evaluarse el comportamiento del suelo como conductor eléctrico a partir de medidas realizadas con un instrumento llamado Telurómetro. El suelo está compuesto mayormente de dos estratos:

- Un estrato superficial
- Un estrato subyacente

#### **Un Estrato Superficial**

Generalmente de tierra limosa y/o tierra arenosa, con un espesor variable entre 0,3 y 1,2 m, normalmente seco en la sierra y selva.

#### **Un Estrato Subyacente**

Constituido por conglomerados finos y pedregosos en la costa, así como rocosos y pedregosos en la sierra y selva alta.

### **3.6 Finalidad De La Medición De La Resistividad**

El objetivo de la medición de la resistividad tiene las siguientes finalidades:

- Obtener la resistividad de cada estrato o capa.

- Encontrar la profundidad de los estratos o capa.
- Ubicación óptima de las instalaciones de puesta a tierra.

### **3.7 Métodos De Medida De La Resistividad**

Para un análisis real del terreno y de la puesta a tierra, es fundamental efectuar la medición de la resistividad del terreno donde se va a instalar la malla de puesta a tierra.

La norma IEEE 80-2000 supone una resistividad uniforme en el terreno.

Típicamente, existe un número de capas considerables, cada una de ellas con resistividad diferente. Las mediciones deben hacerse varias veces para verificar la homogeneidad o heterogeneidad del terreno, y su resistividad en función de la profundidad.

La norma IEEE 80-2000 hace referencia al estándar 81-1983 del IEEE "Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potential of a ground system" en el cual se describe de forma detallada los métodos utilizados para la medición de la resistividad del terreno.

Existen en la práctica varios métodos para medir la resistividad de un terreno, siendo cuatro los recomendados en la norma IEEE 81-1983:

- El método de medición por muestras de suelo.
- El método de los dos puntos
- El método de los tres puntos
- El método de los cuatro puntos

### 3.7.1 El Método de Información Geológica y Muestras de Suelo

La estimación de la resistividad del terreno a partir de la medición de la resistividad de una muestra extraída del mismo, se puede realizar empleando el método de los cuatro puntos en una caja prismática pequeña de sección transversal cuadrada, en la que se introduce el material extraído de la probeta respectiva.

Como es de esperar, el valor de resistividad que se obtiene de esta manera resulta menos exacto que el que se obtendría en el terreno real, pero en algunas ocasiones es el único camino posible.

### 3.7.2 Método de los Dos Puntos.

Este método utiliza dos (2) electrodos pequeños tal como se ilustra en la figura. 3.7. Uno más pequeño que el otro, que se conectan a sendas pértigas aislantes. El borne positivo de una batería se conecta a través de un miliamperímetro al electrodo más pequeño y el borne negativo al otro electrodo.

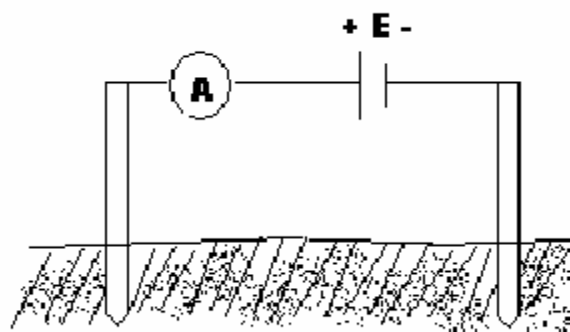


Figura. 3.7 Método de los 2 puntos, p60, Giral (2006)

### 3.7.3 Método de los Tres Puntos.



Este consiste en la aplicación del método de caída de tensión para la determinación de la resistencia de puesta a tierra, de un electrodo de dimensiones conocidas colocado a diferentes profundidades conectado a dos (2) electrodos adicionales que actúan como el electrodo de tensión y de corriente (figura. 3.8).

La resistividad equivalente del terreno es calculada despejando el valor de la misma de la ecuación (3.4), que da a conocer el valor de la resistencia de puesta a tierra de una varilla metálica, suponiendo suelo homogéneo:

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi} \ln \frac{2 * L}{a} \Rightarrow \rho = \frac{2 * \pi * L}{\ln \frac{2 * L}{a}} \quad (3.4)$$

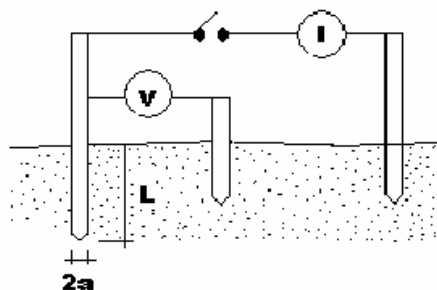
Donde:

$L$  = Longitud de la barra.

$a$  = Radio de la barra.

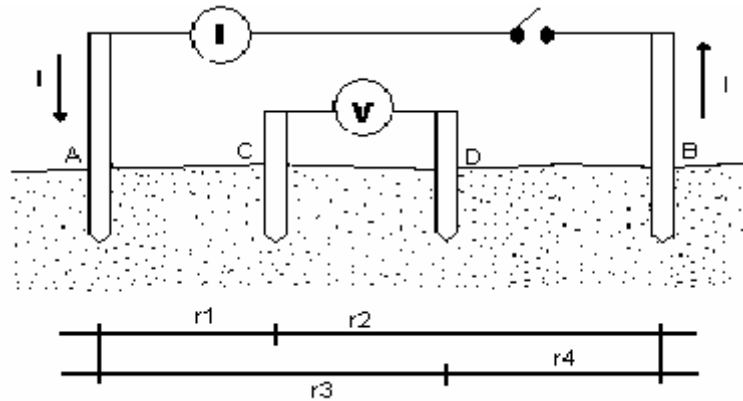
$R$  = Resistencia de puesta a tierra de la barra.

$\rho$  = Resistividad del terreno.



**Figura 3.8 Método de los 3 puntos, p61, Giral (2006)**  
**3.7.4 Método de los Cuatro Puntos o Electrodo.**

Este consiste en inyectar corriente a través de dos (2) electrodos externos y medir la tensión entre los otros electrodos, tal como se muestra en la figura. 3.9.



**Figura. 3.9 Método de los 4 puntos, p62, Giral (2006)**

Entre los electrodos A y B se inyecta una corriente  $I$  y entre C y D se mide la diferencia de potencial. Si la profundidad a la que están enterrados los electrodos es pequeña en comparación a la distancia entre ellos, puede suponerse una distribución radial de corriente y electrodos puntuales, además si suponemos homogeneidad del terreno se puede obtener que la resistividad valga:

$$\rho = \frac{2 * \pi * V}{I} * \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) * \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)} \quad (3.5)$$

En el caso de terrenos no homogéneos el valor de  $\rho$  es ficticio y no corresponde, en general, a ninguna de las resistividades presentes en el terreno.

Entonces para determinar la constitución del terreno investigado es necesario tener diferentes separaciones entre electrodos. Se han desarrollado varios métodos variando la configuración de los electrodos para lograr la medición en terrenos no homogéneos, siendo los más utilizados la configuración Wenner y Schlumberger.

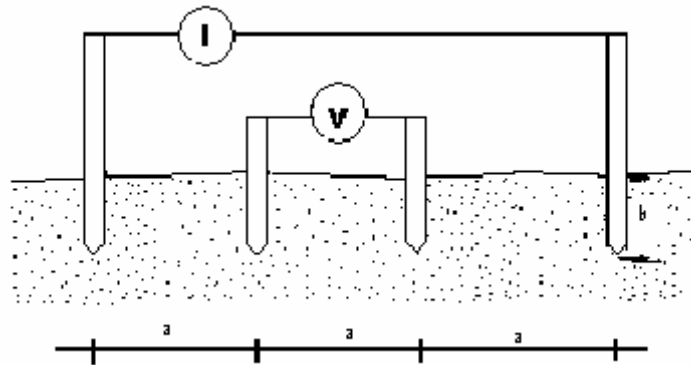
#### 3.7.4.1 Configuración Wenner.

En esta configuración los electrodos se colocan en línea recta enterrados a una profundidad “b”, los electrodos están igualmente espaciados a una longitud “a” como se muestra en la figura. 3.8, Siendo “a” la distancia entre los dos electrodos adyacentes. Entonces, la resistividad “ $\rho$ ” en óhmios por metro es obtenida aplicando la expresión siguiente:

$$\rho = \frac{4 * \rho * R * a}{1 + \left( \frac{2 * a}{\sqrt{a^2 + 4 * b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)} \quad (3.6)$$

Como en la práctica los electrodos son enterrados a una profundidad  $b \ll a$ , entonces, la ecuación puede ser simplificada si se cumple con la condición  $a > 20 * b$ , entonces nos queda la siguiente expresión:

$$\rho = 2 * \pi * R * a \quad (3.7)$$



**Figura. 3.10 Configuración Wenner, p63, Giral (2006)**

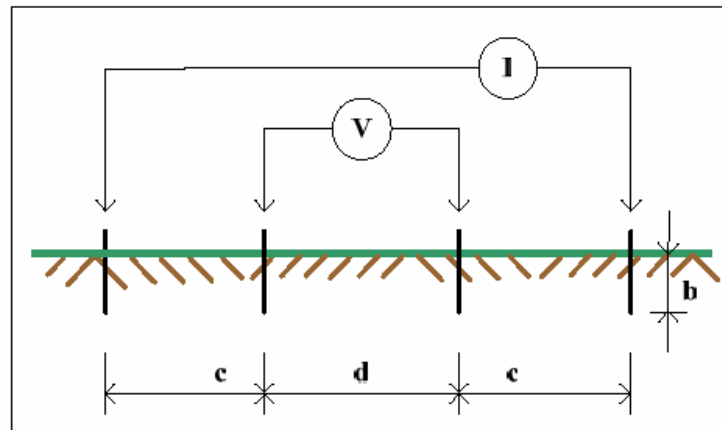
#### **3.7.4.2 Configuración Schlumberger.**

En esta configuración los electrodos se ubican en línea recta simétricamente con respecto a un centro de medición elegido (Figura. 3.11). Los electrodos de potencial permanecen fijos con una distancia de 1 a 3 metros trasladándose solo los de corriente. El valor de la resistividad es calculada a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = \pi * c * (c + d) * \left( \frac{R}{d} \right) \quad (3.8)$$

Donde  $c \gg d$

Si se grafican los valores de resistividad obtenidos para diferentes espaciamentos "c", se puede conocer cuales son las características del terreno en estudio.

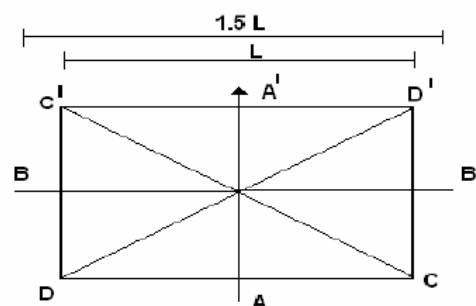


**Figura. 3.11 Configuración Schlumberger, p10, Izarra (2008)**

### 3.7.4.3 Procedimiento y Recomendaciones.

Una vez conocida el área donde se ubicará la subestación, las mediciones deben efectuarse en las direcciones mostradas en la figura.

3.12



**Figura. 3.12 Direcciones Recomendadas Para Efectuar la Medición**

El procedimiento recomendado es el siguiente:

- Se iniciarán las medidas con una separación entre electrodos de 3 a 5 mts. Y con una profundidad entre 0,1 y 0,3 mts. Dependiendo de su correcta fijación en el terreno.
- La separación entre electrodos se irá aumentando gradualmente, en pasos de 2 a 3 mts.

- Se graficará en el campo para cada medición el valor de  $\rho$  vs  $a$ , a fin de determinar el punto donde la curva se vuelve asintótica.
- La separación entre electrodos se aumentará hasta cubrir una longitud de 3 a 5 veces la profundidad de interés o hasta que la curva de  $\rho$  tenga tendencia a estabilizarse.
- En caso de que existan dentro del área de influencia de la subestación, tuberías u objetos metálicos enterrados, estos afectarán la exactitud de las medidas. Para estos casos, la medición debe realizarse en una dirección perpendicular al eje de las tuberías, sin embargo, no debe descartarse la posibilidad de mediciones erróneas.
- Una fuente de error que debe ser tomada en cuenta, es la presencia de líneas energizadas en la vecindad del área de medición, cuya inducción puede distorsionar las curvas de  $\rho$  vs  $a$  cuando las mediciones se efectúan en una dirección paralela a la línea.
- En caso de que el terreno sea muy seco es recomendable humedecer y compactar el contorno de los electrodos especialmente los de corriente.
- Las mediciones deben realizarse durante varias épocas del año, ya que la resistividad superficial varía con las condiciones climáticas.
- Si en el área donde estará ubicada la instalación se hacen acondicionamientos de terreno, la medición debe realizarse después de estar finalizados los mismos.

### 3.8 La Modelización Del Suelo

Comúnmente, los modelos de resistividad usados son el modelo de suelo uniforme y el modelo de suelo biestratificados. Dado, que la mayoría de los suelos no son homogéneos se usa el modelo biestratificado.

#### 3.8.1 El Suelo Homogéneo

Un modelo de suelo uniforme se utiliza cuando las mediciones arrojan una variación moderada en la resistividad aparente. Un aproximado de la resistividad de un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de la medición de la resistividad aparente, o del valor máximo y mínimo de la misma, como se muestra en las ecuaciones 3.6 y 3.7:

$$\rho_{a(\text{avg})} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (3.9)$$

Donde:

$\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \dots + \rho_{a(n)}$  = Es el dato de la resistividad aparente obtenida a diferentes distancias, en  $\Omega.m$

$n$  = es el número total de mediciones.

$$\rho_{a(\text{avg})} = \frac{\rho_{a(\text{max})} + \rho_{a(\text{min})}}{2} \quad (3.10)$$

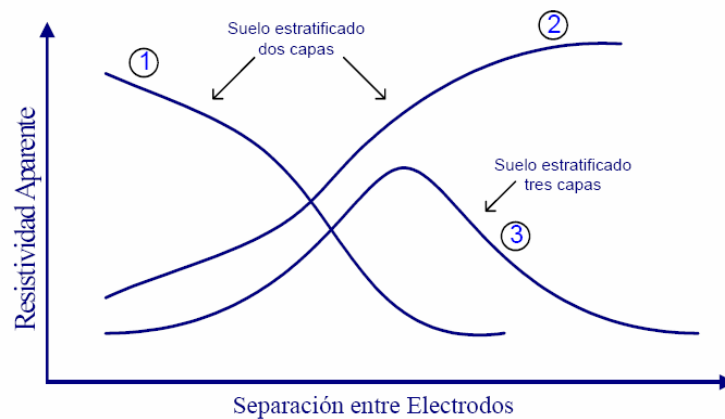
Donde:

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

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

### 3.8.2 Los Suelos Heterogéneos

Los suelos heterogéneos, con mas de una capa, pueden ser tratados como un suelo formado por dos capas de resistividades distintas (primera capa  $\rho_1$ , segunda capa  $\rho_2$ ). Al llevar estas mediciones de campo a una gráfica, se obtiene una resistividad aparente  $\rho_a$  en función de la distancia de los electrodos de prueba. En la figura 2.13 se observa las diferentes curvas tentativas para varios estratos.



**Figura 3.13 La curva de resistividad aparente en función con la separación de los electrodos para suelos estratificados, p40, Chiriboga (2008)**

#### 3.8.2.1 El Suelo Biestratificado

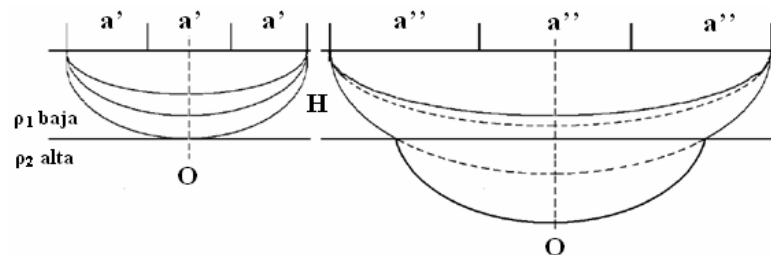
El modelo de suelo de dos capas es, generalmente, una representación adecuada de los suelos heterogéneos, donde se encuentra una capa superior de resistividad  $\rho_1$  de profundidad finita  $h_1$ , y



capa inferior de resistividad  $\rho_2$  la profundidad del segundo estrato se asume un valor tan grande que tiende a infinito  $\infty$ .

### 3.8.2.1.1 El Suelo Biestratificado con $\rho_1 < \rho_2$

La conducción de corriente, durante la medición de la resistividad empleando cuatro electrodos, cuando  $\rho_1 < \rho_2$  es como se indica en la figura 3.14 y los valores de resistividad aparente medidos  $\rho_a$  son como se muestran en la figura 3.15.



**Figura 3.14 El modelo de dos suelos con  $\rho_1 < \rho_2$ , p106, Chiriboga (2008).**

En la figura 3.14 se tiene dos suelos, de los cuales el superficial es de menor resistividad que el inferior, además se aprecian las líneas de corriente, que para valores bajos de "a" (separación entre electrodos) no atraviesan la segunda capa, en cambio para separaciones grandes entre los electrodos de medición, sí la atraviesan, aumentando por este motivo la resistividad aparente  $\rho_a$ , este efecto puede apreciarse en las figuras 3.14 y 3.16.

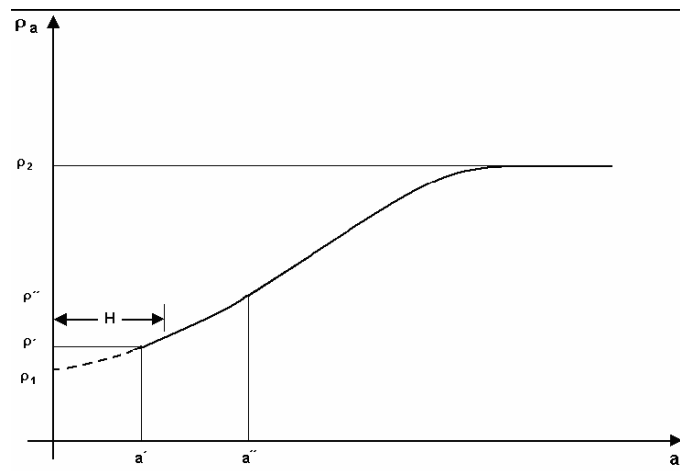


Figura 3.15 La resistividad aparente  $\rho_a$ , cuando  $\rho_1 < \rho_2$ , p107, Chiriboga (2008).

### 3.8.2.1.2 El Modelo Biestratificado con $\rho_1 > \rho_2$

En la figura 3.16. Se tiene que la resistividad del suelo de la superficie, es más alta que la del más profundo,  $\rho_1 > \rho_2$ .

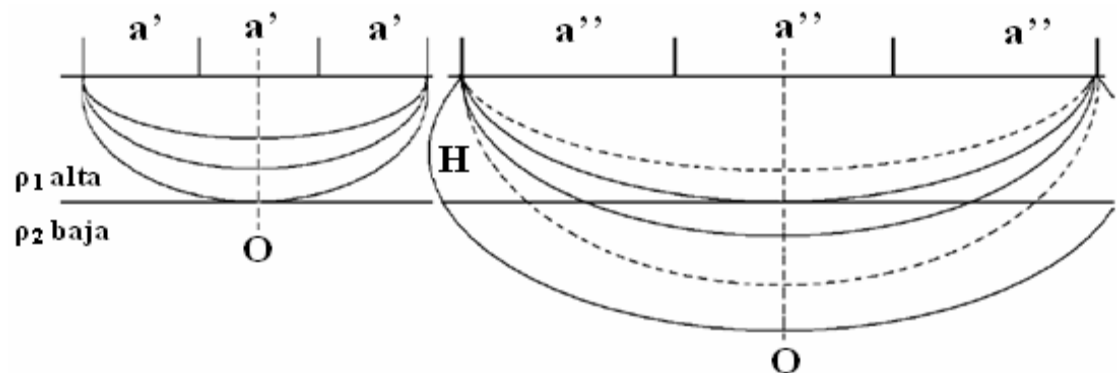


Figura 3.16 El modelo de dos suelos con  $\rho_1 > \rho_2$ , p107, Chiriboga (2008).

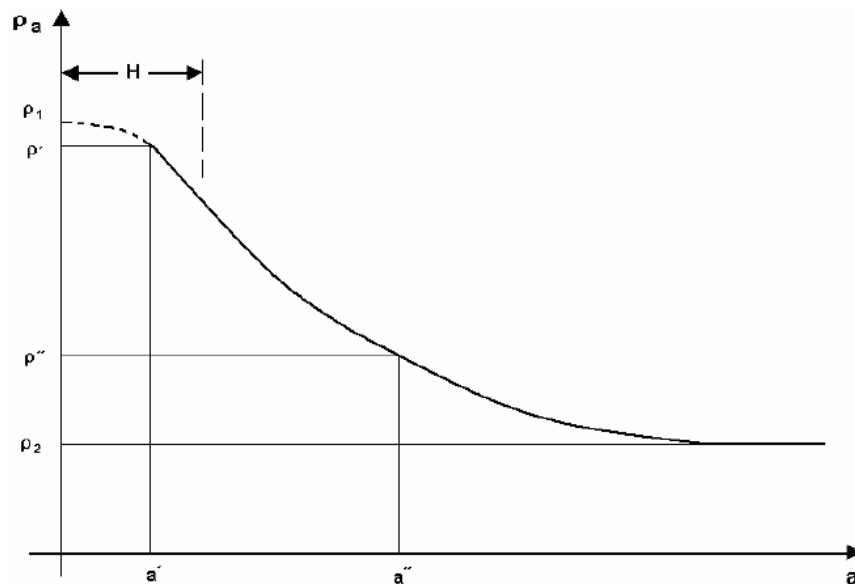


Figura 3.17 La resistividad aparente  $\rho_a$ , cuando  $\rho_1 > \rho_2$ , p108, Chiriboga (2008).

### 3.8.2.2 El Suelo Multiestratificado

En algunos casos, las curvas de la figura 3.13, suele mostrar varios estratos para el mismo tipo de suelo, por lo cual el uso del modelo biestratificado no es viable debido a la pérdida de información. Las técnicas para interpretar este tipo de suelos se requiere la utilización de programas computacionales avanzados, ecuaciones matemáticas profundas o métodos gráficos muy complejos. En la figura 3.18 se observa las distintas capas de terreno.

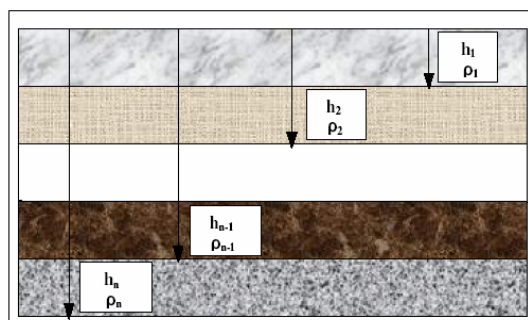


Figura 3.18 El terreno multiestratificado, p12, Izarra (2008).

### 3.8.3 Los Métodos de Modelización de los Suelos Heterogéneos

Los métodos gráficos de interpretación de las resistividades aparentes para suelos, comúnmente, biestratificados, son métodos empíricos, derivados de la experiencia al momento de medir en el campo e interpretación de los valores casi estadísticos de la resistividad de la naturaleza.

Existen varios métodos para modelar suelos biestratificados de los cuales describiremos el método de Sunde por ser el expuesto en la norma IEEE 80-2000.

#### 3.8.3.1 El Método de Sunde

En este método, los valores de la resistividad del primer estrato ( $\rho_1$ ) y del segundo estrato ( $\rho_2$ ) se obtienen al graficar las resistividades aparentes calculadas aplicando cualquiera de los métodos antes descritos. Solo la profundidad del primer estrato ( $h$ ) se consigue por este método, como se explica a continuación:

- Se traza una gráfica de resistividad aparente  $\rho_a$  en el eje “y” versus distancia de los electrodos de prueba en el eje “x”.
- Se estiman los valores de  $\rho_1$  y  $\rho_2$  a partir del paso anterior. La resistividad aparente  $\rho_a$  corresponde a un espacio pequeño del espaciamiento del electrodo de prueba  $\rho_1$  y  $\rho_2$  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.
- Se determina  $\rho_2 / \rho_1$  y se selecciona una curva en la figura 3.18 o la cual casi coincide ó interpola y dibuja una nueva curva en la gráfica.

- Se selecciona el valor en el eje “y” en la región inclinada de la curva  $\rho_2/\rho_1$  apropiada.
- Se lee el valor de  $a/h$  en el eje “x”
- Se calcula  $\rho_a$  multiplicando el valor seleccionado,  $\rho_a/\rho_1$  por  $\rho_1$
- Se lee el espacio de la gráfica de resistividad aparente hecha al inicio.
- Se calcula “h”, la profundidad del primer estrato, usando la separación de los electrodos apropiada “a” (IEEE80 2000, p.58).

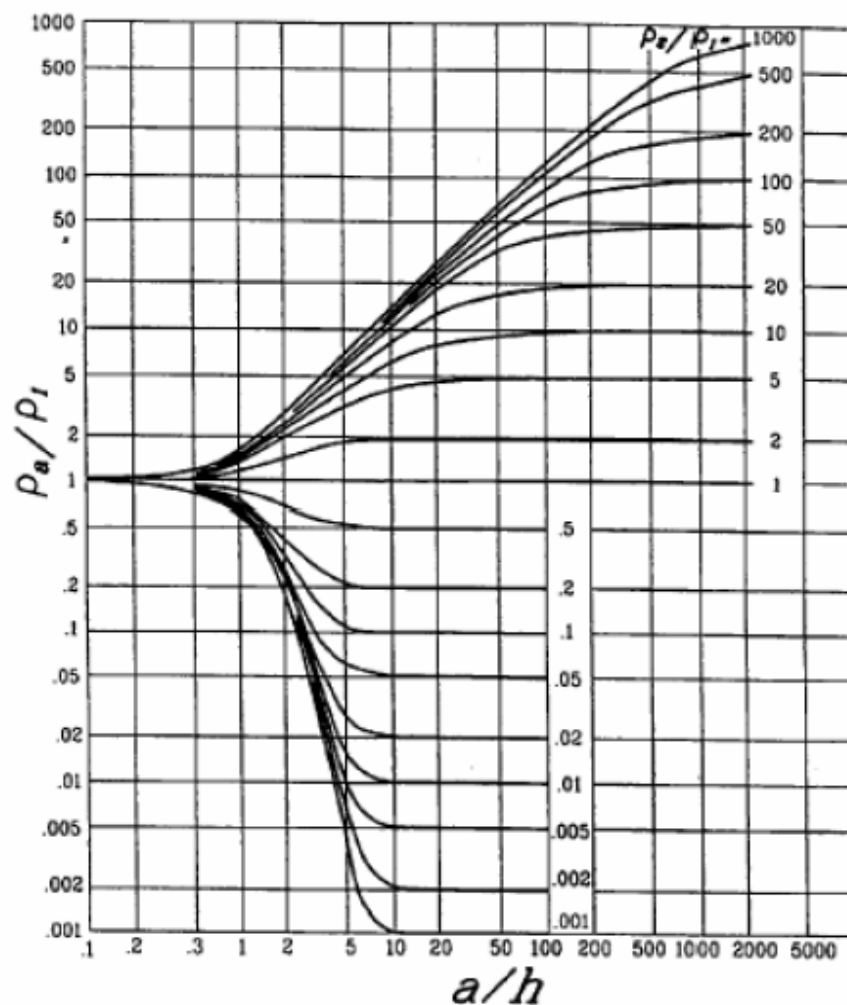


Figura 3.19 El método de Sunde, p59, IEEE80 (2000)

## **CAPÍTULO IV**

### **PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE UNA MALLA DE PUESTA A TIERRA EN UNA SUBESTACION**

#### **4.1 Puesta A Tierra En Subestaciones**

La puesta a tierra en las subestaciones, es de vital importancia, ya que, su función primordial es proteger al personal y a los equipos de la misma, en condiciones normales y de falla.

Los gradientes de potencial que se presentan, dependen de la geometría y la localización de los electrodos, características del terreno local y de otros factores, que determinan lo apropiado o no del sistema.

Durante condiciones típicas de fallas a tierra, el flujo de corriente a tierra produciría gradientes de potencial dentro y alrededor de la subestación. Estos gradientes podrían ser máximos a lo largo de la superficie del terreno, bajo condiciones muy adversas, poniendo en peligro a cualquier persona que se encuentre en el lugar.

También, diferencias de potencial dañinas existen algunas veces durante una falla, entre estructuras o carcasas de equipos puestos a tierra. Los gradientes creados en el terreno, producen perfiles de potencial superficiales, que tienen efecto primario en las diferencias de potencial anteriormente nombradas. Estas se denominan:

- Voltajes de paso.
- Voltaje de toque.
- Voltajes de malla.

- Voltaje transferido.

#### 4.1.1 Voltaje de Paso

Es la diferencia de potencial en la superficie del suelo experimentado por una persona a una distancia de (1) metro con sus pies, sin tener contacto con cualquier objeto aterrado, como se muestra en la figura 4.1.

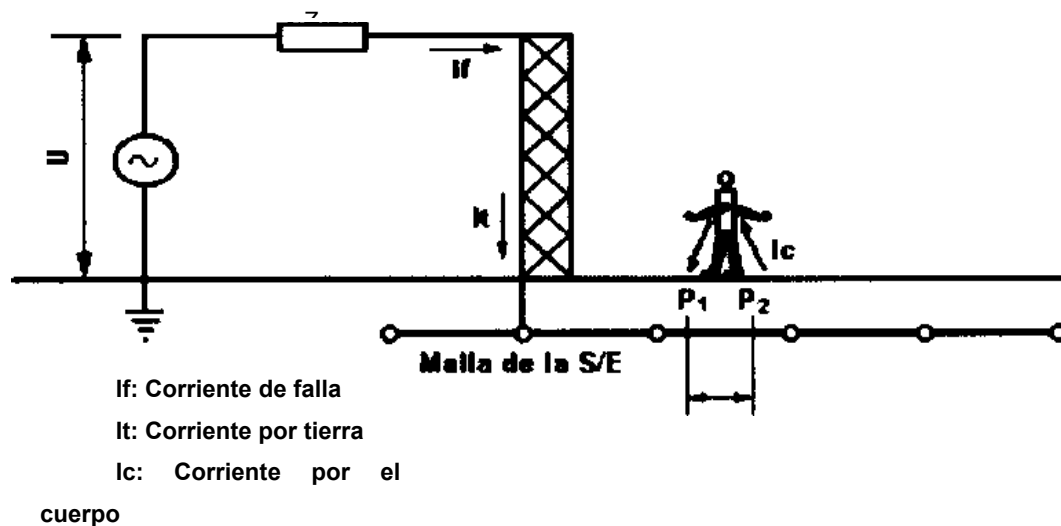
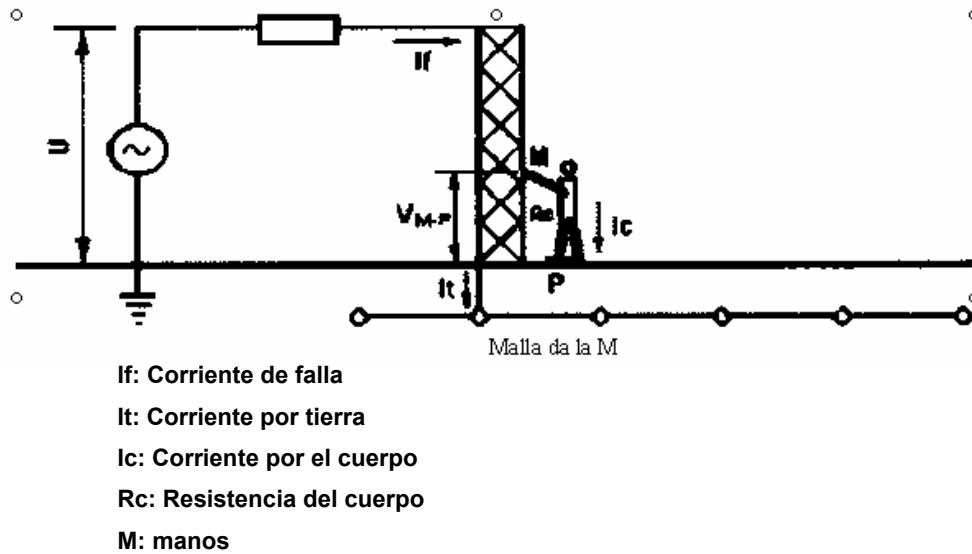


Figura 4.1 Voltaje de paso, p19, IEEE 80 (2000).

#### 4.1.2 Voltaje de Toque

Es la diferencia de potencial entre el aumento de potencial a tierra (GPR) y el potencial en la superficie, en un punto donde la persona esta de pie y al mismo tiempo hace contacto con la mano en una estructura aterrizada, como se muestra en la figura 4.2.



**Figura 4.2 Voltaje de paso, p17, IEEE 80 (2000).**

#### 4.1.3 Voltaje de Malla

Es el máximo voltaje de toque encontrado dentro de una malla de puesta a tierra.

#### 4.1.4 Voltaje Transferido

Es un caso especial del voltaje de toque, donde el voltaje se transfiere hacia el interior ó fuera de la subestación, desde ó hacia un lugar exterior distante al lugar de la subestación

Una vez definidos esos términos, se deben establecer criterios para estos voltajes, que garanticen la seguridad de las personas. Los voltajes motrices máximos de cualquier circuito accidental, tendrían los siguientes límites:



Para el voltaje de paso:

$$E_{paso_{50}} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.1)$$

$$(1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad E_{paso_{70}} = \quad (4.2)$$

Donde:

$E_{paso_{50}}$ : voltaje de paso máximo permisible, peso del cuerpo humano de 50Kg. (110 libras)

$E_{paso_{70}}$ : voltaje de paso máximo permisible, peso del cuerpo humano de 70Kg. (155 libras)

Para el voltaje de toque permisible tiene:

$$E_{toque_{50}} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.3)$$

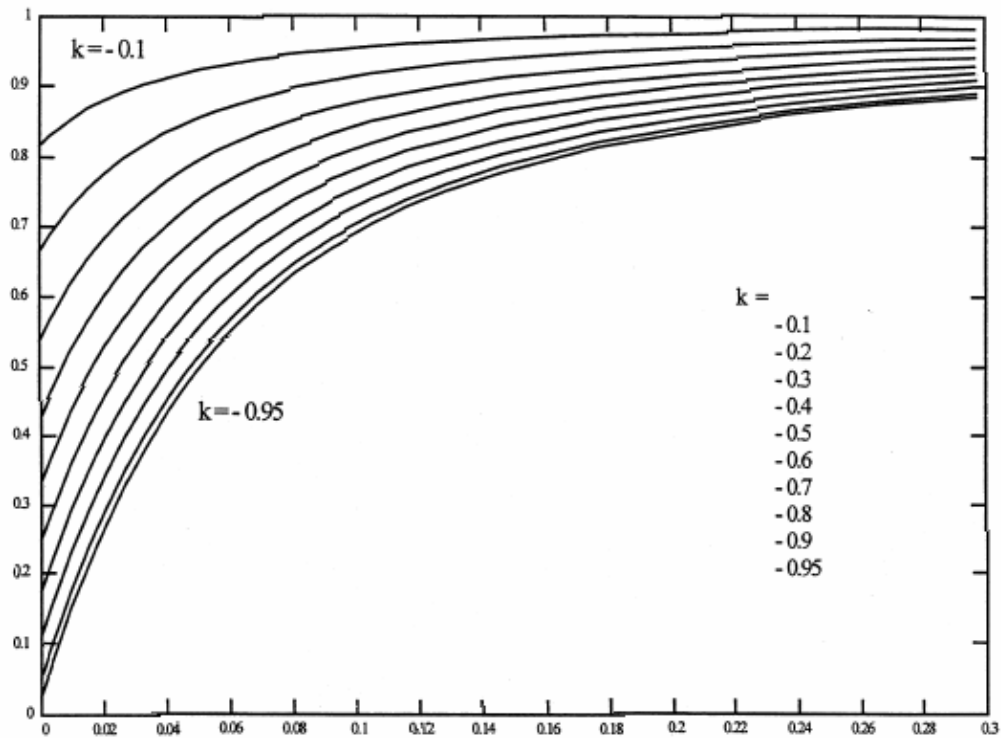
$$E_{toque_{70}} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.4)$$

Donde:

$E_{toque_{50}}$ : voltaje de paso máximo permisible, peso 50Kg.

$E_{toque_{70}}$ : voltaje de paso máximo permisible, peso 70Kg

$C_s$ : Factor de reducción que depende del espesor de la capa de piedra de la superficie de la subestación  $h_s$  y del factor de reflexión  $k$ .  $C_s$  se determina a través de la figura 4.3



**Figura 4.3** Curva estándar para estimar el valor de  $C_s$ , función del factor  $K$  y del espesor de la piedra picada, p22, IEEE 80 (2000).

Los valores de  $C_s$  también se pueden obtener utilizando la siguiente ecuación que están dentro del 5% de los valores que se obtienen con el método gráfico.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (4.5)$$

$K$ : Factor de reflexión entre diferentes resistividades. Se determina por medio de la siguiente fórmula, para el modelo de suelo de dos capas.

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (4.6)$$

$\rho_s$  : Resistividad de la capa superficial del terreno;

$\rho$  : Resistividad del terreno  $\Omega \cdot m$

$t_s$  : Duración de la corriente de schok, en segundos

$h_s$  : Espesor del material superficial en m

## 4.2 Determinacion De La Máxima Corriente De Falla A Tierra O Corriente De Malla

En primer lugar, por medio de cálculos de cortocircuitos se obtiene la máxima corriente de falla a tierra que fluye por la malla de la subestación. Luego, la corriente seleccionada para el diseño de la malla  $I_G$ , se obtiene de la siguiente forma:

$$I_G = S_f * D_f * C_p * I_f \quad (4.7)$$

Donde:

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

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

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

$I_f$  : Corriente de falla RMS asimétrica en Amperios.

### 4.2.1 Factor de Reducción o División de Corrientes de Falla ( $S_f$ ).

Es el factor de división de corriente del cual se puede obtener de las curvas de la figura 4.4, de acuerdo con la resistencia de tierra y la cantidad de líneas de transmisión y distribución que se tengan.

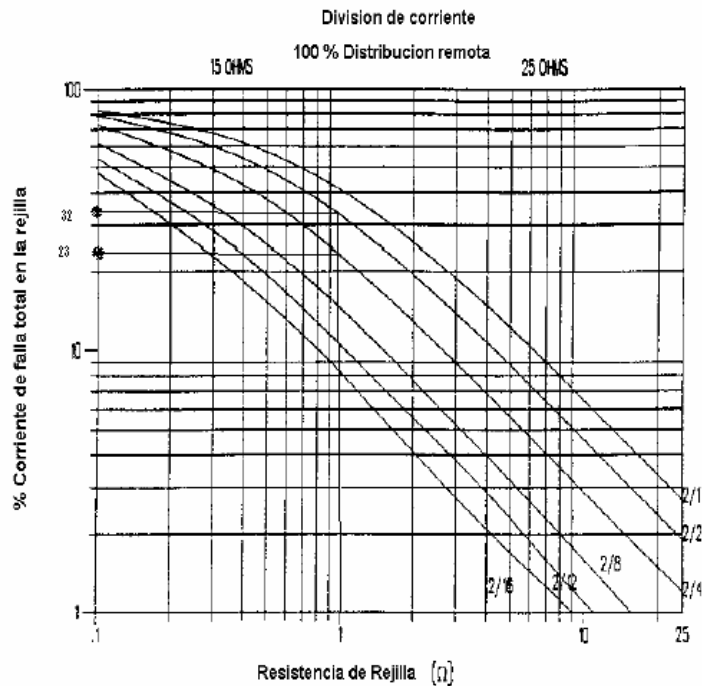


Figura 4.4 curvas para determinar el valor de  $S_f$ , p151, IEEE 80 (2000).

#### 4.2.2 Factor de Corrección o Decrecimiento de la Corriente de Falla Asimétrica ( $D_f$ ).

El factor de decrecimiento ( $D_f$ ), es una medida de la forma de onda de la corriente de falla asimétrica, durante los primeros ciclos. La componente DC decae exponencialmente y esto es conocido como corriente DC desplazada. Para duraciones de la falla de aproximadamente dos ciclos o menos, la componente AC de la onda asimétrica está claramente determinada por la impedancia subtransitoria. Para fallas de duración de aproximadamente 6-60 ciclos, la componente AC, esta determinada por la impedancia transitoria.  $D_f$  Viene dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f}} \left( 1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right) \quad (4.8)$$

$$T_a = \frac{X}{WR} \quad (4.9)$$

Donde:

$t_f$ : Tiempo de duración de la falla en segundos

$T_a$ : Constante subtransitoria equivalente del sistema en segundos

$W$ : Frecuencia angular (rad/segundos)

$X/R$ : Corresponde a la relación X/R del sistema en el punto de falla para un tipo de falla dado, donde X y R son las componentes subtransitoria del sistema.

Para duraciones de fallas relativamente grandes, el efecto de la compensación de DC se puede asumir que esta más que compensado por la disminución de la componente subtransitoria de AC. Un factor de decremento 1,0 se puede utilizar para duraciones de fallas de 30 ciclos o más. En la tabla 4.1 se ilustran varios valores de  $D_f$  en función de  $t_f$  y  $X/R$ .

Tabla 4.1 Valores típicos de  $D_f$ , p85, IEEE 80 (2000).

Duración de la falla $t_f$		Factor de decremento $D_f$			
(s)	Ciclos a (60Hz)	X/R= 10	X/R= 20	X/R= 30	X/R= 40
0,0033	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

### 4.2.3 Factor de Corrección para el Crecimiento del Sistema a Futuro Cp.

El factor de corrección del sistema a futuro, es una medida del crecimiento del sistema con lo cual se incrementa el valor de la corriente de falla. Este factor es un tanto difícil de determinar. Por ejemplo, si añadimos una línea de distribución a una subestación eléctrica, esto resultaría un aumento de la corriente de falla, la cantidad de corriente en la tierra puede disminuirse por los cables de guarda o de tierra de la nueva línea que presenta una ruta adicional de conducción para la corriente de falla, esto si la línea posee cable de guarda (IEEE 80 2000, p120).

**Tabla 4.2 Valores típicos de Cp, p72, Cedeño (2009).**

Futura expansión	Cp
Permanece igual	1
Expansión futura	1,5
Expansión futura	2

### 4.2.4 Valor RMS de la Corriente Simétrica de Falla a Tierra.

Para calcular el valor de la corriente de falla a tierra primero debemos determinar para qué tipo de falla la vamos a calcular. La norma IEEE 80-2000 en su apartado 15.3 recomienda por razones prácticas que la investigación se limite a fallas de línea a tierra y línea a línea tierra.

Para el caso de una falla de línea a tierra, la corriente  $I_f$  puede ser calculada como tres veces el valor de la corriente de falla de secuencia cero ( $3I_0$ ), la cual puede ser calculada como:

$$I_f = \frac{3E}{3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (4.10)$$

Donde:

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

$E$ : es el valor del voltaje 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 resistencia del sistema equivalente en ohmios.

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

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

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

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

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

Para el caso de una falla de línea a línea tierra puede ser calculada mediante la ecuación siguiente

$$I_f = \frac{3E * (R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_2)[R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)] + (R_2 + jX_2) * (R_0 + 3R_f + jX_0)} \quad (4.11)$$

### 4.3 Voltaje De Toque Peligroso En La Periferia (Em)

El voltaje de toque en la periferia considerado, es la diferencia de potencial en voltios, que se produce en el centro de una retícula de la esquina de la malla de puesta a tierra. Esta consideración se remite al hecho de que en las esquinas de la malla es donde se producen los gradientes de potencial más peligrosos. La ecuación que nos permite conseguir el valor de este voltaje, viene dada por la siguiente expresión:

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_G}{L_M} \quad (4.12)$$

Donde

$K_m$  : Factor de espaciamento del voltaje de toque.

$K_i$  : Factor de corrección de irregularidad.

$\rho$  : Resistividad del terreno, en  $\Omega.m$  .

$I_G$  : Máxima corriente RMS en amperios fluyendo entre la malla y la tierra.

$L_M$  : Longitud enterrada efectiva (longitud total de conductores y longitud de barras de tierras si es el caso).

#### 4.3.1 Factor De Espaciamento Para El Voltaje De Toque ( $K_m$ )

Donde el factor geométrico  $K_m$  se determina de la siguiente manera:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \times \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \times h \times d} + \frac{(D+2h)^2}{8 \times D \times d} - \frac{h}{4 \times d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \times \ln \left[ \frac{8}{\pi(2 \times n - 1)} \right] \right] \quad (4.12)$$



Donde:

$h$  : Es la profundidad de enterramiento de la malla

$D$  : Es el valor de espaciamientos entre conductores paralelos en (m)

$n$  : Es el número efectivo de conductores paralelos de la rejilla

$d$  : Es el diámetro del conductor

$K_{ii}$  : Factor de ponderación correctivo que se ajusta por los efectos de los conductores internos en la esquina de la malla

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

Para rejillas con varillas de aterrizaje a lo largo de su perímetro, o para rejillas con varillas de aterrizaje en sus esquinas, o ambos

$$K_{ii} = 1$$

Para rejillas sin varillas de aterrizaje o rejillas con pocas varillas de aterrizaje, ninguna de ellas se coloca en las esquinas o en el perímetro.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}} \quad (4.13)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (4.14)$$

$h_0 = 1$  m (profundidad de referencia de la rejilla)

El número efectivo de conductores paralelos en una rejilla dada,  $n$  la cual se puede aplicar a rejillas de forma cuadrada, rectangular ó de forma irregular, representa el número de conductores paralelos en una rejilla rectangular equivalente.

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad (4.15)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_P} \quad (4.16)$$

$n_b$ : es igual a 1 para mallas cuadradas

$n_c$ : es igual a 1 para mallas cuadradas y rectangulares

$n_d$ : es igual a 1 para mallas cuadradas, rectangulares y en L

Donde

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 * \sqrt{A}}} \quad (4.17)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_X * L_Y}{A} \right]^{\frac{0,7 * A}{L_X * L_Y}} \quad (4.18)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \quad (4.19)$$

$L_C$ : Es la longitud total del conductor en una rejilla horizontal en mt.

$L_P$ : Es la longitud perimetral de la rejilla en mt.

$A$ : Es el área de la rejilla en  $mt^2$ .

$L_x$  :Es la longitud máxima de la rejilla en la dirección de x. en mt.

$L_y$  :Es la longitud máxima de la rejilla en la dirección de y. en mt.

$D_m$  :Es la distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la rejilla

#### 4.3.2 Factor de corrección de irregularidad ( $K_i$ )

El factor de irregularidad.  $K_i$ , utilizado junto con el factor  $n$  anteriormente definido, es:

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n \quad (4.20)$$

Para rejillas sin varillas de aterrizaje o rejillas con tan solo algunas varillas dispersas a lo largo de la misma, pero ninguna colocada en las esquinas o sobre todo el perímetro de la rejilla, la longitud enterrada efectiva,  $L_M$ , es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (4.21)$$

Donde

$L_R$  :Es la longitud total de todas las varillas de aterrizaje en m

Para rejillas con varillas de aterrizaje en las esquinas, así como a lo largo de su perímetro y sobre toda la rejilla, la longitud enterrada efectiva  $L_M$  es:

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (4.22)$$

Donde

$L_r$  :Es la longitud de cada varilla en m

#### 4.4 Voltaje De Paso Peligroso En La Periferia (Es)

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

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

La norma IEEE 80-2000 define una ecuación bastante precisa, la cual toma en consideración la profundidad de enterramiento, el espaciamiento, y en la que el voltaje de paso en la periferia viene definida como:

$$E_s = \frac{\rho * K_s * K_i * I_G}{L_s} \quad (4.23)$$

Donde:

Para rejillas con o sin varillas de aterrizaje, la longitud enterrada efectiva,  $L_s$  es:

$$L_s = 0.75L_C + 0.85L_R \quad (4.24)$$

$K_s$  : Factor de espaciamiento para el Voltaje de Paso.

#### 4.4.1 Factor de Espaciamiento para el Voltaje de Paso ( $K_s$ )

En la norma 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  $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (4.25)$$

#### 4.5 Resistencia De Puesta A Tierra ( $R_g$ ).

Para el cálculo de la resistencia de la malla de tierra se han desarrollado un conjunto de ecuaciones para su cálculo. Partiendo de métodos aproximados relativamente rudimentarios se llega a ecuaciones cada vez más elaboradas y complejas.

La elección entre uno u otra ecuación será en función del caso particular y principalmente de la exactitud que presente dicha ecuación a utilizar, gracias al beneficio que representa el manejo de una técnica que adapte el sistema lo más cercano a la realidad.

Entre los métodos usados con mucha mas frecuencia para determinar la resistencia aproximada de una malla de aterramiento están, el método de Laurent, el método de Sverak's y el método de Schwarz.

Para efecto de este trabajo se utilizara para el cálculo de la resistencia de la malla el metodo de Sverak's y el método de Schwarz que son los utilizados por la norma IEEE 80-2000.

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

#### 4.5.1 Resistencia de Sverak's

Mediante este método se calcula la resistencia del sistema de tierra tomando en cuenta el área ocupada por el reticulado, la profundidad de enterramiento, y la longitud total de conductores utilizados para dicho reticulado.

En el caso de una rejilla con varillas en el suelo uniforme, una combinación de la longitud de conductores horizontales y las varillas de tierra nos proporcionara el estimado de la longitud total de conductores, ya que las varillas de tierra normalmente son mas efectivas en una longitud base por unidad. La resistencia de Sverak's viene dada por:

Esta ecuación es utilizada para rejillas sin varillas de tierra ya que arroja resultados prácticamente idénticos a los que se obtienen de la ecuación de Schwarz pero sin la complejidad del mismo.

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (4.26)$$

Donde:

$\rho$  : Resistividad del suelo, en  $\Omega.m$ .

$A$  : Área de la malla, en  $m^2$ .

$L_T$  : Longitud de los conductores enterrados, en m.

$h$  : Profundidad de enterramiento de la malla, en m.

#### 4.5.2 Resistencia de Schwarz

Mediante este método se calculan individualmente las resistencias a tierra del reticulado del conjunto de barras y la resistencia mutua del reticulado de barras. La resistencia total de un sistema compuesto por retículas y barras es más baja que la resistencia de cualquier combinación en paralelo y viene dada por Schwarz como:

$$R_g = \frac{(R_1 * R_2) - R_m^2}{R_1 + R_2 - (2 * R_m)} \quad (4.27)$$

Donde:

$R_1$  : Es el valor de la resistencia a tierra de los conductores de rejilla en  $\Omega$ .

$R_2$  : Es el valor de la resistencia a tierra de todas las varillas de tierra en  $\Omega$ .

$R_m$  : Es el valor mutuo de la resistencia a tierra entre el grupo de los conductores de rejilla,  $R_1$ , y el grupo de varillas de tierra,  $R_2$ , en  $\Omega$ .

Resistencia de tierra de la rejilla es:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \ln \left( \frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{K_1 * L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (4.28)$$

Donde:

$\rho$ : Es la resistividad del terreno en  $\Omega.m$ .

$L_c$ : Es el valor de la longitud total en metros de todos los conductores de la rejilla de tierra.

$a'$ : Es  $\sqrt{(a * 2h)}$  para todos los conductores que se entierran a una profundidad  $h$  en metros.

$a'$ : Es  $a$  para un conductor en la superficie en metros.

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

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

$K_1, K_2$ : Constantes relacionadas con la geometría del sistema.

Resistencia de tierra de la varilla de apoyo es:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 * \pi * L_r * n_R} \left[ \ln \left( \frac{4 * L_r}{b} \right) - 1 + \frac{(2 * K_1) * L_r}{\sqrt{A}} * (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (4.29)$$

Donde:

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

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

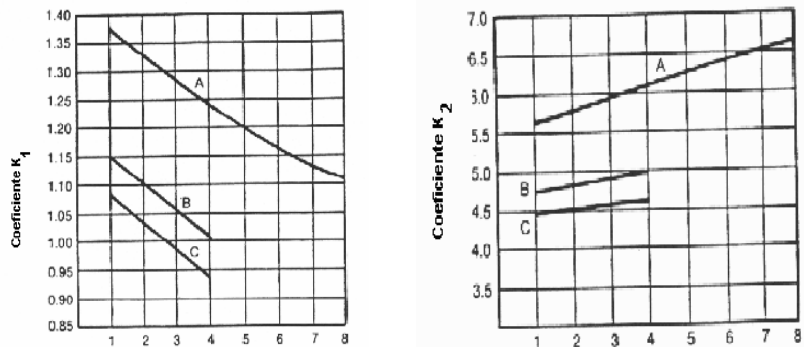
$n_R$ : Es el número de varillas que se colocan en área  $A$ .

Resistencia mutua entre la rejilla y las varillas de apoyo es:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 * L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (4.30)$$



Las constantes  $K_1$  y  $K_2$  se obtienen de las gráficas dadas por Schwarz, las cuales se muestran en la figura 4.5.



**Figura 4.5 gráficas para determinar las constantes geométricas  $K_1$  y  $K_2$ , p67, IEEE 80 (2000).**

Para una profundidad de  $h=0$ : (Curva A)

$$K_1 = -0.05a/b + 1.41 \quad (4.31)$$

$$K_2 = -0.05a/b + 5.50 \quad (4.32)$$

Para una profundidad de  $h=1/10 \sqrt{A}$  (Curva B)

$$K_1 = -0.05a/b + 1.20 \quad (4.33)$$

$$K_2 = -0.10a/b + 4.68 \quad (4.34)$$

Para una profundidad de  $h=1/6 \sqrt{A}$ : (Curva C)

$$K_1 = -0.05a/b + 1.13 \quad (4.35)$$

$$K_2 = -0.05a/b + 4.40 \quad (4.36)$$

Donde

A: es el área de la malla

#### 4.6 Determinación De La Sección Del Conductor

El calibre del conductor se determina por medio de la ecuación simplificada contenida en la norma IEEE 80-2000, que a continuación se mostrará. La corriente de falla  $I_g$  deberá ser la corriente máxima de falla esperada y que podrá ser conducida por el conductor del sistema de tierra, la duración de la corriente de falla deberá reflejar el máximo tiempo de liberación de la falla. La siguiente ecuación determina el área de la sección transversal.

$$AK_{cmil} = I_g * K_f \sqrt{t_c} \quad (4.37)$$

Donde:

$$I_g = I_f * D_f * C_p \quad (4.38)$$

$I_g$ : Valor RMS de la corriente máxima de falla, en KA.

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

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

$I_f$ : Corriente de falla RMS asimétrica en Amperios.

$t_c$ : Duración de la Falla, en segundos.

$K_f$ : Constante de la tabla 4.3, para los materiales de varios valores de temperatura de fusión ( $T_m$ ) y temperatura ambiente  $40^\circ \text{C}$  ( $T_a$ )

**Tabla 4.3 Constantes de los materiales p.44, IEEE 80 (2000).**

Material	Conductividad (%)	T <sub>m</sub> (°C)	Kf
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 Cu	40,0	1084	10,45
Alambre de acero con revestimiento de Cu	30,0	1084	12,06
varilla de acero con revestimiento de Cu	20,0	1084	14,64
Aluminio grado EC	61,0	657	12,12
Aleación de Al 5005	53,5	652	12,41
Aleación de Al 6201	52,5	654	12,47
Alambre de acero con revestimiento de Al	20,3	657	17,20
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

## CAPÍTULO V

### DESARROLLO DEL PROGRAMA

#### 5.1 Diagrama De Flujos

Un diagrama de flujo es la representación gráfica de un algoritmo; también se puede decir que es la representación detallada en forma gráfica de como deben realizarse los pasos en la computadora para producir resultados. Esta representación gráfica se da cuando varios símbolos (que indican diferentes procesos en la computadora), se relacionan entre si mediante líneas que indican el orden en que se deben ejecutar los procesos. Los símbolos normalizados utilizados son los mostrados en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1 Símbolos básicos normalizados de los diagramas de flujo**

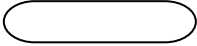
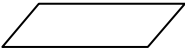
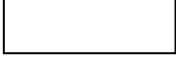
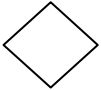
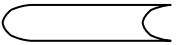
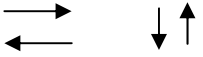

Símbolos	Descripción
	Inicio / Fin: Indica el inicio y el final de nuestro diagrama de flujo.
	Entrada: Indica la entrada y/o salida de datos.
	Proceso: Indica la asignación de un valor en la memoria y/o la ejecución de una operación aritmética.

Tabla 5.1 Símbolos básicos normalizados de los diagramas de flujo  
(Continuación)

	<p>Decisión: Indica la comparación de dos datos y dependiendo del resultado lógico (falso o verdadero) se toma la decisión de seguir un camino del diagrama u otro.</p>
	<p>Salida: Indica la salida de información en la pantalla o monitor.</p>
	<p>Flechas de conexiones: Indica el seguimiento lógico del diagrama.</p>
	<p>Conector: Indica el enlace de dos partes de un diagrama dentro de la misma página.</p>

## 5.2 Diagramas De Flujo Del Programa

A continuación se presentan los diferentes diagramas de flujos que se elaboraron, los cuales permitirán una mejor comprensión al momento del desarrollo del software. Las constantes y variables que se muestran en los diagrama de flujos son definidas en la tabla 5.2

- Diagrama de Datos del Proyecto y Cálculo del Calibre del Conductor
- Diagrama de Cálculo de los Voltajes de Toque y Paso Máximo Tolerables
- Diagrama de Cálculo de la Resistencia de la malla, GPR, Voltajes de Toque y de Paso

**Tabla 5.2 Parámetros de los diagramas utilizados en los diagramas de flujos**

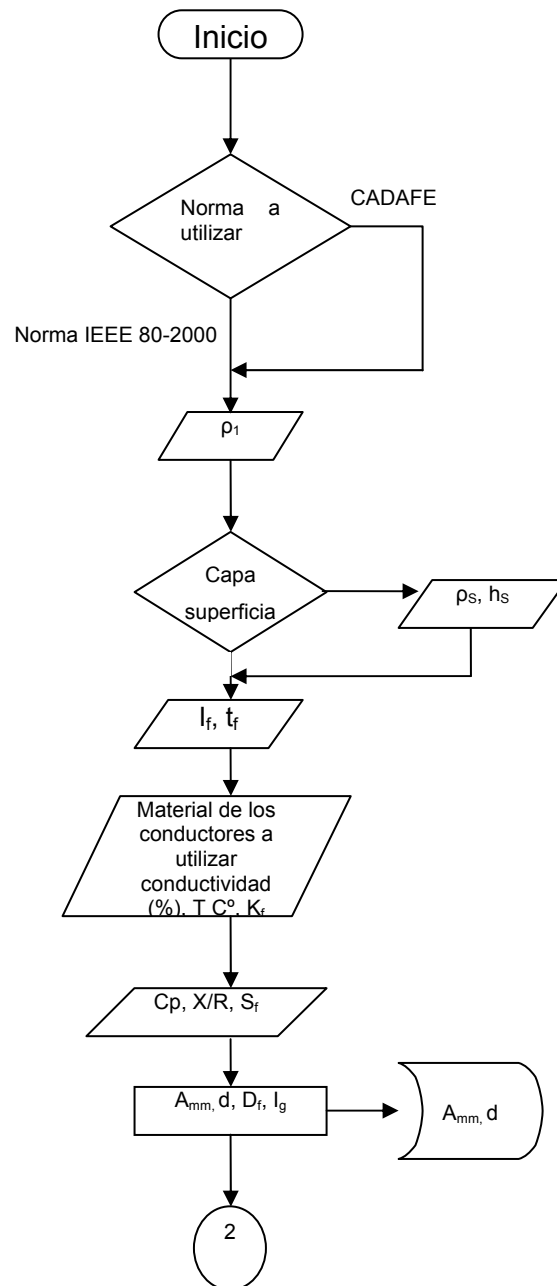
Símbolo	Descripción
$\rho_1$	Resistividad del suelo para el suelo uniforme
$\rho_S$	Resistividad de la capa superficial
$h_S$	Altura de la capa superficial
$I_f$	Corriente de falla
$t_f$	Duración de la falla
$C_p$	Expansión futura
$s_f$	Factor de división de tensión
X/R	Relación X / R del sistema de potencia
A <sub>mm</sub>	Sección transversal del conductor
d	Diámetro del conductor
$I_g$	Corriente simétrica de rejilla
D <sub>f</sub>	Factor de decremento para determinar IG
ET50	Voltaje de toque tolerable por un humano de 50 Kgs de peso)
Es50	Voltaje de paso tolerable por un humano de 50 Kgs de peso)
ET70	Voltaje de toque tolerable por un humano de 70 Kgs de peso)
Es70	Voltaje de paso tolerable por un humano de 70 Kgs de peso)
CS	Factor de decremento de la capa superficial
L <sub>r</sub>	Longitud de la varilla de tierra en cada localización
n <sub>R</sub>	Número de varillas colocadas en el área A
2b	Diámetro de la varillas
L <sub>Mayor</sub>	Longitud del lado mayor de la malla
L <sub>Menor</sub>	Longitud del lado menor de la malla
L1	Longitud paralela al lado mayor de una malla con topología en L
L2	Longitud paralela al lado menor de una malla con topología en L
D	Espaciamiento entre conductores paralelos
H	Profundidad de enterramiento de los conductores de la rejilla
n	Factor geométrico compuesto por los factores n <sub>a</sub> , n <sub>b</sub> , n <sub>c</sub> y n <sub>d</sub>

Tabla 5.2 Parámetros de los diagramas utilizados en los diagramas de flujos (Continuación)

Kh	Factor de corrección por profundidad de los Conductores de la malla
LC	Longitud total de la malla
LT	Longitud total de la malla + longitud total de las barras
IG	Corriente de malla
Rg	Resistencia de puesta a tierra
GPR	Elevación de potencial de tierra
EM	Voltaje de toque
ES	Voltaje de paso
KM	Factor de espaciamiento para voltaje de toque
KS	Factor de espaciamiento para voltaje de paso
Ki	Factor de corrección por geometría de la malla
Kii	Factor de corrección del Efecto de las barras

### 5.2.1 Diagrama de Datos del Proyecto y Cálculo del Calibre del Conductor por la norma IEEE 80-2000

Este diagrama esta basado en la lectura y almacenamiento de los datos correspondientes al usuario y datos del proyecto así como la elección de la norma a utilizar en dichos cálculos. Donde se utilizan los símbolos de toma de decisiones, entrada de datos y el de proceso. La diferencia entre la norma CADAFE y la IEEE 80-2000 corresponde a los criterios de diseños expuestos en dichas norma.



**Figura 5.1 Diagrama de Flujo del Datos del Proyecto y Calculo del Calibre del Conductor utilizando la norma IEEE 80-2000. Fuente: [Autor]**



### 5.2.2 Diagrama de Cálculo de los Voltajes de Toque y Paso Máximo Tolerables por la norma IEEE 80-2000

Este diagrama esta basado en el proceso de selección del peso para el cálculo de los voltajes de paso y toque tolerables.

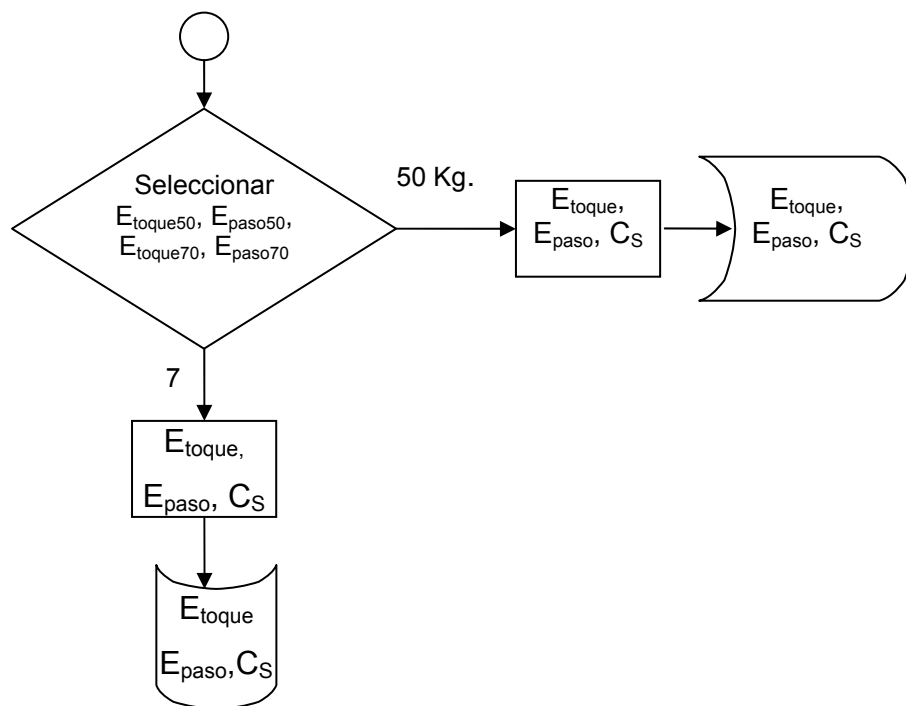


Figura 5.2 Diagrama de Flujo del Calculo de los Voltajes de Toque y Paso Máximos Tolerables utilizando la norma IEEE 80-2000. Fuente: [Autor]

### 5.2.3 Diagrama de Cálculo de la Resistencia de la Malla, GPR, Voltajes de Toque y de Paso por la norma IEEE 80-2000

En este diagrama se muestra las diferentes configuraciones de la malla de tierra que puede seleccionar el diseñador en el programa, como son, si el diseño de la malla posee varillas así como su distribución en la malla de tierra, también la selección de la topología del terreno. Esto permitirá mejorar el valor de la resistencia de malla y el GPR, como también los voltajes de toque y paso permisible en la periferia

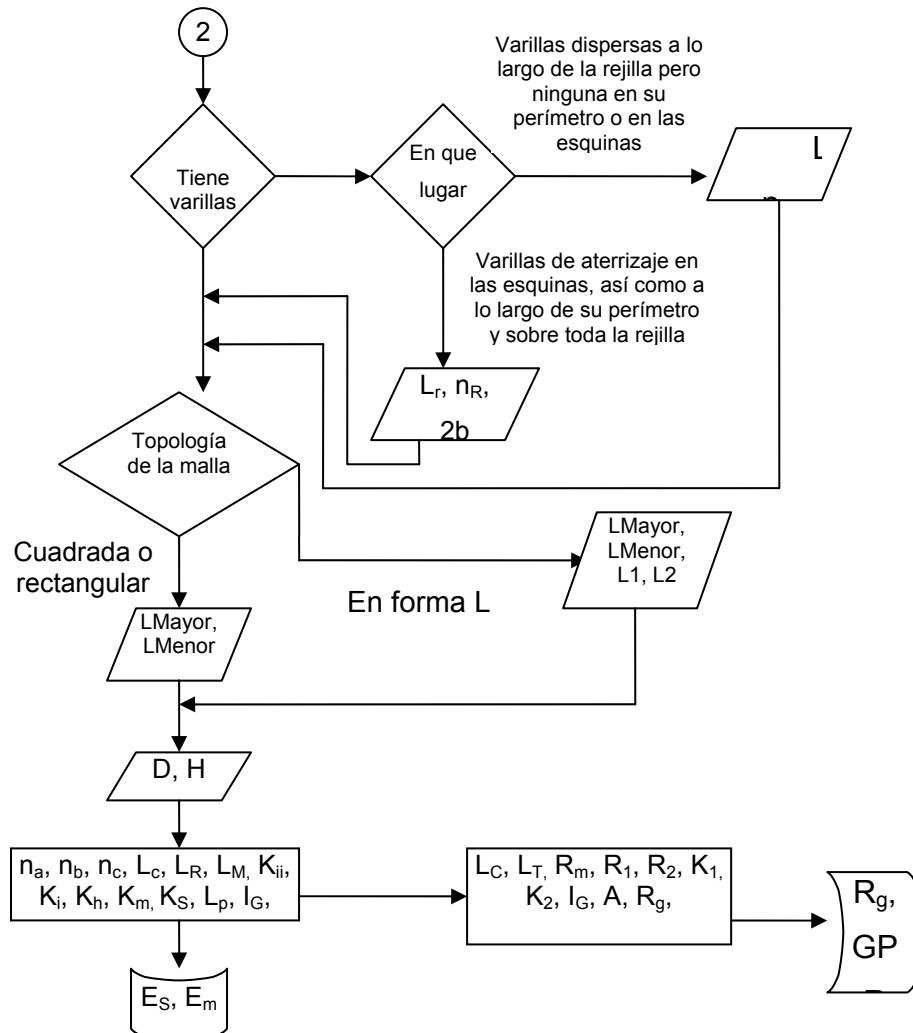


Figura 5.3 Diagrama del Flujo del Cálculo de la Resistencia de la malla, GPR, Voltajes de Toque utilizando la norma IEEE80-2000. Fuente:[Autor]

#### **5.2.4 Criterios de Diseño de una Malla de Puesta a Tierra Utilizado por la Norma CADAPE y IEEE 80-2000**

Para determinar el calibre del conductor a utilizar en una malla de puesta a tierra, la norma IEEE 80-2000 establece un conductor mínimo de #2/0 AWG y la norma CADAPE un conductor como mínimo de #4/0 AWG.

Para determinar los potenciales tolerables por el cuerpo humano la norma CADAPE establece un límite de seguridad el cual no debe exceder los 3133V para el voltaje de paso y 885V para el voltaje de toque mientras que la norma IEEE 80-2000, el límite de estos voltajes dependen solamente de las variables utilizadas para calcular dichos voltaje.

Para la norma CADAPE y la IEEE 80-2000 los criterios para determinar si una malla es segura son los mismos, se debe cumplir que el voltaje de toque tolerable por el cuerpo humano sea mayor que el máximo gradiente de potencial (GPR) o que los voltajes de toque y paso tolerables por el cuerpo humano sean mayores que los calculados en la periferia de la malla.

#### **5.3 Desarrollo Del Software**

Este software está desarrollado con la principal característica de permitir al usuario realizar los cálculos de los parámetros eléctricos de la malla de puesta a tierra de manera rápida, sencilla y efectiva, ya que los cálculos de forma manual son muy largos y tediosos, debido a la complejidad y magnitud que se requieren.

## 5.4 Justificación Del Uso De Gambas

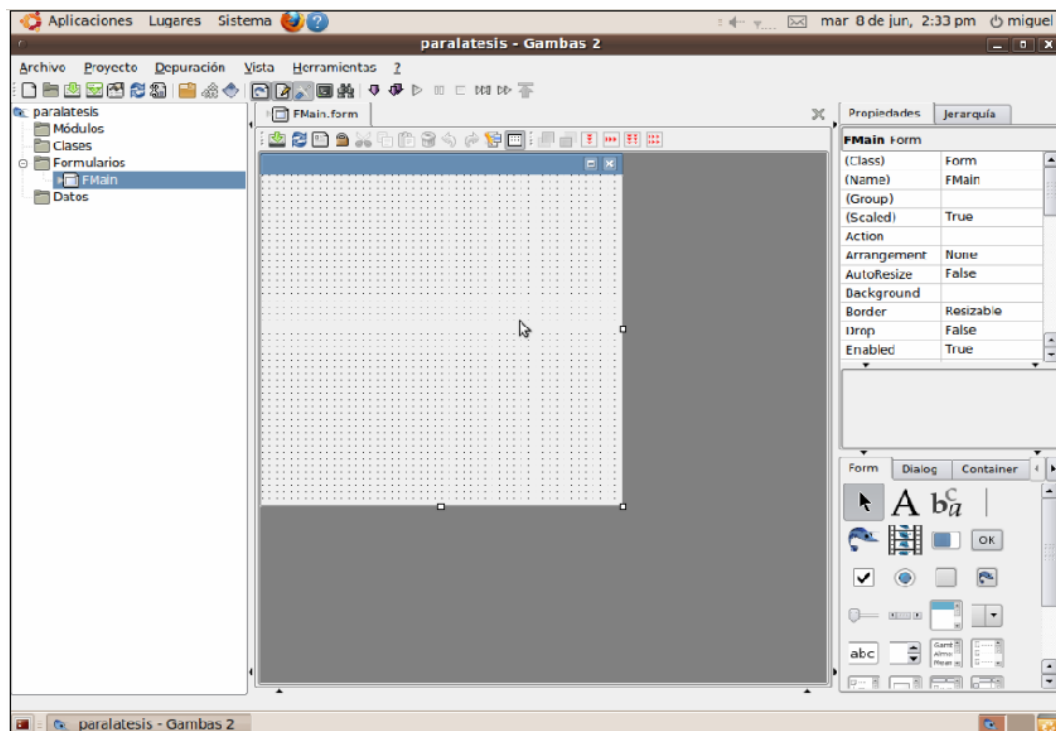
Se seleccionó Gambas para el desarrollo de este software debido a que es una excelente herramienta visual que permite crear aplicaciones o programas en un ambiente similar a las aplicaciones del Sistema Operativo Microsoft Windows®, permitiendo así una rápida y fácil adaptación e interacción del usuario con el software, debido a los conocimientos previos que este posee a las aplicaciones. Por otra parte también se consideró esta herramienta ya que es uno de los lenguajes de programación de licencia libre.

## 5.5 El Entorno De Programación Gambas

Cuando se arranca Gambas aparece en la pantalla una configuración similar a la mostrada en la Figura 5.7 En ella se pueden distinguir los siguientes elementos:

- La barra de títulos, la barra de menús y la barra de herramientas de Gambas en modo Diseño (parte superior de la pantalla).
- Caja de herramientas (toolbox) con los controles disponibles (a la derecha inferior de la ventana).
- Formulario (form) en azul, en que se pueden ir situando los controles (en el centro). Está dotado de una rejilla (grid) para facilitar la alineación de los controles.
- Ventana de proyecto, que muestra los formularios y otros módulos de programas que forman parte de la aplicación (arriba a la izquierda).
- Ventana de Propiedades, en la que se pueden ver las propiedades del objeto seleccionado o del propio formulario (arriba a la derecha). Si esta ventana no aparece, se puede hacer visible con la tecla <F4>.

- Ventana FormLayout, que permite determinar la forma en que se abrirá la aplicación cuando comience a ejecutarse (abajo a la derecha).



**Figura 5.7 Entorno de Programación de Gamba**

Existen otras ventanas para edición de código (Code Editor) y para ver variables en tiempo de ejecución con el depurador o Debugger (ventanas Immediate, Locals y Watch). Todo este conjunto de herramientas y de ventanas es lo que se llama un entorno integrado de desarrollo o IDE (Integrated Development Environment). Construir aplicaciones con Gamba es muy sencillo: basta crear los controles en el formulario con ayuda de la toolbox y del ratón, establecer sus propiedades con ayuda de la ventana de propiedades y programar el código que realice las acciones adecuadas en respuesta a los eventos o acciones que realice el usuario.

## 5.6 Características Del Software

Los cálculos de parámetros de una malla de puesta a tierra son complejos y extensos de obtener, por esto es indispensable la utilización de un software que permita de forma automatizada el cálculo de los mismos. Este software proporciona los cálculos de los parámetros de una malla de puesta a tierra de manera rápida y sencilla. Las medidas por las cuales es necesaria la utilización del mismo se presentan a continuación:

- **Facilidad de Manejo**

Para los cálculos de los parámetros eléctricos de una malla de puesta a tierra el usuario debe ingresar los siguientes datos, resistividad de la capa superficial del terreno si la posee, profundidad de la capa superficial del terreno si la posee, resistividad del terreno, distancia del lado mayor y lado menor de la malla, valor de la corriente simétrica de falla, tiempo de despeje de falla (corresponde al tiempo máximo de respuesta de las protecciones para despejar la falla), factor de corrección del sistema futuro, relación entre la reactancia y la resistencia del sistema donde ocurre la falla, factor de división de la corriente de falla, material del conductor a utilizar, número de barras si es el caso, longitud de cada barra si es el caso, diámetro de la barra si es el caso, L1 y L2 si es una malla en forma de L. Todos estos pasos se realizan de forma secuencial permitiendo su rápida y fácil comprensión.

- **Tamaño del Software**

Este software posee una ventana gráfica que permite una fácil interacción con el usuario. A pesar de esto, el tamaño del software no es

elevado, permitiendo ejecutarse en cualquier ordenador que tenga como sistema operativo Ubuntu.

- **Ambiente del Software**

Para interacción del usuario con el software fue diseñada una interfaz grafica con múltiples componentes de entrada de datos y ventanas de selección. El software contiene elementos que caracterizan a las aplicaciones de *Microsoft Windows®* ya que las personas están familiarizadas con este sistema operativo, esto le permite al usuario una rápida y mejor adaptación.

- **Velocidad de Obtención de los Cálculos**

La obtención de los cálculos de los parámetros de la malla de puesta a tierra mediante el software, se realiza de forma rápida, ya que el programa es de fácil manejo y contiene solo una ventana necesaria para ingresar los datos y mostrar las salidas.

## **5.7 Conocimientos Basicos Para La Utilizacion Del Software**

Este software ha sido desarrollado con la intención de ser una herramienta que permita facilitar la obtención de los cálculos de parámetros de una malla de puesta a tierra, pero para esto es necesario que el usuario posea conocimientos básicos de malla de puesta a tierra, así como también información de las normas para puesta a tierra para la adecuada interpretación de los resultados. Todas estas recomendaciones nos permiten un mejor manejo del software extrayéndose de esta manera el mayor provecho del mismo.

## **5.8 Estructura Del Software**

Este software diseñado para calcular los parámetros de la malla de puesta a tierra dado el valor de la resistividad y las dimensiones del terreno donde se va implantar la malla, también los datos de la falla como son la corriente, el tiempo, el factor de división de corriente y otros parámetros mencionados anterior mente. Los resultados obtenidos mediante este software son: calibre del conductor a utilizar en la malla de tierra, voltajes tolerables de toque y de paso para personas de 50 y 70 kilogramos, resistencia de la malla de tierra, máximo potencial de la malla (GPR), voltaje de toque y de paso en la periferia de la malla. A continuación se describen la utilización del software.

### **5.8.1 Datos del Terreno**

En la figura 5.8 la flecha negra indica una casilla para seleccionar si el terreno posee capa superficial, y la flecha roja indica la sección donde se introducen los datos del terreno como son la resistividad de la capa superficial si; es el caso, profundidad de la capa superficial; si es el caso, resistividad del terreno donde se va introducir la malla de puesta a tierra, lado mayor y lado menor del terreno donde se va a dimensionar la malla.



programa para el cálculo de malla de puesta a tierra en subestaciones

Capa superficial IEEEst80-2000

Voltaje de Toque y Paso Permisible

Persona de 30 Kg  Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque 837.336

Voltaje de Paso 2683.251

Calcula

Cs 0.739

Datos para el cálculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia

Selección si el diseño contiene varillas y el tipo de geometría de la malla

Mallas sin varillas  Cuadrada

Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perímetro  Rectangular

malla con varillas tanto en las esquinas como en perímetro  En Forma de L

Nº de varillas NR 38

Longitud de las varillas Lr (cm) 1000

Diametro de las varillas 2b (mm) 16

Profundidad de los conductores de tierra H m (cm) 50

Espaciamientos entre conductores en paralelo D m (m) 7

Datos de la Corriente de Falla

Valores RMS de la corriente simétrica de falla Is (AMP) 3180

Tiempo de despeje de falla ts (ms) 500

Factor de corrección del sistema futuro Cp 1

X/R 10

Factor de división de la corriente de falla Sf (%) 50

COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO

Conductividad (%) 97

Temperatura de fusión en C° 1084

Kf 7.06

Conductor a utilizar en la malla de puesta a tierra

Sección transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>) 8.251

Sección transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>) 67.43

calcular

Diametro del conductor normalizado en (mm) 10.5

Calibre del conductor normalizado 2/0 AGW

Factor de Decremento Df 1.026

Voltajes de Toque y de Paso en la periferia

Calcular resistencia Resistencia de tierra en (Ω) 2.61855

GPR 5126.094

Calcular Voltajes de Toque y Paso Voltaje de toque 603.24324

Votaje de 471.62015

**Figura 5.8 Vista del programa indicando el lugar donde se selecciona la capa superficial y la introducción de los datos del terreno**

### 5.8.2 Datos de la Corriente de Falla

En la figura 5.9 la flecha negra indica el lugar donde se selecciona el material del conductor a utilizar, y la flecha roja indica la sección donde se introducen los datos de la corriente de falla, como son: la corriente de falla, el tiempo de duración de la falla, el incremento futuro de la corriente de falla, el factor de división de la corriente, la relación entre la reactancia y la resistencia en el lugar de la falla.

programa para el calculo de malla de puesta a tierra en subestaciones

Capa superficial IEEEst80-2000

**DATOS DEL TIERRINO**

Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 2500

Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm) 10

Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 400

Lado mayor de la malla en (m) 84

Lado menor de la malla en (m) 63

**DATOS PARA EL CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA MALLA Y LOS VOLTAJES DE TOQUE Y DE PASO EN LA PERIFERIA**

Selección si el diseño contiene varillas y el tipo de geometría de la malla

Mallas sin varillas  Cuadrada

Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perímetro  Rectangular

Malla con varillas tanto en las esquinas como en perímetro  En Forma de L

Nº de varillas NR 38

Longitud de las varillas  $L_v$  (cm) 1000

Diametro de las varillas  $2b$  (mm) 16

Profundidad de los conductores de tierra  $H$  en (cm) 50

Espaciamientos entre conductores en paralelo  $D$  en (m) 7

**Voltaje de Toque y Paso Permisible**

Persona de 30Kg  Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque 837.336

Voltaje de Paso 2683.251

Calcula

$C_s$  0.739

**DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA**

Valores RMS de la corriente simétrica de falla en (AMP) 3180

Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms) 500

Factor de correccion del sistema futuro  $C_p$  1

X.R. 10

Factor de division de la corriente de falla  $S_f$  en (%) 50

**CONDUCTOR UTILIZAR EN LA MALLA DE PUESTA A TIERRA**

Seccion transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>) 8.251

Seccion transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>) 67.43

Calcula

Diametro del conductor normalizado en (mm) 10.5

Tipos del conductor normalizado 2/0 AGW

Factor de Decremento Df 1.026

**TIPO DE MATERIAL COMERCIAL CON DURO TRAZADO**

Conductividad (%) 97

Temperatura de fusion en C° 1084

Kf 7.06

**Voltajes de Toque y de Paso en la periferia**

Calcular resistencia Resistencia de tierra en ( $\Omega$ ) 2.61855

GPR 5126.094

Calcular Voltajes de Toque y Paso Voltaje de toque 603.24324

Voltaje de 471.62015

**Figura 5.9 Vista del programa indicando el lugar donde se selecciona el material del conductor a utilizar y la introducción de los datos de la corriente de falla**

### 5.8.3 Datos de la Geometría de la Malla y Barras de Tierra

En la figura 5.10 la flecha negra indica el lugar donde se selecciona el tipo de geometría de la malla, que para este programa se dispone de tres posibles formas de la malla (cuadrada, rectangular y en forma de L). La flecha roja indica la sección donde se selecciona como estarán dispuestas las barras de puesta a tierra así como los datos correspondientes a cada una de la selección.

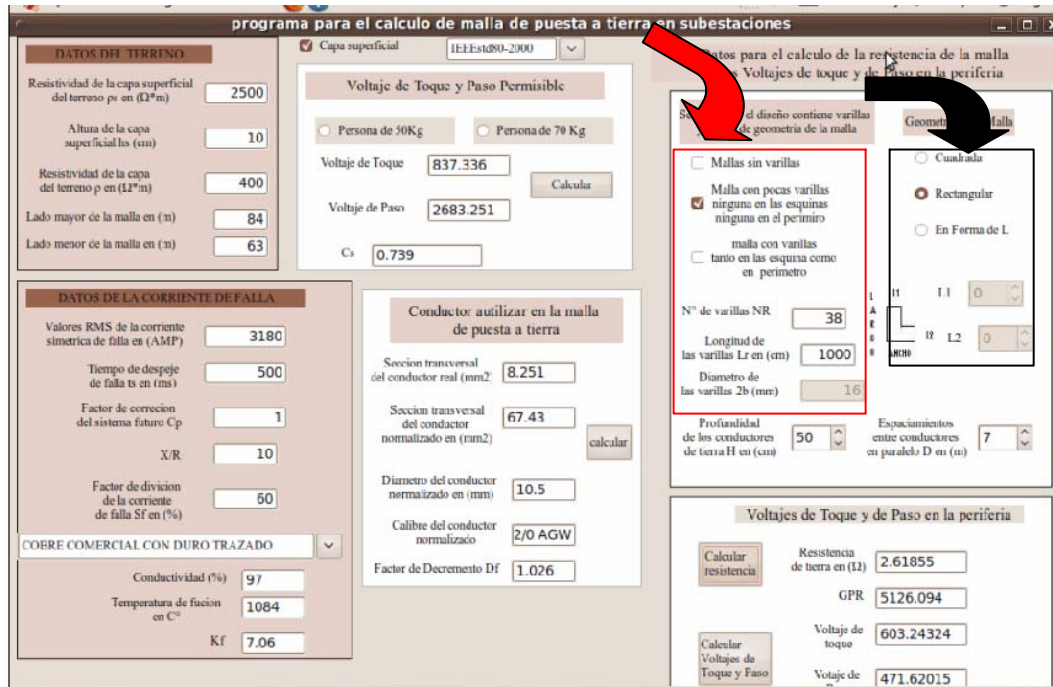


Figura 5.10 vista del programa indicando el lugar donde se selecciona la geometría de la malla material y la disposición de las barras de puesta a tierra

### 5.8.4 Datos de la Profundidad y el Espaciamiento entre Conductores de la Malla

En la figura 5.11 la flecha negra indica la casilla donde se introduce el valor del espaciamiento entre conductores de la malla de puesta a tierra, y la flecha roja indica la casilla donde se introduce el valor de la profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra.

programa para el calculo de malla de puesta a tierra en subestaciones

Capa superficial IEEEst80-2000

**DATOS DEL TIERRINO**

Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 2500

Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm) 10

Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 400

Lado mayor de la malla en (m) 84

Lado menor de la malla en (m) 63

**Voltaje de Toque y Paso Permisible**

Persona de 30Kg  Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque 837.336

Voltaje de Paso 2683.251

Calcula

$C_s$  0.739

**Datos para el calculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia**

Selección si el diseño contiene varillas y el tipo de geometría de la malla

Mallas sin varillas  Cuadrada

Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perímetro  Rectangular

malla con varillas tanto en las esquinas como en perímetro  En Forma de L

Nº de varillas NR 38

Longitud de las varillas L (m) 1000

Diametro de las varillas 2b (mm) 16

Profundidad de los conductores de tierra H en (cm) 50

Espaciamientos entre conductores en paralelo D en (m) 7

**DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA**

Valores RMS de la corriente simétrica de falla en (AMP) 3180

Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms) 500

Factor de corrección del sistema futuro  $C_p$  1

X/R 10

Factor de división de la corriente de falla  $S_f$  en (%) 50

COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO

Conductividad (%) 97

Temperatura de fusión en  $^{\circ}C$  1084

Kf 7.06

**Conductor a utilizar en la malla de puesta a tierra**

Sección transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>) 8.251

Sección transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>) 67.43

calcular

Diametro del conductor normalizado en (mm) 10.5

Calibre del conductor normalizado 2/0 AGW

Factor de Decremento Df 1.026

**Voltajes de Toque y de Paso en la periferia**

Calcular resistencia Resistencia de tierra en ( $\Omega$ ) 2.61855

GPR 5126.094

Calcular Voltajes de Toque y Paso Voltaje de toque 603.24324

Votaje de 471.62015

**Figura 5.11** vista del programa indicando las casillas donde se introduce el valor del espaciamiento entre conductores y profundidad de la malla de puesta a tierra

### 5.8.5 Resultados del Calibre del Conductor a Utilizar en la Construcción de la Malla de Tierra

En la figura 5.12 la flecha roja indica la sección donde se mostrarán los resultados del conductor a utilizar, como son: la sección transversal del conductor calculado, la sección transversal del conductor normalizado, el diámetro del conductor normalizado y el calibre del conductor normalizado. La flecha verde indica el botón que se debe presionar para realizar dichos cálculos.

programa para el calculo de malla de puesta a tierra en subestaciones

Capa superficial IEEEst80-2000

**DATOS DEL TIERRINO**

Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 2500

Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm) 10

Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 400

Lado mayor de la malla en (m) 84

Lado menor de la malla en (m) 63

**DATOS PARA EL CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA MALLA Y LOS VOLTAJES DE TOQUE Y DE PASO EN LA PERIFERIA**

Selección si el diseño contiene varillas y el tipo de geometría de la malla

Mallas sin varillas  Cuadrada

Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perímetro  Rectangular

malla con varillas tanto en las esquinas como en perímetro  En Forma de L

Nº de varillas NR 38

Longitud de las varillas  $L_v$  (cm) 1000

Diametro de las varillas  $2b$  (mm) 16

Cantidad conductores tierra H en (cm) 50

Espaciamientos entre conductores en paralelo D en (m) 7

**Voltaje de Toque y Paso Permisible**

Persona de 30Kg  Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque 837.336

Voltaje de Paso 2683.251

Calcula

$C_s$  0.739

**DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA**

Valores RMS de la corriente simétrica de falla en (AMP) 3180

Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms) 500

Factor de corrección del sistema futuro  $C_p$  1

X/R 10

Factor de división de la corriente de falla  $S_f$  en (%) 50

COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO

Conductividad (%) 97

Temperatura de fusión en  $^{\circ}C$  1084

Kf 7.06

**Conductor a utilizar en la malla de puesta a tierra**

Sección transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>) 8.251

Sección transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>) 67.43

Diametro del conductor normalizado en (mm) 10.5

Calibre del conductor normalizado 2/0 AGW

Factor de Decremento Df 1.026

Calcula

**Voltajes de Toque y de Paso en la periferia**

Calcular resistencia Resistencia de tierra en ( $\Omega$ ) 2.61855

GPR 5126.094

Calcular Voltajes de Toque y Paso Voltaje de toque 603.24324

Voltaje de 471.62015

**Figura 5.12** vista del programa indicando la sección donde se mostraran los resultados de las características técnicas del conductor calculado

### 5.8.6 Voltajes de Toque y Paso Permisibles

En la figura 5.13 la flecha negra indica el lugar donde se selecciona el peso de la persona, para el cual se calculan los voltajes de toque y paso permisibles, y la flecha roja indica la sección donde se muestran los resultados de los voltajes de toque y de paso para el peso seleccionado y el factor de reducción  $C_s$ . La flecha verde indica el botón que se debe presionar para realizar dichos cálculos.

programa para el calculo de malla de puesta a tierra en subestaciones

Capa sup. IEEEStd80-2000

**DATOS DEL TIERRINO**

Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 2500

Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm) 10

Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 40

Lado mayor de la malla en (m)

Lado menor de la malla en (m)

**DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA**

Valores RMS de la corriente simétrica de falla en (AMP) 3180

Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms) 500

Factor de corrección del sistema futuro  $C_p$  1

X/R 10

Factor de división de la corriente de falla  $S_f$  en (%) 50

COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO

Conductividad (%) 97

Temperatura de fusión en  $^{\circ}C$  1084

Kf 7.06

**Voltaje de Toque y Paso Permissible**

Persona de 50Kg  Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque 837.336

Voltaje de Paso 2683.251

Calcular

$C_s$  0.739

**Conductor a utilizar en la malla de puesta a tierra**

Sección transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>) 8.251

Sección transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>) 67.43

calcular

Diametro del conductor normalizado en (mm) 10.5

Calibre del conductor normalizado 2/0 AGW

Factor de Decremento Df 1.026

**Datos para el calculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia**

Seleccione si el diseño contiene varillas y el tipo de geometria de la malla

Geometria de la Malla

Cuadrada

Rectangular

En Forma de L

Mallas sin varillas

Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perimetro

malla con varillas tanto en las esquinas como en perimetro

Nº de varillas NR 38

Longitud de las varillas  $L_r$  en (cm) 1000

Diametro de las varillas 2b (mm) 16

Profundidad de los conductores de tierra H en (cm) 50

Espaciamientos entre conductores en paralelo D en (m) 7

**Voltajes de Toque y de Paso en la periferia**

Calcular resistencia

Resistencia de tierra en ( $\Omega$ ) 2.61855

GPR 5126.094

Calcular Voltajes de Toque y Paso

Voltaje de toque 603.24324

Voltaje de 471.62015

**Figura 5.13** vista del programa indicando el lugar donde se selecciona el peso de la persona a la cual se le calculan los voltajes de toque y paso permisibles

### 5.8.7 Resistencia de la Malla de Tierra y el Máximo Potencial a Tierra (GPR)

En la figura 5.14 la flecha roja indica la sección donde se muestran los resultados del diseño de la malla de puesta a tierra que corresponden a los valores de la resistencia de la malla de puesta a tierra y máximo Potencial de tierra, y la flecha verde indica el botón que se debe presionar para realizar dichos cálculos.

programa para el calculo de malla de puesta a tierra en subestaciones

Capa superficial IEEEst80-2000

Datos para el calculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia

Selección si el diseño contiene varillas y el tipo de geometría de la malla

Geometría de la Malla

Mallas sin varillas  Cuadrada

Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perímetro  Rectangular

malla con varillas tanto en las esquinas como en perímetro  En Forma de L

Nº de varillas NR 38

Longitud de las varillas Lr (cm) 1000

Diametro de las varillas 2b (mm) 16

Profundidad de los conductores de tierra H (m) 50

Espaciamientos entre conductores en paralelo D (m) 7

Datos del terreno

Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 2500

Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm) 10

Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega \cdot m$ ) 400

Lado mayor de la malla en (m) 84

Lado menor de la malla en (m) 63

Voltaje de Toque y Paso Permisible

Persona de 30Kg  Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque 837.336

Voltaje de Paso 2683.251

Calcula

Cs 0.739

Datos de la corriente de falla

Valores RMS de la corriente simétrica de falla en (AMP) 3180

Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms) 500

Factor de corrección del sistema futuro  $C_p$  1

X.R. 10

Factor de división de la corriente de falla  $S_f$  en (%) 50

COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO

Conductividad (%) 97

Temperatura de fusión en  $^{\circ}C$  1084

Kf 7.06

Conductor a utilizar en la malla de puesta a tierra

Sección transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>) 8.251

Sección transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>) 67.43

calcular

Diametro del conductor normalizado en (mm) 10.5

Calibre del conductor normalizado 2/0 AGW

Factor de Decremento Df 1.026

Voltajes de Toque y de Paso en la periferia

Calcular resistencia

Resistencia de tierra en ( $\Omega$ ) 2.61855

GPR 5126.094

Calcular Voltajes de Toque y Paso

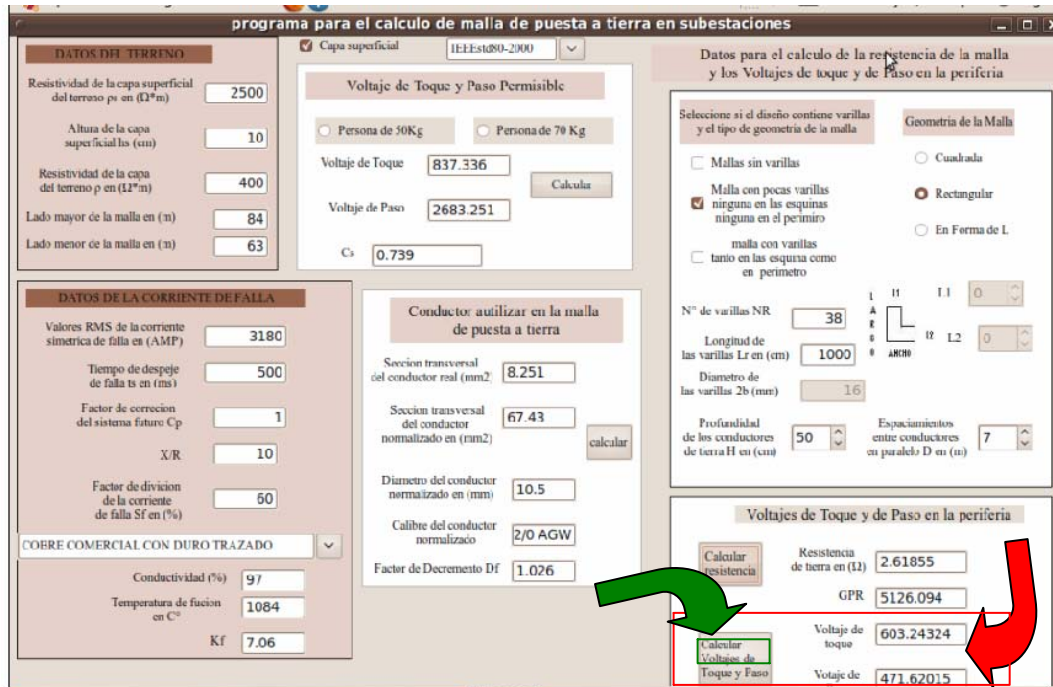
Voltaje de toque 603.24324

Votaje de 471.62015

Figura 5.14 vista del programa indicando la sección donde se mostrara los resultados de resistencia de la malla de tierra y el máximo potencial de la malla

### 5.8.8 Voltajes de Toque y Paso en la Periferia de la Malla

En la figura 5.15 la flecha roja indica la sección donde se muestran los resultados del diseño de la malla de puesta a tierra que corresponden a los valores de voltaje de toque y de paso en la periferia de la malla, y flecha verde indica el botón que se debe presionar para realizar los cálculos mencionados anteriormente.

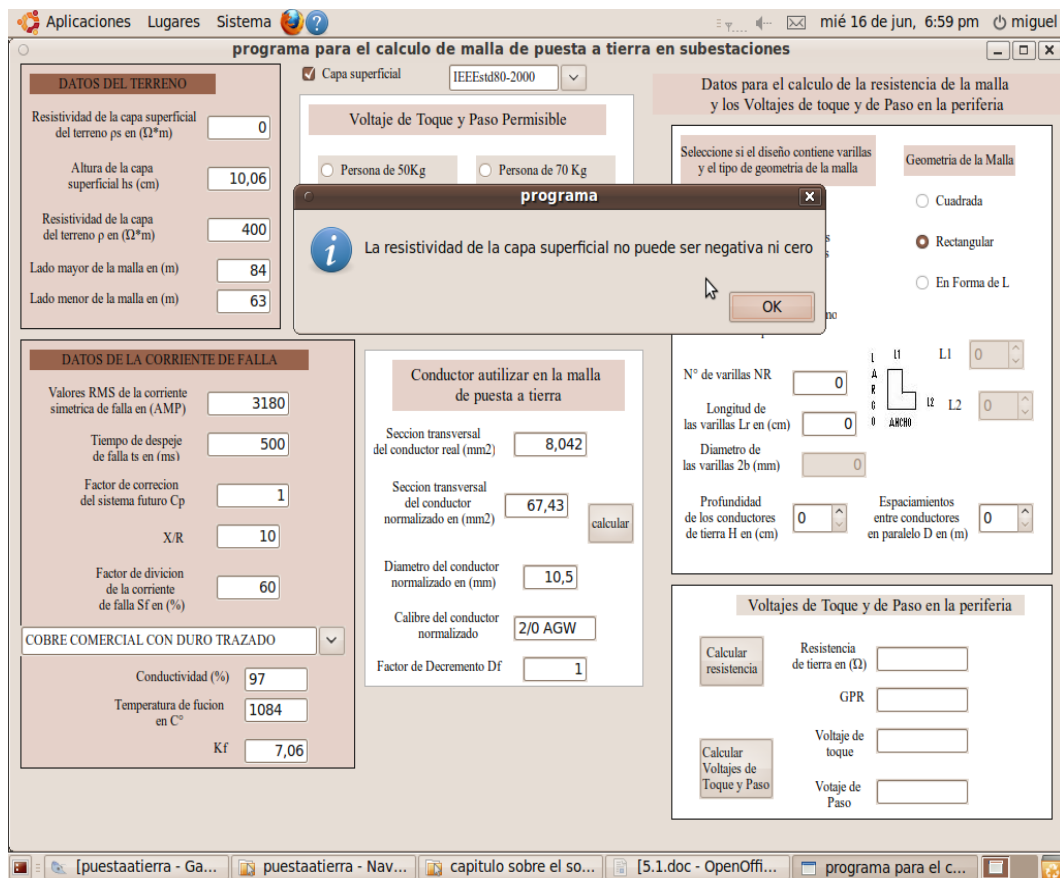


**Figura 5.15** vista del programa indicando la sección donde se mostrara los resultados del cálculo de los voltajes de toque y de paso en la periferia de la malla

### 5.8.9 Mensajes de Error Emitido por Valores Negativos y Ceros

En la figura 5.16 se puede apreciar el mensaje de error emitido por el programa al introducirle en cualquiera de las casillas de entrada de datos valores negativos o cero, este mensaje le indica al usuario que el valor de ese parámetro tiene que ser mayor que cero. Este error se soluciona cambiando el valor por un valor mayor que cero.

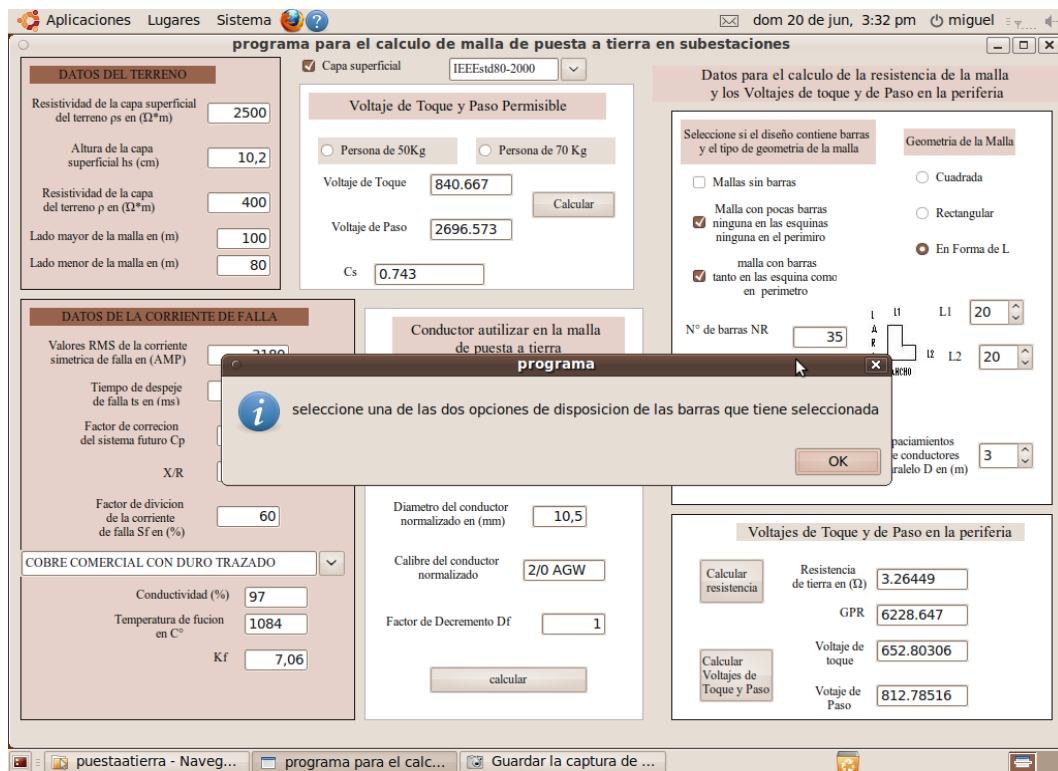




**Figura 5.16** vista del programa arrojando un mensaje de error por la introducción de un parámetro negativo o cero

### 5.8.10 Mensajes de Error Emitido por una Doble Selección

En la figura 5.18 se puede apreciar el mensaje de error emitido por el programa al seleccionar al mismo tiempo dos opciones GPR para hacer un determinado cálculo. Esto se soluciona desmarcando cualquiera de las opciones que no se desee.



**Figura 5.18** vista del programa arrojando un mensaje de error al seleccionar dos opciones al mismo tiempo

## **CAPITULO VI**

### **VALIDACION DEL PROGRAMA**

#### **RESULTADOS, MANUALES Y DATOS COMPUTARIZADOS**

A continuación, en este capítulo se mostrarán los resultados calculados de forma manual y automatizados por el software de calculo, la cual se obtuvo mediante las diferentes fórmulas respectivas para el cálculo de los parámetros de una malla de puesta a tierra, dichas fórmulas han sido mostradas en el capítulo 4.

##### **6.1 Desarrollo De Cálculos Manuales**

###### **6.1.1 Valores Utilizados en el Ejemplo 1**

En la tabla 6.1, se muestran los valores utilizados como datos en los cálculos teóricos y de entrada al programa de este proyecto; estos valores fueron extraídos del proyecto de Nixon Vidal titulado “Rediseño del Sistema de Puesta a Tierra de la Subestación Tigre I 230/115 Kv de la empresa CADAPE”, Capítulo 4, de la página 165. En la tabla 6.2 se muestran los resultados del ejemplo en referencia.

**Tabla 6.1 Datos del ejemplo “Rediseño del Sistema de Puesta a Tierra de la Subestación Tigre I 230/115 Kv de la empresa CADAPE”**

Datos	Valor	
Resistividad de la capa superficial	3000	$\Omega$ - metros
Resistividad del suelo	716	$\Omega$ - metros
Altura de la capa superficial	0.104	metros
Corriente de falla	11330,499	amperios
Duración de la falla	0,5	segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	0,8	metros
Espaciamiento entre conductores	4	metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	193	metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	124	metros
Número de barras instaladas	15	
Diámetro de la barra	0,0159	metros
Longitud de la barra	2,1336	metros
Material del conductor de la malla	Cobre	

**Tabla 6.2 Resultados del ejemplo “Rediseño del Sistema de Puesta a Tierra de la Subestación Tigre I 230/115 Kv de la empresa CADAPE”**

Datos	Valor	
Voltaje de toque máximo tolerable (70 Kg)	911.4394	Voltios
Voltaje de paso máximo tolerable( 70 Kg)	2979.6631	Voltios
Resistencia de puesta a tierra	2.1121	$\Omega$
Máximo Potencial de Tierra (GPR)	11965.7597	Voltios
Voltaje de toque en la periferia	968.45	Voltios
Voltaje de paso en la periferia	848.88	Voltios
Calibre del conductor de la malla	4/0	AWG

### 6.1.2 Valores Utilizados en el Ejemplo 2

En la tabla 6.3, se muestran los valores utilizados como datos en los cálculos teóricos y de entrada al programa de este proyecto; estos valores fueron extraídos de la Norma IEEE 80-2000. Se toma como ejemplo “Malla Rectangular con Barras de Puesta a Tierra” de la página 137. En la tabla 6.4 se observan los resultados del ejemplo de referencia.

**Tabla 6.3 Datos del ejemplo “Malla Rectangular con Barras de Puesta a Tierra”**

Datos	Valor	
Resistividad de la capa superficial	2500	$\Omega$ - metros
Resistividad del suelo	400	$\Omega$ - metros
Altura de la capa superficial	0.1	metros
Corriente de falla	3180	amperios
Duración de la falla	0,5	segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	0,5	metros
Espaciamiento entre conductores	4	metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	84	metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	63	metros
Número de barras instaladas	38	
Diámetro de la barra	0,016	metros
Longitud de la barra	10	metros
Material del conductor de la malla	Cobre	

**Tabla 6.4 Resultados del ejemplo “Malla Rectangular con Barras de Puesta a Tierra”**

Datos	Valor	
Voltaje de toque máximo tolerable (70 Kg)	838,2	Voltios
Voltaje de paso máximo tolerable( 70 Kg)	2686,6	Voltios
Resistencia de puesta a tierra	2.62	$\Omega$
Elevación del Potencial de Tierra (GPR)	4998,96	Voltios
Voltaje de toque	595,8	Voltios
Voltaje de paso	No calculado	Voltios
Calibre del conductor de la malla	2/0	AWG

### 6.1.3 Valores Utilizados en el Ejemplo 3

En la tabla 6.5, se muestran los valores utilizados como datos en los cálculos teóricos y de entrada al programa de este proyecto; estos valores fueron extraídos de la Norma IEEE 80-2000. Se toma como ejemplo “Malla en Forma de L con Barras de Puesta a Tierra” de la página 137. En la tabla 6.6 se observan los resultados del ejemplo de referencia.

**Tabla 6.5 Datos del ejemplo “Malla en Forma de L con Barras de Puesta a Tierra”**

Datos	Valor	
Resistividad de la capa superficial	2500	$\Omega$ - metros
Resistividad del suelo	400	$\Omega$ - metros
Altura de la capa superficial	0.102	metros
Corriente de falla	3180	amperios
Duración de la falla	0,5	segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	0,5	metros

Tabla 6.5 Datos del ejemplo “Malla en Forma de L con Barras de Puesta a Tierra” (Continuación)

Datos	Valor	
Espaciamiento entre conductores	3	metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	100	metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	80	metros
L1	20	metros
L2	20	metros
Número de barras instaladas	35	
Diámetro de la barra	0,016	metros
Longitud de la barra	2,4	metros
Material del conductor de la malla	Cobre	

Tabla 6.6 Resultados del ejemplo “Malla en Forma de L con Barras de Puesta a Tierra”

Datos	Valor	
Voltaje de toque máximo tolerable (70 Kg)	838,2	Voltios
Voltaje de paso máximo tolerable( 70 Kg)	2686,6	Voltios
Resistencia de puesta a tierra	3.264	$\Omega$
Elevación del Potencial de Tierra (GPR)	6227.71	Voltios
Voltaje de toque	651,8	Voltios
Voltaje de paso	812.373	Voltios
Calibre del conductor de la malla	2/0	AWG

## 6.2 Resultados Computarizados

Por motivos de espacio y visibilidad las figuras 6.1, 6.2, 6.4, 6.5, 6.7, 6.8 serán ajustadas para visualizar los datos introducidos mostrándose al final de cada ejemplo la ventana original del programa.

### 6.2.1 Ejemplo N° 1: Entrada de Datos

The screenshot shows a software interface with several data entry panels. At the top right, there is a dropdown menu for 'Capa superficial' set to 'CADAFE'. Below it is a title 'Datos para el calculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia'. The interface is divided into several sections:

- DATOS DEL TERRENO:**
  - Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega^*m$ ): 3000
  - Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm): 10,4
  - Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega^*m$ ): 716
  - Lado mayor de la malla en (m): 193
  - Lado menor de la malla en (m): 124
- DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA:**
  - Valores RMS de la corriente simetrica de falla en (AMP): 11330,499
  - Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms): 500
  - Factor de correcion del sistema futuro  $C_p$ : 1
  - X/R: 10
  - Factor de divicion de la corriente de falla  $S_f$  en (%): 50
- Material Selection:**
  - COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO
  - Conductividad (%): 97
  - Temperatura de fucion en  $C^\circ$ : 1084
  - $K_f$ : 7.06
- Mesh Configuration:**
  - Selecciones si el diseo contiene varillas y el tipo de geometria de la malla:
    - Mallas sin varillas
    - Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perimiro
    - malla con varillas tanto en las esquina como en perimetro
  - Geometria de la Malla:
    - Cuadrada
    - Rectangular
    - En Forma de L
  - N° de varillas NR: 15
  - Longitud de las varillas  $L_r$  en (cm): 213,36
  - Diametro de las varillas  $2b$  (mm): 15,9
  - Profundidad de los conductores de tierra  $H$  en (cm): 80
  - Espaciamientos entre conductores en paralelo  $D$  en (m): 0

Figura 6.1 Datos de entrada del ejemplo 1 extraídos de la tabla 6.1



## 6.2.2 Ejemplo N° 1: Resultados

**Voltaje de Toque y Paso Permissible**

Persona de 50Kg      Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque

Voltaje de Paso

Cs

**Conductor utilizar en la malla de puesta a tierra**

Seccion transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>)

Seccion transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>)

Diametro del conductor normalizado en (mm)

Calibre del conductor normalizado

Factor de Decremento Df

**Voltajes de Toque y de Paso en la periferia**

Resistencia de tierra en (Ω)

GPR

Voltaje de toque

Voltaje de Paso

**Figura 6.2 Resultados del ejemplo 1 arrojados por el programa**

### 6.2.3 Ejemplo N° 1: Ventana del Programa, datos y resultados

Se puede observar en la figura 6.3 que los resultados obtenidos por el programa tienen pequeñas variaciones con el ejemplo 1 obtenidos de forma manual. Esto es debido al cálculo de algunos valores que fueron obtenidos mediante gráficas, como el valor del factor de reducción  $C_s$ , para el cálculo de los voltajes de toque y de paso tolerables en el procedimiento manual mientras que el programa determina el valor de  $C_s$  mediante una ecuación que tiene un margen de error de 5%. Esta ecuación se expone en la norma IEEE 80-2000. Otras variaciones en los resultados son el método de redondeo utilizado en los cálculos de forma manual mientras que los cálculos realizados por el programa no realiza redondeo ya que utiliza una cantidad de decimales bastante considerable.

**DATOS DEL TERRENO**

Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega^2\text{m}$ )

Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm)

Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega^2\text{m}$ )

Lado mayor de la malla en (m)

Lado menor de la malla en (m)

**DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA**

Valores RMS de la corriente simétrica de falla en (AMP)

Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms)

Factor de corrección del sistema futuro  $C_p$

X/R

Factor de división de la corriente de falla SF en (%)

COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO

Conductividad (%)

Temperatura de fusión en  $^{\circ}\text{C}$

Kf

**Capa superficial** CADAFE

**Voltaje de Toque y Paso Permisible**

Persona de 50Kg  Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque

Voltaje de Paso

Calcular

$C_s$

**Conductor utilizar en la malla de puesta a tierra**

Sección transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>)

Sección transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>)

calcular

Dímetro del conductor normalizado en (mm)

Calibre del conductor normalizado

Factor de Decremento Df

**Datos para el cálculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia**

Seleccione si el diseño contiene varillas y el tipo de geometría de la malla

Mallas sin varillas  Cuadrada

Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perímetro  Rectangular

malla con varillas tanto en las esquinas como en perímetro  En Forma de L

N° de varillas NR

Longitud de las varillas  $L_r$  en (cm)

Dímetro de las varillas  $2b$  (mm)

Profundidad de los conductores de tierra H en (cm)

Espaciamientos entre conductores en paralelo D en (m)

**Voltajes de Toque y de Paso en la periferia**

Calcular resistencia Resistencia de tierra en ( $\Omega$ )

GPR

Calcular Voltajes de Toque y Paso Voltaje de toque

Voltaje de Paso

Figura 6.3 Datos y resultados del ejemplo 1, obtenidos con el programa de puesta a tierra

## 6.2.4 Ejemplo N° 2: Entrada de Datos

programa para el cálculo de

Capa superficial IEEEStd80-2000

Datos para el cálculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia


Seleccione si el diseño contiene varillas y el tipo de geometría de la malla

Geometría de la Malla

Mallas sin varillas  Cuadrada

Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perimetro  Rectangular

malla con varillas tanto en las esquina como en perimetro  En Forma de L

N° de varillas NR  

Longitud de las varillas Lr en (cm)

Diametro de las varillas 2b (mm)

Profundidad de los conductores de tierra H en (cm)  Espaciamientos entre conductores en paralelo D en (m)

**DATOS DEL TERRENO**

Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega^*m$ )

Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm)

Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega^*m$ )

Lado mayor de la malla en (m)

Lado menor de la malla en (m)

**DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA**

Valores RMS de la corriente simétrica de falla en (AMP)

Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms)

Factor de correccion del sistema futuro  $C_p$

X/R

Factor de división de la corriente de falla  $S_f$  en (%)

COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO

Conductividad (%)

Temperatura de fucion en C°

Kf

Figura 6.4 Datos de entrada del ejemplo 2 extraídos de la tabla 6.3

### 6.2.5 Ejemplo N° 2: Resultados

IEEEStd80-2000

**Voltaje de Toque y Paso Permissible**

Persona de 50Kg     Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque

Voltaje de Paso

Cs

**Voltajes de Toque y de Paso en la periferia**

Resistencia de tierra en ( $\Omega$ )

GPR

Voltaje de toque

Voltaje de Paso

**Conductor utilizar en la malla de puesta a tierra**

Seccion transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>)

Seccion transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>)

Diametro del conductor normalizado en (mm)

Calibre del conductor normalizado

Factor de Decremento Df

**Figura 6.5 Resultados del ejemplo 2 arrojados por el programa**

## 6.2.6 Ejemplo N° 2: Ventana del Programa, Datos y Resultados

En la figura 6.6 se puede observar la ventana completa del programa pudiéndose visualizar los datos introducidos del ejemplo 2 de la tabla 6.3 y los resultados obtenidos por el programa de forma fácil visualizándose todo en una misma interfase facilitando las modificaciones del diseño.

The screenshot displays a software interface for calculating ground grid resistance and touch/step voltages. It is divided into several sections:

- DATOS DEL TERRENO:**
  - Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega^2\text{m}$ ): 2500
  - Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm): 10
  - Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega^2\text{m}$ ): 400
  - Lado mayor de la malla en (m): 84
  - Lado menor de la malla en (m): 63
- DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA:**
  - Valores RMS de la corriente simétrica de falla en (AMP): 3180
  - Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms): 500
  - Factor de corrección del sistema futuro  $C_p$ : 1
  - X/R: 10
  - Factor de división de la corriente de falla  $S_f$  en (%): 60
  - Material: COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO
  - Conductividad (%): 97
  - Temperatura de fusión en  $^{\circ}\text{C}$ : 1084
  - $K_f$ : 7.06
- Capa superficial:** IEEEStd80-2000
- Voltaje de Toque y Paso Permisible:**
  - Persona de 50Kg / Persona de 70 Kg
  - Voltaje de Toque: 837.336
  - Voltaje de Paso: 2683.251
  - Calcular
  - $C_s$ : 0.739
- Datos para el calculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia:**
  - Selección de diseño: Malla con pocas varillas ninguna en las esquinas ninguna en el perimetro
  - Geometría de la Malla: Rectangular
  - N° de varillas NR: 38
  - Longitud de las varillas  $L_r$  (cm): 1000
  - Diametro de las varillas  $2b$  (mm): 16
  - Profundidad de los conductores de tierra  $H$  en (cm): 50
  - Espaciamientos entre conductores en paralelo  $D$  en (m): 7
- Conductor utilizar en la malla de puesta a tierra:**
  - Sección transversal del conductor real ( $\text{mm}^2$ ): 8.251
  - Sección transversal del conductor normalizado en ( $\text{mm}^2$ ): 67.43
  - calcular
  - Diametro del conductor normalizado en (mm): 10.5
  - Calibre del conductor normalizado: 2/0 AGW
  - Factor de Decremento  $D_f$ : 1.026
- Voltajes de Toque y de Paso en la periferia:**
  - Calcular resistencia: Resistencia de tierra en ( $\Omega$ ): 2.61855
  - GPR: 5126.094
  - Calcular Voltajes de Toque y Paso: Voltaje de toque: 603.24324
  - Voltage de Paso: 471.62015

Figura 6.6 Datos y resultados del ejemplo 2, obtenidos con el programa de puesta a tierra

### 6.2.7 Ejemplo N° 3: Entrada de Datos

Datos para el calculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia

Capa suj

**DATOS DEL TERRENO**

Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega \cdot m$ )

Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm)

Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega \cdot m$ )

Lado mayor de la malla en (m)

Lado menor de la malla en (m)

**DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA**

Valores RMS de la corriente simetrica de falla en (AMP)

Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms)

Factor de correcion del sistema futuro  $C_p$

X/R

Factor de divicion de la corriente de falla  $S_f$  en (%)

COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO

Conductividad (%)

Temperatura de fucion en  $C^\circ$

Kf

Seleccione si el diseño contiene barras y el tipo de geometria de la malla

Mallas sin barras

Malla con pocas barras ninguna en las esquinas ninguna en el perimiro

malla con barras tanto en las esquina como en perimetro

Geometria de la Malla

Cuadrada

Rectangular

En Forma de L

N° de barras NR

Longitud de las burras Lr en (cm)

Diametro de las burras 2b (mm)

Profundidad de los conductores de tierra H en (cm)

Espaciamientos entre conductores en paralelo D en (m)

Figura 6.7 Datos de entrada del ejemplo 3 extraídos de la tabla 6.5

### 6.2.8 Ejemplo N° 3: Resultados

**Voltaje de Toque y Paso Permissible**

Persona de 50Kg   
  Persona de 70 Kg

Voltaje de Toque

Voltaje de Paso

Cs

**Conductor autilizar en la malla de puesta a tierra**

Seccion transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>)

Seccion transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>)

Diametro del conductor normalizado en (mm)

Calibre del conductor normalizado

Factor de Decremento Df

**Voltajes de Toque y de Paso en la periferia**

Resistencia de tierra en (Ω)

GPR

Voltaje de toque

Votaje de Paso

Figura 6.8 Resultados del ejemplo 3 arrojados por el programa

### 6.2.9 Ejemplo N° 3: Ventana del Programa

En la figura 6.9 se puede observar la ventana completa del programa pudiéndose visualizar los datos introducidos del ejemplo 3 de la tabla 6.5 y los resultados obtenidos por el programa de forma fácil visualizándose todo en una misma interfase facilitando las modificaciones del diseño.

The screenshot displays the 'programa para el calculo de malla de puesta a tierra en subestaciones' interface. The window title is 'programa para el calculo de malla de puesta a tierra en subestaciones'. The interface is divided into several sections:

- DATOS DEL TERRENO:** Resistividad de la capa superficial del terreno  $\rho_s$  en ( $\Omega^*m$ ) = 2500; Altura de la capa superficial  $h_s$  (cm) = 10,2; Resistividad de la capa del terreno  $\rho$  en ( $\Omega^*m$ ) = 400; Lado mayor de la malla en (m) = 100; Lado menor de la malla en (m) = 80.
- Voltaje de Toque y Paso Permissible:** Capa superficial = IEEEStd80-2000; Voltaje de Toque = 840.667; Voltaje de Paso = 2696.573; Cs = 0.743.
- Datos para el calculo de la resistencia de la malla y los Voltajes de toque y de Paso en la periferia:** Selección de diseño:  Malla con pocas barras ninguna en las esquinas ninguna en el perimetro; Geometría de la Malla:  Cuadrada,  Rectangular,  En Forma de L; N° de barras NR = 35; Longitud de las barras  $L_r$  en (cm) = 240; Diametro de las barras  $2b$  (mm) = 0; Profundidad de los conductores de tierra  $H$  en (cm) = 50; Espaciamientos entre conductores en paralelo  $D$  en (m) = 3.
- DATOS DE LA CORRIENTE DE FALLA:** Valores RMS de la corriente simetrica de falla en (AMP) = 3180; Tiempo de despeje de falla  $t_s$  en (ms) = 500; Factor de correcion del sistema futuro  $C_p$  = 1; X/R = 10; Factor de division de la corriente de falla  $S_f$  en (%) = 60; COBRE COMERCIAL CON DURO TRAZADO; Conductividad (%) = 97; Temperatura de fucion en  $C^\circ$  = 1084; Kf = 7,06.
- Conductor utilizar en la malla de puesta a tierra:** Seccion transversal del conductor real (mm<sup>2</sup>) = 8,042; Seccion transversal del conductor normalizado en (mm<sup>2</sup>) = 67,43; Diametro del conductor normalizado en (mm) = 10,5; Calibre del conductor normalizado = 2/0 AGW; Factor de Decremento Df = 1.
- Voltajes de Toque y de Paso en la periferia:** Resistencia de tierra en ( $\Omega$ ) = 3.26449; GPR = 6228.647; Voltaje de toque = 652.80306; Voltaje de Paso = 812.78516.

Figura 6.9 Datos y resultados del ejemplo 3, obtenidos con el programa de puesta a tierra



### 6.3 Comparación De Resultados

En la tabla 6.7, 6.8 y 6.9 se muestran los resultados de los ejemplos 1, 2 y 3 respectivamente, en cada tabla se muestran los resultados originales y los obtenidos con el programa desarrollado en este proyecto.

**Tabla 6.7 – Comparación de resultados del ejemplo 1**

	Cálculo Manual	Cálculo con el Software
Voltaje de toque tolerable (70 Kg)	911.4394 V	909.439 V
Voltaje de paso tolerable (70 Kg)	2979.6631 V	2962.749 V
Resistencia de puesta a tierra	2.1121 $\Omega$	2.1115 $\Omega$
Máximo Potencial de Tierra (GPR)	11965.7597 V	11962.231 V
Voltaje de toque en la periferia	965.745	969.885
Voltaje de paso en la periferia	848.88 V	849.3988 V

**Tabla 6.8 – Comparación de resultados del ejemplo 2**

	Cálculo Manual	Cálculo con el Software
Voltaje de toque tolerable (70 Kg)	838,2 V	837,336 V
Voltaje de paso tolerable (70 Kg)	2686,6 V	2683,251 V
Resistencia de puesta a tierra	2,62 $\Omega$	2,618 $\Omega$
Máximo Potencial de Tierra (GPR)	4998,96 V	5126,084 V
Voltaje de toque en la periferia	595,8 V	603,243 V
Voltaje de paso en la periferia	No calculado	471,62 V

**Tabla 6.9 – Comparación de resultados del ejemplo 3**

	Cálculo Manual	Cálculo con el Software
Voltaje de toque tolerable (70 Kg)	838,2 V	840.66 V
Voltaje de paso tolerable (70 Kg)	2686,6 V	2696,57 V
Resistencia de puesta a tierra	3,264 $\Omega$	3,254 $\Omega$
Máximo Potencial de Tierra (GPR)	6227.71 V	6228,54 V
Voltaje de toque en la periferia	652,52 V	652,803 V
Voltaje de paso en la periferia	812,37	812,78 V

En los resultados obtenidos, para los 3 ejemplos, se nota una pequeña diferencia que se debe a la cantidad de decimales usados en los cálculos matemáticos manuales y automatizados, sin embargo se observa que es válido para el desarrollo de sistemas de puesta a tierra.

#### **6.4 Rediseño De La Malla De Puesta A Tierra Del Ejemplo 1 Variando El Espaciamiento Entre Conductores Y La Profundidad De La Malla**

Después de haber comprobado la eficacia del programa, vamos a determinar la influencia de algunos parámetros, como son la profundidad de enterramiento y el espaciamiento entre conductores de la malla, para observar los cambios que se producen en los resultados. Cabe notar que sólo al cambiar la profundidad y el espaciamiento entre conductores, la sección del conductor y las tensiones de paso y toque permisibles no varían, ya que no dependen de estos parámetros.

#### 6.4.1 Resultados Obtenidos con el Programa para las Diferentes Separaciones entre Conductores y Profundidades de la Malla de Puesta a Tierra

En la tabla 6.5, 6.6, 6.7 se muestra los datos de entrada extraídos del ejemplo 1 tabla 6.1 y los resultados obtenidos mediante el programa para una separación entre conductores de 3, 5 y 10 metros respectivamente.

**Tabla 6.5 Datos y resultados de la malla de puesta a tierra del ejemplo 1 (para una separación entre conductores 3 m)**

Parámetros	Valores	
Resistividad de la capa superficial	3000	$\Omega$ – metros
Resistividad del suelo	716	$\Omega$ – metros
Altura de la capa superficial	0.1	Metros
Corriente de falla	11330,499	Amperios
Duración de la falla	0,5	Segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	0,8	Metros
Espaciamiento entre conductores	3	Metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	193	Metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	124	Metros
Número de barras instaladas	15	
Diámetro de la barra	0,0159	Metros
Longitud de la barra	2,1336	Metros
Conductor seleccionado	4/0 AGW	
Tensiones de paso <sup>70</sup>	2972.749	Voltios
Tensiones de toque <sup>70</sup>	909.711	Voltios
Resistencia de la malla de tierra	2.08483	Ohm
Máximo gradiente de potencial	11811.082	Voltios
Voltaje de paso en la periferia de la malla (Es)	938.046	Voltios
Voltaje de toque en la periferia de la malla (Et)	721.7169	Voltios

**Tabla 6.6 Datos y resultados de la malla de puesta a tierra del ejemplo 1  
(para una separación entre conductores 5 m)**

Parámetros	Valores	
Resistividad de la capa superficial	3000	$\Omega$ – metros
Resistividad del suelo	716	$\Omega$ – metros
Altura de la capa superficial	0.1	Metros
Corriente de falla	11330,499	Amperios
Duración de la falla	0,5	Segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	0,8	Metros
Espaciamiento entre conductores	5	Metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	193	Metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	124	Metros
Número de barras instaladas	15	
Diámetro de la barra	0,0159	Metros
Longitud de la barra	2,1336	Metros
Conductor seleccionado	4/0 AGW	
Tensiones de paso70	2972.749	Voltios
Tensiones de toque70	909.711	Voltios
Resistencia de la malla de tierra	2.13612	Ohm
Máximo gradiente de potencial	12101.653	Voltios
Voltaje de paso en la periferia de la malla (Es)	797.8622	Voltios
Voltaje de toque en la periferia de la malla (Et)	1189.6425	Voltios

**Tabla 6.7 Datos y resultado de la malla de puesta a tierra del ejemplo 1  
(para una separación entre conductores 10 m)**

Parámetros	Valores	
Resistividad de la capa superficial	3000	$\Omega$ – metros
Resistividad del suelo	716	$\Omega$ – metros
Altura de la capa superficial	0.1	Metros
Corriente de falla	11330,499	Amperios
Duración de la falla	0,5	Segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	0,8	Metros
Espaciamiento entre conductores	10	Metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	193	Metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	124	Metros
Número de barras instaladas	15	
Diámetro de la barra	0,0159	Metros
Longitud de la barra	2,1336	Metros
Conductor seleccionado	4/0 AGW	
Tensiones de paso70	2972.749	Voltio
Tensiones de toque70	909.711	Voltio
Resistencia de la malla de tierra	2.2384	Ohm
Máximo gradiente de potencial	12681.321	Voltios
Voltaje de paso en la periferia de la malla (Es)	716.11887	Voltios
Voltaje de toque en la periferia de la malla (Et)	2042.40577	Voltios

En la tabla 6.8, 6.9, 6.10 se muestra los datos de entrada extraídos del ejemplo 1 tabla 6.1 y los resultados obtenidos mediante el programa para una separación entre conductores de 0,5, 0,8 y 1,10 metros respectivamente.

**Tabla 6.8 Malla de puesta a tierra del ejemplo 1 (para una profundidad de la malla 0.5 m)**

Parámetros	Valores	
Resistividad de la capa superficial	3000	$\Omega$ – metros
Resistividad del suelo	716	$\Omega$ – metros
Altura de la capa superficial	0.1	Metros
Corriente de falla	11330,499	Amperios
Duración de la falla	0,5	Segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	0,5	Metros
Espaciamiento entre conductores	3	Metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	193	Metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	124	Metros
Número de barras instaladas	15	
Diámetro de la barra	0,0159	Metros
Longitud de la barra	2,1336	Metros
Conductor seleccionado	4/0 AGW	
Tensiones de paso <sup>70</sup>	2972.749	Voltio
Tensiones de toque <sup>70</sup>	909.711	Voltio
Resistencia de la malla de tierra	2.09437	Ohm
Máximo gradiente de potencial	11865.129	Voltios
Voltaje de paso en la periferia de la malla (Es)	1243.3508	Voltio
Voltaje de toque en la periferia de la malla (Et)	691.4903	Voltio

**Tabla 6.9 Malla de puesta a tierra del ejemplo 1 (para una profundidad de la malla 0.8 m)**

Parámetros	Valores	
Resistividad de la capa superficial	3000	$\Omega$ – metros
Resistividad del suelo	716	$\Omega$ – metros
Altura de la capa superficial	0.1	Metros
Corriente de falla	11330,499	Amperios
Duración de la falla	0,5	Segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	0,8	Metros
Espaciamiento entre conductores	3	Metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	193	Metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	124	Metros
Número de barras instaladas	15	
Diámetro de la barra	0,0159	Metros
Longitud de la barra	2,1336	Metros
Conductor seleccionado	4/0 AGW	
Tensiones de paso70	2972.749	Voltio
Tensiones de toque70	909.711	Voltio
Resistencia de la malla de tierra	2.08483	Ohm
Máximo gradiente de potencial	11811.082	Voltios
Voltaje de paso en la periferia de la malla (Es)	938.0466	Voltio
Voltaje de toque en la periferia de la malla (Et)	721.71699	Voltio

**Tabla 6.10 Malla de puesta a tierra del ejemplo 1 (para una profundidad de la malla 1.10 m)**

Parámetros	Valores	
Resistividad de la capa superficial	3000	$\Omega$ – metros
Resistividad del suelo	716	$\Omega$ – metros
Altura de la capa superficial	0.1	Metros
Corriente de falla	11330,499	Amperios
Duración de la falla	0,5	Segundos
Profundidad de la malla de puesta a tierra	1.10	Metros
Espaciamiento entre conductores	3	Metros
Lado mayor de la malla de puesta a tierra	193	Metros
Lado menor de la malla de puesta a tierra	124	Metros
Número de barras instaladas	15	
Diámetro de la barra	0,0159	Metros
Longitud de la barra	2,1336	Metros
Conductor seleccionado	4/0 AGW	
Tensiones de paso <sup>70</sup>	2972.749	Voltio
Tensiones de toque <sup>70</sup>	909.711	Voltio
Resistencia de la malla de tierra	2.07632	Ohm
Máximo gradiente de potencial	11762.871	Voltios
Voltaje de paso en la periferia de la malla (Es)	792.3584	Voltio
Voltaje de toque en la periferia de la malla (Et)	794.418	Voltio

#### 6.4.2 Comparación y Análisis de Resultados

En la tabla 6.11 se muestran los valores obtenidos del rediseño de las mallas de puesta a tierra del ejemplo 1 para las distintas separaciones entre conductores.



**Tabla 6.11 comparación de los distintos espaciamentos entre conductores**

Parámetros	Valores de diseño (Separación D=3 m)	Valores de diseño (Separación D=5 m)	Valores de diseño (Separación D=10 m)
Conductor seleccionado	4/0 AWG	4/0 AWG	4/0 AWG
Número de conductores transversales	66	40	21
Número de conductores paralelo	43	26	14
Longitud total del conductor (m)	16319	9937	5151
Resistencia de la malla de tierra ( $\Omega$ )	2.0848	2.1361	2.2384
Tensión de toque <sup>70</sup> (V)	909.711	909.711	909.711
Tensión de paso <sup>70</sup> (V)	2972.749	2972.749	2972.749
Máximo gradiente de potencial (V)	11811.082	12101.653	12681.321
Voltaje de paso en la periferia (Es) (V)	938.046	797.862	716.118
Voltaje de toque en la periferia (Et) (V)	721.716	1189.642	2042.405

En la tabla 6.11 se observa que el espaciamento entre conductores tiene mayor importancia en el voltaje toque que en el de paso, observándose que al aumentar el espaciamento entre conductores, disminuye el voltaje de paso en un promedio de 10.245% mientras que el voltaje de toque se incrementa en un promedio 68.2586%. También se observa que la resistencia de puesta a tierra no varía significativamente teniendo una variación promedio de 3.6248% al aumentar o disminuir el espaciamento entre conductores.

Comparando los resultados mostrados en la tabla 6.11 con los obtenidos en la tabla de resultados de ejemplo 1 podemos establecer, que, la configuración que se adapta a los criterios de seguridad para voltajes de paso y toque en subestaciones, es para un espaciamiento entre conductores 3 m. aunque económicamente no es recomendada es la que obtiene los valores de voltaje de paso y toque menores que los tolerables por el cuerpo humano y como la seguridad de las personas es la premisa a la hora de diseñar una sistema de puesta a tierra es aceptable.

En la tabla 6.12 se muestran los valores obtenidos del rediseño de las mallas de puesta a tierra del ejemplo 1 para las distintas profundidades de enterramiento de malla de puesta a tierra.

**Tabla 6.12 comparación de las distintas profundidades de la malla de puesta a tierra**

Parámetros	Valores de diseño (Profundidad H=0.5 m)	Valores de diseño (Profundidad H=0.8 m)	Valores de diseño (Profundidad H=1.1 m)
Conductor seleccionado	4/0 AWG	4/0 AWG	4/0 AWG
Número de conductores transversales	66	66	66
Número de conductores paralelo	43	43	43
Longitud total del conductor (m)	16319	16319	16319
Resistencia de la malla de tierra ( $\Omega$ )	2.0943	2.0848	2.0763
Tensión de toque <sup>70</sup> (V)	909.711	909.711	909.711
Tensión de paso <sup>70</sup> (V)	2972.749	2972.749	2972.749

Tabla 6.12 comparación de las distintas profundidades de la malla de puesta a tierra (Continuación)

Parámetros	Valores de diseño (Profundidad H=0.5 m)	Valores de diseño (Profundidad H=0.8 m)	Valores de diseño (Profundidad H=1.1 m)
Maximo gradiente de potencial (V)	11865.129	11811.082	11762.871
Voltaje de paso en la periferia (Es) (V)	1243.3508	938.0466	792.3584
Voltaje de toque en la periferia (Et) (V)	691.4901	721.7169	794.4185

En la tabla 6.12 se observa que la profundidad de la malla de puesta a tierra tiene mayor importancia en el voltaje de paso que en el de toque, observándose que al aumentar la profundidad de la malla, disminuye el voltaje de paso en un promedio de 20.042% mientras que el voltaje de toque se incrementa en un promedio 7.222%. También se observa que la resistencia de puesta a tierra no varía significativamente teniendo una variación promedio de 0.4306% al aumentar o disminuir la profundidad de la malla de puesta a tierra.

Comparando los resultados mostrados en la tabla 6.12 con los obtenidos en la tabla de resultados de ejemplo 1 podemos establecer, que, todas las configuraciones se adaptan a los criterios de seguridad para voltajes de paso y toque en subestaciones, para esta escogeremos la configuración mas económica que resulta para este caso, la configuración para una profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra de 0.5 m.

## CONCLUSIONES

- El software para el cálculo de los parámetros eléctricos de la malla de puesta a tierra para subestaciones se desarrolló tomando en cuenta la norma IEEE 80-2000 y está diseñado con la herramienta computacional gamba (software libre) la cual realiza los cálculos de los voltajes de toque, de paso, la resistencia de puesta a tierra y el máximo gradiente de potencial de las mallas de puesta a tierra mucho más rápido que los cálculos realizados manualmente.
- Este software es de rápida adaptación, ya que se caracteriza por su ambiente gráfico, el cual es similar al sistema operativo Windows, que es el programa más conocido en nuestro país.
- El software desarrollado, aunque permite calcular los parámetros eléctricos de un sistema de puesta a tierra está abierto a ajuste y dado que está desarrollado en software libre y el código fuente es de libre acceso, permite la incorporación del cálculo de los voltajes de paso y toque para otras topologías como podrían ser en forma de T y triangulo, gráficas de los voltajes de toque y paso.
- Se validó la efectividad y precisión del software desarrollado, utilizando ejemplos de trabajos de sistemas de puesta a tierra realizados en el departamento, los resultados de los ejemplos se compararon con los obtenidos con el software desarrollado, se observaron diferencias relativamente despreciables, producto de

la cantidad de decimales utilizados tanto en los cálculos manuales como en los realizados por el software.

- Luego de validar el software desarrollado se realizaron pruebas con el mostrado en el trabajo (“Rediseño del Sistema de Puesta a Tierra de la Subestación Tigre I 230/115 Kv de la empresa CADAFE”) donde se variaron espaciamiento entre conductores y profundidad de la malla. Estas pruebas se realizaron como punto de referencia para observar los parámetros del diseño que son afectados por la profundidad y espaciamiento entre conductores.
- Al variar los espaciamientos entre conductores y enterramiento de la malla de puesta a tierra, se observó que los valores de resistencia de la malla varían en un porcentaje bastante bajo, el espaciamiento entre conductores tiene gran influencia en el voltaje de toque y baja influencia en el voltaje de paso. Se pudo demostrar mediante los cálculos realizados por el programa desarrollado que, al aumentar el espaciamiento entre conductores aumenta el voltaje de toque de forma significativa mientras que el voltaje de paso disminuye de forma moderada.
- La profundidad de la malla tiene una influencia significativa para el voltaje de paso y moderada para el voltaje de toque, para aumentos de la profundidad de enterramiento disminuye el voltaje de paso y aumenta el voltaje de toque.

## RECOMENDACIONES

- Incorporar al programa el método de las imágenes de Maxwell para conocer los potenciales generados en cualquier punto de la malla de puesta a tierra, al inyectar una corriente en suelos homogéneos y multiestratificados.
- Desarrollar el método de elementos finitos para modelar cualquier cantidad de variables como son obstáculos (tuberías), cualquier tipo de estratificación del suelo (vertical u horizontal), que puede interferir en el cálculo de los potenciales generados en la malla de puesta a tierra.
- Desarrollar una función que permita modelar en 3D los gradientes de potencial en toda la superficie de la malla. Permitiendo mejorar el análisis del diseño realizado.

## BIBLIOGRAFIA

- ANSI/IEEE Std.80. "IEEE Guide for Safty in A.C, Substation Grounding" (2000).
- ASDRÚBAL, J., CASTRO, O. (2003). Calculo de la Malla de Puesta a Tierra de una Subestación. *Scientia et Técnica*, 22, 37-41.
- Barahona, Cideos y Marroquín. (2003). *Manual para Aterrizaje en Subestaciones y Sistemas Electricos*, Tesis de grado, Departamento de electricidad, Universidad Albert Einstein, La Libertad, El Salvador.
- Cedeño, L. (2009). Estudio de los Métodos Utilizados en el Diseño de Puesta a Tierra en las Subestaciones Eléctricas y Líneas de transmisión para los niveles de Tensión de 400 KV, 300Kv, 115Kv y 34.5Kv en cadafe, Tesis de grado, Departamento de electricidad, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela.
- Fidias, A. (1999). *El proyecto de investigación*. Caracas: Editorial EPISTEME, C.A. / ORIAL EDICIONES
- Giral, Y (2006). *Estudio del Sistema de Puesta a Tierra de la Subestación Barbacoa I 230//115//34,5 kv*, Tesis de grado, Departamento de electricidad, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela.
- Herrera, M. (2008). Sistema de Puesta a Tierra en una central de Generación de Energía Eléctrica con grupos Electrógenos de Baja Tensión y Ajuste de Protección, Tesis de grado,

Departamento de electricidad, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela.

- Hernández, C. (2005). *Evaluación de los Sistemas de Puesta a Tierra de las Subestaciones de Distribución de Senda*. Tesis de grado, Departamento de electricidad, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela
- Izarra, I. (2008). Desarrollo de un Software Interactivo que Permita Obtener un Modelo de Suelo Estratificado y el Valor de resistencia a tierra para un Sistema de Conexión a tierra Seleccionado. Tesis de grado, Departamento de electricidad, Universidad de los Andes, Merida, Venezuela
- Suárez, L. (2007). *Sistemas de Puesta a Tierra y Protección Contra Descargas Atmosféricas de Cervecería Polar*, Informe de Pasantía, Coordinación de electricidad, Universidad de Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- Sautriau, F. (2000). Puesta a Tierra del Neutro en una Red Industrial de MT. *Cuaderno Técnico Schneider*, 62, 1-12.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador: Manual de trabajo de grado de Especialización, Maestría y tesis Doctorales. 4ta Edición. Editorial Fedupel. Caracas (2008).



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

<b>TÍTULO</b>	<b>ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA COMPUTARIZADO PARA EL CÁLCULO ELÉCTRICO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES BASADOS EN LA NORMA IEEE 80-2000</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

AUTOR (ES):

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>Mesa G. Miguel A.</b>	<b>CVLAC: 16.257.848</b> <b>E MAIL:miguel_angel_mesa@cantv.net</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Malla, \_resistencia\_de\_puesta\_a\_tierra, \_barras\_de\_tierra.

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

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería eléctrica

## RESUMEN (ABSTRACT):

Los cálculos eléctricos para el diseño de una malla de puesta a tierra son muy complejos y extensos, es por esto que se desarrolló un programa computarizado capaz de realizar los cálculos eléctricos de los parámetros necesarios para el diseño de la malla de puesta a tierra a instalar en suelos homogéneos de una manera rápida, efectiva y automatizada, dado la resistividad del terreno, las dimensiones que ocupará la malla de tierra, la corriente de falla, el tiempo de duración de la falla, el factor de expansión futura. Permitiendo calcular los voltajes de paso y toque tolerables por el cuerpo humano, el calibre del conductor, la resistencia de la malla de tierra utilizando la ecuación de sveraks o la de schwarz, el máximo gradiente de potencial, los voltajes de toque y paso en la periferia de la malla. Éste programa fue creado mediante el programa Gamba (software libre), que permite a través de un ambiente gráfico, el desarrollo de aplicaciones avanzadas, además permite la modificación y mejoras del programa desarrollado ya que la licencia de este programa es de libre acceso, sin restricciones al código fuente.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
<b>Ing. Melquíades Bermúdez</b>	CVLAC:	<b>3.486.726</b>			
	E_MAIL	<b>Melquiades_bermudez@cantv.net</b>			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
<b>Ing. Verena Mercado</b>	CVLAC:	<b>82.235.587</b>			
	E_MAIL	<b>verenamercado@yahoo.com</b>			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
<b>Ing. Luis Suarez</b>	CVLAC:	<b>11.144.624</b>			
	E_MAIL	<b>acerosilicon@gmail.com</b>			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

<b>2010</b>	<b>7</b>	<b>7</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

LENGUAJE. SPA

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

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.puesta a tierra.doc	Application/msword

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

ALCANCE

ESPACIAL: \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

TEMPORAL: \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

\_\_\_\_\_ Ingeniero electricista \_\_\_\_\_

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

\_\_\_\_\_ Pregrado \_\_\_\_\_

ÁREA DE ESTUDIO:

\_\_\_\_\_ Departamento de Electricidad \_\_\_\_\_

INSTITUCIÓN:

\_\_\_\_\_ Universidad de Oriente Nucleo de Anzoategui \_\_\_\_\_

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo N° 41 del Reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario, para su autorización.

---

**Mesa G. Miguel A**

**AUTOR**

---

**Ing. Melquíades Bermúdez. Prof. Verena Mercado. Prof. Luis Suárez**

**TUTOR**

**JURADO**

**JURADO**

---

**Prof. Verena Mercado**

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**