

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

Modelamiento del sistema de puesta a tierra de plantas industriales basado en el IEEE Std 80-2013 y Software CYMGRD para asegurar la protección de las personas

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Elaborado por

Miguel Angel Sifuentes Policarpo

 [0009-0009-4630-9808](https://orcid.org/0009-0009-4630-9808)

Asesor

M.Sc. Edgard Guadalupe Goñas

 [0000-0002-2144-6058](https://orcid.org/0000-0002-2144-6058)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Sifuentes, 2025)
Referencia/Reference	Sifuentes, M. (2025). <i>Modelamiento del sistema de puesta a tierra de plantas industriales basado en el IEEE Std 80-2013 y Software CYMGRD para asegurar la protección de las personas</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A la memoria de mi padre Santos Sifuentes. Puedo decir, promesa cumplida.

*A la memoria de mi madre Santa Policarpo quien con sus acciones demostró el
verdadero amor.*

*A mi segunda madre Dina Flores a quien debo el aprender a leer, sumar y
restar.*

A mi hermosa familia, Bella, Cecia y Jshade.

Agradecimientos

A Dios, por dirigir mi camino.

A mis queridas hermanas y hermanos por apoyarme cuando más lo necesitaba, por ellos debo el éxito.

A la empresa IT Consultores S.A. liderada por el ingeniero Ivan Rau, quienes hicieron posible el auspicio del software CYMGRD por parte de CYME International T&D.

A mi asesor MSc. Edgard Guadalupe Goñas quien gentilmente compartió sus conocimientos.

Lista de Contenidos

	Pág.
Resumen	xxv
Abstract	xxvi
Introducción	xxvii
Capítulo I. Generalidades	1
1.1 Antecedentes de la Investigación	1
1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio	7
1.3 Formulación del Problema	7
1.3.1 Problema Principal	7
1.3.2 Problemas Secundarios	8
1.4 Justificación e Importancia.....	8
1.5 Objetivos.....	9
1.5.1 Objetivo General	9
1.5.2 Objetivos específicos	9
1.6 Hipótesis	9
1.6.1 Hipótesis General.....	9
1.6.2 Hipótesis Específicas	10
1.7 Variables y Operacionalización de Variables	10
1.7.1 Variables	10
1.7.2 Operacionalización de Variables	10
1.8 Metodología de la Investigación.....	11
1.8.1 Unidades de Análisis.....	11
1.8.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación.....	11
1.8.3 Diseño de la Investigación.....	12
1.8.4 Fuentes de Información.....	12
1.8.5 Población y muestra.....	12
1.8.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	12

1.8.7	Análisis y Procesamiento de Datos	13
	Capítulo II: Marco Teórico y Marco Conceptual	14
2.1	Bases Teóricas	14
2.1.1	Sistema de Puesta a Tierra	14
2.1.2	Resistencia Eléctrica del Cuerpo Humano	14
2.1.3	El Suelo Como Conductor Eléctrico	16
2.1.3.1	Factores que Influyen en la Resistividad del Suelo.....	17
2.1.3.2	Tipos de suelos y valores supuestos de resistividad.....	18
2.1.3.3	Uso de material superficial.....	19
2.1.3.4	Modelos de suelos.....	20
2.1.3.4.1	Modelo de Suelo Uniforme.....	21
2.1.3.4.2	Modelo de Suelo Biestratificado Mediante Método Gráfico.....	22
2.1.3.5	Medición de Resistividad del Suelo.	24
2.1.3.5.1	Método de Wenner.	24
2.1.3.5.2	Método de Schlumberger.....	25
2.1.4	Gradientes de Potencial Producto de Una Falla a Tierra.....	26
2.1.4.1	Tensión de Paso Es (Step Voltage).	28
2.1.4.2	Tensión de Contacto Et (Touch Voltage).	28
2.1.4.3	Tensión Transferida Etrrd (Transferred voltage).	28
2.1.4.4	Tensión de Retículo Em (Mesh voltage).	28
2.1.4.5	Tensión de Contacto Metal-Metal Emm (Mesh voltage).	28
2.1.5	Efecto del Paso de la Corriente por el Cuerpo Humano	30
2.1.5.1	Efecto de la Frecuencia de la Corriente de Falla.	30
2.1.5.2	Efecto de la Magnitud y Duración de la Corriente de Falla.	31
2.1.5.3	Importancia de la Alta Rapidez de Despeje de Falla.....	33
2.1.5.4	Influencia del Recorrido de la Corriente.	34
2.1.6	Equivalente Thevenin de Una Exposición a Gradientes de Potencial ..	36
2.1.6.1	Efecto del Espesor del Material de la Capa Superficial.....	38

2.1.6.2	Criterios de Tensiones de Toque y Paso.	40
2.1.6.2.1	Tensión de Toque y Paso para Cuerpos de 50 kg.	40
2.1.6.2.2	Tensión de Toque y Paso para Cuerpos de 70 kg.	40
2.1.6.2.3	Tensión Metal-Metal para Cuerpos de 50kg.	41
2.1.6.2.4	Tensión Metal-Metal para Cuerpos de 70kg.	41
2.1.7	Métodos de Cálculo de Mallas a Tierra	41
2.1.7.1	Método FEM (Finit Element Method).	41
2.1.7.2	Método de la Norma IEEE Std 80-2013.	42
2.1.7.3	Método Electromagnético Completo.	42
2.1.8	Cálculo de la Corriente de Falla en Plantas Industriales	42
2.1.8.1	Cálculo Manual de Corriente de Falla Monofásica.	43
2.1.8.2	Cálculo Manual de Corriente de Falla Bifásica a Tierra.	44
2.1.8.3	Cálculo de Corriente de Falla Monofásica y Bifásica a Tierra Con Uso de Software de Estudios Eléctricos.	45
2.1.9	Diseño de Sistema de Puesta a Tierra Según IEEE Std 80-2013	45
2.1.9.1	Dimensionamiento de Conductores.	45
2.1.9.2	Factor de decremento (D_f)	47
2.1.9.3	Factor de Dispersión de Corriente (S_f)	48
2.1.9.4	Factor de Proyección Correctivo (C_p)	49
2.1.9.5	Máxima Corriente de Malla (I_G)	49
2.1.9.6	Cálculo de la Resistencia de la Malla a Tierra (R_g)	51
2.1.9.6.1	Ecuación de Sverak.	51
2.1.9.6.2	Ecuación de Schwarz.	52
2.1.9.7	Cálculo del GPR.	54
2.1.9.8	Cálculo de la Máxima Tensión de Contacto y de Paso.	54
2.1.9.8.1	Cálculo de la Tensión de Malla (E_m)	54
2.1.9.8.2	Cálculo de la Tensión de Paso (E_s)	56
2.2	Marco Conceptual	57

2.2.1	Diagrama de Bloque para Diseño de Una Malla a Tierra	57
2.2.2	Descripción Paso a Paso para el Diseño de Mallas a Tierra	59
2.2.3	Conceptos Clave para el Diseño de Mallas a Tierra.....	61
2.2.4	Terminología	62
capítulo III: Desarrollo del Trabajo de Investigación		65
3.1	Descripción del Modelamiento	65
3.2	Caso 1	71
3.2.1	Modelamiento Basado en Metodología IEEE Std 80-2013.....	71
3.2.2	Modelamiento Mediante Software CYMGRD	73
3.3	Caso 2	80
3.3.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013	81
3.3.2	Modelamiento Mediante Software CYMGRD	85
3.4	Caso 3	89
3.4.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013	90
3.4.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	93
3.5	Caso 4	97
3.5.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013	98
3.5.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	99
3.6	Caso 5	104
3.6.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013	104
3.6.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	108
3.7	Caso 6	113
3.7.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013	113
3.7.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	117
3.8	Caso 7	121
3.8.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013	122
3.8.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	125
3.9	Caso 8	129

3.10	Caso 9.....	130
3.10.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	130
3.10.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	133
3.11	Caso 10.....	137
3.11.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	138
3.11.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	140
3.12	Caso 11.....	145
3.13	Caso 12.....	146
3.13.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	146
3.13.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	150
3.14	Caso 13.....	154
3.14.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	155
3.14.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	158
3.15	Caso 14.....	162
3.15.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	163
3.15.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	166
3.16	Caso 15.....	171
3.16.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	172
3.16.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	173
3.17	Caso 16.....	179
3.17.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	179
3.17.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	182
3.18	Caso 17.....	186
3.18.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	187
3.18.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	189
3.19	Caso 18.....	193
3.19.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	194
3.19.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	195

3.20	Caso 19.....	198
3.20.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	199
3.20.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	202
3.21	Caso 20.....	205
3.21.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	206
3.21.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	208
3.22	Caso 21.....	212
3.22.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	213
3.22.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	216
3.23	Caso 22.....	220
3.24	Caso 23.....	221
3.24.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	221
3.24.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	224
3.25	Caso 24.....	228
3.25.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	229
3.25.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	231
3.26	Caso 25.....	236
3.27	Caso 26.....	237
3.27.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	237
3.27.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	240
3.28	Caso 27.....	244
3.28.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	244
3.28.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	247
3.29	Caso 28.....	252
3.29.1	Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013.....	252
3.29.2	Modelamiento mediante software CYMGRD	255
Capítulo IV: Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados		
.....		261

4.1	Resultados.....	261
4.2	Contrastación de Hipótesis	265
4.3	Discusión de Resultados	265
	Conclusiones.....	269
	Recomendaciones.....	271
	Referencias bibliográficas.....	272
	Anexos	275

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Operacionalización de variables.	10
Tabla 2: Valores referenciales de resistividad de suelos.	18
Tabla 3: Valores típicos de resistividad de material superficial.	19
Tabla 4: Zonas tiempo/corriente para a.c. 15Hz a 100Hz para recorrido mano izquierda -pie.	32
Tabla 5: Factor de corriente del corazón para diferentes trayectorias.	35
Tabla 6: Constantes del material conductor.	47
Tabla 7: Impedancias equivalentes de cables de guarda en líneas de transmisión y neutros de distribución.	48
Tabla 8: Coeficiente K1 de la fórmula de Schwarz.	53
Tabla 9: Coeficiente K2 de la fórmula de Schwarz.	53
Tabla 10: Leyenda de variables para el diseño de mallas a tierra según metodología IEEE Std 80-2013.	58
Tabla 11: Variables independientes para los 28 casos de diseño.	66
Tabla 12: Data de campo de mediciones de baja resistividad. Oquendo, Callao.	68
Tabla 13: Data de campo de mediciones de media resistividad. Cañete, Perú.	69
Tabla 14: Resultados de cálculo de cortocircuito nivel alto.	70
Tabla 15: Resultados de cálculo de cortocircuito nivel bajo.	70
Tabla 16: Resultados de diseño de los 28 casos evaluados con el software CYMGRD.	262
Tabla 17: Resultados de diseño de los 28 casos evaluados con la metodología IEEE Std 80-2013.	263
Tabla 18: Resultado final de los casos.	264
Tabla 19: Contrastación de hipótesis.	265

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Dependencia de impedancia del cuerpo humano y frecuencias desde 50Hz hasta 2kHz.....	15
Figura 2: Dependencia de impedancia del cuerpo humano y frecuencias desde 90Hz hasta 150kHz.....	15
Figura 3: Curvas Resistividad del suelo vs %sal, %humedad, temperatura.....	17
Figura 4: Modelo de multiestratificado del terreno.	21
Figura 5: Modelo biestratificado del terreno.	22
Figura 6: Gráfico de método de Sunde.	23
Figura 7: Método de Wenner.	24
Figura 8: Método de Schlumberger.....	25
Figura 9: Falla a tierra y retorno por punto remoto.....	26
Figura 10: Curvas de nivel de tensiones superficiales.	27
Figura 11: Tensiones superficiales 3D.....	27
Figura 12: Situaciones básicas de shock eléctrico.....	29
Figura 13: Zonas tiempo/corriente a.c. en el rango 15Hz a 100Hz para recorrido mano izquierda -pie.	31
Figura 14: Izquierda, Impedancia de partes del cuerpo en porcentajes respecto a impedancia mano-pie o mano-mano. Derecha, impedancia simplificada de extremidades del cuerpo.....	34
Figura 15: Exposición a la tensión de contacto E_t	37
Figura 16: Circuito equivalente para la exposición a tensión de contacto E_t	37
Figura 17: Equivalente Thevenin para la exposición a tensión de contacto E_t	37
Figura 18: Exposición a la tensión de paso E_s	38
Figura 19: Equivalente Thevenin de exposición a la tensión de paso E_s	38
Figura 20: Falla dentro de la subestación particular, neutro local aterrado.	50

Figura 21: Falla dentro de la subestación particular, neutro aterrado en locación remota.	50
Figura 22: Falla dentro de la subestación particular, neutro local aterrado y también otros puntos.	50
Figura 23: Diagrama de bloques para el diseño de mallas a tierra según metodología IEEE Std 80-2013.	57
Figura 24: Planta modelo con layout hipotético con 01 subestación particular.	65
Figura 25: Planta modelo con layout hipotético con 02 subestaciones particulares.	66
Figura 26: Layout puesta a tierra caso 1.	71
Figura 27: Cuadro de diálogo Soil Parameter CYMGRD Caso 1.	74
Figura 28: Cuadro de diálogo SM1 CYMGRD Caso 1.	74
Figura 29: Perfil de resistividad del suelo con CYMGRD Caso 1.	75
Figura 30: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 1.	75
Figura 31: Cuadro para carga de corriente de falla, duración de la falla, X/R, contribución remota CYMGRD Caso 1.	76
Figura 32: Cuadro de diálogo para carga de parámetros de la red CYMGRD Caso 1.	76
Figura 33: Cuadro de diálogo para selección de material de conductor y electrodo CYMGRD.	77
Figura 34: Resultados de dimensionamiento mínimo requerido de conductor y electrodo CYMGRD.	77
Figura 35: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 1.	78
Figura 36: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 1.	78
Figura 37: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 1.	78
Figura 38: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 1.	79
Figura 39: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 1.	79
Figura 40: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 1.	79

Figura 41: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 1.	80
Figura 42: Layout malla a tierra Caso 2.	80
Figura 43: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 2.	85
Figura 44: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 2.	86
Figura 45: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 2.	86
Figura 46: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 2.	87
Figura 47: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 2.	87
Figura 48: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 2.	87
Figura 49: Perfil de tensiones generados en dirección diagonal CYMGRD Caso 2 .	88
Figura 50: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 2.	88
Figura 51: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 2.	89
Figura 52: Layout malla a tierra caso 3.	89
Figura 53: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 3.	93
Figura 54: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 3.	93
Figura 55: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 3.	94
Figura 56: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 3.	94
Figura 57: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 3.	95
Figura 58: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 3.	95
Figura 59: Perfil de tensiones generados en dirección diagonal CYMGRD Caso 3 .	96
Figura 60: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 3.	96
Figura 61: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 3.	97
Figura 62: Layout puesta a tierra Caso 4.	97
Figura 63: Cuadro de diálogo Soil Parameter CYMGRD Caso 4.	99
Figura 64: Cuadro de diálogo SM1 CYMGRD Caso 4.	100
Figura 65: Perfil de resistividad del suelo con CYMGRD Caso 4.	100

Figura 66: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 4.	100
Figura 67: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 4.	101
Figura 68: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 4.	101
Figura 69: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 4.	102
Figura 70: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 4.	102
Figura 71: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 4.	102
Figura 72: Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 4.	102
Figura 73: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 4.	103
Figura 74: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 4.	103
Figura 75: Layout malla a tierra caso 5.	104
Figura 76: Cuadro de diálogo Soil Parameter CYMGRD Caso 5.	108
Figura 77: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 5.	108
Figura 78: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 5.	109
Figura 79: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 5.	109
Figura 80: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 5.	110
Figura 81: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 5.	110
Figura 82: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 5.	110
Figura 83: Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 5.	111
Figura 84: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 5.	111
Figura 85: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 5.	112
Figura 86: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 5.	112
Figura 87: Layout malla a tierra caso 6.	113
Figura 88: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 6.	117
Figura 89: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 6.	118
Figura 90: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 6.	118

Figura 91: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 6.	119
Figura 92: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 6.	119
Figura 93: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 6.	120
Figura 94: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 6.	120
Figura 95: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 6.	120
Figura 96: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 6.	121
Figura 97: Layout malla a tierra Caso 7.	121
Figura 98: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 7.	125
Figura 99: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 7.	125
Figura 100: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 7.	126
Figura 101: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 7.	126
Figura 102: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 7.	127
Figura 103: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 7.	128
Figura 104: Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 7.	128
Figura 105: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 7.	128
Figura 106: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 7.	129
Figura 107: Layout puesta a tierra caso 8.	129
Figura 108: Layout malla a tierra caso 9.	130
Figura 109: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 9.	133
Figura 110: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 9.	134
Figura 111: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 9.	134
Figura 112: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 9.	135
Figura 113: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 9.	135
Figura 114: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 9.	135
Figura 115: Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 9.	136
Figura 116: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 9.	136

Figura 117: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 9.	137
Figura 118: Layout malla a tierra caso 10.	137
Figura 119: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD	
Caso 10.	141
Figura 120: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 10.	141
Figura 121: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 10.	142
Figura 122: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 10.	142
Figura 123: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 10.	143
Figura 124: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 10.	143
Figura 125: Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 10.	144
Figura 126: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 10.	144
Figura 127: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 10.	145
Figura 128: Layout puesta a tierra caso 11.	145
Figura 129: Layout malla a tierra caso 12.	146
Figura 130: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD	
Caso 12.	150
Figura 131: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 12.	151
Figura 132: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 12.	151
Figura 133: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 12.	152
Figura 134: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 12.	152
Figura 135: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 12.	152
Figura 136: Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 12.	153
Figura 137: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 12.	153
Figura 138: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 12.	154
Figura 139: Layout malla a tierra caso 13.	154
Figura 140: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD	
Caso 13.	158
Figura 141: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 13.	158

Figura 142: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 13	159
Figura 143: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 13.	159
Figura 144: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 13.	160
Figura 145: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 13.	160
Figura 146: Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 13.	161
Figura 147: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 13.	161
Figura 148: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 13.	162
Figura 149: Layout malla a tierra caso 14.	162
Figura 150: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 14.	166
Figura 151: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 14.	166
Figura 152: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 14.	167
Figura 153: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 14.	167
Figura 154: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 14.	168
Figura 155: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 14.	169
Figura 156: Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 14.	169
Figura 157: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 14.	170
Figura 158: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 14.	170
Figura 159: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 14.	171
Figura 160: Layout malla a tierra caso 15.	171
Figura 161: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 15.	173
Figura 162: Cuadro para carga de corriente de falla, duración de la falla, X/R, porcentaje de contribución CYMGRD Caso 15.....	174
Figura 163: Cuadro de diálogo para carga de parámetros de la red CYMGRD Caso 15.	174
Figura 164: Cuadro de diálogo para selección de material de conductor y electrodo CYMGRD Caso 15.....	175

Figura 190: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 17.	192
Figura 191: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 17.	192
Figura 192: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 17.	192
Figura 193: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 17.	193
Figura 194: Layout puesta a tierra Caso 18.	193
Figura 195: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 18.	195
Figura 196: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 18.	195
Figura 197: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 18.	196
Figura 198: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 18.	196
Figura 199: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 18.	196
Figura 200: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 18.	196
Figura 201: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 18.	197
Figura 202: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 18.	197
Figura 203: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 18.	198
Figura 204: Layout malla a tierra Caso 19.	198
Figura 205: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 19.	202
Figura 206: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 19.	202
Figura 207: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 19.	203
Figura 208: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 19.	203
Figura 209: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 19.	203
Figura 210: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 19.	204
Figura 211: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 19.	204
Figura 212: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 19.	204
Figura 213: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 19.	205
Figura 214: Layout malla a tierra caso 20.	205

Figura 215: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD	
Caso 20.	209
Figura 216: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 20.	209
Figura 217: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 20.	210
Figura 218: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 20.	210
Figura 219: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 20.	210
Figura 220: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 20.	211
Figura 221: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 20.	211
Figura 222: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 20.	211
Figura 223: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 20.	212
Figura 224: Layout malla a tierra caso 21.	212
Figura 225: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD	
Caso 21.	216
Figura 226: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 21.	216
Figura 227: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 21.	217
Figura 228: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 21.	217
Figura 229: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 21.	218
Figura 230: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 21.	219
Figura 231: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 21.	219
Figura 232: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 21.	219
Figura 233: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 21.	220
Figura 234: Layout puesta a tierra caso 22.	220
Figura 235: Layout malla a tierra caso 23.	221
Figura 236: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD	
Caso 23.	224
Figura 237: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 23.	225
Figura 238: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 23.	225
Figura 239: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 23.	226

Figura 240: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 23.	226
Figura 241: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 23.	226
Figura 242: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 23.....	227
Figura 243: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 23.	227
Figura 244: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 23.	228
Figura 245: Layout malla a tierra caso 24.	228
Figura 246: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 24.	232
Figura 247: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 24.	232
Figura 248: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 24.	233
Figura 249: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 24.	233
Figura 250: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 24.	234
Figura 251: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 24.	234
Figura 252: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 24.....	235
Figura 253: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 24.	235
Figura 254: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 24.	236
Figura 255: Layout puesta a tierra Caso 25.	236
Figura 256: Layout malla a tierra caso 26.	237
Figura 257: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 26.	240
Figura 258: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 26.	240
Figura 259: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 26.	241
Figura 260: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 26.	241
Figura 261: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 26.	242
Figura 262: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 26.	242
Figura 263: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 26.....	242
Figura 264: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 26.	243
Figura 265: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 26.	243

Figura 266: Layout malla a tierra caso 27.	244
Figura 267: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 27.	247
Figura 268: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 27.	248
Figura 269: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 27.	248
Figura 270: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 27.	249
Figura 271: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 27.	249
Figura 272: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 27.	250
Figura 273: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 27.	250
Figura 274: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 27.	251
Figura 275: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 27.	251
Figura 276: Layout malla a tierra caso 28.	252
Figura 277: Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 28.	255
Figura 278: Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 28.	256
Figura 279: Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 28.	256
Figura 280: Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 28.	257
Figura 281: Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 28.	258
Figura 282: Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 28.	258
Figura 283: Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 28.	259
Figura 284: Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 28.	259
Figura 285: Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 28.	260

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo modelar de manera generalizada un sistema de puesta a tierra aplicada a plantas industriales en Perú, y a partir de los resultados permita a los proyectistas considerar la relación entre el área ocupada por una malla a tierra y la seguridad del personal frente a tensiones de toque y paso generadas durante una falla a tierra. Se analizan los efectos de estas fallas sobre el perfil de tensiones en la superficie del terreno, que dependen del área de la malla, demostrando que la seguridad se garantiza al controlar dichas tensiones. Además, se examina la condición de la mayoría de las plantas en Perú, que solo cuentan con pozos a tierra individuales, lo cual puede generar tensiones peligrosas, incluso múltiplos del voltaje de suministro.

Para evaluar la seguridad según el área que ocupa un sistema de puesta a tierra, se modelaron 28 casos de diseño para una planta hipotética de 48,836 m², considerando combinaciones de dos perfiles de resistividad del suelo, dos niveles de corriente de corto circuito en media tensión, dos subestaciones y cuatro tamaños de sistemas de puesta a tierra. Los diseños se realizaron con el software CYMGRD y la metodología IEEE Std 80-2013. Como plus, se calculó la inversión para cada caso, lo que ayuda a comprender el valor de la seguridad. El enfoque de investigación es aplicado, y los resultados muestran la relación entre la seguridad y el área ocupada por la malla de puesta a tierra.

Palabras claves: Modelamiento de Malla a tierra, Plantas industriales, IEEE Std 80-2013, CYMGRD, tensión de toque, tensión de paso.

Abstract

This study aims to develop a generalized model of a grounding system applied to industrial plants in Peru. Based on the results, it seeks to provide designers with insights into the relationship between the area occupied by a grounding grid and personnel safety concerning touch and step voltages generated during a ground fault. The effects of such faults on the surface voltage profile are analyzed, demonstrating that safety can be ensured by controlling these voltages. Additionally, the common condition of most industrial plants in Peru is examined, where only individual grounding electrodes are used, which can lead to hazardous voltages, even multiples of the supply voltage.

To evaluate safety based on the area occupied by a grounding system, 28 design cases were modeled for a hypothetical plant of 48,836 m², considering combinations of two soil resistivity profiles, two medium-voltage fault current levels, two substations, and four sizes of grounding systems. The designs were made using CYMGRD software and the IEEE Std 80-2013 methodology. Additionally, the investment for each case was calculated, which helps understand the value of safety. The research approach is applied, and the results show the relationship between safety and the area occupied by the grounding grid.

Keywords: Grounding grid modeling, Industrial plants, IEEE Std 80-2013, CYMGRD, touch voltage, step voltage.

Introducción

En la mayoría de las plantas industriales en Perú, ya sean pequeñas, medianas, incluso grandes, es común encontrar sistemas de puesta a tierra compuestas por 03 o más pozos a tierra independientes, ubicados dentro y/o en la periferia de cada subestación, esto a raíz de una mala interpretación y generalización de la siguiente frase indicada por el Código Nacional de Electricidad Utilización en la sección 060-712, CNE (2006) “el valor de la resistencia de la puesta a tierra debe ser tal que, cualquier masa no pueda dar lugar a tensiones de contacto superiores a las permitidas y no debe ser mayor a $25\ \Omega$ ” (p. 21).

El criterio erróneo con el que se diseñan estos pozos basados en la frase anterior es que la resistencia de cada pozo (o pozos en paralelo), sea menor a $25\ \Omega$ para media tensión, $15\ \Omega$ para baja tensión, y $05\ \Omega$ para equipos electrónicos. El problema de este criterio es que durante una falla a tierra se podrían ocasionar tensiones peligrosas (tensión de toque y tensión de paso) para las personas y equipos, tensiones que podrían llegar a ser más altos que la tensión nominal.

La razón principal por el cual se instalan pozos a tierra y no una malla a tierra, es la inversión, que guarda relación con el área que ocupará la malla, de allí nace la pregunta, ¿qué área debe abarcar una malla a tierra? Para dar respuesta, en este trabajo se realiza una amplia evaluación del comportamiento del perfil de tensiones generado ante una falla a tierra en una planta hipotética, ensayado sobre la combinación de variables independientes, que resulta 28 casos de diseño, modelados con el software CYMGRD y metodología IEEE Std 80-2013.

En el Capítulo I, se enumera los antecedentes de investigación, que para contraste del estudio se han considerado aquellos que sí toman en cuenta la tensión de toque y paso, y también aquellas que no. También se hace la formulación del problema, se describe los objetivos y expone la hipótesis. Finalmente se describe la metodología de investigación seguida.

El Capítulo II expone ampliamente el marco teórico que explica cómo se formularon las expresiones para diseñar una puesta a tierra segura. Se analizan aspectos clave como la resistencia eléctrica del cuerpo humano y su interacción con las corrientes de falla, así como el suelo como conductor eléctrico y el impacto de su resistividad en el sistema de puesta a tierra. También se abordan los métodos más comunes de medición de la resistividad, como los de Wenner y Schlumberger. Se profundiza en los gradientes de potencial generados en el suelo por una falla a tierra, lo que permite determinar las tensiones admisibles de toque y paso para el cuerpo humano. Este capítulo se basa principalmente en la norma IEEE Std 80-2013, la adaptación y precisión de la misma quedan a responsabilidad del tesista.

En el Capítulo III, se desarrolla el trabajo de investigación, con 28 casos de diseño de puestas a tierra sobre una misma planta industrial de layout hipotético. Cada caso se diseña de dos formas, con empleo de las expresiones matemáticas de la norma IEEE Std 80-2013, y con uso del software CYMGRD, se puede evidenciar lo potente de este software, permite obtener resultados con mayor precisión los cuales se observan en los gráficos 3D y 2D de tensiones generadas en el suelo.

El capítulo IV presenta los resultados, la contrastación de hipótesis y la discusión de los mismos. A partir de los cálculos del Capítulo III, se recopilan los resultados en tablas para su análisis, lo que, junto con la estimación de la inversión para la construcción de la puesta a tierra en los 28 casos, permite obtener observaciones y conclusiones clave en relación con los objetivos del trabajo de tesis.

El trabajo se enfocó de una manera que lector capte de manera práctica la importancia de realizar el diseño de mallas a tierra considerando las tensiones de toque y paso. Se asume que los lectores cuentan con conocimiento de ingeniería eléctrica.

Capítulo I. Generalidades

1.1 Antecedentes de la Investigación

Tesis de grado de ingeniero:

Durante el proceso de investigación, se encontró numerosas tesis que hacen referencia al diseño de puestas a tierra en industrias. Algunas tesis realizan el diseño aplicando las ecuaciones del IEEE Std 80-2013, incluso con asistencia de software principalmente para proyectos en la gran industria o minería; otro grupo de tesis aplican de manera errónea los conceptos del IEEE Std 80-2013 o simplemente hacen referencia a la norma sin saber los fundamentos y las validaciones necesarias. A continuación, se hace la referencia a varias tesis peruanas y extranjeras para identificar recomendaciones importantes; también para detectar los errores más recurrentes.

Según Leon (2022), expone que las sobretensiones transitorias de origen atmosférico son las principales causas de las interrupciones de energía eléctrica, especialmente cuando las circunstancias permiten que ocurra un backflashover luego que un rayo impacte sobre una línea de transmisión; resalta la importancia de entender los fenómenos electromagnéticos asociados, y que para tal, es importante modelar de forma rigurosa los elementos del sistema eléctrico de potencia, especialmente la línea de transmisión y el sistema de puesta a tierra del pie de la torre. El objetivo de su trabajo es evaluar la influencia del modelado del sistema de puesta a tierra del pie de la torre y de la línea de transmisión ante las sobretensiones producto del impacto directo de un rayo a una línea de transmisión. Emplea los programas MATLAB y JULIA integrados al software de simulación ATP-EMTP. Según los resultados, la representación del sistema de puesta a tierra impacta significativamente en las sobretensiones resultantes y la definición del valor crítico de la corriente de descarga que provocará la rotura del aislamiento.¹

¹ Leon, J. (2022). Análisis de la influencia de los parámetros del suelo en los modelos de líneas de transmisión y sistema de aterramiento durante sobretensiones transitorias.

Domínguez (2022), plantea la interrogante si una malla de puesta a tierra diseñado bajo la metodología de la guía IEEE Std 80-2013 es adecuada para una subestación eléctrica reductora de 115kV/34,5 kV de tal forma que brinde la condición de seguridad de las personas y equipos; realiza una comparativa de resultados del software ETAP versus una macro con empleo de las ecuaciones del IEEE Std 80-2013, con la intención de validar el empleo de las macros para futuras aplicaciones. La metodología empleada es aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel de alcance descriptivo, y diseño preexperimental. Los resultados fueron: a) La comparativa de resultados entre las macros y el ETAP fueron valores con poca diferencia, principalmente para geometrías simétricas, estas diferencias van creciendo con geometrías asimétricas, b) Es confiable emplear las ecuaciones del IEEE Std 80-2013 para aplicaciones de mallas simétricas, para geometrías complejas o irregulares es preferible el empleo de software especializado.²

Según Guzman (2022), indica que los pozos a tierra tradicionales no protegen eficientemente a equipos en industria ligera, y que existen unos electrodos patentados que ayudan a disminuir la resistencia de un pozo a tierra pero que son muy caros; y de allí la necesidad de diseñar un prototipo de puesta a tierra (electrodo) barato que garantice la obtención de una resistencia menor a 5 Ω , y que además proteja contra descargas atmosféricas y tensiones peligrosa de retorno por tierra. La metodología empleada es aplicada, con enfoque mixto, nivel de alcance descriptivo, y diseño experimental. Los resultados fueron: a) Logra diseñar un prototipo de electrodo de pozo a tierra barato, usando 03 varillas de cobre, 02 placas de cobre en los extremos y 01 bobina de choque, b) El autor da el crédito de obtención de una resistencia de 3.22 Ω a su prototipo, sin embargo, no hace ningún análisis al efecto del tratamiento del terreno con soluciones salinas que dosifica según su experiencia. c) Menciona que el diseño asegura control de tensiones peligrosas, sin embargo, en la simulación con software ETAP se aprecia que las tensiones generadas superan los umbrales de tensión de toque y paso, d) El prototipo

² Domínguez, E. (2022). Diseño de mallas de puesta a tierra bajo la norma IEEE Std 80-2013 con macros en Excel.

diseñado podría implementarse en mallas a tierra, previa evaluación técnica económica de su impacto para el control de tensión de toque.³

Según Castro (2020), los pozos a tierra de tableros de baja tensión del área de cancha de materiales de la empresa CPSAA (Cementos Pacasmayo S.A.A) medían resistencias mayores a 25 Ω , y por este motivo existe la necesidad de diseñar un sistema que cumpla lo exigido por el CNE – Utilización 2006. La metodología de investigación es aplicada, con enfoque mixto, alcance correlativo, diseño preexperimental. Los puntos positivos y negativos encontrados fueron: a) Asume el valor de resistividad de terreno, b) El diseño propuesto queda fuera del marco del IEEE Std 80-2013, se menciona que se diseñó una malla cuando en realidad es un pozo a tierra cuyo cálculo de la resistencia se hizo con una expresión para determinar el valor máximo requerido, que no tiene nada que ver con la validación del diseño propuesto, c) No se evalúa si los gradientes de tensiones generadas están por debajo de los umbrales de tensiones de toque y paso, d) Asume el valor de las corrientes de falla en función al ajuste de los interruptores, e) En el flujo de caja, se asumió como ingreso el despedir a un personal que estaría abocado al 100% en solucionar problemas ocasionados por una inadecuada puesta a tierra.⁴

Según Aliaga (2020), la exposición de las personas a tensiones peligrosas dentro de las instalaciones de una subestación de alta tensión es crítica, por ello su trabajo evalúa las instalaciones de un sistema de puesta a tierra con el objetivo de mejorar la seguridad de las personas expuestas a tensiones peligrosas. Plantea la evaluación de tensiones peligrosas en las puestas a tierra de las subestaciones y líneas de transmisión que forman parte del sistema eléctrico usando los softwares especializados CYMGRD y ATP Draw, que son de uso comercial y con buena confiabilidad de resultados. La metodología empleada es aplicada, con enfoque mixto, nivel de alcance descriptivo, y diseño preexperimental. El resultado de la evaluación permitió al autor recomendar alternativas

³ Guzman, J. (2021). Diseño de un prototipo de puesta a tierra para la protección efectiva en la industria ligera en el distrito de San Agustín de Cajas.

⁴ Castro, L. (2020). Diseño de un sistema de puesta a tierra para mejorar las condiciones de operación del área de Cancha de Materiales, CPy SAA.

para mejorar la seguridad de las personas expuestas a tensiones peligrosas dentro de las subestaciones de alta tensión.⁵

De acuerdo Huamani (2018), la mina Cerro Verde se encontraba en proceso de ampliación y que los nuevos equipos eran susceptibles a daño al estar expuestos a efectos de la naturaleza de red y atmosférica, y por tanto, era necesario un sistema de puesta a tierra adecuadamente construido para garantizar la seguridad del personal y de todos los equipos. En su trabajo diseña una malla a tierra que abarca toda el área del edificio del alimentador de bolas del molino, con empleo del IEEE Std 80-2000 y compara los resultados con el software Aspix para garantizar buenos resultados. La metodología empleada es aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel de alcance descriptivo, y diseño experimental. Los resultados fueron: a) Logra diseñar una malla con geometría de cuadrículas irregulares cuyos resultados fueron satisfactorios, garantizando la limitación de tensiones peligrosas por debajo de los umbrales de toque y paso, b) Si bien es cierto que las ecuaciones del IEEE Std 80-2000/2013 son para mallas con geometría y cuadrículas regulares, en la investigación se usó para efecto comparativo, observándose que los valores de resistencia eléctrica de la malla, GPR, tensión de contacto y tensión de paso, difieren un poco respecto a los resultados del software Aspix.⁶

Yanque (2006), realiza un amplio trabajo, donde aborda el funcionamiento de las puestas a tierra desde su composición y desempeño según el tipo de falla a tierra. Describe los procedimientos para medición de resistividad del suelo, medición de la resistencia de la malla a tierra, y medición de tensiones de toque y paso. También aborda de manera extensa la corrosión de los elementos de puestas a tierra. Finalmente realiza una aplicación práctica del diseño de una malla a tierra que cubre toda el área de una subestación de transmisión usando las expresiones analíticas del IEEE Std 80-2013 y traslada recomendaciones para mejorar las tensiones de toque en algunas zonas de la malla, entre

⁵ Aliaga, W. (2020). Evaluación de un sistema de puesta a tierra para la seguridad en subestaciones de alta tensión.

⁶ Huamani, A. (2018). Sistema de puesta a tierra bajo el gradiente del alimentador de bolas de molino con tierra tipo IV mejorado.

ellas, colocar varillas verticales, mayor profundidad de la porción de la malla, reticulado más fino⁷.

Artículos científicos:

Batista et al (2019), indican que las puestas a tierra típicos a pie de torre consistentes en arreglos de electrodos horizontales podrían resultar onerosos y que no atenúan de manera efectiva las tensiones superficiales transitorias de origen atmosférico (alta frecuencia). Menciona lo importante que es contar con una puesta a tierra que funcione de manera efectiva tanto en baja y alta frecuencia, tal que permita contar con líneas de transmisión con baja tasa de indisponibilidad por fallas a tierra, especialmente las de origen atmosférico para el caso crítico de un backflashover. Los autores plantean que con la evaluación comparativa de una configuración de puesta a tierra a pie de torre típico horizontal, versus, una configuración con pozos verticales permitirá plantear un arreglo efectivo que funcione bien ante fallas de baja y alta frecuencia. La metodología empleada es aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel de alcance descriptivo, y diseño experimental. Las conclusiones fueron que, los pozos verticales son más efectivos atenuando tensiones transitorias de alta frecuencia respecto que las puestas a tierra horizontales de longitudes equivalentes, por tanto, el arreglo propuesto es una combinación pozos verticales distribuidos a lo largo de arreglo horizontal.⁸

El estándar IEEE Std 80-2013, documento que será la referencia principal, brinda los lineamientos siguientes: (a) establece los umbrales seguros para las diferencias de potencial, (b) desarrolla criterios seguros para el diseño de puestas a tierra y proveer un procedimiento práctico para tal, (c) desarrolla métodos analíticos para el entendimiento y solución de problemas típicos de gradientes de tensión, (d) muestra ejemplos prácticos de diseño y recomendaciones para la construcción. Cabe precisar que este documento enfatiza el riesgo asociado a los gradientes de potencial para las personas, en este

⁷ Yanque, M. (2006). Diseño de redes de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna.

⁸ Batista et al. (2019). A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models.

contexto, no recomienda la instalación de pozos a tierra. Esta norma es la más usada en el mundo para el diseño de mallas a tierra, tiene una metodología estructurada para un diseño y validación paso a paso, incluso en sus anexos tiene una serie de ejemplos de diseño⁹.

El American Institute of Electrical Engineers (1961), hoy Institute of Electrical and Electronic Engineers ó IEEE, publica la primera revisión del estándar IEEE-80, cuyos propósitos fueron: (a) revisar el estado del arte de la ejecución de puestas a tierra con riguroso enfoque a la seguridad, (b) establecer los umbrales de seguridad para las diferencias de potencial entre dos puntos accesibles por el humano durante una falla a tierra, (c) proporcionar una guía paso a paso para el diseño de sistemas prácticos de puesta a tierra basados en estos límites, (d) recomendar métodos de prueba para obtener datos para el diseño de sistemas de puesta a tierra y para verificar posibles replanteos, (e) desarrollar una metodología que ayude a comprender y solucionar problemas de gradiente de tierra, (f) poner a disposición algunos de los artículos más pertinentes y valiosos realizados hasta ese año. En esta publicación ya se aprecia el estudio conceptos tales como, interferencias de electrodos, la tensión de toque, la tensión de paso, la tensión transferida, el camino de paso de la corriente por el cuerpo; la frecuencia, magnitud y duración de una corriente de falla, la determinación de la máxima corriente de falla, el estudio del suelo, cálculo de la máxima elevación de potencial en la malla, adicionalmente ya puede observarse que se habla de mallas a tierra en el cual se conecta todas las instalaciones. Este estándar, al igual que sus actualizaciones fueron desarrollados para subestaciones de uso a la intemperie, tanto para las convencionales o las GIS, aplicables para generación, transmisión y distribución, y extensible a subestaciones interiores, incluyendo las de plantas industriales, pero abordándose con el debido criterio¹⁰.

⁹ IEEE. (2013). Guide for Safety in AC Substation Grounding.

¹⁰ American Institute of Electrical Engineers. (1961). Guide for Safety in AC Substation Grounding (IEEE Std 80-1961).

1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio

La mayoría de las plantas industriales en Perú cuentan con sistemas de puesta a tierra conformados por 03 o más pozos a tierra independientes, ubicados dentro y/o en la periferia de cada subestación particular. El criterio con que se vienen diseñando es que deben tener resistencias menores a, 25 Ω para protección a instalaciones de media tensión, 15 Ω para pozos de baja tensión y 5 Ω para pozos de equipos electrónicos. En la práctica, existen pocas plantas con mallas a tierra que cubren el área de la subestación particular, también hay unas cuantas plantas con mallas a tierra que cubren casi toda el área del predio; los motivos recurrentes del porqué del tamaño de la malla a tierra van desde la economía hasta el estándar de cada empresa, sin evaluar analíticamente el tamaño de la malla que garantice la protección del personal. Estas prácticas durante la fase de diseño existen tanto en plantas pequeñas, medianas y grandes industrias, lo cual se evidencia en expedientes técnicos aprobados por las empresas distribuidoras de energía, y claro está, verificable en campo. Estos diseños basados en el control de la resistencia, que no toman en cuenta las tensiones de contacto y paso, en especial las configuraciones con pozos a tierra independientes ocasionan tensiones peligrosas durante un evento de falla a tierra.

1.3 Formulación del Problema

Durante la fase de diseño de un sistema de puesta a tierra de plantas industriales en Perú, surge las interrogantes de, ¿instalar pozos a tierra individuales o instalar una malla a tierra?, y si fuese una malla a tierra, ¿qué área debe ocupar?, y finalmente, ¿se garantiza la seguridad de personas e instalaciones durante una falla a tierra?, para tal efecto: ¿Ayudaría contar con un modelamiento de puestas a tierra en plantas industriales mediante aplicación del IEEE Std80-2013 y software CYMGRD?

1.3.1 Problema Principal

La mayoría de las plantas industriales cuentan con un sistema de puesta a tierra conformado por los típicos pozos a tierra independientes para, media tensión, baja tensión, neutro, y electrónica de ser necesario; este sistema de aterramiento no protege al personal ante tensiones peligrosas provocadas por fallas a tierra.

1.3.2 Problemas Secundarios

- La práctica de instalar pozos a tierra independientes ha ido afianzándose a lo largo de las últimas décadas y seguramente ha sido causa de accidentes laborales y avería de equipos.
- La mayoría de los profesionales desconoce lo que realmente recomienda el CNE y normas internacionales en cuanto al diseño de puestas a tierra.
- Las empresas distribuidoras de energía no verifican cumplimiento de limitación de tensiones de contacto y paso durante la revisión de proyectos de sistemas de utilización en media tensión.
- No existe una norma que indique de forma precisa, qué área debe ocupar una malla a tierra en plantas industriales.
- El nivel de inversión en mallas a tierra, que depende del área que esta ocupa, es un factor crucial que las empresas toman en cuenta en la fase construcción.

1.4 Justificación e Importancia

La seguridad de los trabajadores dentro de una planta industrial ante un evento de falla a tierra queda garantizada siempre que las tensiones generadas a tierra sean inferiores a los umbrales de tensión de contacto y paso, propio de las condiciones de cada planta, asimismo, la integridad de los equipos queda garantizada siempre que estas tensiones generadas sean menores que la tensión de aislamiento a tierra propio de cada equipo; esto se logra con un adecuado diseño que evalúe no solo la resistencia de una puesta a tierra, que incluso podría tener un valor bajo, pero que ante una falla podría generar tensiones peligrosas. Lamentablemente en la gran mayoría de plantas industriales en Perú no se hace este tipo de validación al momento de diseñar puestas a tierra, se ha incurrido a la instalación de pozos a tierra enfocadas en conseguir una resistencia menor a lo indicado por el CNE peruano.

Se ha identificado dos causas del porqué de la omisión de evaluación rigurosa de las tensiones peligrosas, la primera es por desconocimiento de los proyectistas, y la segunda es por la inversión necesaria tanto en el diseño y posterior implementación de una

mallas a tierra. El problema de la primera causa es que el dueño de una planta confía en el proyectista, y no logra saber del costo de una malla a tierra apropiada para la seguridad de su personal y equipos, al menos no tiene la opción de decidir. La segunda causa tiene que ver con el tamaño de la malla a tierra, que podría abarcar incluso el área total de una planta.

De lo comentado, nace la justificación de elaborar un modelamiento generalizado de mallas a tierra cuya importancia de las conclusiones permitirán identificar elementos de juicio para responder a la siguiente pregunta ¿Qué tamaño debe tener la malla a tierra de una planta industrial?

1.5 Objetivos

El objetivo general y específicos se describen a continuación.

1.5.1 Objetivo General

Modelar el sistema de puesta a tierra en plantas industriales, basado en el estándar IEEE Std 80-2013 y el software CYMGRD, para garantizar la protección de las personas.

1.5.2 Objetivos específicos

- Diseñar mallas a tierra con el estándar IEEE Std 80-2013 y el software CYMGRD.
- Analizar la ineficacia de pozos a tierra ante tensiones peligrosas.
- Aplicar teoría del IEEE Std 80-2013 a casos reales en Perú.
- Evaluar la relación costo-seguridad.

1.6 Hipótesis

La hipótesis general y específicas se describen a continuación.

1.6.1 Hipótesis General

El modelamiento de 28 casos, considerando variaciones en el área de la malla, la corriente de falla, el perfil resistivo del suelo y la cantidad de subestaciones permitirá identificar la relación existente entre el área de la malla y las tensiones de toque y paso en sistemas de puesta a tierra.

1.6.2 Hipótesis Específicas

- La comparación de los resultados obtenidos mediante el IEEE Std 80-2013 y el software CYMGRD proporcionará a los lectores criterios técnicos para escoger la opción adecuada acorde a cada proyecto.
- El análisis de la ineficacia de los pozos a tierra frente a tensiones peligrosas evidenciará la necesidad de evaluar las tensiones de toque y paso en el diseño de sistemas de puesta a tierra.
- La aplicación práctica de los conceptos teóricos del IEEE Std 80-2013 en casos reales en Perú contribuirá a transformar la visión tradicional de los proyectistas sobre el diseño de sistemas de puesta a tierra.
- Conocer los montos de inversión permitirá establecer una relación precio-seguridad y servir como referencia para tomar decisiones de construcción.

1.7 Variables y Operacionalización de Variables

Las variables independientes y dependientes son:

1.7.1 Variables

Variable Independiente: Modelamiento de puestas a tierra de plantas industriales.

Variable Dependiente: Seguridad de las personas.

1.7.2 Operacionalización de Variables

Tabla 1

Operacionalización de variables.

Variable independiente	Definición	Dimensión	Indicadores	Instrumento
Modelamiento de puestas a tierra de plantas industriales	Se conforman de 28 casos de diseño de mallas a tierra y pozos a tierra sobre una planta industrial hipotética.	Área de la malla	m2	Cinta métrica
		Corriente de falla a tierra	Ampere	Amperímetro
		Material superficial	Ohm-metro	Laboratorio
		Resistividad del suelo	Ohm-metro	Telurómetro
		Cantidad de subestaciones	Unidad	No aplica

Variable dependiente	Definición	Dimensión	Indicadores	Instrumento
Seguridad de las personas	Es la garantía de que la integridad del personal queda garantizada ante un evento de falla a tierra.	Tensión de toque	Volt	Medidor de tensión de toque
		Tensión de paso	Volt	Medidor de tensión de paso
		Resistencia de la malla	Ohm	Telurómetro
		Ground Potencial Rise (GPR)	Volt	Cálculo

Nota: Elaboración propia.

1.8 Metodología de la Investigación

1.8.1 Unidades de Análisis

La unidad de análisis de la presente investigación son mallas a tierra y pozos a tierra, que serán diseñados dentro de una planta industrial con layout hipotético, estos se diferencian según la combinación de las variables independientes.

1.8.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación

Tipo de investigación: La investigación es aplicada debido a que parte de teorías y procedimientos de cálculo ya definido en normas como la IEEE Std 80-2013 y software que cuentan con herramientas de análisis de elementos finitos, con el aprovechamiento de estos, y previo dominio conceptual, permite encontrar conclusiones para definir el tamaño de una puesta a tierra durante la fase de diseño de una planta industrial.

Enfoque de la investigación: La investigación cuenta con un enfoque mixto. Evalúa los valores de las tensiones peligrosas generadas, comparándolos con los umbrales de toque y paso; como plus, se evalúa las inversiones de cada caso; con estos resultados, se realiza una comparativa cualitativa, asociándolos con la seguridad del personal e instalaciones.

Nivel de la investigación: La investigación tiene un nivel correlacional, establece un grado de asociación entre la seguridad del personal e instalaciones, versus, los 28 casos que componen el modelamiento generalizado.

1.8.3 *Diseño de la Investigación*

La investigación de este trabajo presenta un diseño experimental, permite evaluar resultados acerca de la seguridad de las personas e instalaciones mediante la manipulación de variables independientes.

1.8.4 *Fuentes de Información*

Se revisa documentos técnicos de referencia, tales como, IEEE Std 80-2013, papers, libros especializados, tesis, expedientes técnicos de ingeniería en instalaciones industriales, publicaciones de ingenieros de amplia experiencia en el tema, manual de usuario de CYMGRD.

1.8.5 *Población y muestra*

Población: Se considera las puestas a tierras de plantas industriales en el Perú.

Muestra: Modelo de puestas a tierra para una planta con layout hipotético.

1.8.6 *Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos*

Concordante a los objetivos del presente estudio, se toma como técnicas de recolección de datos, La Observación, y, Análisis de documentos.

Observación: Se observa la dependencia cuantitativa de variables dependientes asociadas al modelamiento de puestas a tierra de plantas industriales, como son, la tensión de contacto, la tensión de paso, la resistencia de la malla, GPR, y la inversión; cuando se modifican las variables independientes como, el nivel de corriente de falla, el perfil resistivo del suelo, el área que ocupa la malla a tierra, número de subestaciones. En base a los resultados, se hace una observación cualitativa enfocada a la seguridad del personal e instalaciones.

Análisis de documentos: Se analiza e identifica información relevante de las fuentes de información. La información permite reforzar conceptos asociados a la generación de tensiones peligrosas producto de una falla a tierra, también a identificar malas prácticas durante el diseño de puestas a tierra.

Como instrumentos de recolección de datos, se usan, Ficha de análisis de documentos, Ficha de comprobación o chequeo (check list). El primero para recolectar

datos de interés de las fuentes de información, el segundo para monitorear el avance de los cálculos.

1.8.7 *Análisis y Procesamiento de Datos*

Luego de los cálculos mediante aplicación de la metodología IEEE Std 80-2013 y uso del software CYMGRD, en una tabla de análisis de resultados, se condensa los valores de los diferentes parámetros de diseño de puestas a tierra, y también los valores calculados de, tensiones de toque, de tensiones de paso, de resistencia de malla, del GPR, generados en cada uno de los 28 casos propuestos, incluyendo la inversión referencial como plus. Para reforzar el análisis, se incluye la visualización de las superficies de tensiones peligrosos generados mediante el uso del software CYMGRD. En la tabla de resultados, se valida en cada caso si las tensiones generadas se encuentran debajo de los umbrales de toque y paso, se calcula el porcentaje de área que ocupa cada malla a tierra respecto al área de la planta.

Luego del análisis, se procesa los datos hallados, relacionándolos con la seguridad del personal e instalaciones y la inversión que representa, este procesamiento permite hallar conclusiones técnicas y económicas para diseños en cualquier planta industrial.

Capítulo II: Marco Teórico y Marco Conceptual

2.1 Bases Teóricas

2.1.1 Sistema de Puesta a Tierra

Comprende el conjunto de conductores, barras, elementos de conexión, canalizaciones y aditivos químicos distribuidos de manera subterránea y superficial, acorde a un diseño particular propio a la localización, de tal manera que, el conjunto de instalaciones queden conectadas a tierra a través de una impedancia suficientemente baja y de apropiada capacidad para garantizar la seguridad del personal e instalaciones ante tensiones peligrosas provocados por corrientes de falla monofásica o bifásica a tierra.

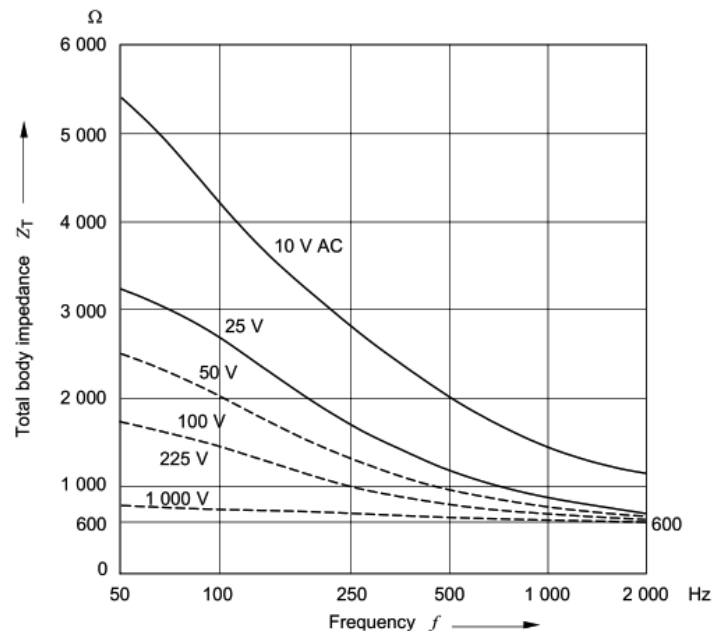
2.1.2 Resistencia Eléctrica del Cuerpo Humano

La impedancia total que ofrece el cuerpo humano al paso de la corriente está constituida por tres elementos en serie: la impedancia de la piel en el punto de ingreso de la corriente, la impedancia interna del cuerpo y la impedancia de la piel en el punto de egreso. Tanto la impedancia en los puntos de entrada y salida incluyen una componente resistiva y otra capacitiva, mientras que la impedancia interna es esencialmente resistiva y varía en función de la trayectoria de la corriente y el punto de contacto.

La norma IEC-60479-1-2005 provee de curvas de la dependencia de la impedancia total del cuerpo humano en función de la frecuencia para un rango percentil de 50%, para tensiones de contacto entre 10V a 1000V, medición luego de 50 ms de aplicado el voltaje, y trayectoria de corriente mano-mano o mano-pie, en condiciones secas. La Figura 1 muestra las curvas para rangos desde 50 Hz hasta 2 kHz, la Figura 2 muestra para 90 Hz hasta 150 kHz.

Figura 1

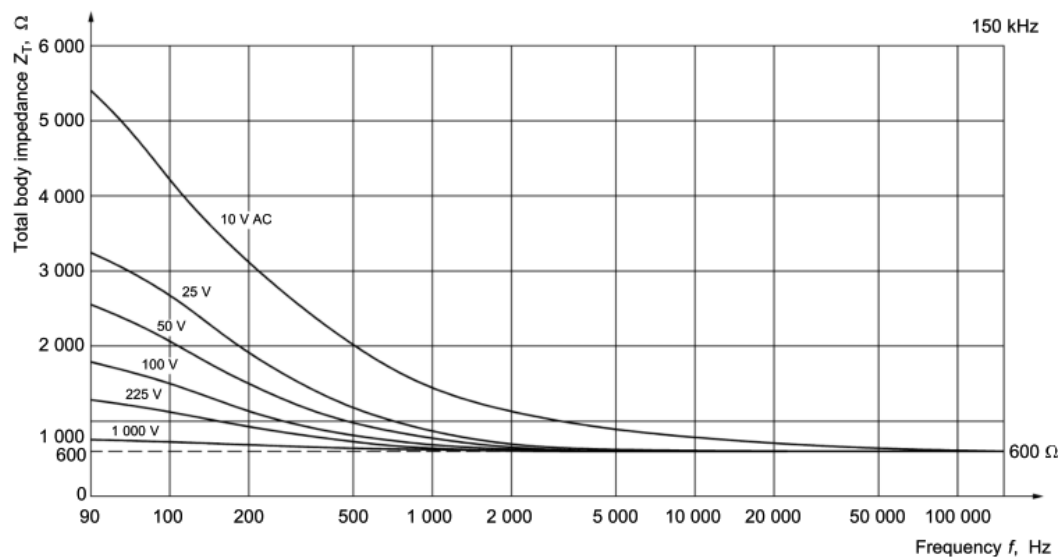
Dependencia de impedancia del cuerpo humano y frecuencias desde 50Hz hasta 2kHz.



Nota: Tomado de IEC-60479-1-2005.

Figura 2

Dependencia de impedancia del cuerpo humano y frecuencias desde 90Hz hasta 150kHz.



Nota: Tomado de IEC-60479-1-2005.

De estas curvas se deduce que la impedancia de la piel disminuye conforme aumenta la frecuencia, para frecuencias muy altas su valor es despreciable, para esta condición solo prevalece únicamente la resistencia interna.

El IEEE Std 80-2013, basado en los estudios de Charles Dalziel, indica que el cuerpo humano para corrientes directas y corrientes alternas de 50 Hz o 60 Hz, se asemeja a una resistencia. Usualmente, la trayectoria de la corriente es considerado entre ambos pies o desde una mano a ambos pies. Las investigaciones de Charles Dalziel señalan que la resistencia interna del cuerpo puede asumirse con el valor de 300 Ω , además hay que tener en cuenta que incluyendo la resistencia de la piel sube entre 500 Ω a 3000 Ω . Dalziel, hizo sus ensayos humedeciendo las manos y pies con salmuera y así determinó los niveles de corrientes seguras, los valores obtenidos para 60Hz para hombres fueron: 9 mA, 21 V mano-mano y 10.2 V mano-pie. Entonces, basado en este experimento, la resistencia a.c. mano-mano es 2330 Ω , y resistencia mano-pie es 1130 Ω .

La norma IEEE Std 80-2013, cuya metodología será usado en el presente trabajo, para propósito de diseño asume la resistencia mano-pie, mano-mano, pie-pe, con el valor de:

$$R_B = 1000 \Omega \quad (1)$$

La norma señala que las resistencias adicionales durante un contacto con una corriente de falla se asumen que es cero, estas resistencias son, resistencia entre mano o pie con el área de contacto, resistencia de zapatos y guantes, y todo aquello que agregue una resistencia en serie a la piel.

2.1.3 El Suelo Como Conductor Eléctrico

Acorde a lo señalado por Canales (2011), “en general los minerales presentes en los suelos son malos conductores de la electricidad. Sin embargo, cuando se les agrega agua, su resistividad disminuye considerablemente volviéndose conductores aceptables, aunque muy pobres en comparación con los conductores metálicos clásicos” (p. 6). Esta aseveración es claramente verificable, al mojar suelos con presencia de arena, arcilla, incluso roca, se aprecia una disminución de la resistividad durante las pruebas.

Es la resistividad, la característica principal para el diseño de una puesta a tierra, como se ve a continuación, guarda relación con diferentes variables que componen el

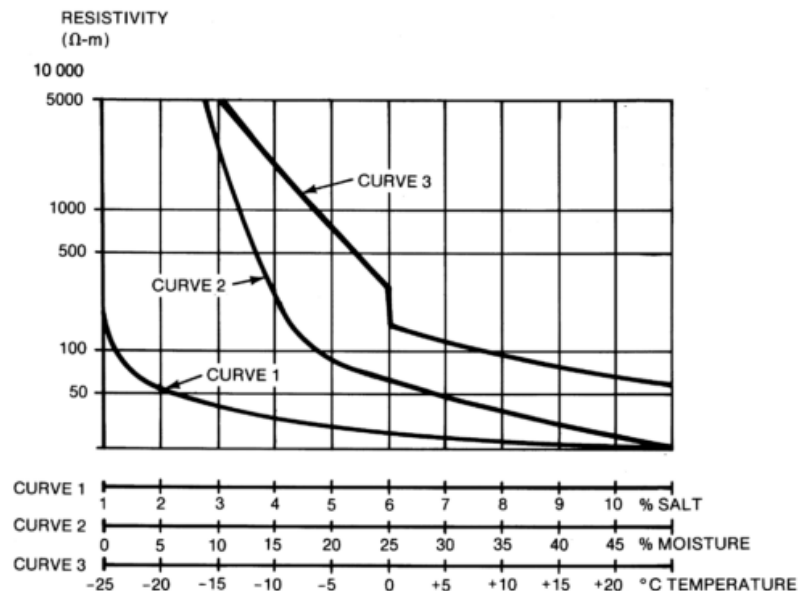
terreno. Existen diferentes tablas con valores referenciales de resistividad para tipos de suelos, más adelante se muestra que es imprescindible realizar el estudio de resistividad de suelo antes de todo diseño de puesta a tierra.

2.1.3.1 Factores que Influyen en la Resistividad del Suelo.

La conducción eléctrica del suelo es esencialmente electrolítica a causa de los iones de agua disuelta, esta forma de conducción tiene íntima relación principalmente con, la humedad, la temperatura, y la composición química del suelo. En la Figura 3 se aprecia que para suelos con humedad menor al 15% del peso, la resistividad se eleva considerablemente a medida que disminuye la humedad, también puede apreciarse el efecto de la temperatura, que, a partir de 0°C la resistividad crece abruptamente debido a la solidificación de las moléculas de agua. Finalmente se aprecia el efecto del contenido de sal disuelta en el suelo (que para el ejemplo es con un contenido del 30% de humedad en peso).

Figura 3

Curvas Resistividad del suelo vs %sal, %humedad, temperatura.



Nota: Tomado de IEEE Std 80-2013.

Las curvas anteriores solo son referenciales, no debe emplearse para cálculos de diseño, las características de cada terreno deben averiguarse mediante estudios en campo.

En general, adicionalmente a la temperatura, humedad y contenido de sal disuelto en el suelo, la resistividad también tiene influencia en menor medida al, tipo de suelo, composición química, granulometría y compactibilidad.

2.1.3.2 Tipos de suelos y valores supuestos de resistividad.

Resulta una tarea complicada clasificar los tipos de suelos debido a la gran variedad de minerales que las componen, por ello, dos suelos con apariencia similar pueden mostrar resistividades muy distintas debido a la combinación de capas listadas en la Tabla 2 donde se presentan valores referenciales de resistividad para ciertos tipos de suelos.

Tabla 2

Valores referenciales de resistividad de suelos.

Tipo de Suelo	ρ aparente (Ω -m)
Terrenos vegetales	10-50
Arcillas, Limos	20-80
Tierra de cultivo	50-100
Arenas arcillosas	80-200
Fangos turbos	150-300
Tierra aluvional	200-500
Arenas y eriales	250-800
Pedregales y dunas	300-3000
Roca compacta	2500-10000
Feldespatos secos	3000-30000
Concreto de cimentación	10000-50000

Nota: Adaptado de (Hipólito, V. 2008).

Se debe tener en cuenta que la clasificación de la Tabla 2 es general, por ende, no debe usarse para los cálculos definitivos de diseño debido a que los valores reales están estrechamente relacionados a las características geológicas particulares del lugar donde se tiene proyectado la construcción, incluso depende de la estación del año el cual tiene

mucha influencia en la humedad del suelo; hay que tener en cuenta lo que menciona Yanque (2006), la mayor cantidad de suelos en Perú es de alta resistividad (mayores a 300 Ω -m) a causa de la elevada concentración del contenido de óxidos de silicio y aluminio (70-80%), bajo nivel de salinidad (0.1-2%), muy poca humedad en zonas secas (menor a 1%), esto se agrava en los terrenos que no cuentan con recarga de humedad (0.1%).

2.1.3.3 Uso de material superficial.

El material que compone la capa superficial del suelo de los sectores de una planta industrial depende de varios factores como son, la resistencia mecánica para tránsito de vehículos livianos o pesados según la naturaleza del negocio, la economía y la seguridad industrial. Es usual encontrar plantas con pisos en toda el área o parte de ella con materiales de concreto, asfalto, tierra natural o de relleno, grava; incluso dependiendo del giro de negocio puede existir poca o mucha humedad en el suelo, y a nivel de infraestructura podría haber mucha área sin techo que es susceptible a lluvia.

En la Tabla 3 se muestra valores típicos de materiales comunes usados en la capa superficial de suelos, puede apreciarse la gran diferencia de resistividad entre material seco y mojado.

Tabla 3

Valores típicos de resistividad de material superficial.

Material superficial	ρ aparente – seco (Ω -m)	ρ aparente – mojado (Ω -m)
Granito triturado con finos	140×10^6	1300
11/2" granito triturado con finos	4000	1200
3/4" a 1" de granito con finos	---	6513
1" a 2" de granito lavado	1.5×10^6 a 4.5×10^6	5000
2" a 4" de granito lavado	2.6×10^6 a 3×10^6	10000
Piedra caliza	7×10^6	2000 a 3000
Granito lavado similar 3/4" de grava	2×10^6	10000
Granito lavado similar grava fina	40×10^6	5000
3/4" de granito lavado	190×10^6	8000
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10000 a 6×10^6
Concreto	1×10^6 a 1×10^9	21 a 200

Nota: Adaptado de IEEE Std 80-2013.

2.1.3.4 Modelos de suelos.

En el diseño de puesta a tierra, uno de los primeros pasos es modelar el suelo a partir de las mediciones de resistividad del suelo hechas con algún método de prueba, queda a criterio del ingeniero proyectista con qué modelo de suelo realizará el diseño, el cual en gran parte depende de qué tan uniforme o qué nivel de variabilidad hay en las mediciones de resistividad de la data de campo. Es común modelar a suelo de dos capas o biestratificado debido a su suficiente precisión y además que los cálculos pueden hacerse manualmente y también con apoyo de software (la mayoría de software restringe su uso hasta modelos de 02 capas). Para terrenos con mucha variabilidad se recomienda el modelo multicapa (más de 02 capas), su uso dependerá de la envergadura del proyecto debido a que requiere software costoso. El suelo de una 01 capa u homogéneo es poco usado debido a que es ideal y podría arrastrar errores considerables, la norma IEEE Std 80-2013 usa el modelo de suelo uniforme en su metodología de cálculo, aunque da la opción de emplear el método de Sunde para llevar a un modelo biestratificado para una aplicación computacional.

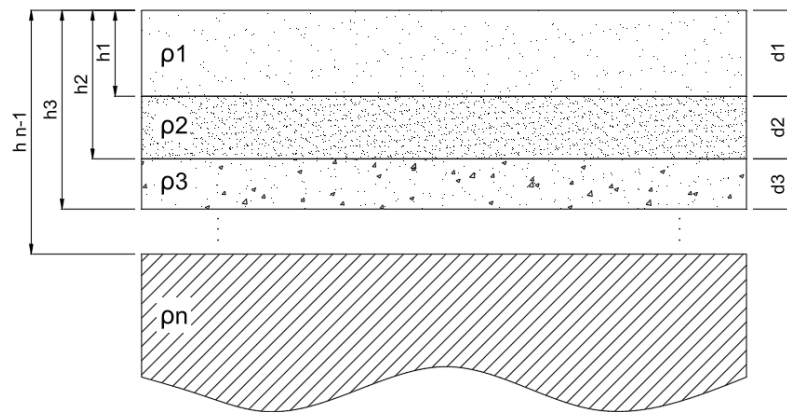
La resistividad del terreno varía superficial y verticalmente, la variación superficial puede despreciarse porque usualmente varía solo un poco en algunas porciones del área destinada para la puesta a tierra. La variación vertical sí se toma en cuenta para el diseño, esta variación puede ser con incremento de la resistividad a medida que incrementa la profundidad del estrato horizontal, este tipo de terreno se le conoce como Terreno con Perfil de Resistividad Ascendente; para terrenos donde la resistividad disminuye a medida que incrementa la profundidad del estrato horizontal, se les conoce como Terreno con Perfil de Resistividad Descendente.

La Figura 4 grafica un modelo general de suelo multiestratificado con capas horizontales donde se inyecta una corriente de falla en la capa superficial, puede apreciarse varios estratos horizontales o capas de espesor d_i y un valor invariable de resistividad ρ_i , a una profundidad h_i . Para la solución general del problema de modelar un suelo multiestratificado a equivalentes de suelos de 02, 03 o más capas (según necesidad

del ingeniero proyectista), en cada plano de separación entre capas, es necesario establecer dos condiciones de contorno: una relacionada con el potencial y otra con la densidad de corriente en dirección perpendicular al plano. Así, cuando el terreno está compuesto por n estratos, se obtienen $2n$ condiciones de contorno en total. Si se incluye el aire como una capa adicional, el sistema se divide en $n+1$ regiones para el cálculo de los potenciales, cada una con una expresión general que involucra dos funciones desconocidas que deben determinarse. En consecuencia, se tienen $2(n+1)$ funciones por resolver, junto con $2n$ ecuaciones de contorno y dos condiciones extra que garantizan que el potencial tiende a cero en el infinito.

Figura 4

Modelo de multiestratificado del terreno.



Nota: Elaboración propia.

Ya sea manualmente con algún método indicado en IEEE Std 81-2013, o mediante software de computación, puede realizarse la parametrización del modelo del suelo que se usará para el diseño de la puesta a tierra, considerando que cada modelo cuenta con un grado de precisión.

2.1.3.4.1 Modelo de Suelo Uniforme.

La resistividad aparente de un suelo uniforme se calcula empleando las dos siguientes ecuaciones:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad (2)$$

Donde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}$ Son los valores de las mediciones de resistividad [$\Omega\cdot m$].
 n es el total de mediciones.

$$\rho_{a(av2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2} \quad (3)$$

Donde:

$\rho_{a(max)}, \rho_{a(min)}$ Máximo y mínimo valor de las mediciones de resistividad [$\Omega\cdot m$].

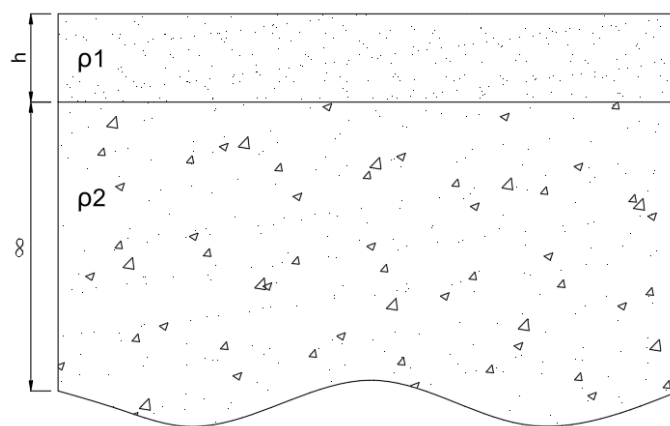
La aplicación de las Ecuaciones 2 y 3 queda a evaluación de proyectista, es poco común usarlas, debido a que un suelo uniforme es ideal. $\rho_{a(av1)}$ ó $\rho_{a(av2)}$ viene a ser la resistividad aparente del suelo uniforme de profundidad infinita.

2.1.3.4.2 **Modelo de Suelo Biestratificado Mediante Método Gráfico.**

El modelo de 02 capas es el más usado debido a la precisión aceptable de sus resultados, además que los softwares comerciales usan este modelo. En la Figura 5, ρ_1 y h es la resistividad y espesor de la primera capa, ρ_2 es la resistividad de la segunda capa de espesor infinito.

Figura 5

Modelo biestratificado del terreno.



Nota: Elaboración propia.

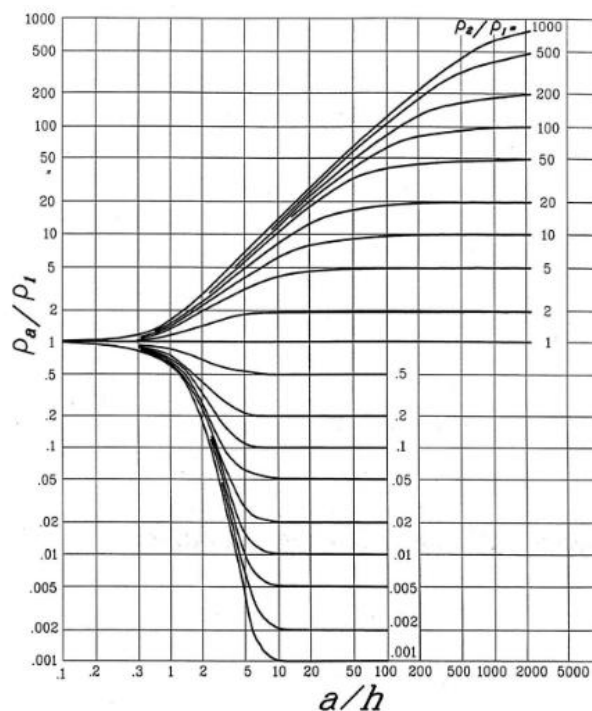
A continuación, se muestra el método gráfico de Sunde, que es un método aproximado para modelar suelo de 02 capas en caso no se cuente con un software.

ρ_1 y ρ_2 son obtenidos mediante inspección de la data de medición de campo, solo h es obtenido del método de Sunde, tal como sigue:

- Graficar los valores de resistividad aparente medidos en campo. Eje Y la resistividad, y eje X la distancia de separación del método Wenner.
- Seleccionar ρ_1 y ρ_2 , ρ_1 corresponde al espaciamiento más pequeño, mientras que ρ_2 la del mayor espaciamiento. Puede extrapolarse, de ser necesario en ambos extremos del gráfico para estimar mayor data.
- Calcular ρ_1/ρ_2 y seleccionar la curva en la curva de Sunde. Puede extrapolar una nueva curva en el gráfico.
- Seleccionar el valor del eje Y de ρ_a/ρ_1 en la Figura 6.
- Leer el valor de a/h en el eje X.
- Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado ρ_a/ρ_1 por ρ_1 inicial.
- Leer la distancia de separación a del gráfico de mediciones en campo.
- Calcular h .

Figura 6

Gráfico de método de Sunde.



Nota: Tomado de IEEE Std 80-2013.

2.1.3.5 Medición de Resistividad del Suelo.

Para el diseño es vital conocer el valor de la resistividad del terreno, el IEEE Std 81-2012 refiere a tres métodos principales para la medición, el método de variación de la profundidad o método de los tres puntos; el método de cuatro puntos, dividido en el Método de Wenner y el Método de Schlumberger, siendo estos dos últimos los usualmente empleados gracias a su facilidad de medición en campo y permite cubrir grandes áreas en comparación del método de tres puntas que es más restringido.

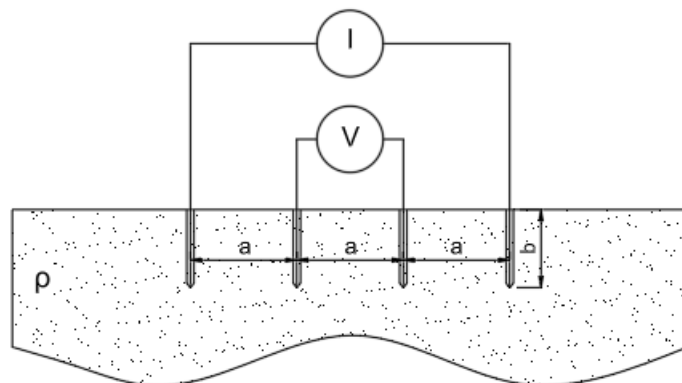
Las mediciones deben ser siempre que sea posible con terreno seco o semiseco para evaluar la peor condición, asimismo se podría conseguir información de parte los profesionales civiles o geólogos durante el movimiento de tierras y estudios de suelos durante la fase de estudios preliminares del proyecto, parte de información importante puede ser, granulometría en cada capa, humedad, PH, profundidad de napa freática.

2.1.3.5.1 Método de Wenner.

La Figura 7 ilustra el uso de este método. Se entierran cuatro electrodos iguales a una profundidad b [m] en línea recta, espaciados a una distancia a [m]. Por medio de un telurómetro de 4 puntas, se inyecta una corriente I entre los dos electrodos externos (electrodos de medición de corriente) y se mide la tensión V entre los dos electrodos internos (electrodos de medición de tensión) con un voltímetro de alta impedancia. El telurómetro realiza el cociente V/I y halla el valor de la resistencia R [Ω].

Figura 7

Método de Wenner.



Nota: Elaboración propia.

ρ_a [$\Omega \cdot m$] en términos de a , b , y R , representa la resistividad aparente de la capa de suelo a una profundidad a , y viene expresada por:

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

En la práctica si $a \geq 20b$, la Ecuación 4 puede resumirse a

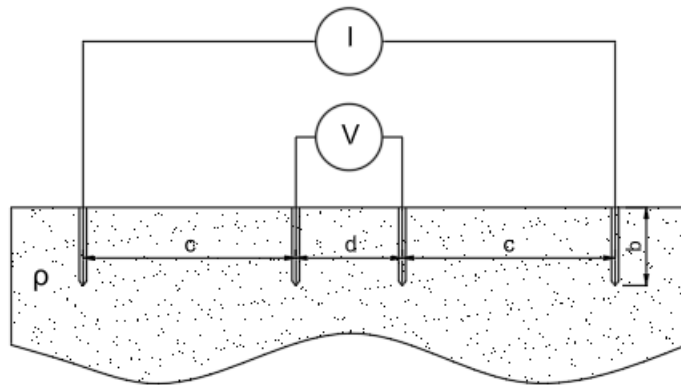
$$\rho_a = 2\pi a R \quad (5)$$

2.1.3.5.2 Método de Schlumberger.

En la Figura 8 se ilustran cuatro electrodos iguales, enterrados a una profundidad b [m] en línea recta. Por medio de un telurómetro de 4 puntas, se inyecta una corriente I entre los dos electrodos externos espaciados a una distancia $2c+d$ [m] y se mide el tensión V entre los dos electrodos internos espaciados a una distancia d [m] con un voltímetro de alta impedancia. El telurómetro realiza el cociente V/I y halla el valor de la resistencia R [Ω].

Figura 8

Método de Schlumberger.



Nota: Elaboración propia.

Para $b \ll c, d$ y $c > 2d$, ρ [$\Omega \cdot m$] en términos de c , d , y R , representa la resistividad aparente de la capa de suelo a una profundidad $(2c+d)/2$, y viene expresada por:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad (6)$$

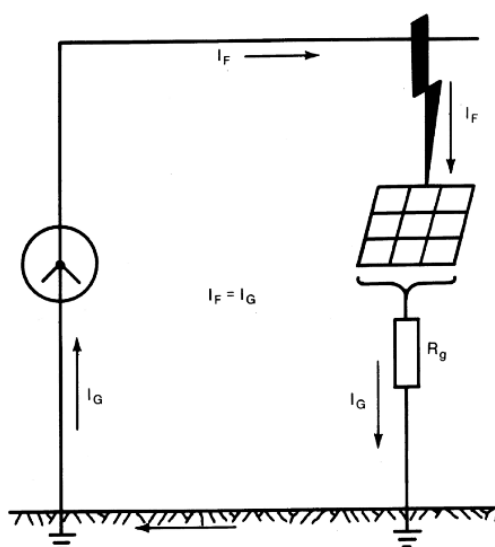
2.1.4 Gradientes de Potencial Producto de Una Falla a Tierra

La baja resistencia de una puesta a tierra no es sinónimo de seguridad del personal ni instalaciones. No existe una relación matemática simple entre la resistencia y la máxima corriente que una persona puede estar expuesta sin causarle un shock eléctrico, de ello podría darse que una subestación con aparente baja resistencia podría ser potencialmente riesgosa, mientras que otra con mayor nivel de resistencia podría resultar menos riesgosa si se diseña adecuadamente.

En condiciones normales, los elementos que conforman el sistema de puesta a tierra y el suelo están al mismo potencial, pero en eventos de falla, la corriente que fluye hacia la tierra puede generar una elevación de potencial en el punto de falla y una distribución de potencial en la superficie del terreno (Figuras 9 al 11), extendiéndose a todas las instalaciones conectadas a la red de tierra superficial, esta elevación de potencial es directamente proporcional al valor de la resistencia de la puesta a tierra y la magnitud de la corriente efectiva que ingresa a la tierra. La Figura 9 ejemplifica el paso de la corriente de falla hacia un punto remoto por donde ingresa nuevamente al sistema eléctrico (tierra remota).

Figura 9

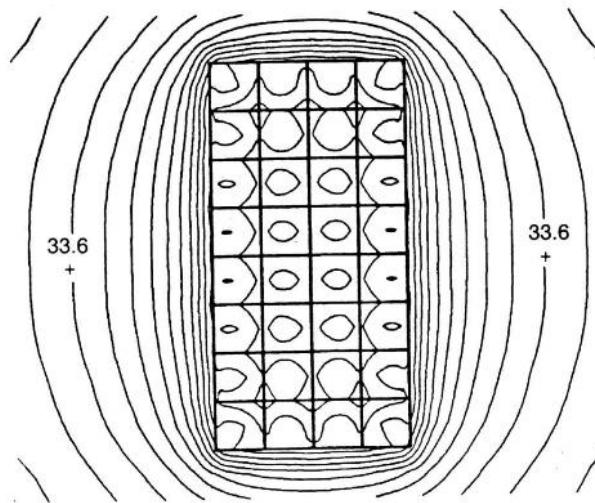
Falla a tierra y retorno por punto remoto.



Nota: Tomado de IEEE Std 80-2013.

Figura 10

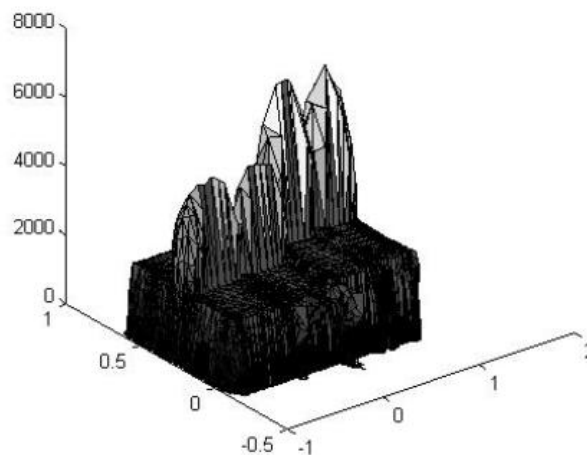
Curvas de nivel de tensiones superficiales.



Nota: Tomado de IEEE Std 80-2013.

Figura 11

Tensiones superficiales 3D.



Nota: Tomado de (Ramirez, J. y Cano E. 2010).

El máximo valor del potencial de la superficie respecto a una tierra remota se le conoce como GPR (Ground Potential Rise).

En la Figura 12, se muestra 5 situaciones que envuelven al personal e instalaciones aterradas durante una falla a tierra. La diferencia de potencial pie-pie es conocido como E_s (step voltage). Los 3 ejemplos de diferencia de potencial mano-pie mostrados en esta figura son conocidos como E_t (touch voltage), E_m (mesh voltage), E_{trrd} (transferred voltage).

La diferencia de potencial por contacto metal a metal, ya sea mano-mano o mano-pie es representado como E_{mm} (metal to metal touch voltage).

2.1.4.1 Tensión de Paso Es (Step Voltage).

En la Figura 12, la persona 1 ejemplifica la tensión de paso, se aprecia una diferencia de potencial E_s entre los dos pies separados 1m.

2.1.4.2 Tensión de Contacto E_t (Touch Voltage).

En la Figura 12, la persona 2 está sometida a una diferencia de potencial E_t entre la mano o alguna parte en contacto con el equipo y sus pies.

2.1.4.3 Tensión Transferida E_{trrd} (Transferred voltage).

Es una forma particular de la tensión de contacto, donde la persona se encuentra en un punto externo al área que cubre una malla a tierra. La persona 3 de la Figura 12 está expuesta a una diferencial de voltaje mayor que la de los casos anteriores, y podría resultar estar sometido al valor del GPR. Durante el diseño se debe evaluar los riesgos y tomar las medidas respectivas tal como lo recomienda el IEEE Std 80-2013, instalar aislamiento en elementos conductores que puedan transferir potencial, además de rotular los puntos de peligro y quizás reforzar el uso de EPP dieléctrico.

2.1.4.4 Tensión de Retículo E_m (Mesh voltage).

Trata del caso extremo de tensión de contacto dentro de la malla y se ubica cerca del centro del retículo de una de las esquinas de la malla de puesta a tierra, tal como lo ejemplifica la persona 4 de la Figura 12.

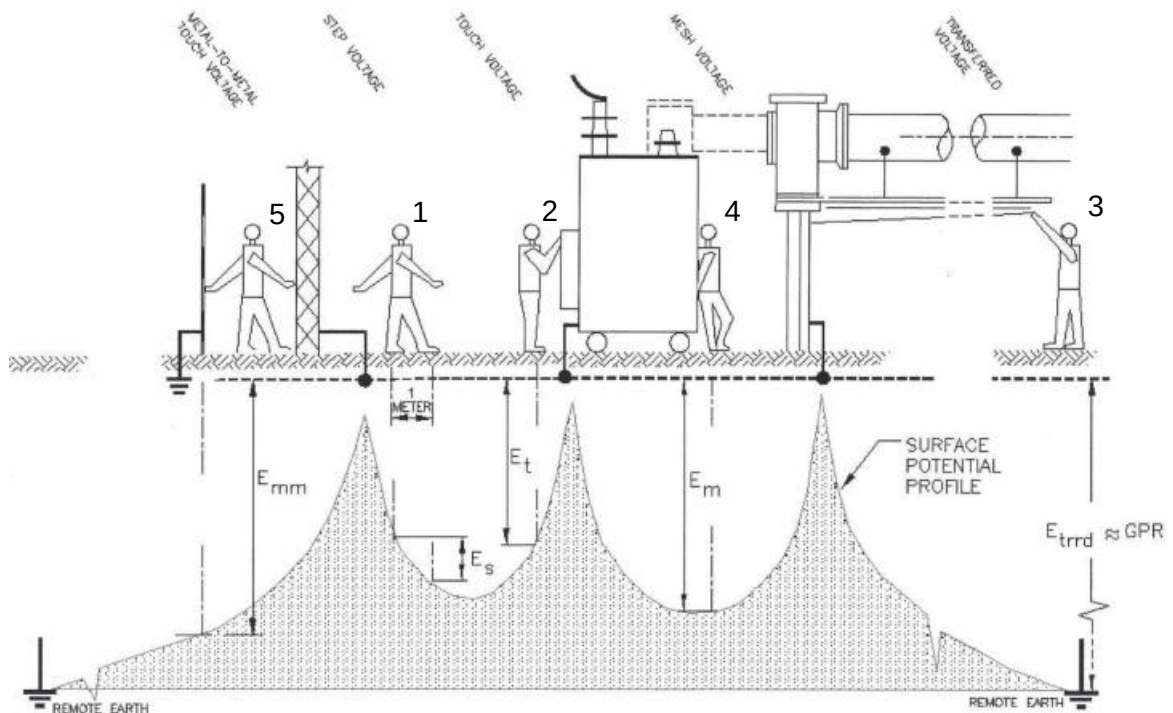
2.1.4.5 Tensión de Contacto Metal-Metal E_{mm} (Mesh voltage).

Es la diferencia de potencial que una persona puede estar sometida cuando toca dos objetos metálicos. Para el caso de dos objetos metálicos aterrados en una misma malla a tierra, el E_{mm} resulta despreciable. Para un objeto aterrado y el otro aislado de tierra,

como por ejemplo las rejas perimetrales, el Emm puede ser peligroso. Tal situación se muestra en la persona 5 de la Figura 12.

Figura 12

Situaciones básicas de shock eléctrico.



Nota: Tomado de IEEE Std 80-2013.

Según el IEEE (2013), se debe evitar la conexión eléctrica de una malla de tierra con cualquier conductor que se extienda fuera del perímetro de la malla o bien evitar que una persona en un lugar remoto haga contacto directo con este conductor; y aún así, potenciales de menor magnitud pueden transferirse por elementos conductores que pasen cerca de la malla. La norma recomienda usar uniones o cubiertas aislantes en este segundo caso, la implementación de esto es muchas veces difícil y hasta imposible en campo, por ello debe prevalecer en todo proyecto la inclusión de un estudio de la magnitud de las tensiones de paso y contacto y eventualmente tensiones transferidas críticas evaluando los costos necesarios y viabilidad técnica.

2.1.5 Efecto del Paso de la Corriente por el Cuerpo Humano

El efecto del paso de la corriente eléctrica por partes vitales del cuerpo depende de la magnitud, duración de contacto, y frecuencia (Hz) de esta corriente, además de la diferencia de potencial y la trayectoria por el cuerpo. La consecuencia más peligrosa que puede suceder es la fibrilación ventricular, resultando en la inmediata detención de circulación sanguínea.

El IEEE (2013) indica que las circunstancias que podrían ocasionar un shock eléctrico son las siguientes:

- Una alta corriente de falla a tierra respecto del área de la malla a tierra y la resistencia a tierra remota.
- La resistividad del suelo y la distribución de corriente en el suelo, tal que pueden ocurrir elevados gradientes de potencial en puntos de la superficie del terreno.
- Situación donde un individuo, en un punto, tiempo y ubicación dentro de las instalaciones, logra estar en contacto con dos puntos con alta diferencia de potencial.
- Poco nivel de resistencia de contacto u otras series de resistencias para limitar la corriente a través del cuerpo a valores seguros bajo las situaciones anteriores.
- Duración de la falla y el contacto del cuerpo, por tanto, del flujo de corriente por el cuerpo humano por un tiempo suficiente que cause daño, dada una intensidad de corriente.

La relativa baja frecuencia de accidentes se debe en gran medida a la baja probabilidad de coincidencia de todas las circunstancias desfavorables listadas arriba.

2.1.5.1 Efecto de la Frecuencia de la Corriente de Falla.

Según el IEEE (2013), los humanos son altamente vulnerables para frecuencias entre 50 Hz a 60 Hz, corrientes aproximadas a 100 mA podrían resultar letales. Las investigaciones indican que el cuerpo humano puede tolerar corrientes ligeramente mayores a frecuencias de 25 Hz y unas cinco veces mayor en corriente continua, para determinados niveles de corriente. Para frecuencias entre 3 kHz a 10 kHz incluso altas

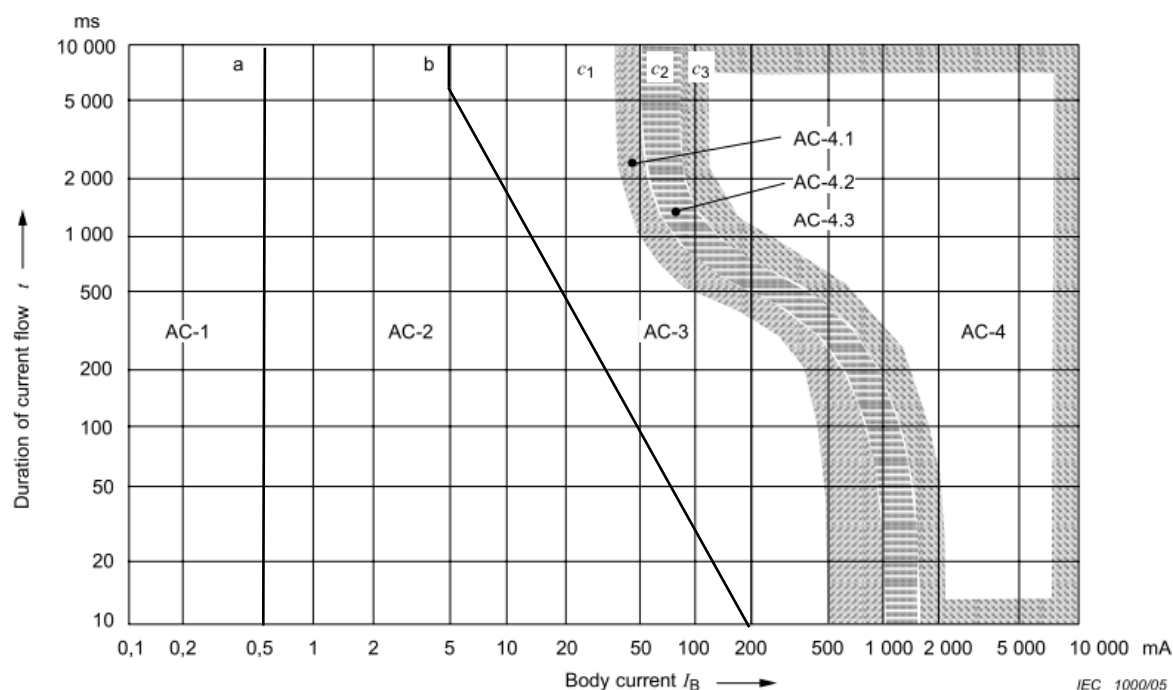
corrientes pueden ser toleradas, en algunos casos es posible que el cuerpo humano tolere altas corrientes provenientes de descargas atmosféricas.

2.1.5.2 Efecto de la Magnitud y Duración de la Corriente de Falla.

Según indica el IEC (2005), los efectos fisiológicos más comunes del paso de corriente por el cuerpo, en orden ascendente de la magnitud de la corriente, son umbral de percepción, contracción muscular, inconsciencia, fibrilación del corazón, paro respiratorio, y quemadura. Esta norma muestra una gráfica de los efectos del paso de la corriente alterna versus el tiempo, en una trayectoria desde mano izquierda a pie, y para frecuencias comprendidas entre 15 Hz y 100 Hz. Establece zonas de efecto delimitadas por las curvas que aparecen en la Figura 13. Para otras trayectorias, se debe tener en cuenta el paso de la corriente por el corazón.

Figura 13

Zonas tiempo/corriente a.c. en el rango 15Hz a 100Hz para recorrido mano izquierda - pie.



Nota: tomada de la norma IEC-60479-1-2005.

En la Tabla 4, se hace una descripción de las zonas de efecto de la Figura 13.

Tabla 4

Zonas tiempo/corriente para a.c. 15Hz a 100Hz para recorrido mano izquierda -pie.

Zonas	Límites	Efectos Fisiológicos
AC-1	0.5 mA. Curva a	Umbral de posible percepción, usualmente sin reacción de sorpresa
AC-2	0.5 mA hasta Curva b	Percepción involuntaria, contracción muscular agradable, usualmente sin efectos fisiológicos dañinos.
AC-3	Curva b hasta Curva c1	Fuertes contracciones musculares involuntarias. Dificultad en respirar. Efectos reversibles a las alteraciones de las funciones del corazón. Puede ocurrir inmovilización. Efectos se incrementan con la magnitud de la corriente. Usualmente no se espera daños en los órganos
AC-4	Arriba de Curva c1	Puede ocurrir efectos pato-fisiológicos como paro cardíaco, paro respiratorio, quemaduras y daño celular. La probabilidad de fibrilación ventricular incrementa con la magnitud de la corriente y el tiempo.
	c1-c2	AC-4.1 Probabilidad de fibrilación ventricular alrededor de 5%
	c2-c3	AC-4.2 Probabilidad de fibrilación ventricular alrededor de 50%
	Más allá de curva c3	AC-4.3 Probabilidad de fibrilación ventricular arriba de 50%

Nota: Adaptado de la norma IEC-60479-1-2005.

Por tanto, un diseño cuidadoso de un sistema de puesta a tierra debe dar especial énfasis en el umbral de fibrilación, de tal forma que pueda evitarse daños o muerte.

Según el IEEE (2013), la corriente empírica I_B que no causa fibrilación en el rango de 0.03 s a 3.0 s y que relaciona la energía absorbida por el cuerpo se expresa como:

$$S_B = I_B^2 \cdot t_s \quad (7)$$

Donde:

I_B es la magnitud rms de la corriente a través del cuerpo en [A].

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

S_B es la constante empírica relacionada a la energía tolerada en un shock eléctrico para un 99.5% de personas.

Entonces, despejando la expresión para I_B :

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

$$k = \sqrt{S_B} \quad (9)$$

Dalziel descubrió que para personas de 50 kg, el valor de $S_B = 0.0135$ y por tanto $k_{50}=0.116$, y para personas de 70 kg, $S_B = 0.0246$ y $k_{70}=0.157$.

Por tanto:

Para personas de 50 kg

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

Para personas de 70 kg

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (11)$$

Las Ecuaciones 10 y 11 son la base de referencia de la norma IEEE Std 80-2013 para el cálculo de las tensiones tolerables por el cuerpo humano. Para el diseño de puestas a tierra, esta norma recomienda valores de t_s en el rango de 0.25 s a 1.0 s.

2.1.5.3 Importancia de la Alta Rapidez de Despeje de Falla.

En las ecuaciones anteriores se puede notar la relevancia del tiempo de despeje de una falla, contar con un sistema de rápido despeje de fallas a tierra es ventajosa por las siguientes razones, (a) La probabilidad de exposición a un shock eléctrico puede ser reducido debido a la rápida respuesta en el corte de corriente de falla; (b) Los estudios y la práctica muestran que es posible la minimización del riesgo a daños severos o la muerte si se limita la duración de la circulación de corriente en el cuerpo por periodos muy cortos.

Un sistema de despeje de falla a tierra puede comprender de las combinaciones de dispositivos de protección como, interruptores diferenciales, interruptores magneto-diferenciales en baja tensión (habilitados con la función G), relés de falla a tierra, interruptores de media y/o alta tensión, transformadores de corriente, fusibles. La selección del tiempo de despeje (tiempo que se configura en el dispositivo de protección) debe estar basado en un estudio de coordinación de protecciones donde se asegure la selectividad local y total, este tiempo debe ser el mínimo posible. Según el IEEE (2013), si el tiempo de exposición a la corriente es cercano al período cardiaco, es muy probable que el corazón

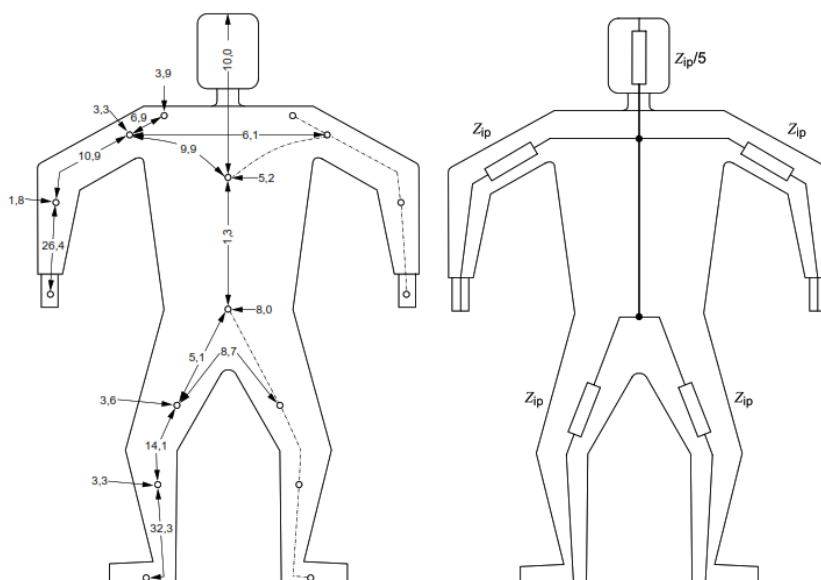
del ser humano llegue a la fibrilación ventricular, pero que el peligro se reduce si el tiempo de exposición se da el intervalo de 0.06 s a 0.3 s.

2.1.5.4 Influencia del Recorrido de la Corriente.

Según la IEC (2005), la gravedad de un accidente depende del recorrido de la corriente eléctrica, en especial los que involucran órganos vitales como el cerebro, corazón, pulmones, etc., los recorridos que pasan por la cabeza y el tronco son potencialmente los de mayor gravedad. En la Figura 14 izquierda se indican los porcentajes del valor de la impedancia de partes del cuerpo respecto de una impedancia mano-pie, la Figura 14 derecha muestra de manera simplificada la impedancia de las extremidades del cuerpo humano, donde Z_{ip} es la impedancia de una extremidad ya sea pierna o brazo, entonces se tiene que respecto a una impedancia de 100% entre mano-mano o mano-pie, la impedancia mano-ambos pies representa un 75%, la impedancia ambas manos – ambos pies representa un 50%, la impedancia ambas manos - tronco es un 25%, y ambas manos-cabeza un 35%.

Figura 14

Izquierda, Impedancia de partes del cuerpo en porcentajes respecto a impedancia mano-pie o mano-mano. Derecha, impedancia simplificada de extremidades del cuerpo.



Nota: Tomada de la norma IEC-60479-1-2005.

La IEC (2005) indica que, si la trayectoria es diferente, la intensidad que produce un riesgo equivalente se determina a través de un factor F, llamado factor de corriente de corazón, que incorpora la variabilidad de la impedancia del cuerpo según el recorrido de la corriente. Para el cálculo de la intensidad equivalente se usa la siguiente ecuación:

$$I_h = \frac{I_{Ref}}{F} \quad (12)$$

Donde:

I_{Ref} es la intensidad correspondiente al trayecto mano izquierda - pie.

I_h es la intensidad que recorre por las trayectorias de la Tabla 5.

F es el factor de corriente de corazón indicado en la Tabla 5.

Tabla 5

Factor de corriente del corazón para diferentes trayectorias.

Trayectoria	Factor F
Mano izquierda – pie izquierdo, pie derecho o ambos	1
Ambas manos – ambos pies	1
Mano izquierda – mano derecha	0.4
Mano derecha – pie izquierdo, derecho o ambas	0.8
Espalda – mano derecha	0.3
Espalda – mano izquierda	0.7
Pecho – mano derecha	1.3
Pecho – mano izquierda	1.5
Trasero – mano izquierda, derecha o ambos	0.7
Pie izquierdo – pie derecho	0.04

Nota: Tabla adaptada de la norma IEC-60479-1-2005

Para los diseños se debe tener presente que las indicaciones siguientes de IEEE (2013), la resistencia del cuerpo humano $R_B = 1000 \Omega$, que considera el paso de la corriente de mano-mano, mano-pie o pie-pie, donde la corriente recorre órganos vitales incluyendo el corazón en mayor o menor medida según sea el caso; asimismo, la trayectoria pie-pie es menos riesgoso, un estudio realizado por el alemán Loucks, indica que una relación de

25:1 entre la corriente pie-pie sobre la corriente mano-pie, debe darse para generar la misma magnitud de corriente en la región del corazón.

2.1.6 Equivalente Thevenin de Una Exposición a Gradientes de Potencial

A continuación, se muestra el desarrollo que da el IEEE Std 80-2013, las ecuaciones para las tensiones tolerables por el cuerpo humano son determinadas a partir de las Ecuaciones 10 y 11 y simplificaciones de algunas variables.

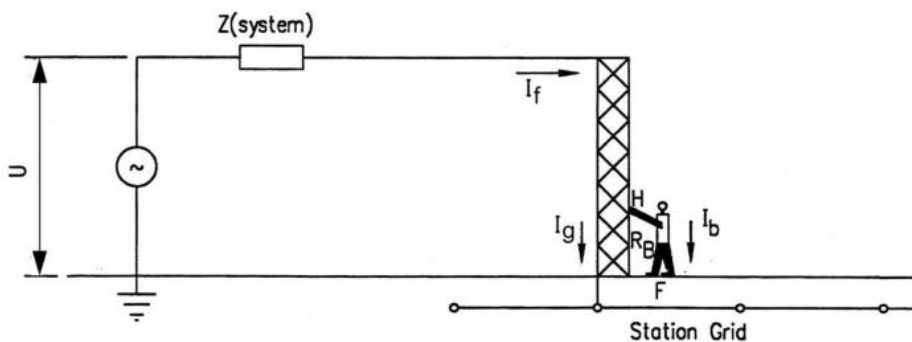
Se define las siguientes variables para la explicación de la exposición a tensiones de contacto E_t y tensiones de paso E_s en las Figuras 15 y 18:

- I_f es la corriente de falla total en [A]
- I_g es la corriente que fluye a la malla a tierra en [A]
- I_b es la corriente que fluye por el cuerpo en [A]
- R_B es la resistencia del cuerpo en [Ω]
- R_m es la resistencia mutua entre los pies y la malla a tierra en [Ω]
- R_f es la resistencia de una porción cilíndrica de tierra bajo un pie en [Ω]
- Z_{sys} es la impedancia del sistema en [Ω]
- U es el voltaje efectivo a tierra total del sistema en [V]
- H y F son puntos de contacto del cuerpo.

La Figura 15 ejemplifica la exposición a una tensión de contacto E_t cuando una persona toca una estructura metálica en el punto H durante una falla a tierra, el cual causa una corriente I_b igual que la corriente tolerable por el cuerpo I_B , y que circula desde el punto H hacia el punto F el cual es el área de contacto de los dos pies con el suelo.

Figura 15

Exposición a la tensión de contacto E_t .

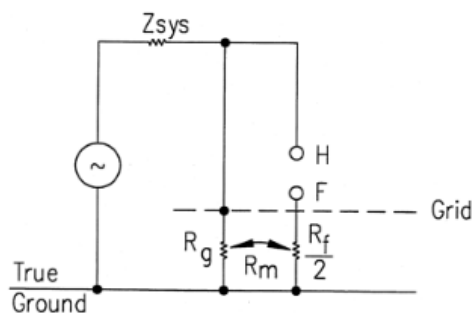


Nota: Tomada de IEEE Std 80-2013.

La Figura 16 muestra el circuito equivalente para una exposición a una tensión de contacto, la Figura 17 muestra el equivalente Thevenin para los puntos H-F, donde Z_{sys} y R_m se consideran despreciables, quedando como $V_{H-F} = V_{Th}$ y $Z_{Th} = R_f / 2$.

Figura 16

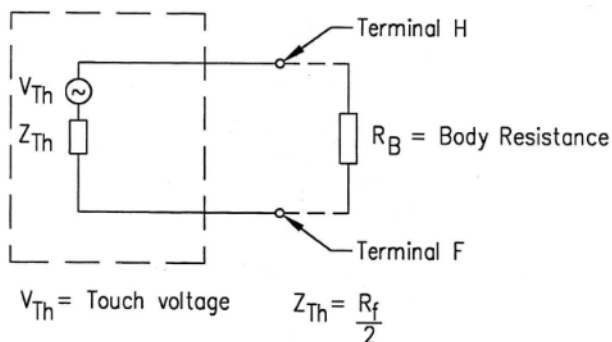
Circuito equivalente para la exposición a tensión de contacto E_t .



Nota: Tomada de IEEE Std 80-2013.

Figura 17

Equivalente Thevenin para la exposición a tensión de contacto E_t .

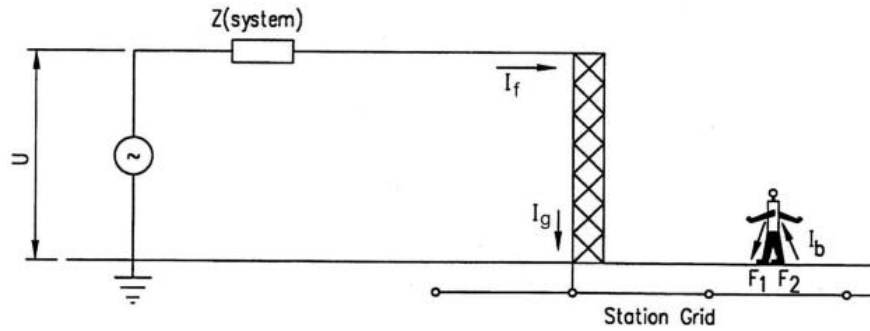


Nota: Tomada de IEEE Std 80-2013.

La Figura 18 muestra la exposición a una tensión de paso E_s cuando una persona pisa con los pies en los puntos F_1 y F_2 durante una falla a tierra, la corriente I_b que es igual a la corriente tolerable por el cuerpo I_B , circula desde el punto F_1 hacia el punto F_2 .

Figura 18

Exposición a la tensión de paso E_s .

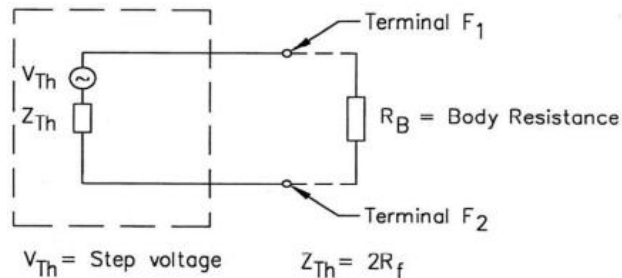


Nota: Tomada de IEEE Std 80-2013.

La Figura 19 muestra el equivalente Thevenin para los puntos F_1 - F_2 , quedando como $V_{F1-F2} = V_{Th}$ y $Z_{Th} = 2R_f$.

Figura 19

Equivalente Thevenin de exposición a la tensión de paso E_s .



Nota: Tomada de IEEE Std 80-2013.

De la Figura 17 y 19 el V_{Th} resulta:

$$V_{Th} = (Z_{Th} + R_B)I_B \quad (13)$$

2.1.6.1 Efecto del Espesor del Material de la Capa Superficial.

Según lo indicado por IEEE (2013), Laurent encontró una expresión para R_f , modelando los pies como discos metálicos de radio b (m) sobre la superficie de un suelo

homogéneo de resistividad ρ (Ω -m), la resistencia de contacto de zapatos, medias, etc., son despreciados.

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

La Ecuación 14 no considera el efecto de la resistividad ρ_s (Ω -m) del material de la capa superficial con espesor h_s (m), que usualmente es concreto o grava. En algunas instalaciones precarias incluso no se cuenta con material superficial aparte del suelo original. Según lo indica el IEEE (2013), Thapar, Gerez, y Kejriwal, son quienes propusieron un factor C_s que refleja el efecto del material de la capa superficial.

$$R_f = \frac{\rho_s}{4b} \cdot C_s \quad (15)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (16)$$

La Ecuación 16 es el método práctico de calcular C_s con un margen de error dentro del 5% respecto del método analítico también presentado en la norma IEEE Std 80-2013.

Para materiales con valor de resistividad similar o menor al del suelo original, el factor C_s se considera 1.0. Por ejemplo, para suelos muy resistivos prácticamente no existiría mejora cuando la capa superficial es concreto mojado (100 – 200 Ω -m) u otro material de baja resistividad. El cálculo de C_s tiene mucha importancia debido al impacto en los límites de tensiones tolerables, así que a la hora del diseño es bueno elegir el mejor material superficial en función de las condiciones particulares de cada planta, en plantas industriales normalmente es usado concreto bajo techo, en subestaciones de transmisión y algunas industrias también es usado grava para instalaciones eléctricas (piedra chancada certificada) con espesor normalmente entre 0.08 m a 0.15 m, cuya resistividad de diseño en condición seca puede ser 5000 Ω -m.

Para $b=0.08$ m, Z_{Th} para tensión de contacto:

$$Z_{Th} = 1.5\rho_s C_s \quad (17)$$

Para $b=0.08$ m, Z_{Th} para tensión de paso:

$$Z_{Th} = 6\rho_s C_s \quad (18)$$

Entonces

$$E_t = (R_B + 1.5\rho_s C_s)I_B \quad (19)$$

$$E_s = (R_B + 6\rho_s C_s)I_B \quad (20)$$

2.1.6.2 Criterios de Tensiones de Toque y Paso.

Las tensiones generadas en el suelo durante una falla no deben superar los límites que se indican a continuación.

2.1.6.2.1 Tensión de Toque y Paso para Cuerpos de 50 kg.

Reemplazando la Ecuación 10 en las Ecuaciones 13 y 14, y $R_B=1000 \Omega$, tenemos:

$$E_{t50} = (1000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (21)$$

$$E_{s50} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (22)$$

2.1.6.2.2 Tensión de Toque y Paso para Cuerpos de 70 kg.

Reemplazando la Ecuación 11 en las Ecuaciones 13 y 14, y $R_B=1000 \Omega$, tenemos:

$$E_{t70} = (1000 + 1.5\rho_s C_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (23)$$

$$E_{s70} = (1000 + 6\rho_s C_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (24)$$

2.1.6.2.3 Tensión Metal-Metal para Cuerpos de 50kg.

Haciendo $\rho_s = 0$ y manteniendo $R_B=1000 \Omega$ para contactos mano-mano o mano-pie en la Ecuación 21, se tiene que:

$$E_{mm50} = \frac{116}{\sqrt{t_s}} \quad (25)$$

2.1.6.2.4 Tensión Metal-Metal para Cuerpos de 70kg.

Haciendo $\rho_s = 0$ y manteniendo $R_B=1000 \Omega$ para contactos mano-mano o mano-pie en la Ecuación 23, se tiene que:

$$E_{mm50} = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \quad (26)$$

2.1.7 Métodos de Cálculo de Mallas a Tierra

Existen diferentes métodos de cálculo, entre los principales tenemos:

2.1.7.1 Método FEM (Finit Element Method).

Se basan en cálculos numéricos en la solución de ecuaciones diferenciales parciales asumiendo la premisa de equipotencialidad en todos los elementos conectados a la malla a tierra durante una falla; estas son aproximaciones no rigurosas que desprecian, impedancias propias, impedancias mutuas, pérdidas por efecto Joule, acoplamiento capacitivo. Una de sus desventajas es que no discrimina por dónde ingresa de la corriente de falla.

El método FEM puede aplicarse a cualquier configuración de malla a tierra y en suelos uniformes o de dos capas. Existen en el mercado softwares potentes para el diseño de mallas en base a este método y con resultados con buena aproximación. El método es muy aplicado para el diseño de mallas en generación, transmisión y distribución. Algunos de los softwares más conocidos son, CYMGRD, ETAP, GDEGS. Para el desarrollo práctico del presente trabajo se usa el CYMGRD.

2.1.7.2 Método de la Norma IEEE Std 80-2013.

Las numerosas ecuaciones para la metodología de cálculo se basan en la linealización de ecuaciones diferenciales del método FEM.

Solo aplica para:

- Formas regulares de mallas, cuadradas, rectangulares o en “L”.
- Modelo de suelo uniforme.
- Distribución de corriente uniforme.
- Áreas que van desde 6.25m² hasta 10000m², con cuadrículas que van desde 2.5m hasta 22.5m, variando desde 1 a 40 cuadrículas.

La Es y Et calculados son aproximaciones para los cuadrados más pegados al perímetro de la malla. Los criterios de diseño también aplican para el método FEM.

2.1.7.3 Método Electromagnético Completo.

Este método soluciona las ecuaciones diferenciales parciales de la teoría electromagnética asociada al efecto del paso de una corriente de falla por el suelo y electrodos. Los resultados son muy aproximados a la realidad, incluso puede verse resultados de la tensión superficial producido en las fronteras a partir del punto exacto donde se origina la falla. Su aplicación es especializado y usado en proyectos especiales. Puede usarse en suelos uniformes y multicapas. Un software que usa este método es CDEGS.

2.1.8 Cálculo de la Corriente de Falla en Plantas Industriales

En el cálculo de cortocircuito en los diferentes puntos de la red eléctrica de una planta industrial, es preciso contar con el equivalente Thevenin en el punto de entrega, a partir de ello, es posible calcular las corrientes de falla en cualquier parte de la red, ya sea de forma manual, con alguna aplicación en Excel, o uso de algún software de análisis eléctrico como por ejemplo Digsilent o ETAP.

Conforme lo indica la norma N° 018-2002-EM/DGE, el primer paso para proyectos de nuevos sistemas de utilización en media tensión o incremento de potencia en sistemas

de utilización en media tensión es presentar una solicitud de Factibilidad de Suministro y Punto de Entrega a la empresa distribuidora de energía. Para plantas industriales con alimentación en alta tensión, conforme lo indica el PR-20 del COES, se presenta una solicitud de Punto de Conexión a la empresa concesionaria de la línea de transmisión o subestación de transmisión donde se pretende conectar.

Luego de la solicitud de Factibilidad de Suministro y Punto de Entrega, las concesionarias entregan la siguiente información en su carta de respuesta:

- Ubicación del punto de entrega.
- Pcc3f: Potencia de cortocircuito trifásico [MVA].
- Pcc1f: Potencia de cortocircuito monofásico [MVA]. (No siempre lo hacen)
- V_n : Nivel de tensión [kV].
- t_{apert} : Tiempo de apertura de protecciones [s].

Para suministros en alta tensión, las concesionarias de la línea y el COES facultan el uso de las bases DigSilent para EPOs, estos archivos base se pueden descargar desde la web del COES, en estos archivos se encuentran modelados la red eléctrica del sistema de potencia de Perú, sobre el cual puede modelarse la red eléctrica de la planta industrial y sustentar su conexión mediante estudios eléctricos inherentes al EPO.

Para cualquiera de los casos descritos línea arriba, puede calcularse la corriente de cortocircuito en el punto de entrega y aguas abajo a este, pudiendo calcular la corriente de falla a tierra. El IEEE Std 80-2013 realiza sus aplicaciones de ejemplo con la corriente de falla monofásica, pero recomienda considerar la máxima corriente entre una falla monofásica y una bifásica a tierra.

2.1.8.1 Cálculo Manual de Corriente de Falla Monofásica.

La corriente de falla monofásica en el punto de entrega se calcula con la siguiente expresión:

$$I_{CC1f} = \frac{P_{CC1f}}{\sqrt{3} \cdot V_n} \quad (27)$$

La corriente de falla monofásica aguas abajo del punto de entrega se calcula con las siguientes expresiones:

$$I_{CC1f} = \frac{\frac{V_n}{\sqrt{3}}}{Z_{CABLE} + Z_{SIST}} \quad (28)$$

$$Z_{SIST} = \frac{V_n^2}{P_{CC1f}} \quad (29)$$

$$Z_{CABLE} = (R_{CABLE} + jX_{CABLE}) \cdot L \quad (30)$$

$$Z_{TOTAL} = Z_{SIST} + Z_{CABLE} \quad (31)$$

Donde:

I_{CC1f} Corriente de cortocircuito monofásico en Ka.

Z_{CABLE} Impedancia del conductor [Ω].

Z_{SIST} Impedancia del sistema [Ω].

R_{CABLE} Resistencia del conductor [Ω/km].

X_{CABLE} Reactancia inductiva del cable conductor [Ω/km].

L Longitud del cable conducto [km].

Usualmente las concesionarias no entregan el valor de la potencia de cortocircuito monofásico P_{cc1f} , para esos casos se asume que $P_{cc1f} \approx P_{cc3f}$. También se considera como típico $R/X=0.1$ para redes de distribución en el caso que se necesite estimar el valor de R y X en el punto de entrega.

2.1.8.2 Cálculo Manual de Corriente de Falla Bifásica a Tierra.

Es poco frecuente que se realicen los cálculos de la corriente de falla bifásica a tierra, a causa de que se necesita conocer los parámetros de componentes simétricas en el punto de entrega, las concesionarias no entregan esta información salvo solicitud especial y que podría demorar mucho tiempo en responder. La expresión para el cálculo es:

$$I_{CC2f-t} = \frac{\sqrt{3}V_n.X_2}{X_1.X_0 + X_1.X_2 + X_2.X_0} \quad (32)$$

Donde:

X_0 reactancia equivalente del sistema en secuencia cero [Ω].

X_1 reactancia equivalente del sistema en secuencia positiva [Ω].

X_2 reactancia equivalente del sistema en secuencia negativa [Ω].

2.1.8.3 Cálculo de Corriente de Falla Monofásica y Bifásica a Tierra Con Uso de Software de Estudios Eléctricos.

El uso de softwares como el DigSilent o ETAP permite ahorrar tiempo en cálculos eléctricos, en especial para redes con más de dos subestaciones internas o donde se requiera analizar los circuitos de baja tensión, para estos casos incluso ya se hace necesario el uso de estos softwares.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Modelar el equivalente Thevenin, ya sea, a partir de la información de la empresa distribuidora o desde las bases DigSilent para EPOs.
- Modelar la red eléctrica interna de la planta industrial.
- Realizar los cálculos de corrientes de falla.

En el presente trabajo, se usa el software DigSilent, y se limita a mostrar una tabla de resultados de las corrientes de falla.

2.1.9 Diseño de Sistema de Puesta a Tierra Según IEEE Std 80-2013

2.1.9.1 Dimensionamiento de Conductores.

Los conductores de sistemas de puestas a tierra pueden dividirse en; aquellos que conforman la malla a tierra y por tanto van enterradas, y, los que van instalados superficialmente. Es usual que los conductores de instalación superficial sean de cobre, es más, existen tablas para poder seleccionarlos en función al rol que desempeña el conductor, si es conexión equipotencial, cable de aterramiento de equipos (ver Tablas 20, 21, 22). Para el caso de dimensionamiento de conductores de malla a tierra, estas se realizan mediante las Ecuaciones 33 y 34 derivadas de las expresiones de Sverak.

$$I = A_{mm^2} \times \sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \times \alpha_r \times \rho_r}\right) \times \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (33)$$

Despejando:

$$A_{mm^2} = I \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \times \alpha_r \times \rho_r}\right) \times \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (34)$$

Donde:

I es la corriente rms [kA].

A_{mm^2} es la sección del conductor de la malla [mm²].

T_m es la máxima temperatura permisible [°C].

T_a es la temperatura ambiente [°C].

T_r es la temperatura de referencia del material conductor [°C].

α_0 es el coeficiente térmico de resistividad a 0 °C [1/°C].

α_r es el coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r [1/°C].

ρ_r es la resistividad del terreno a la temperatura de referencia T_r [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$].

K_0 $1/\alpha_0$ o $1/\alpha_r - T_r$ [1/°C].

t_c es la duración de la corriente de falla [s].

TCAP es la capacidad térmica por unidad de volumen [J/(cm³·°C)].

Los conductores de malla a tierra deben ser seleccionados teniendo las siguientes consideraciones: Buena conductividad, resistente a la fusión y deterioro mecánico producto de la exposición a la máxima corriente de falla, ser mecánicamente robusto, contar con resistencia a la corrosión particular al tipo de suelo. De estas consideraciones, y de un análisis físico químico del tipo de terreno, deberá seleccionarse el material adecuado, que pueden ser, cobre, copper-clad (acero bañado de cobre), copper-plated (cobre bañado de plata), acero inoxidable, grafito.

La Tabla 6, indica las constantes de materiales para aplicar en las Ecuaciones 33 o 34.

Tabla 6*Constantes del material conductor.*

Descripción	Conductividad del material (% IACS)	α_r a 20 °C (1/°C)	K_0 a 0°C (°C)	T_m (°C)	ρ_r a 20 °C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP [J/(cm ³ ·°C)]
Cobre alta pureza	100	0.00393	234	1083	1.72	3.4
Cobre comercial	97	0.00381	242	1084	1.78	3.4
Copper-clad conductor acero	40	0.00378	245	1084	4.40	3.8
Copper-clad conductor acero	30	0.00378	245	1084	5.86	3.8
Copper-clad varilla acero	17	0.00378	245	1084	10.1	3.8
Aluminum-clad conductor acero	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.561
Acero inoxidable	10.8	0.00377	245	1510	15.90	3.8
Acero galvanizado	9.8	0.00377	245	1400	17.50	4.4
3/4" de granito lavado	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.9
Acero inoxidable 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.0

*Nota: Adaptado de la norma IEEE Std 80-2013.***2.1.9.2 Factor de decremento (D_f)**

Para representar el efecto de una corriente asimétrica (con componente DC) sobre el valor simétrico en todo el tiempo de duración de la falla, se multiplica el factor D_f a la corriente de falla rms I_f , D_f es mayor a 1.

$$I_F = I_f \cdot D_f \quad (35)$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad (36)$$

Donde:

D_f factor de decremento.

t_f duración de la falla [s].

T_a constante de tiempo de componente DC.

Sabiendo que:

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{R} \left(\frac{1}{2\pi f} \right) \quad (37)$$

2.1.9.3 Factor de Dispersión de Corriente (S_f)

El factor de dispersión de corriente S_f , es un factor que multiplica al valor de la corriente total de falla I_f para poder calcular la corriente efectiva que circulará a través de los conductores que conforman la malla a tierra I_g .

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad (38)$$

$$(S_f)_{x/y} = \left| \frac{(Z_{eq})_{x/y}}{R_g + (Z_{eq})_{x/y}} \right| \quad (39)$$

Donde:

$(S_f)_{x/y}$ factor de dispersión de corriente.

$(Z_{eq})_{x/y}$ impedancia equivalente de X cables de guarda de líneas de transmisión e Y neutros de alimentadores de distribución [Ω].

R_g resistencia de la malla a tierra del proyecto en [Ω].

El valor de $(Z_{eq})_{x/y}$, se obtiene de la de los valores indicados en la Tabla 7.

Tabla 7

Impedancias equivalentes de cables de guarda en líneas de transmisión y neutros de distribución.

Número de líneas de transmisión	Número de neutros de distribución	Rtg=15; Rdg=25 R+jX (Ω)	Rtg=100; Rdg=200 R+jX (Ω)
1	1	0.91+j0.485	3.27+j0.652
1	2	0.54+j0.33	2.18+j0.412
1	4	0.295+j0.20	1.32+j0.244
1	8	0.15+j0.11	0.732+j0.133
1	12	0.10+j0.076	0.507+j0.091
1	16	0.079+j0.057	0.387+j0.069
2	1	0.685+j0.302	2.18+j0.442
2	2	0.455+j0.241	1.63+j0.324
2	4	0.27+j0.165	1.09+j0.208

Número de líneas de transmisión	Número de neutros de distribución	Rtg=15; Rdg=25 R+jX (Ω)	Rtg=100; Rdg=200 R+jX (Ω)
2	8	0.15+j0.10	0.685+j0.122
2	12	0.10+j0.07	0.47+j0.087
2	16	0.08+j0.55	0.366+j0.067
4	1	0.45+j0.16	1.3+j0.273
4	2	0.34+j0.15	1.09+j0.22
4	4	0.23+j0.12	0.817+j0.16
4	8	0.134+j0.083	0.546+j0.103
4	12	0.095+j0.061	0.41+j0.077
4	16	0.073+j0.05	0.329+j0.06
8	1	0.27+j0.08	0.72+j0.152
8	2	0.23+j0.08	0.65+j0.134
8	4	0.17+j0.076	0.543+j0.11
8	8	0.114+j0.061	0.408+j0.079
8	12	0.085+j0.049	0.327+j0.064
8	16	0.067+j0.041	0.273+j0.052
12	1	0.191+j0.054	0.498+j0.106

Nota: Adaptada de la norma IEEE Std 80-2013 (Tabla C.1).

Este factor es importante si se quiere optimizar el costo de la construcción de la malla a tierra, en resumen, considera el camino adicional al paso de la corriente de falla a través de cables de neutro del sistema, tuberías enterradas, pantalla de cables de acometidas aterradas desde el punto de entrega, otros elementos que puedan conducir parte de la corriente total de falla.

2.1.9.4 Factor de Proyección Correctivo (C_p).

C_p : Factor de proyección correctivo que explica el aumento futuro de la falla durante su vida útil. Para sistema de distribución es típico un:

$$C_p=125\% \quad (40)$$

2.1.9.5 Máxima Corriente de Malla (I_c).

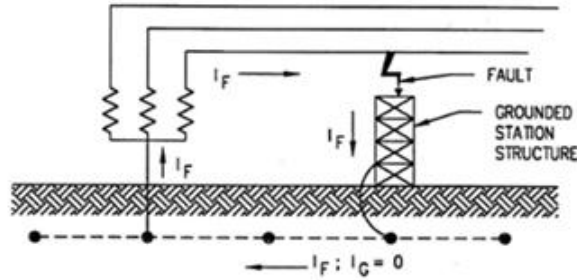
La máxima corriente de falla que circulará a través de la malla a tierra, luego de aplicar los diferentes factores de corrección viene dado por la siguiente ecuación:

$$I_G = C_p \cdot D_f \cdot S_f \cdot I_f \quad (41)$$

Los gráficos a continuación muestran casos típicos de distribución de la corriente de falla, puede observarse los casos particulares donde $I_G=0$ y $S_f=1$.

Figura 20

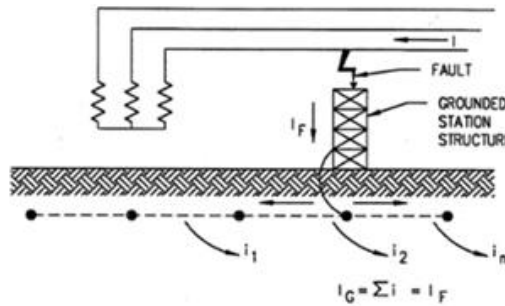
Falla dentro de la subestación particular, neutro local aterrado.



Nota: Tomado de IEEE Std 80-2013.

Figura 21

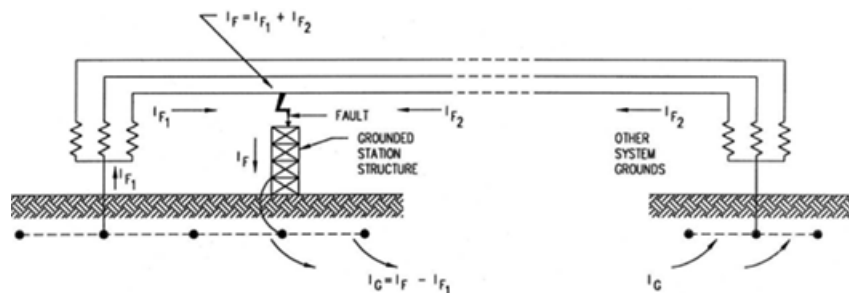
Falla dentro de la subestación particular, neutro aterrado en locación remota.



Nota: Tomado de IEEE Std 80-2013.

Figura 22

Falla dentro de la subestación particular, neutro local aterrado y también otros puntos.



Nota: Tomado de IEEE Std 80-2013.

Para sistemas de utilización en media tensión, líneas de transmisión igual a cero, alimentadores de distribución igual a cero, por tanto Sf es igual a 1.

2.1.9.6 Cálculo de la Resistencia de la Malla a Tierra (R_g).

La Ecuación 42 calcula el valor de la resistencia a tierra de un plato circular metálico montado superficialmente. Esta primera ecuación da una primera aproximación.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (42)$$

Donde:

ρ es la resistividad aparente del terreno idealmente uniforme [Ω -m].

A es al área ocupada por la malla a tierra [m^2].

Laurent y Nieman propusieron la Ecuación 43, esta adiciona el efecto de la longitud de conductores enterrados en una malla. Para mallas sin varillas verticales, puede colocarse la longitud total de conductores directamente; para aquellas donde existan varillas verticales, la longitud total deberá incrementarse ya que las varillas tienen mayor efectividad.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (43)$$

Donde:

L_T es la longitud total de conductor enterrado en la malla [m].

2.1.9.6.1 Ecuación de Sverak.

Sverak trabajó en la expansión de la Ecuación 43 para una malla enterrada a cierta profundidad.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (44)$$

Donde:

h es la profundidad de enterramiento de la malla [m].

2.1.9.6.2 Ecuación de Schwarz.

Schwarz desarrolló una serie de ecuaciones que permiten calcular la resistencia total de una malla a tierra de suelo homogéneo, considera los efectos de conductores enterrados, electrodos verticales, y el efecto mutuo. La Ecuación 45 calcula la resistencia de la malla, representa el equivalente de la resistencia de los conductores horizontales, los electrodos verticales, y la resistencia mutua entre ambos.

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (45)$$

Donde:

R_1 es la resistencia de los conductores horizontales [Ω].

R_2 es la resistencia de los electrodos verticales [Ω].

R_m es la resistencia mutua entre R_1 y R_2 [Ω].

La resistencia de los conductores horizontales se calcula:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (46)$$

Donde:

L_C es la suma de la longitud de todos los conductores horizontales [m].

a' es $\sqrt{2a \cdot h}$ para conductores enterrados a una profundidad h [m].

a' es a para conductores tendidos superficialmente [m].

$2a$ es el diámetro del conductor [m].

A es el área cubierta por la malla [m^2].

k_1, k_2 son coeficientes de Schwarz.

La resistencia del conjunto de electrodos verticales se calcula:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi \cdot n_R \cdot L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (47)$$

Donde:

L_r es la longitud de cada electrodo vertical [m].

$2b$ es el diámetro de la varilla vertical $[m]$.

n_R es la cantidad de electrodos verticales distribuidos en la malla.

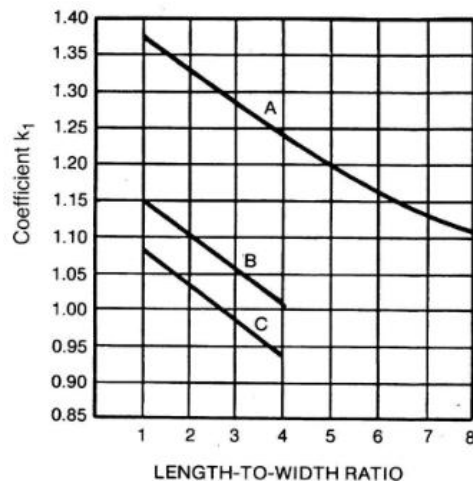
La resistencia mutua se calcula:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{k_1 \cdot L_C}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (48)$$

Las gráficas a continuación permiten calcular los coeficientes k_1 y k_2 .

Tabla 8

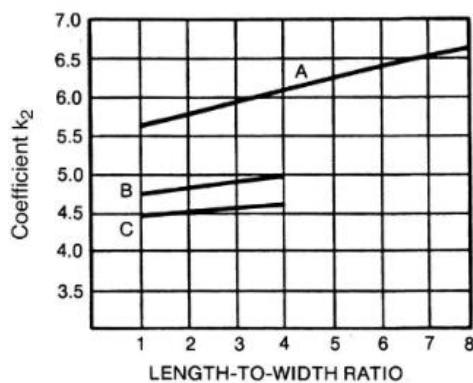
Coeficiente K_1 de la fórmula de Schwarz.



Nota: Adaptada de la norma IEEE Std 80-2013.

Tabla 9

Coeficiente K_2 de la fórmula de Schwarz.



Nota: Adaptado de la norma IEEE Std 80-2013.

2.1.9.7 Cálculo del GPR.

El GPR se calcula:

$$GPR = I_G \cdot R_G \quad (49)$$

2.1.9.8 Cálculo de la Máxima Tensión de Contacto y de Paso.

Según el IEEE Std 80-2013, las ecuaciones para Em y Es se obtuvieron mediante simplificación de ecuaciones diferenciales y fueron validadas con software avanzado. Las ecuaciones aplican para geometrías cuadradas, rectangulares, en triángulo, en L, en T; modelo uniforme de suelo y espaciamientos uniformes de retículos, con o sin electrodos verticales. Las ecuaciones fueron probadas para áreas desde 6.25 m² hasta 10,000 m², que contienen desde 1 a 40 retículos que varían desde 2.5 m a 22.5 m.

2.1.9.8.1 Cálculo de la Tensión de Malla (Em).

La Tensión de Malla, representa la máxima diferencia de tensión de la malla, calculado en el centro del retículo contiguo a la esquina más alejada desde el centro geométrico de la malla. Viene dada por la Ecuación 50.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (50)$$

Donde:

K_m es un factor geométrico.

k_i es un factor correctivo de irregularidad.

$\frac{I_G}{L_M}$ es la ratio de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado.

K_m se calcula:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (51)$$

Para mallas con electrodos verticales distribuidos en el perímetro o ubicados en las esquinas $K_{ii} = 1$.

Para mallas sin electrodos o con pocos electrodos distribuidos en posiciones diferentes a las esquinas o el perímetro.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (52)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (53)$$

El número de conductores en paralelo de una malla rectangular equivalente se calcula:

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (54)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad (55)$$

$n_b = 1$ para mallas cuadradas.

$n_c = 1$ para mallas cuadradas y rectangulares.

$n_d = 1$ para mallas cuadradas, rectangulares y en L.

Para otras geometrías:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (56)$$

$$n_c = \left(\frac{L_x L_y}{A}\right)^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} \quad (57)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (58)$$

L_c es la longitud total de los conductores horizontales [m].

L_p es el perímetro de la malla [m].

A es el área cubierta por la malla [m²].

L_x es la máxima longitud de la malla en la dirección x [m].

L_y es la máxima longitud de la malla en la dirección y [m].

D_m es la máxima distancia entre dos puntos sobre la malla [m].

D es la distancia entre conductores paralelos [m].

d es el diámetro del conductor de la malla [m].

$$k_i = 0.644 + 0.148n \quad (59)$$

Para mallas sin electrodos verticales o con pocos electrodos verticales no distribuidos en las esquinas o perímetro, la longitud efectiva enterrada se calcula:

$$L_M = L_C + L_R \quad (60)$$

L_R es la longitud total de los electrodos verticales [m].

Para mallas con electrodos verticales en las esquinas o perímetro, la longitud efectiva enterrada se calcula:

$$L_M = L_C + [1.55 + 1.22(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}})]L_R \quad (61)$$

L_r es la longitud de cada electrodo vertical [m].

2.1.9.8.2 Cálculo de la Tensión de Paso (Es).

La Ecuación 62, calcula la Tensión de Paso en un punto separado 1 m desde la esquina más alejada de la malla, ubicado en la línea bisectriz externa en esa esquina.

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (62)$$

Para mallas con o sin electrodos verticales, la longitud efectiva de conductores enterrados L_s es:

$$L_s = 0.75L_C + 0.85L_R \quad (63)$$

K_s en el rango $0.25m < h < 2.5m$ viene dado por:

$$K_s = \frac{1}{\pi} [\frac{1}{2h} + \frac{1}{d+h} + \frac{1}{d} (1 - 0.5^{n-2})] \quad (64)$$

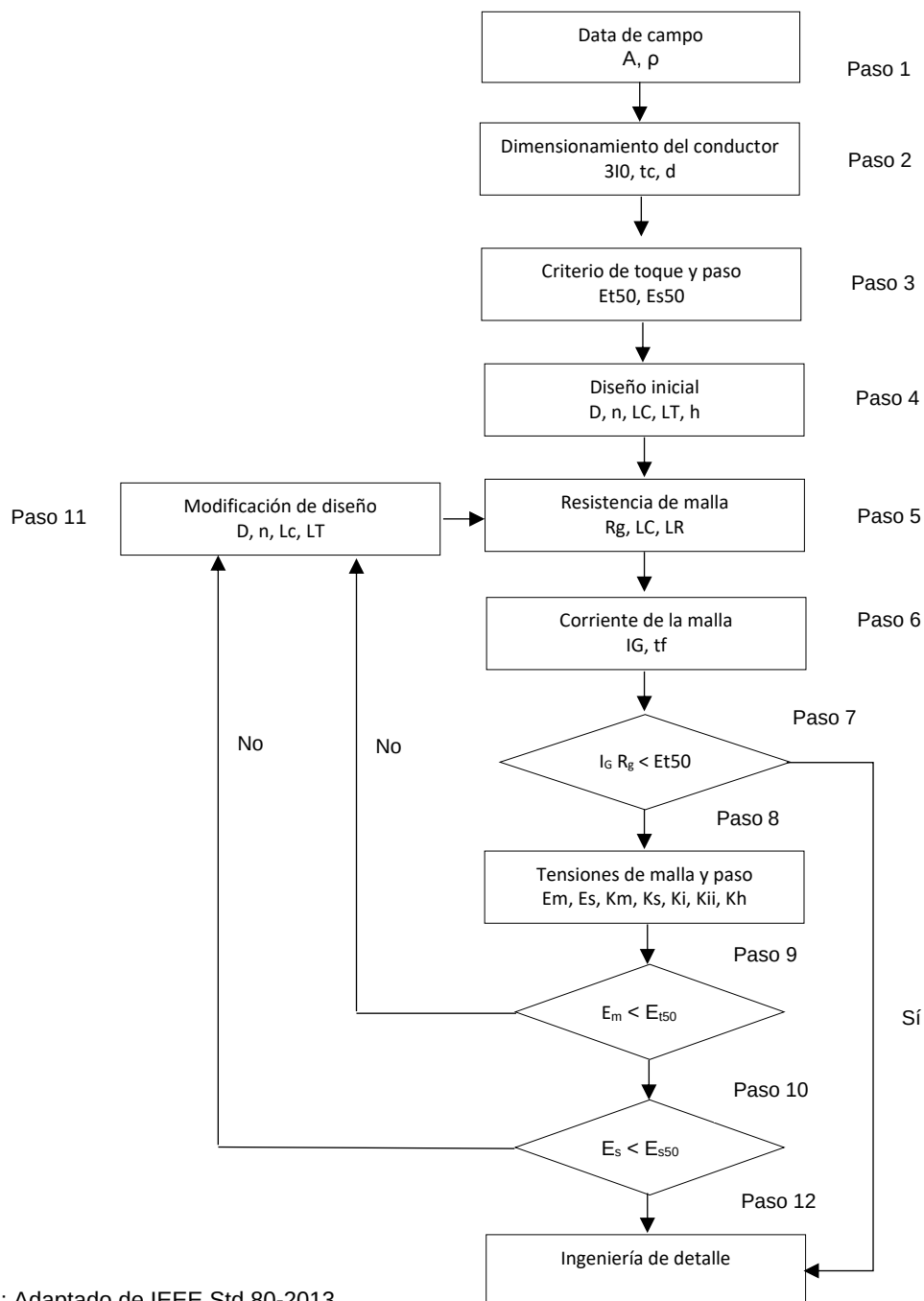
2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Diagrama de Bloque para Diseño de Una Malla a Tierra

La Figura 23 muestra el diagrama bloque para el diseño de un sistema de puesta a tierra para protección de personas con peso mínimo de 50kg (acorde al promedio peruano).

Figura 23

Diagrama de bloques para el diseño de mallas a tierra según metodología IEEE Std 80-2013.



Nota: Adaptado de IEEE Std 80-2013.

Donde:

Tabla 10

Leyenda de variables para el diseño de mallas a tierra según metodología IEEE Std 80-2013.

Símbolo	Descripción
A	Área total encerrada por la malla (m ²)
ρ	Resistividad del terreno (Ω -m)
ρ_s	Resistividad de la capa superficial (Ω -m)
3I0	Valor de corriente de falla simétrica para dimensionamiento de conductor (A)
ts	Duración de la exposición para determinar corriente permisible en el cuerpo (s)
tc	Duración de la corriente de falla para dimensionamiento de conductores de tierra (s)
d	Diámetro del conductor de la malla (m)
Et50	Tensión de toque permisible para una persona de 50kg (V)
Es50	Tensión de paso permisible para una persona de 50kg (V)
D	Distancia entre dos conductores paralelos de la malla (m)
Dm	Máxima distancia en dos puntos cualquiera en la malla (m)
n	Factor geométrico compuesto por factores na, nb, nc, y nd
n _R	Número de varillas dispuestas en la malla
Lc	Longitud total de los conductores de la malla (m)
LM	Longitud efectiva de LC +LR para la tensión de malla Em (m)
LT	Longitud total del conductor enterrados incluyendo malla y varillas (m)
LR	Longitud total de las varillas (m)
Lr	Longitud de varillas en cada locación (m)
LS	Longitud efectiva de LC +LR para la tensión de paso Es (m)
Lx	Máxima longitud de conductores en la dirección la dirección x (m)
Ly	Máxima longitud de conductores en la dirección la dirección y (m)
Rg	Resistencia de la malla (Ω)
h	Profundidad a la que se encuentra enterrada la malla sin considerar capa superficial (m)
hs	Espesor de la capa superficial (m)
Sf	Factor de división de la corriente de falla
Df	Factor de decremento para determinar máxima corriente en la malla
Cs	Factor de derrateo de capa superficial
IG	Corriente máxima a través del sistema de puesta a tierra (A)
Ig	Corriente simétrica de la malla (A)
tf	Duración de la corriente de falla para determinar Df (s)
Emm50	Tensión de toque metal-metal para cuerpos de 50kg (V)
Es	Tensión de paso entre una esquina de la malla y 1 punto alejado 1m diagonalmente (V)
Em	Tensión en el centro de la grilla de una esquina (V)
K	Factor de reflexión entre diferentes resistividades
Km	Factor de espaciamiento para la tensión de malla Em

Símbolo	Descripción
Ks	Factor de espaciamiento para la tensión de paso Es
Ki	Factor de corrección de la geometría de la malla
Kii	Factor de corrección que ajusta el efecto de los conductores en las esquinas de la malla
Kh	Factor corrección que ajusta los efectos de profundidad de malla

Nota: Adaptado de la norma IEEE Std 80-2013

2.2.2 Descripción Paso a Paso para el Diseño de Mallas a Tierra

Pasos para el diseño de mallas a tierra adaptados de IEEE Std 80-2013, aplicados a plantas industriales y la realidad peruana:

Paso 1: Empieza con definir el layout de la planta, donde debe definirse el área de subestaciones y áreas principales, en especial los equipos críticos; este layout da una referencia del área A necesaria para la malla a tierra. Se debe realizar mediciones de resistividad del suelo, con ello calcular el perfil de resistividad y los datos para modelar el terreno, ya sea suelo uniforme o suelo de dos capas. Tener presente que el IEEE Std 80-2013 emplea una resistividad equivalente para suelo uniforme. Emplear Ecuaciones 2 ó 3, Ecuaciones 5 ó 6.

Paso 2: Dimensionar el calibre del conductor de la malla. Se debe considerar la máxima corriente de falla que el sistema pueda alcanzar en un futuro, cualquier conductor del sistema de puesta a tierra debe ser capaz de conducirlo, esta corriente se calcula a partir de los valores de cortocircuito en el punto de entrega que definen las empresas distribuidoras de energía en su carta de Factibilidad y Punto de Entrega; también, si la situación lo amerita, se halla a partir de estudios de cortocircuito con software similares a Power Factory DigSilent o ETAP. Se selecciona la máxima corriente entre la falla monofásica y la falla bifásica a tierra de los cortocircuitos en media tensión y baja tensión. El tiempo t_c debe ser igual al tiempo de despeje máximo posible (incluyendo el respaldo), se considera igual a t_s , para sistemas de utilización se recomienda 0.5 s. Emplear Ecuaciones 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 40.

Paso 3: Determinar las tensiones de toque y de paso permisibles para personas con peso corporal de 50 kg. Definir el material superficial y el espesor de este. La elección

de tiempo t_s se deja a juicio del ingeniero diseñador, para fines conservadores se considera 0.5s. Emplear Ecuaciones 16, 21, 22.

Paso 4: Realizar el diseño preliminar, debe partir de un anillo que circunscriba toda el área de la malla a tierra, más los conductores en los cruces, teniendo en cuenta la distribución de puntos de conexión de equipos, cajas equipotenciales, estructuras, etc. Luego hay que dar los espaciamientos preliminares entre conductores de la malla y ubicar las varillas de tierra en función a la corriente IG y el área aterrada. Definir profundidad de enterramiento, ubicación de varillas verticales y sección de estos, tamaño de cuadrículas. Para el diseño final deben modificarse la geometría.

Paso 5: Calcular la resistencia de puesta a tierra preliminar en suelo uniforme mediante las ecuaciones de Sverak o Schwarz, Sverak si la malla cuenta con pocas varillas verticales (usualmente las de registro), y Schwarz para mallas que cuenten con varillas distribuidas en el perímetro y/o esquinas. Emplear Ecuaciones 44 para Sverak, y Ecuaciones 45, 46, 47, 48 para Schwarz.

Paso 6: Calcular la máxima corriente a tierra. La corriente IG debe reflejar el máximo valor de la corriente de falla entre el cortocircuito monofásico y bifásico, la ubicación, el factor de decremento y expansión de la red. Emplear Ecuaciones 36, 37, 39, 40, 41.

Paso 7: Calcular el GPR, si en el diseño preliminar el GPR resultase menor que el umbral de tensión de contacto, los cálculos quedan hasta este paso pasando a distribuir los conductores para salidas a equipos y estructuras. Emplear Ecuación 49.

Paso 8: Si no se cumple la condición anterior, calcular la tensión de malla y la tensión de paso. Emplear Ecuaciones 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64.

Paso 9: Si la tensión de malla calculado es menor que el umbral de tensión de contacto, pasar al Paso 10. Si la tensión de malla calculada es mayor que el umbral de tensión de contacto, el diseño debe ser modificado, ir al Paso 11.

Paso 10: Si la tensión de paso fuese menor al umbral de tensión de paso, el diseño sólo necesita la distribución de conductores para salidas a equipos y estructuras. Caso contrario, el diseño preliminar debe ser modificado, ir al Paso 11.

Paso 11: En caso se superen los umbrales de tensiones de contacto y paso, se debe replantear el diseño preliminar. Los replanteos pueden incluir, reducción de espaciamientos de conductores, varillas adicionales de tierra, profundidad, etc.

Paso 12: Después de validarse los criterios de tensión de contacto y paso, se debe realizar la ingeniería de detalle, donde dependiendo la distribución de equipos y estructuras, probablemente se deba agregar porciones de malla y varillas verticales. En el diseño final propuesto de evaluarse el control de tensiones transferidas en la medida de lo posible.

2.2.3 Conceptos Clave para el Diseño de Mallas a Tierra

De las bases teóricas, se tiene que:

- La resistencia del cuerpo humano para efecto de diseño en frecuencia industrial (50 Hz a 60 Hz) será $R_B = 1000\Omega$. Se desprecia la resistencia de contacto mano y pie con estructuras, también la resistencia de zapatos y guantes, y la impedancia del sistema.
- El nivel de daño provocado por el paso de la corriente eléctrica por partes vitales del cuerpo depende de la magnitud, duración de contacto, y frecuencia (Hz) de esta corriente, además de la diferencia de potencial y la trayectoria por el cuerpo. Se debe evitar la fibrilación ventricular. Las ecuaciones 10 y 11 basadas en los estudios empíricos de Dalziel, Lagen, Thurston, y Massogilia, son la referencia para calcular la corriente I_B que no causa fibrilación, en el rango de exposición de 0.03 s a 3.0 s.
- Las tensiones de contacto y tensiones de paso se deben limitar a valores permisibles por el cuerpo humano, usando las Ecuaciones 21, 22, 23, 24 para personas con pesos de 50kg y 70 kg según sea el caso. Para efecto de diseño en Perú, se evalúa para personas de 50kg.

- El material de la capa superficial del suelo sobre la malla a tierra debe tener adecuada evaluación en función a las condiciones particulares de cada planta, esto definirá el valor de C_s a partir de la Ecuación 16 una vez conocido la resistividad de la capa superficial ρ_s y el espesor h_s de este. En plantas industriales normalmente se usa concreto bajo techo que puede considerarse semiseco, en algunas industrias también se usa grava de $\frac{1}{2}$ " con espesor normalmente entre 0.08 m a 0.15 m, cuya resistividad de diseño en condición seca puede ser 5000 Ω -m.
- Los valores del tiempo de exposición t_s , se recomiendan en el rango de 0.25 s a 1.0 s. El Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006 recomienda un valor conservador de 0.5 s.
- Procurar no superar un GPR de 5000 V, se permite una tensión mayor, hasta el máximo nivel de aislamiento del equipo sensible.
- La normativa peruana debe ser usada con cuidado, se puede tomar algunas recomendaciones que superan las exigencias de la norma IEEE Std 80-2013, según lo indica el CNE (2006), (a) El calibre mínimo de cables de conexión equipotencial, cables usados como electrodos, cables de aterramiento de estructuras, columnas metálicas, estructuras en general, equipos de potencia, neutro de transformadores, deben ser 70mm²; (b) Todos los circuitos derivados deberán estar dotados con interruptor diferencial con sensibilidad de 30 mA; (c) Se debe aterrizar armaduras de cables, shield de terminaciones de media tensión, canalizaciones, tuberías, pantallas de guarda y tableros, con conductores de cobre no menores de 25 mm²; (d) Un electrodo de varilla debe tener las siguientes características, diámetro no inferior a 16 mm ($\frac{5}{8}$ ") para electrodos de acero-cobre y 13 mm ($\frac{1}{2}$ ") para electrodos de cobre, tener una longitud no menor de 2 m.

2.2.4 Terminología

Modelamiento: Es la representación matemática del sistema de puesta a tierra, que se utiliza para analizar el comportamiento eléctrico de la malla. El modelamiento se puede realizar mediante software o a mano con expresiones matemáticas.

Falla a tierra: Es la situación cuando un conductor eléctrico inyecta corriente eléctrica al suelo luego de entrar en contacto involuntario con este.

Electrodo: Son los conductores, barras, o cualquier otro elemento que se utiliza para hacer contacto con el terreno y garantizar la disipación de corriente.

Tensión de malla: Máximo tensión de contacto dentro de la malla, según la metodología IEEE Std 80-2013, esta se da en el centro del retículo más alejado de la malla.

Malla a tierra: Es una estructura formada por una red conductores generalmente de cobre enterrados en el suelo para disipar corrientes de falla hacia el terreno.

Resistividad del suelo: Es una propiedad intrínseca del suelo que representa su grado de oposición al paso de la electricidad. Depende de factores como la composición del suelo, la humedad y la temperatura. Se mide en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$).

Resistencia aparente: Es la oposición al flujo de corriente eléctrica ofrecida por el sistema de puesta a tierra. Se mide en ohm (Ω) y depende de factores como la resistividad del suelo, el tamaño y la forma de la malla, y las condiciones de humedad.

Norma N° 018-2002-EM/DGE: Norma peruana para procedimientos para la elaboración de proyectos y ejecución de obras en sistemas de distribución y sistemas de utilización en media tensión en zonas de concesión de distribución.

Sistema de Utilización en media tensión: Según N° 018-2002-EM/DGE, es el conjunto de instalaciones eléctricas aguas abajo del punto de entrega que llegan hasta los bornes de baja tensión del transformador y a partir del cual se dota de energía eléctrica a un predio. La acometida aérea o subterránea puede recorrer la vía pública o propiedad privada, la subestación siempre se ubicará dentro del predio del usuario.

Cemento conductivo: Es una mezcla de cemento Portland con aditivos como grafito, carbón o metales en polvo, que confieren capacidad para conducir electricidad. Es muy usado en mallas a tierra. En otros países es conocido como mejorador de suelos.

Equipotencialidad: Condición en la que todos los puntos de un sistema eléctrico tienen el mismo potencial eléctrico, es decir, no existe diferencia de tensión entre ellos.

GPR (Ground Potential Rise): Es el aumento temporal de la tensión en el suelo alrededor de un sistema de puesta a tierra durante una falla, representa la diferencia de potencial del punto con mayor potencial en la malla respecto a una tierra remota.

Acoplamiento capacitivo de tierra: Se refiere al fenómeno en el cual dos sistemas eléctricos o tierras separadas se interconectan de manera no directa mediante un campo eléctrico. Este acoplamiento ocurre debido a la proximidad de los conductores o sistemas, lo que genera una transferencia de energía entre ellos.

Fibrilación ventricular: La fibrilación ventricular es una arritmia cardíaca grave caracterizada por una actividad eléctrica desorganizada en los ventrículos del corazón. Esto impide que el corazón lata de manera efectiva, causando una pérdida de circulación sanguínea. Es una emergencia médica que puede llevar a un paro cardíaco y requiere intervención inmediata, como desfibrilación, para restablecer el ritmo normal.

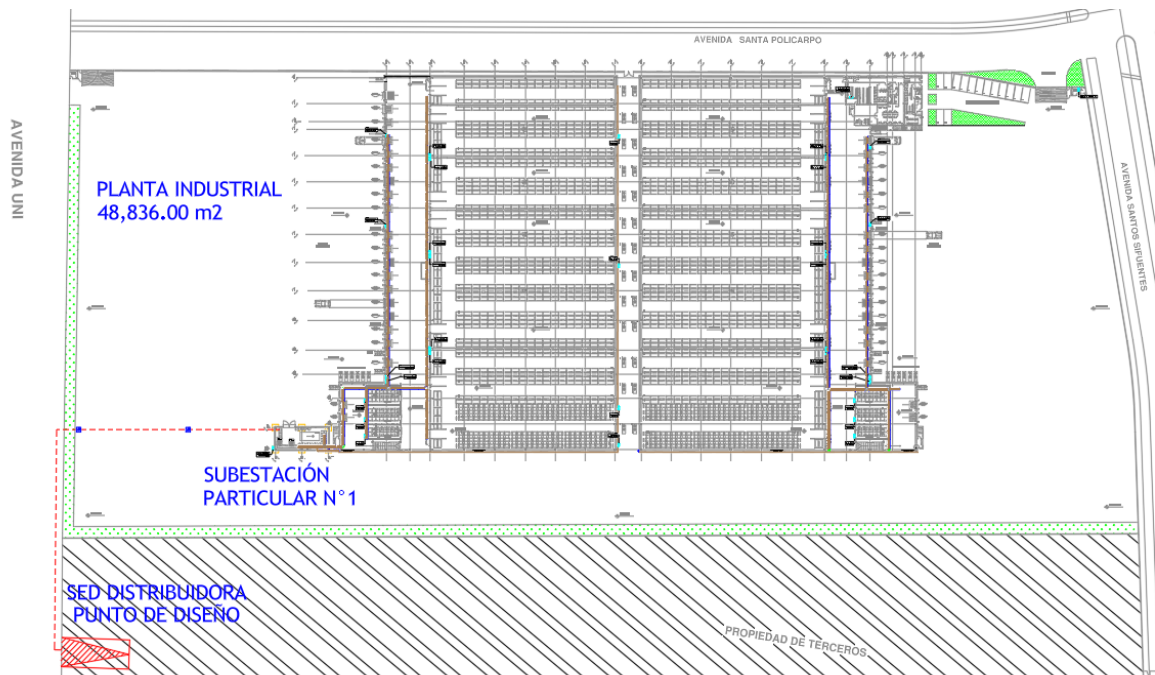
Capítulo III: Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1 Descripción del Modelamiento

Se realiza un modelamiento del sistema de puesta a tierra sobre una planta con layout hipotético de 48,836 m², donde en 28 casos de diseño basados en la combinación de variables independientes se cubre las opciones representativas de extensión de área que pueda cubrir una malla a tierra en cualquier planta industrial. En la Figura 24 se visualiza la planta hipotética con 18,414.00 m² de área techada que comprende la zona de procesos, 01 subestación particular de 200 m². En la Figura 25 se visualiza la misma planta, pero con 02 subestaciones particulares de 200 m² cada una. Puede verse en ambas Figuras que la Subestación Eléctrica de Distribución (SED) se ubica en el predio de la planta vecina, el punto de diseño se ubica en una celda de salida dentro de la SED, y a partir de esta se suministra energía a la planta mediante 140 m de electroductos subterráneos de media tensión.

Figura 24

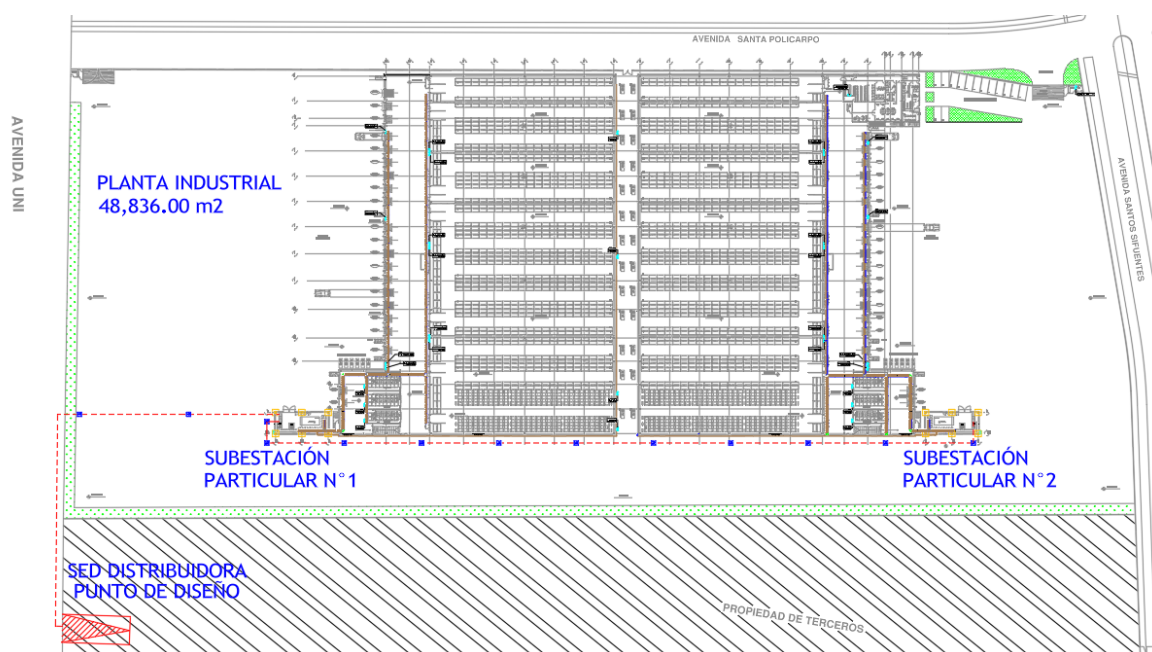
Planta modelo con layout hipotético con 01 subestación particular.



Nota: Elaboración propia.

Figura 25

Planta modelo con layout hipotético con 02 subestaciones particulares.



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 24, la Subestación Particular N°1 comprende de:

- 01 transformador tipo seco de 3 MVA, 10-22.9/0.46 kV, Dyn5-Yyn6.
- 01 transformador tipo seco de 0.63 MVA, 10-22.9/0.40 kV, Dyn5-Yyn6.

En la Figura 25, la Subestación Particular N°1 y Subestación Particular N°2 comprende cada una de:

- 01 transformador tipo seco de 1.6 MVA, 10-22.9/0.46 kV, Dyn5-Yyn6.
- 01 transformador tipo seco de 0.32 MVA, 10-22.9/0.40 kV, Dyn5-Yyn6.

La Tabla 11 muestra la combinación de variables independientes, los cuales definen el punto de partida de cada caso de diseño.

Tabla 11

Variables independientes para los 28 casos de diseño.

Caso	Configuración	Resistividad	N° SE	Icc [A]	ps [Ω-m]	Área [m2]
1	Pozos a tierra independientes	Baja	1	8301.00	5000.00	-
2	Malla a tierra subestación	Baja	1	8301.00	5000.00	200
3	Malla a tierra perímetro naves	Baja	1	8301.00	5000.00	21251.67
4	Pozos a tierra independientes	Media	1	8301.00	5000.00	-
5	Malla a tierra subestación	Media	1	8301.00	50000.00	200

Caso	Configuración	Resistividad	N° SE	Icc [A]	ps [Ω -m]	Área [m2]
6	Malla a tierra perímetro naves	Media	1	8301.00	5000.00	21251.67
7	Malla a tierra reticulada	Media	1	8301.00	5000.00	21251.67
8	Pozos a tierra independientes	Baja	2	8301.00	5000.00	-
9	Malla a tierra subestación	Baja	2	8301.00	5000.00	400
10	Malla a tierra perímetro naves	Baja	2	8301.00	5000.00	21451.67
11	Pozos a tierra independientes	Media	2	8301.00	5000.00	-
12	Malla a tierra subestación	Media	2	8301.00	50000.00	400
13	Malla a tierra perímetro naves	Media	2	8301.00	5000.00	21451.67
14	Malla a tierra reticulada	Media	2	8301.00	5000.00	21451.67
15	Pozos a tierra independientes	Baja	1	160.00	5000.00	-
16	Malla a tierra subestación	Baja	1	160.00	5000.00	200
17	Malla a tierra perímetro naves	Baja	1	160.00	5000.00	21251.67
18	Pozos a tierra independientes	Media	1	160.00	5000.00	-
19	Malla a tierra subestación	Media	1	160.00	5000.00	200
20	Malla a tierra perímetro naves	Media	1	160.00	5000.00	21251.67
21	Malla a tierra reticulada	Media	1	160.00	5000.00	21251.67
22	Pozos a tierra independientes	Baja	2	160.00	5000.00	-
23	Malla a tierra subestación	Baja	2	160.00	5000.00	400
24	Malla a tierra perímetro naves	Baja	2	160.00	5000.00	21451.67
25	Pozos a tierra independientes	Media	2	160.00	5000.00	-
26	Malla a tierra subestación	Media	2	160.00	5000.00	400
27	Malla a tierra perímetro naves	Media	2	160.00	5000.00	21451.67
28	Malla a tierra reticulada	Media	2	160.00	5000.00	21451.67

Nota: Elaboración propia.

Leyenda por columna:

Configuración: representa la topología de la puesta a tierra profunda.

- Pozos a tierra independientes: son los pozos separados por sistema, se consideró, el de media tensión, el de baja tensión, el neutro de baja tensión, y electrónico.
- Malla a tierra subestación: en una malla a tierra que cubre solo el área de las subestaciones particulares.
- Malla a tierra perímetro naves: es una malla a tierra que cubre parcial o totalmente el área techada de procesos, la distribución de la malla es un anillo o semianillo perimetral sin retículos internos.
- Malla a tierra reticulada: es una malla a tierra distribuido en los 18,414.00 m2 de área techada, las cuadrículas o reticulado son de 8.0m de lado en promedio.

Resistividad: es el nivel de resistividad aparente del suelo, que para el estudio es de perfil descendente. Los valores son a partir de data de campo de experiencia del tesista medidos con el método Wenner.

- Baja: Son mediciones de campo de terreno de baja resistividad, representada por la Tabla 12. Data medida en Oquendo, Callao, Perú. Esta data se usará para modelar un suelo homogéneo aplicando las expresiones del IEEE Std 80-2013, y a un modelo biestratificado usando el software CYMGRD. Usado en los casos 1,2,3,8,9,10,15,16,17,22,23,24.
- Media: Son mediciones de campo de terreno de mediana resistividad, representada por la Tabla 13. Data medida en Quilmana, Cañete, Perú. Esta data se usa en los casos 4,5,6,7,11,12,13,14,18,19,20,21,25,26,27,28.

Tabla 12

Data de campo de mediciones de baja resistividad. Oquendo, Callao.

MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE SUELO											
Equipo de prueba: EM 4058				Marca: MEGABRAS				Serial: 21D2205			
N°	a (m)	R (Ω)	$\rho=2\pi aR$ (Ω.m)	N°	a (m)	R (Ω)	$\rho=2\pi aR$ (Ω.m)	N°	a (m)	R (Ω)	$\rho=2\pi aR$ (Ω.m)
1	1	5.68	35.7	1	1	3.96	24.9	1	1	5.44	34.15
2	2	1.49	18.7	2	2	1.07	13.43	2	2	1.4	17.6
3	4	0.7	17.6	3	4	0.57	14.43	3	4	0.55	13.77
4	6	0.43	16.07	4	6	0.39	14.71	4	6	0.76	28.8
5	8	0.31	15.8	5	8	0.28	13.87	5	8	0.32	15.9
6	10	0.23	14.53	6	10	0.23	14.64	6	10	0.23	14.45
7	12	0.19	14.47	7	12	0.21	15.47	7	12	0.2	14.8
8	14	0.16	14.44	8	14	0.18	15.71	8	14	0.14	12.2
9	16	0.16	15.72	9	16	0.15	15.53	9	16	0.13	13.5
10	18	0.14	16.02	10	18	0.14	15.96	10	18	0.14	15.75
11	20	0.13	16.64	11	20	0.13	16.95	11	20	0.12	15.35
Dirección 1: Norte - Sur				Dirección 2: Este-Oeste				Dirección 3: Noreste-Suroeste			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 13

Data de campo de mediciones de media resistividad. Cañete, Perú.

MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE SUELO											
Equipo de prueba: EM 4058				Marca: MEGABRAS				Serial: 21D2205			
N°	a (m)	R (Ω)	$\rho=2\pi aR$ ($\Omega.m$)	N°	a (m)	R (Ω)	$\rho=2\pi aR$ ($\Omega.m$)	N°	a (m)	R (Ω)	$\rho=2\pi aR$ ($\Omega.m$)
1	1	24.8	155.83	1	1	17.3	108.69	1	1	22.31	140.19
2	2	10.76	135.25	2	2	7.96	99.99	2	2	10.26	128.98
3	4	4.03	101.25	3	4	3.82	95.99	3	4	4.12	103.5
4	6	2.32	87.54	4	6	2.42	91.4	4	6	2.29	86.41
5	8	1.71	86	5	8	1.7	85.4	5	8	1.66	83.5
6	10	1.35	84.6	6	10	1.3	81.89	6	10	1.27	80.11
7	12	1.09	82.5	7	12	0.98	73.7	7	12	1.07	80.65
8	14	0.87	76.45	8	14	0.73	64.49	8	14	0.93	82
9	16	0.79	79	9	16	0.55	55.28	9	16	0.79	79.25
10	18	0.67	76.2	10	18	0.45	50.99	10	18	0.58	65.78
11	20	0.59	73.92	11	20	0.41	51.56	11	20	0.53	66.51
Dirección 1: Norte - Sur				Dirección 2: Este-Oeste				Dirección 3: Noreste-Suroeste			

Nota: Elaboración propia.

N° SE: es la cantidad de subestaciones particulares en cada caso. Para efecto del estudio, se plantea hasta 02 subestaciones.

Icc: es el valor de la corriente de falla a tierra en media tensión en la subestación particular, calculada a partir de la información entregada por la empresa distribuidora. Para el estudio:

- 8,301.00 A: valor de alto nivel de corriente, propuesto como valor referencial para suministros en 22.9 kV, 20 kV, y aquellas con conexión estrella del transformador de potencia de la empresa distribuidora de energía. En la Tabla 14 se muestra los resultados de cálculo de cortocircuito; para el estudio, 310 es el máximo entre Icc1f y Icc2f-t en bornes de media tensión de transformadores. La data de la Tabla 14 se usa en los casos 1 al 14.

Tabla 14

Resultados de cálculo de cortocircuito nivel alto.

CORTOCIRCUITO NIVEL ALTO			
Puntos	Icc 1f [kA]	Icc 2f-t [kA]	Icc 3f [kA]
PMI	8.756	9.109	8.101
Bornes MT transformadores	8.201	8.301	7.73
Bornes BT transformador 1.6 MVA	31.199	31.678	30.58
Bornes BT transformador 0.4 MVA	9.346	9.362	9.328

Nota: Elaboración propia.

- 160.00 A: bajo nivel de corriente, propuesto como valor referencial para suministros en 10 kV y aquellas con conexión delta o neutro aislado del transformador de potencia del distribuidor de energía. 3I0 es el máximo entre Icc1f y Icc2f-t en bornes de media tensión de transformadores. La data de la Tabla 15 se usa en los casos 15 al 28.

Tabla 15

Resultados de cálculo de cortocircuito nivel bajo.

CORTOCIRCUITO NIVEL BAJO			
Puntos	Icc 1f [kA]	Icc 2f-t [kA]	Icc 3f [kA]
PMI	0.167	0.164	8.49
Bornes MT transformadores	0.16	0.158	8.101
Bornes BT transformador 1.6 MVA	31.199	31.678	30.58
Bornes BT transformador 0.4 MVA	9.346	9.362	9.328

Nota: Elaboración propia.

ρ_s : es el valor de la resistividad del material de la capa superficial de suelo que cubre la malla a tierra.

- 5,000 [Ω -m]: valor representativo de pisos con grava seca, especialmente en la subestación bajo techo.
- 50,000 [Ω -m]: valor representativo conservador de pisos de concreto semiseco, especialmente en la subestación bajo techo.

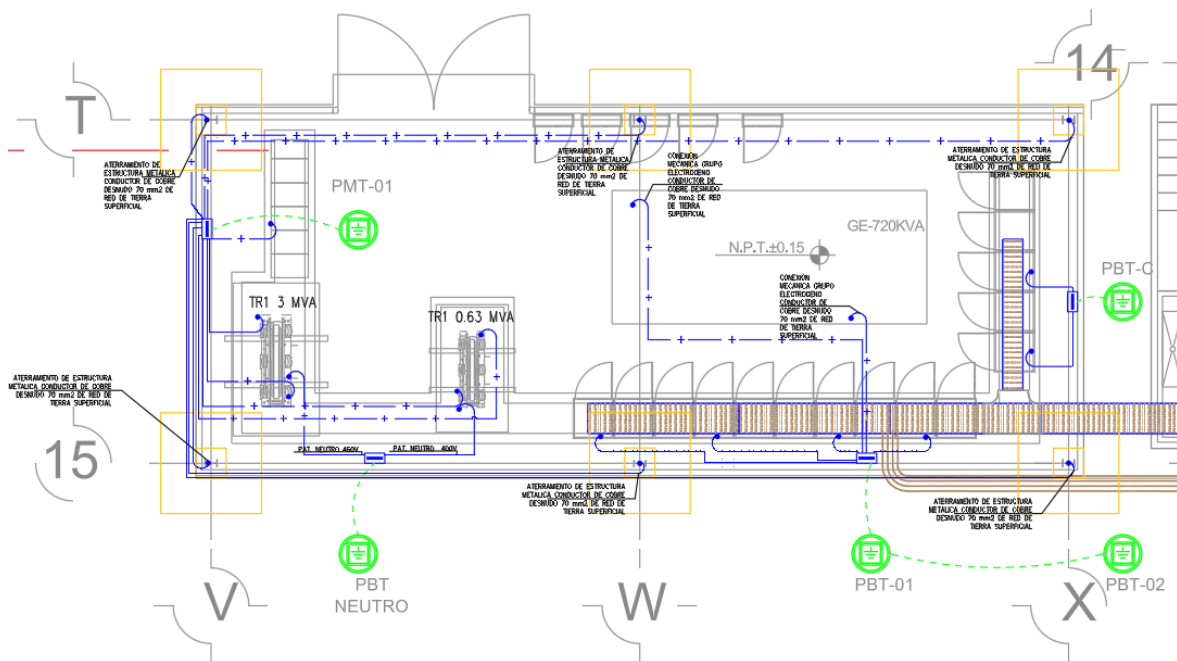
Área: es el área que se extiende la malla a tierra, asociado a la configuración de la puesta a tierra, ítem “A”.

3.2 Caso 1

En la Figura 26 se muestra el layout de la puesta a tierra con pozos a tierra independientes. PMT-01 es el pozo de media tensión, PBT NEUTRO es el pozo del neutro de baja tensión, PBT-01 y PBT-02 son los pozos de baja tensión, PBT-C es el pozo de comunicaciones. Estos pozos tienen una separación de 5.0 m.

Figura 26

Layout puesta a tierra caso 1.



Nota: Elaboración propia.

3.2.1 Modelamiento Basado en Metodología IEEE Std 80-2013

El IEEE Std 80-2013 está orientado al diseño de mallas a tierra, sin embargo, para el estudio de un pozo a tierra se hace una adaptación de la metodología paso por paso:

Paso 1: Data de campo (A,p)

Aplicando la Ecuación 1 en la data de la Tabla 12, tenemos:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{35.7+18.7+17.6+16.07+15.8+14.64+15.47+15.71+15.72+16.02+16.95}{11} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre un pozo a tierra geoméricamente ante gradientes de potencial podría presumirse que es cero.

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3lo, t_c, d)

De la Tabla 14:

$3I_0$ en media tensión = 8,301 A

$3I_0$ en baja tensión = 31,678 A

La corriente de falla para la selección del conductor principal es:

$$3I_0(C_p) = 31,678(1.25) = 39.598 \text{ kA}$$

Aplicando la Ecuación 34 y los datos de la Tabla 6 para un conductor de cobre comercial, la sección mínima del conductor es:

$$A_{mm^2} = 39.598 \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3.4 \times 10^{-4}}{0.5 \times 0.00381 \times 1.78}\right) \times \ln\left(\frac{242+700}{242+30}\right)}}$$

$$A_{mm^2} = 112.20 \text{ mm}^2 \cong 120 \text{ mm}^2$$

Se asume $T_m = 700^\circ\text{C}$ por fines conservadores, tal como indica el IEEE Std 80-2013 en su página 131.

Se asume el tiempo de duración de la corriente de falla $t_c = 0.5 \text{ s}$.

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50} , E_{s50})

Aplicando la Ecuación 16

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{18.03}{5000}\right)}{2(0.15) + 0.09} = 0.7701$$

Calculando E_{t50} , E_{s50}

$$E_{t50} = (1000 + 1.5(5000)(0.7701)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 1,111.51 \text{ V}$$

$$E_{s50} = (1000 + 6(5000)(0.7701)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D , n , L_c , L_T , h)

Para pozos a tierra:

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$2b = 0.05 \text{ m}$ (equivalente en diámetro de capa de cemento conductivo).

$$n_R = 1$$

Paso 5: Resistencias del pozo a tierra

Reemplazando $n_R = 1$ la Ecuación 47 queda:

$$R_2 = R_g = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 \right]$$

$$R_g = \frac{18.03}{2\pi \cdot 2.4} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.025} \right) - 1 \right] = 4.26 \, \Omega$$

Paso 6: Corriente del pozo a tierra (I_G , t_f)

Se asume la duración de la falla $t_f = 0.5$ s, y para un sistema de utilización en media tensión $X/R = 10$. Reemplazando en las Ecuaciones 36 y 37:

$$T_a = 10 \left(\frac{1}{2\pi(60)} \right) = 0.02652$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.02652}{0.5} \left(1 - e^{-\frac{2(0.5)}{0.02652}} \right)} = 1.0262$$

Para un sistema de utilización radial, $S_f = 1$, reemplazando en la Ecuación 41:

$$I_G = (1.25)(1.0262)(1)(8,301) = 10,647.93 \, \text{A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 10,647.93(4.26) = 45,389.93 \, \text{V}$$

$\text{GPR} = 45,389.93 \, \text{V} \gg E_{t50} = 1,111.51 \, \text{V}$, este pozo a tierra no limita de ninguna forma las tensiones peligrosas, el cálculo queda en este paso, se debe cambiar de diseño a una malla a tierra.

3.2.2 Modelamiento Mediante Software CYMGRD

La ayuda del software CYMGRD hace sencillo el proceso de cálculo y es modificable fácilmente. A continuación, el detalle de cómo se hace el modelamiento.

Paso 1: Análisis del suelo

En el cuadro de la Figura 27 se hace la selección para modelar un suelo biestratificado, también se carga el espesor y resistividad del material de capa superficial, la duración de la exposición, y el peso del cuerpo.

Figura 27

Cuadro de diálogo Soil Parameter CYMGRD Caso 1.

En el cuadro SM1 se carga la data de campo. Se puede ir inhabilitando algunos puntos de medición, sujeto al porcentaje de error resultante.

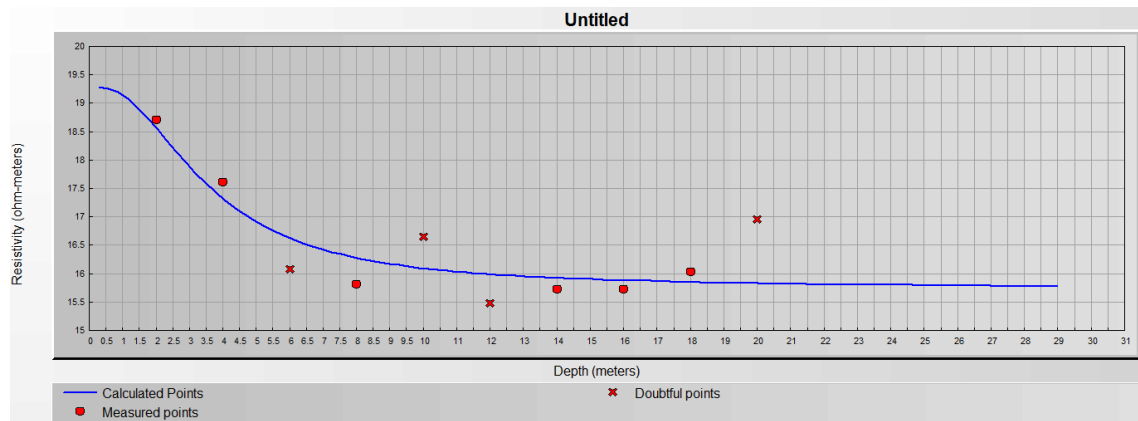
Figura 28

Cuadro de diálogo SM1 CYMGRD Caso 1

		Enabled	Probe distance (m)	Resistance (ohms)	Resistivity (ohm-m)
SM1	1	☐	1	5.682	35.7
	2	☒	2	1.488	18.7
	3	☒	4	0.700	17.6
	4	☒	6	0.426	16.06
	5	☒	8	0.314	15.8
	6	☒	10	0.265	16.64
	7	☒	12	0.205	15.47
	8	☒	14	0.179	15.71
	9	☒	16	0.156	15.72
	10	☒	18	0.142	16.02
	11	☒	20	0.135	16.95
	12	☒			

Figura 29

Perfil de resistividad del suelo con CYMGRD Caso 1.



Con la información anterior, el software calcula la resistividad aparente de la primera y segunda capa, así como el espesor de la primera capa y el porcentaje de error del modelo. También calcula C_s y los umbrales de tensión de contacto y paso.

Figura 30

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 1.

Output Results

Soil Model Measurement Axis

Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor C_s	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

En este paso se carga la información del estudio de cortocircuito de la Tabla 13, la duración de la falla, la relación X/R . Para un sistema de utilización radial, la contribución remota es 100%, R_{tg} y R_{dg} no se aplica debido a que S_f es igual a 1, es decir, toda la corriente de falla es conducido por el pozo a tierra.

Figura 31

Cuadro para carga de corriente de falla, duración de la falla, X/R, contribución remota CYMGRD Caso 1.

	Enabled	Bus ID	LL-Voltage (KV)	LG Fault Current (amps)	Fault Duration (secs)	Remote Contribution (%)	LG X/R	Rtg (ohms)	Transmission Lines	Rdg (ohms)	Distribution Feeders
1	☒	Unknown	22.9	10647.93	0.5	100	10	15	0	25	0
2	☒					100					

También se carga la especificación de la impedancia en paralelo al cable alimentador de media tensión a la planta, que, para sistemas de utilización es de valor infinito.

Figura 32

Cuadro de diálogo para carga de parámetros de la red CYMGRD Caso 1

Se selecciona el material del conductor y el electrodo vertical (jabalina).

Figura 33

Cuadro de diálogo para selección de material de conductor y electrodo CYMGRD.

	Enabled	Type	Material	Conductivity	Alpha Factor (1/C°)	Pr (μohm-cm)	TCAP (J/cm3.°C)	Tm
1	☐	Conductor	Copper anneal	100	0.00393	1.72	3.42	1083
2	☒	Conductor	Copper comm	97	0.00381	1.78	3.42	1084
3	☐	Conductor	Copper_clad s	40	0.00378	4.4	3.85	1084
4	☐	Conductor	Copper_clad s	30	0.00378	5.86	3.85	1084
5	☐	Conductor	Aluminum EC	61	0.00403	2.86	2.56	657
6	☐	Conductor	Aluminum 500	53.5	0.00353	3.22	2.6	652
7	☐	Conductor	Aluminum 620	52.5	0.00347	3.28	2.6	654
8	☐	Conductor	Aluminum cla	20.3	0.0036	8.48	3.58	657
9	☐	Conductor	Copper Strip	58	0.0038	1.78	3.475	1083
10	☒	Rod	Copper_clad s	20	0.00378	8.62	3.85	1084
11	☐	Rod	Aluminum EC	61	0.00403	2.86	2.56	657
12	☐	Rod	Aluminum 500	53.5	0.00353	3.22	2.6	652
13	☐	Rod	Aluminum 620	52.5	0.00347	3.28	2.6	654
14	☐	Rod	Steel 1020	10.8	0.0016	15.9	3.28	1510
15	☐	Rod	Stainless clad	9.8	0.0016	17.5	4.44	1400
16	☐	Rod	Zinc-coated st	8.6	0.0032	20.1	3.93	419
17	☐	Rod	Stainless stee	2.4	0.0013	72	4.03	1400

En la Figura 34 se muestra los resultados del cálculo del software, los resultados son calibres mínimos de conductores y electrodos, estos calibres son inferiores al mínimo indicado en el IEEE Std 80-2013 y el CNE, por tanto, solo es referencial para efecto de visualizar la tolerancia respecto al calibre seleccionado. Para el diseño se emplea el conductor de cobre de 120 mm² y varilla de cobre de 5/8", conforme los resultados del paso 2 de la metodología IEEE.

Figura 34

Resultados de dimensionamiento mínimo requerido de conductor y electrodo CYMGRD.

Parameters

Bus ID	Unknown
LG Fault Current	10647.9 amps
Fault Duration	0.5 secs
Ambient Temperature	30 °C

Output Results

Decrement Factor	1.02618

Conductor Sizing (Minimum required)

Material	Conductivity (%)	Tm (°C)	Kf	Area (mm ²)	Nominal Size
Copper commercial hard-drawn	97	1084	6.98714	27.3489	2/0AWG

Rod Sizing (Minimum required)

Material	Conductivity (%)	Tm (°C)	Kf	Diameter (mm)	Nominal Size
Copper clad steel 20%	20	1084	14.4624	8.48976	1/2"

Paso 3: Análisis del pozo a tierra

En este paso se importa el archivo DWG del diseño propuesto, el software CYMGRD adapta el archivo y lo visualiza en un layout equivalente.

Figura 35

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 1.

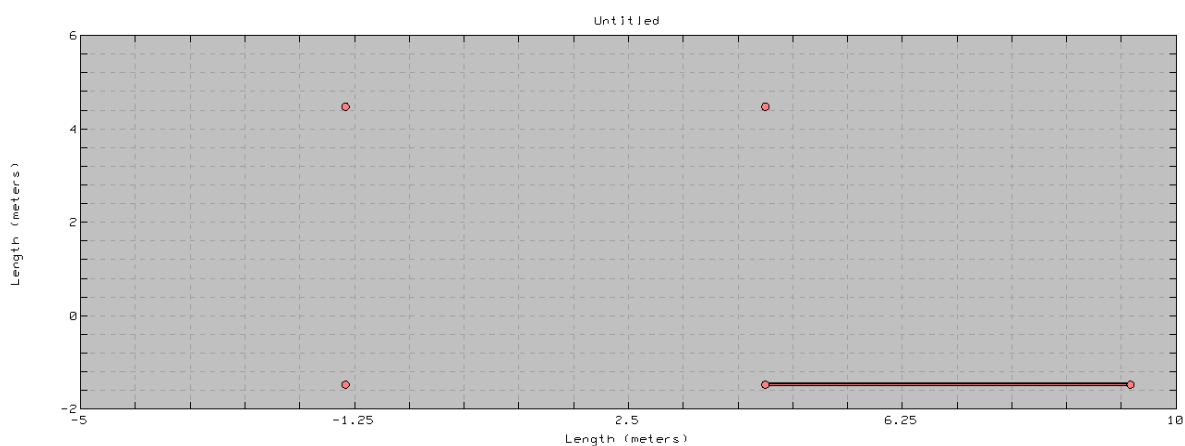
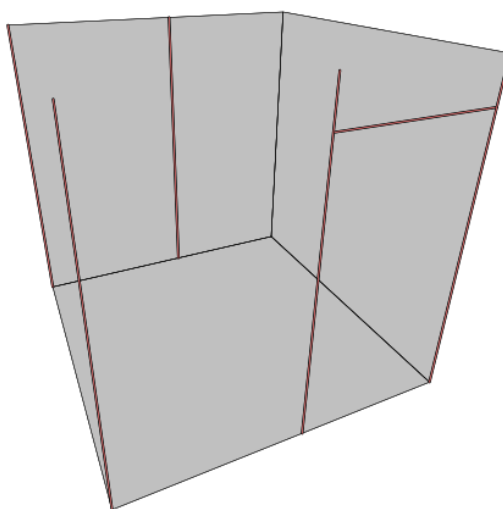


Figura 36

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 1.



En las Figura 37 y 38 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos del pozo a tierra.

Figura 37

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 1.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	4.375	-1.475	0.6	9.375	-1.475	0.6	1	Select		14.1

Figura 38

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 1.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	-1.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
2	☒	Primary	-1.375	4.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
3	☒	Primary	4.375	4.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
4	☒	Primary	4.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
5	☒	Primary	9.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

A continuación, se ve los resultados del cálculo de la resistencia del pozo a tierra y el GPR, que, tal como advierte el software, excede al valor de la tensión L-L de la red.

Figura 39

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 1.

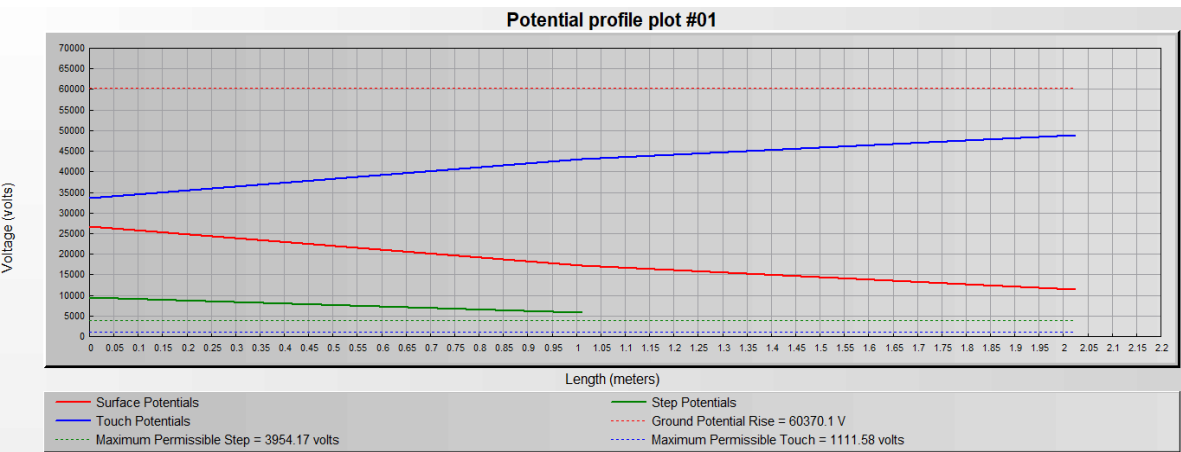
Output Results	
Ground Potential Rise	60370.1 volts
Calculated Ground Resistance	5.52805 ohms
Equivalent Resistance	5.525 ohms
Warning: The GPR Voltage Exceeded the Line to Line Voltage of the Fault Location	

Paso 4: Perfil de tensiones

El software muestra el GPR y tensión superficial producto de una falla a tierra, se aprecia que las tensiones de contacto y paso superan por mucho a los umbrales de contacto y paso. Esta gráfica es en una dirección.

Figura 40

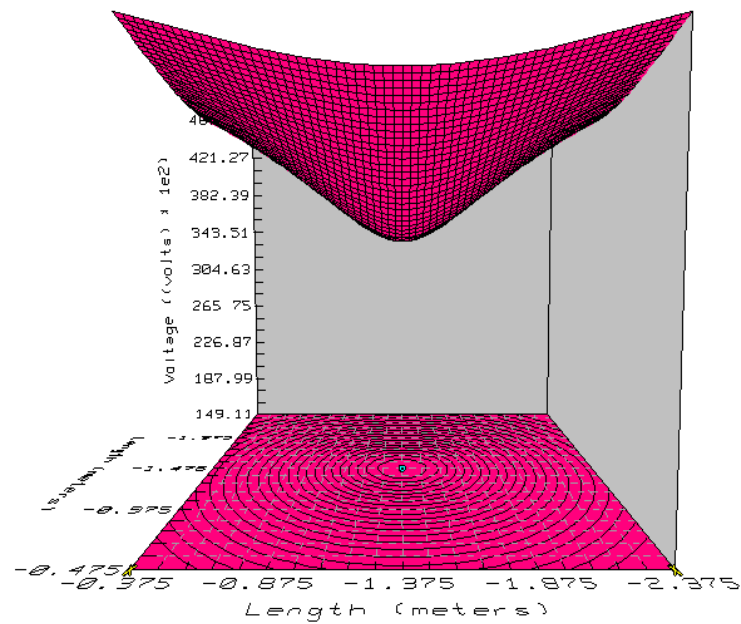
Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 1.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 41

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 1.

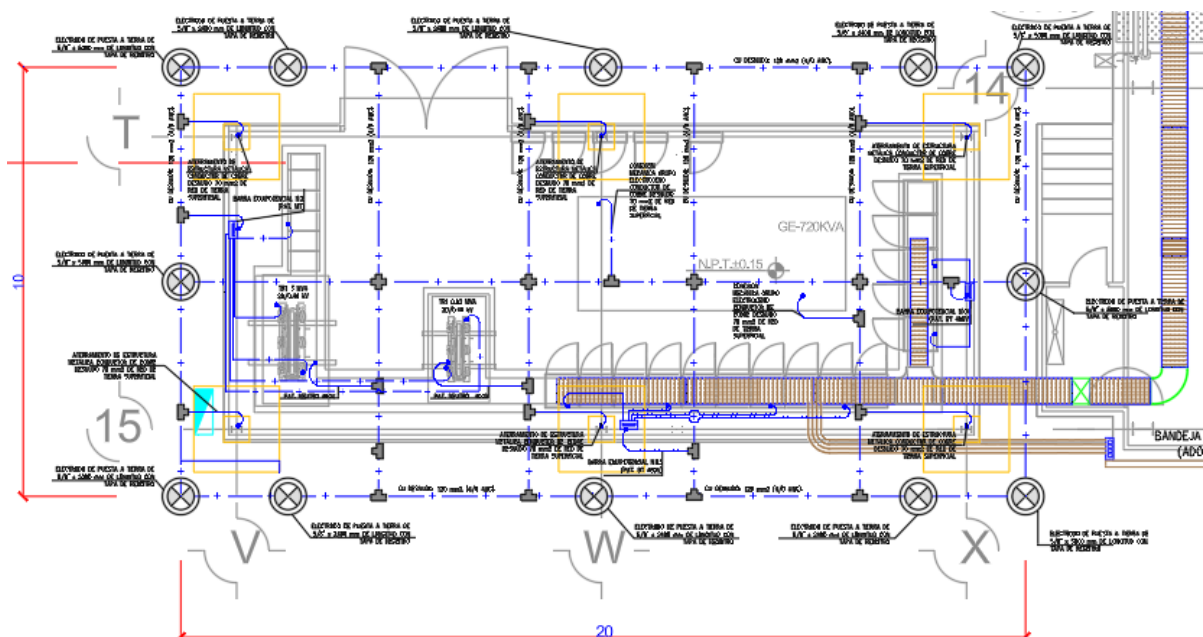


3.3 Caso 2

En la Figura 42 se muestra el layout de una malla a tierra que cubre el área de la Subestación N°1.

Figura 42

Layout malla a tierra Caso 2.



Nota: Elaboración propia.

3.3.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A,ρ)

Del caso 1:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 200 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 112.20 \, mm^2 \cong 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 1:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \, V$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_c, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 44.4 \, m$$

$$D = 5 \, m$$

$$L_x = 20 \, m$$

$$L_y = 10 \, m$$

$$L_c = 110 \, m$$

$$L_T = 154.40 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.0158 \, m$$

$$n_R = 12$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Schwarz porque existe muchas varillas verticales.

Cálculo de la resistencia de los conductores horizontales, resistencia de electrodos verticales, y resistencia mutua entre conductores y electrodos verticales.

$$2a=0.0141 \text{ m}$$

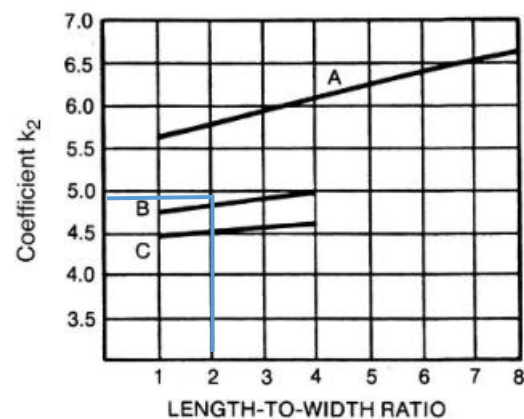
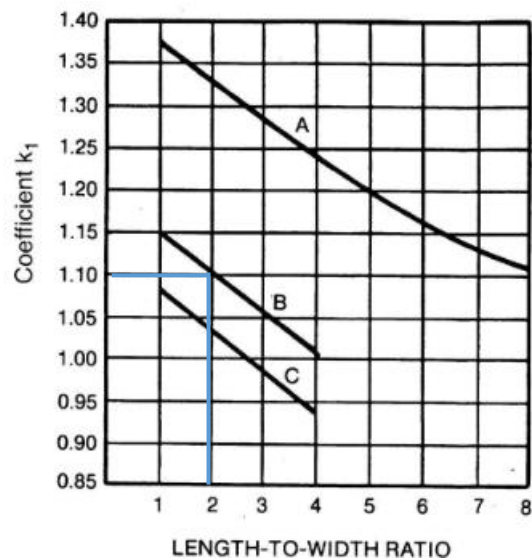
$$a' = \sqrt{2(0.0141)(1)} = 0.119 \text{ m}$$

Hallando k_1 y k_2 en las Tablas 7 y 8

$$\sqrt{A} = \sqrt{200} = 14.14 \text{ m}$$

$$\frac{\sqrt{A}}{10} = 1.414 \text{ m}$$

$$\text{Length/width ratio} = 20/10 = 2, k_1=1.1, k_2=4.8$$



Reemplazando en la Ecuación 46 para hallar la resistencia de los conductores.

$$R_1 = \frac{18.03}{\pi(110)} \left[\ln \left(\frac{2(110)}{0.119} \right) + \frac{1.1(110)}{14.14} - 4.8 \right] = 0.59 \, \Omega$$

Reemplazando en la Ecuación 47 para halla la resistencia de los electrodos verticales.

$$R_2 = \frac{18.03}{2\pi(12)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.0079} \right) - 1 + \frac{2(1.1)(2.4)}{14.14} (\sqrt{12} - 1)^2 \right] = 0.70 \, \Omega$$

Reemplazando en la Ecuación 48 para hallar la resistencia mutua

$$R_m = \frac{18.03}{\pi(110)} \left[\ln \left(\frac{2(110)}{2.4} \right) + \frac{1.1(110)}{14.14} - 4.8 + 1 \right] = 0.48 \, \Omega$$

Reemplazando R1, R2 y Rm en la Ecuación 45 para hallar la resistencia de la malla.

$$R_g = \frac{0.59(0.7) - 0.48^2}{0.59 + 0.70 - 2(0.48)} = 0.554 \, \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Se asume la duración de la falla $t_f = 0.5$ s, y para un sistema de utilización en media tensión $X/R = 10$. Reemplazando en las Ecuaciones 36 y 37:

$$T_a = 10 \left(\frac{1}{2\pi(60)} \right) = 0.02652$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.02652}{0.5} \left(1 - e^{-\frac{2(0.5)}{0.02652}} \right)} = 1.0262$$

Para un sistema de utilización radial, $S_f = 1$, reemplazando en la Ecuación 41:

$$I_G = (1.25)(1.0262)(1)(8,301) = 10,647.93 \, A$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$GPR = I_G \cdot R_g = 10,647.93(0.554) = 5,899.76 \, V$$

GPR = 5,899.76 V > E_{iso} = 1,111.51 V, continuamos con el paso 8.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular:

$$L_p = 2(10+20) = 60 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(110)}{60} = 3.67$$

$$n_b = \sqrt{\frac{60}{4(14.14)}} = 1.03$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 3.67(1.03)(1)(1) = 3.78$$

Al tener electrodos verticales en las esquinas, entonces $k_{ii} = 1$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{5^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(5+2(1))^2}{8(5)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(3.78)-1)} \right) \right] = 0.72$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(3.78) = 1.20$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 110 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{20^2 + 10^2}} \right) \right] 44.4 = 184.63 \text{ m}$$

Reemplazando en la Ecuación 51 para hallar la tensión de malla

$$E_m = \frac{18.03(0.72)(1.2)(10,647.93)}{184.63} = 900.88 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso

$$L_s = 0.75(110) + 0.85(44.40) = 120.24 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{5+1} + \frac{1}{5} (1 - 0.5^{3.78-2}) \right] = 0.26$$

Reemplazando en la Ecuación 62 para hallar la tensión de paso

$$E_s = \frac{18.03(0.26)(1.2)(10,647.93)}{120.24} = 494.26 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 900.88 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 494.26 \text{ V} < E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 11: La comparativas de tensiones de toque y paso versus sus respectivos umbrales son favorables, por tanto no se requiere rediseño.

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle.

3.3.2 Modelamiento Mediante Software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 43

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 2.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Para el dimensionamiento del conductor de la malla se toma en cuenta los resultados del IEEE Std 80-2013 para una corriente en baja tensión de 39.598 kA.

$$A_{mm^2} = 39.598 \times \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3.4 \times 10^{-4}}{0.5 \times 0.00381 \times 1.78}\right) \times \ln\left(\frac{242 + 700}{242 + 30}\right)}}$$

$$A_{mm^2} = 112.20 \text{ mm}^2 \cong 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 44 y 45 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 44

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 2.

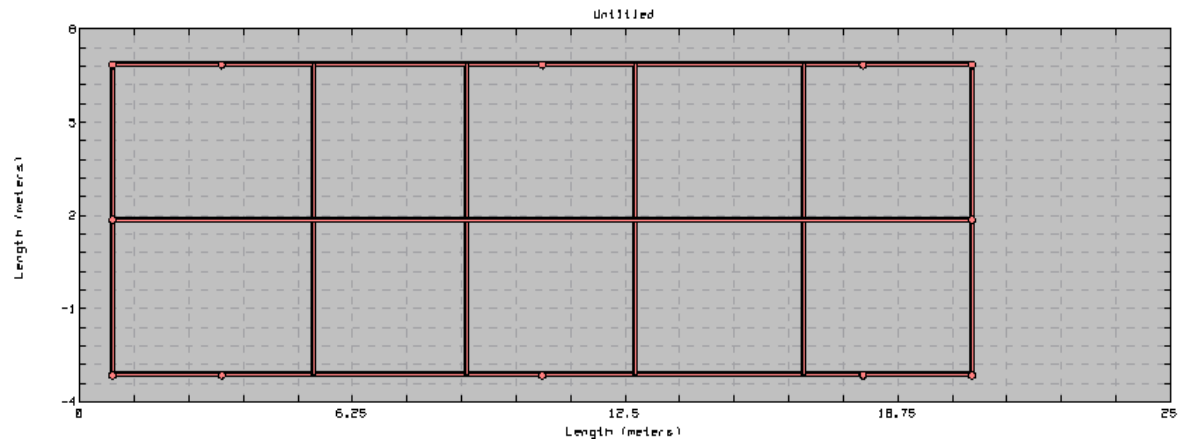
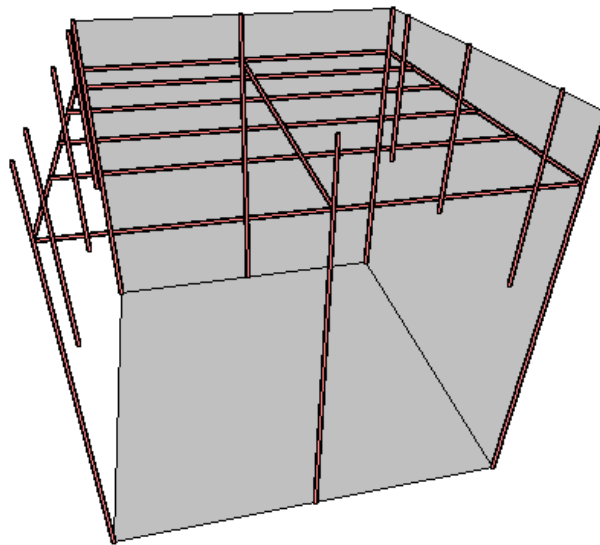


Figura 45

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 2.



En las Figura 46 y Figura 47 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 46

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 2.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1

Figura 47

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 2.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		15.8
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		15.8
5	☒	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		15.8
6	☒	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		15.8
7	☒	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☒	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☒	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☒	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☒	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☒	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR:

Figura 48

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 2.

Output Results

Ground Potential Rise	4781.2 volts
Calculated Ground Resistance	0.437588 ohms
Equivalent Resistance	0.437569 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

El software muestra el GPR y tensión superficial producto de una falla a tierra, se aprecia que las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 49

Perfil de tensiones generados en dirección diagonal CYMGRD Caso 2.

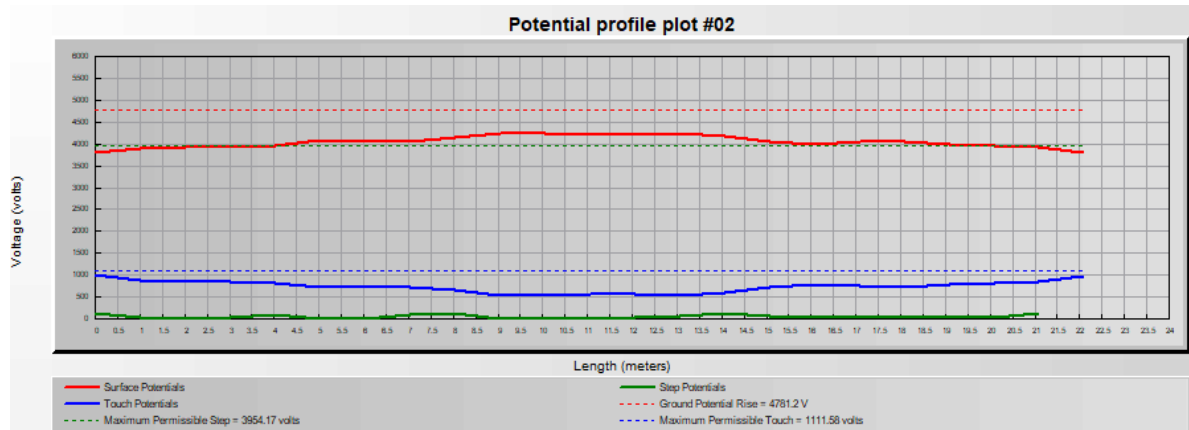
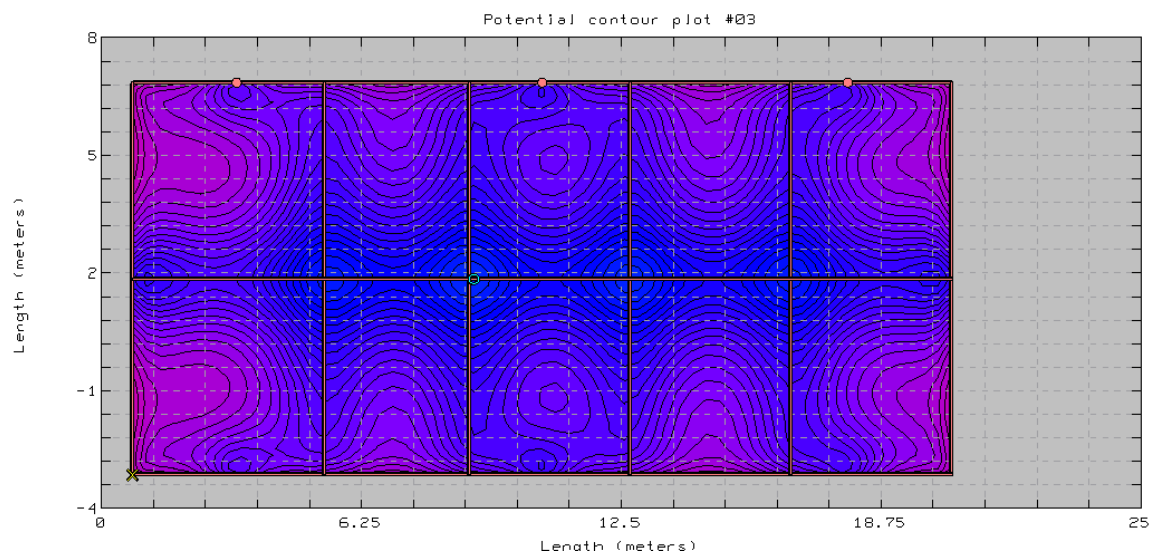


Figura 50

Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 2.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 2.

**Figura 52**

Layout malla a tierra caso 3.



3.4.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

No es recomendable la evaluación de esta malla con esta metodología debido a su geometría no simétrica, sin embargo, se hace la evaluación idealizando algunos pasos para efecto de estudio.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 1:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,251.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 1:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \, V$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 9.6 \, m$$

D = 145.78 m (idealizando a una malla cuadrada de una sola cuadrícula de 21,251.67 m²)

$$L_x = 173.72 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 122.33 \, m$$

$$L_c = 2(173.72 + 122.33) = 592.10 \, m$$

$$L_T = 601.7 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.0158 \, m$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Sverak por tratarse de una malla con muy pocas varillas verticales.

$$R_g = 18.03 \left[\frac{1}{601.7} + \frac{1}{\sqrt{20(21,251.67)}} \left(1 + \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{20}{21,251.67}}} \right) \right] = 0.084$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del resultado anterior tenemos:

$$I_G = 10,647.93 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 10,647.93(0.084) = 894.42 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 894.42 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$, podemos continuar con la ingeniería de detalle, pero por fines de estudio continuamos con los pasos siguientes.

Paso 8: Cálculo de la tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de la tensión de malla para una geometría rectangular con pocas varillas verticales.

$$L_p = 2(173.72 + 122.33) = 592.10 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(592.10)}{592.10} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{592.10}{4(145.78)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.01)(1)(1) = 2.02$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(2.02))^{\frac{2}{2.02}}} = 0.25$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{145.78^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(145.78 + 2(1))^2}{8(145.78)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.25}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.82$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.02) = 0.94$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con pocos electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 592.10 + 9.6 = 601.7 \text{ m}$$

Por tanto, la tensión de malla es

$$E_m = \frac{18.03(1.82)(0.94)(10,647.93)}{601.7} = 547.35 \text{ V}$$

Cálculo de la tensión de paso:

$$L_S = 0.75(592.10) + 0.85(9.6) = 452.24 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{145.78+1} + \frac{1}{145.78} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.16$$

Por tanto, la tensión de paso es

$$E_s = \frac{18.03(0.94)(0.16)(10,647.93)}{452.24} = 64.56 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 547.35 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 64.56 \text{ V} < E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 11: No requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle.

3.4.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 53

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 3.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$A_{mm^2} = 120\text{ mm}^2$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 54 y 55 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 54

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 3.

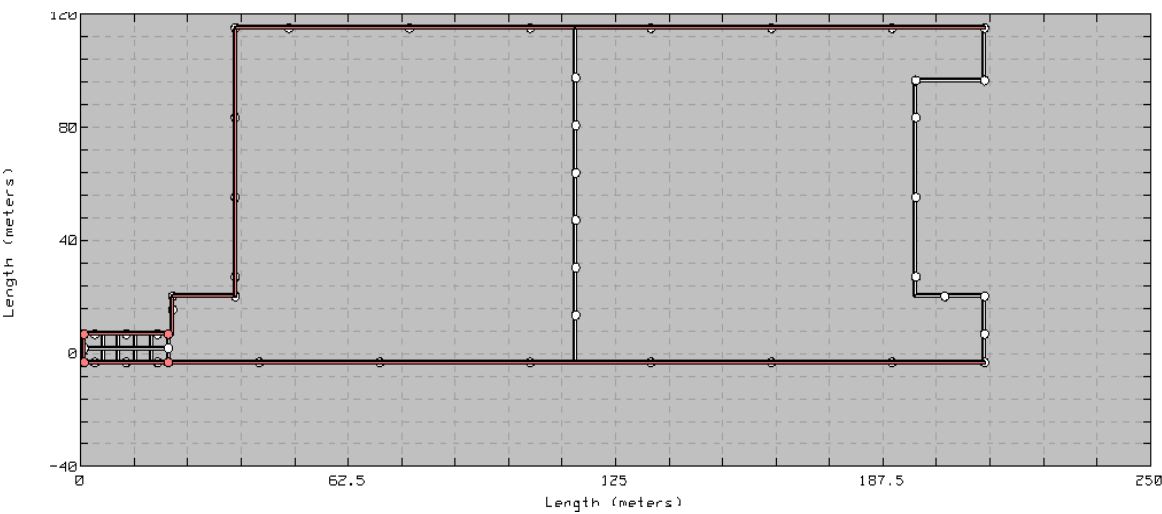
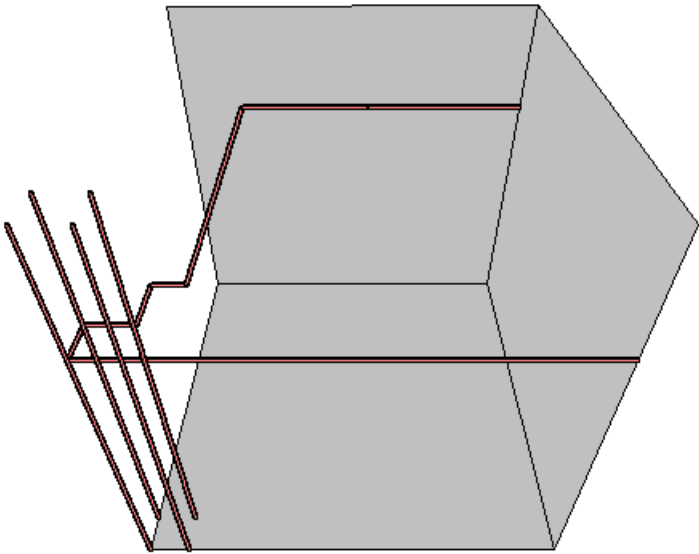


Figura 55

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 3.



En las Figuras 56 y 57 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 56

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 3.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☐	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	36.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☐	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.877	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☐	Primary	211.244	-3.149	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1
18	☐	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
19	☐	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
20	☐	Primary	195.187	20.284	1	195.187	96.556	1	1	Select		14.1
21	☐	Primary	195.187	20.284	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1

Figura 57

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 3.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☐	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☐	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☐	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	211.244	6.904	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☐	Primary	201.950	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	195.187	27.095	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	189.587	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☐	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☐	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
31	☐	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
32	☐	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
33	☐	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
34	☐	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
35	☐	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 58

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 3.

Output Results

Ground Potential Rise	985.009 volts
Calculated Ground Resistance	0.0901476 ohms
Equivalent Resistance	0.0901468 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

El software muestra el GPR y tensión superficial producto de una falla a tierra, se aprecia que las tensiones de toque y paso se encuentran por debajo de los umbrales de toque y paso.

Figura 59

Perfil de tensiones generados en dirección diagonal CYMGRD Caso 3.

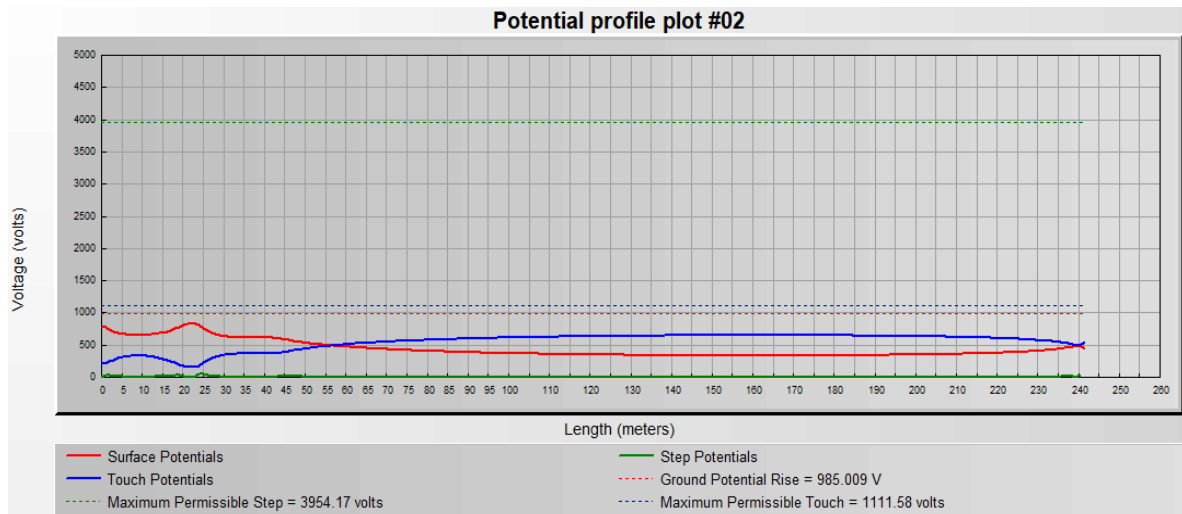
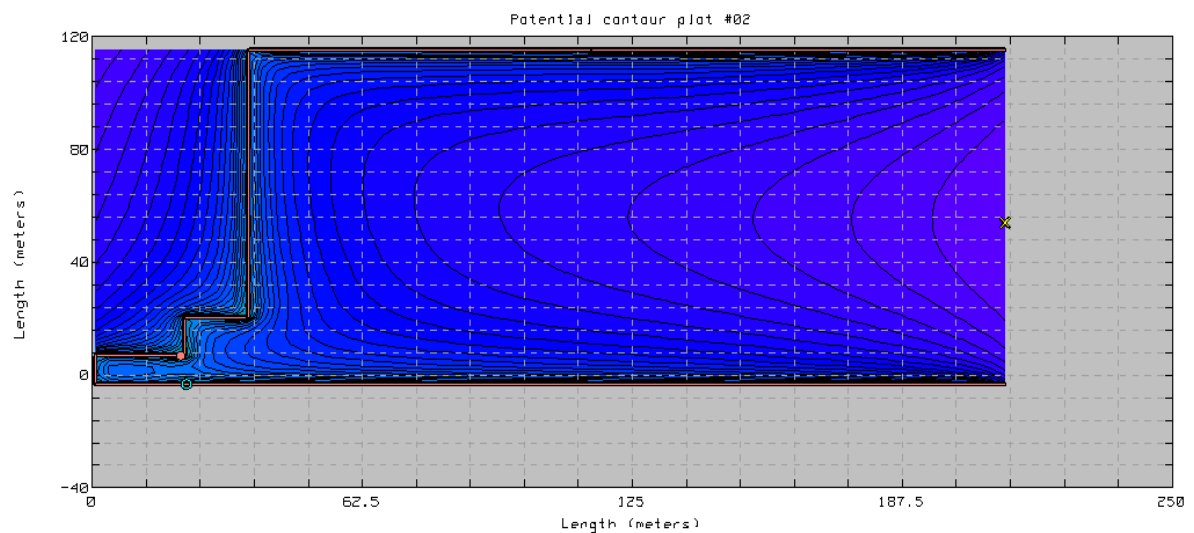


Figura 60

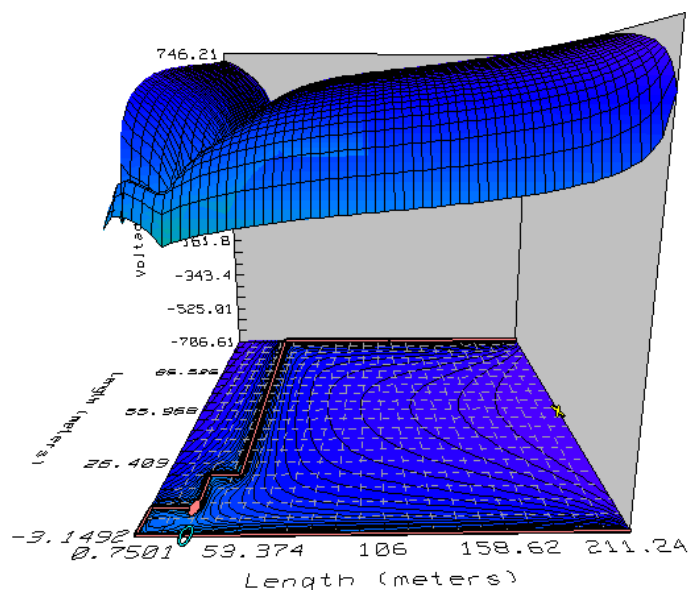
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 3.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 61

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 3.

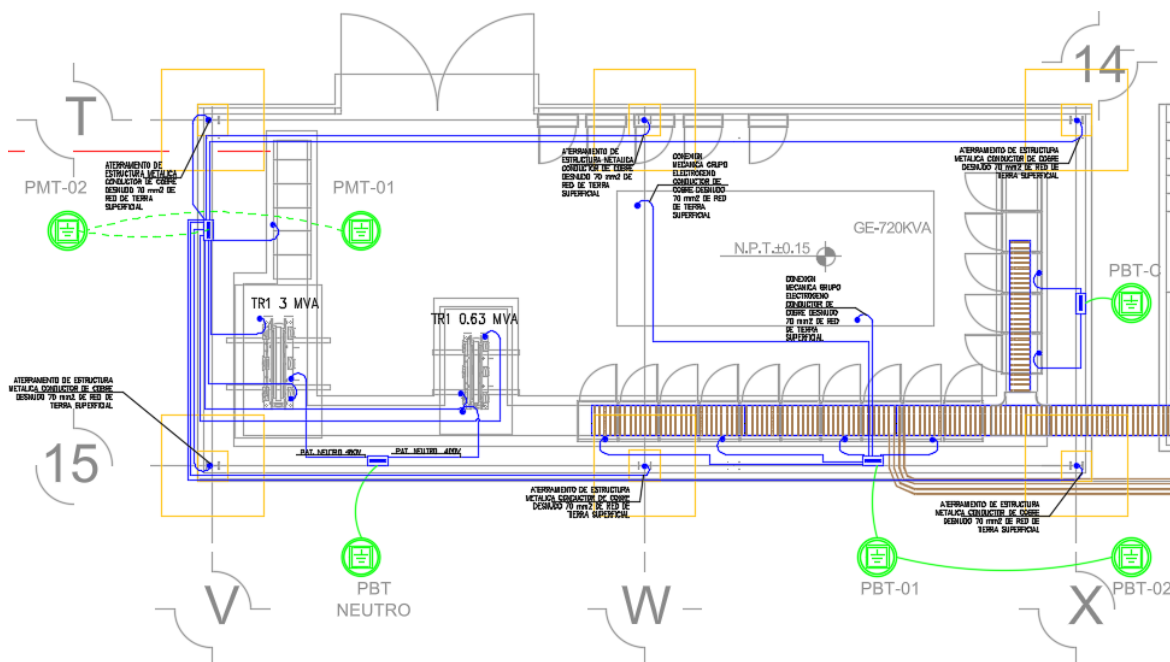


3.5 Caso 4

La Figura 62 muestra el layout de pozos individuales que rodean la subestación N°1. Es similar al caso 1, con la diferencia que la resistividad del suelo es mayor, para el estudio se agrega un segundo pozo en paralelo en el sistema de media tensión.

Figura 62

Layout puesta a tierra Caso 4.



Nota: Elaboración propia.

3.5.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A,ρ)

Aplicando la Ecuación 2 en la data de la Tabla 13, tenemos:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{155.83+135.25+103.50+91.40+86+84.6+82.5+82+79.25+76.2+73.92}{11}$$

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre un pozo a tierra geoméricamente ante gradientes de potencial podría presumirse que es cero.

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{95.50}{5000})}{2(0.15) + 0.09}$$

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = (1000 + 1.5(5000)(0.7736)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

$$E_{s50} = (1000 + 6(5000)(0.7736)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

L_r = 5 m (varillas largas para efecto de estudio)

2b = 0.2 m (se asume el efecto de tratamiento con cemento conductivo)

$$n_R = 2$$

Paso 5: Resistencias del pozo a tierra

$$R_g = \frac{95350}{2\pi(2)(5)} \left[\ln \left(\frac{4(5)}{0.1} \right) - 1 \right] = 4.43 \, \Omega$$

Paso 6: Corriente del pozo a tierra (I_G, t_f)

Del caso 1:

$$I_G = 10,647.93 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 10,647.93(4.43) = 47,126.30 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 47,126.30 \text{ V} \gg E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$, este pozo a tierra no limita de ninguna forma las tensiones peligrosas, el cálculo queda en este paso.

3.5.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Figura 63

Cuadro de diálogo Soil Parameter CYMGRD Caso 4.

Soil Parameters

Title: Untitled

Soil Model: Two-Layer (from Soil Measurements)

Soil Measurement Method: Wenner

Soil Measurement Axis: SM1

Upper Layer Thickness: 1.89 meters

Upper Layer Material: User Defined

Upper Layer Resistivity: 158.12 ohm-m

Lower Layer Material: User Defined

Lower Layer Resistivity: 77.47 ohm-m

Air Characteristics: Ambient Temperature: 30.0 °C

Safety Parameters: IEEE-80(TM) 2013

Surface Layer Thickness: 0.15 meters

Surface Layer Material: User Defined

Surface Layer Resistivity: 5000.0 ohm-m

Shock Duration: 0.5 secs

Body Weight: 50 kg

Maximum Permissible Touch: 1119.46 volts

Maximum Permissible Step: 3985.71 volts

OK Cancel

En el cuadro SM1 se carga la data de campo.

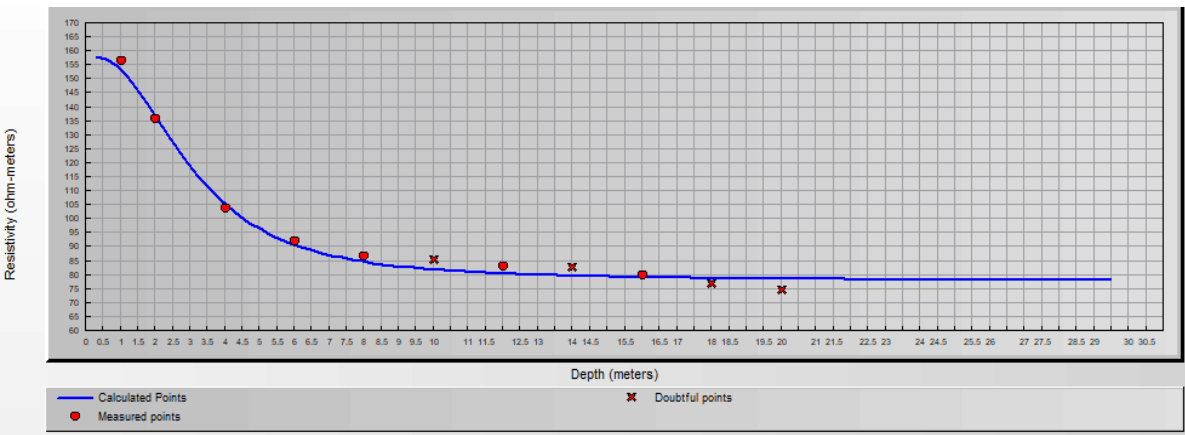
Figura 64

Cuadro de diálogo SM1 CYMGRD Caso 4.

		Enabled	Probe distance (m)	Resistance (ohms)	Resistivity (ohm-m)
SM1	1	☒	1	24.801	155.83
	2	☒	2	10.763	135.25
SM2	3	☒	4	4.118	103.5
	4	☒	6	2.424	91.4
	5	☒	8	1.711	86
	6	☒	10	1.346	84.6
	7	☒	12	1.094	82.5
	8	☒	14	0.932	82
	9	☒	16	0.788	79.25
	10	☒	18	0.674	76.2
	11	☒	20	0.588	73.92

Figura 65

Perfil de resistividad del suelo con CYMGRD Caso 4.



Resultados del cálculo:

Figura 66

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 4.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis del pozo a tierra

En las Figuras 67 y 68 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 67

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 4.

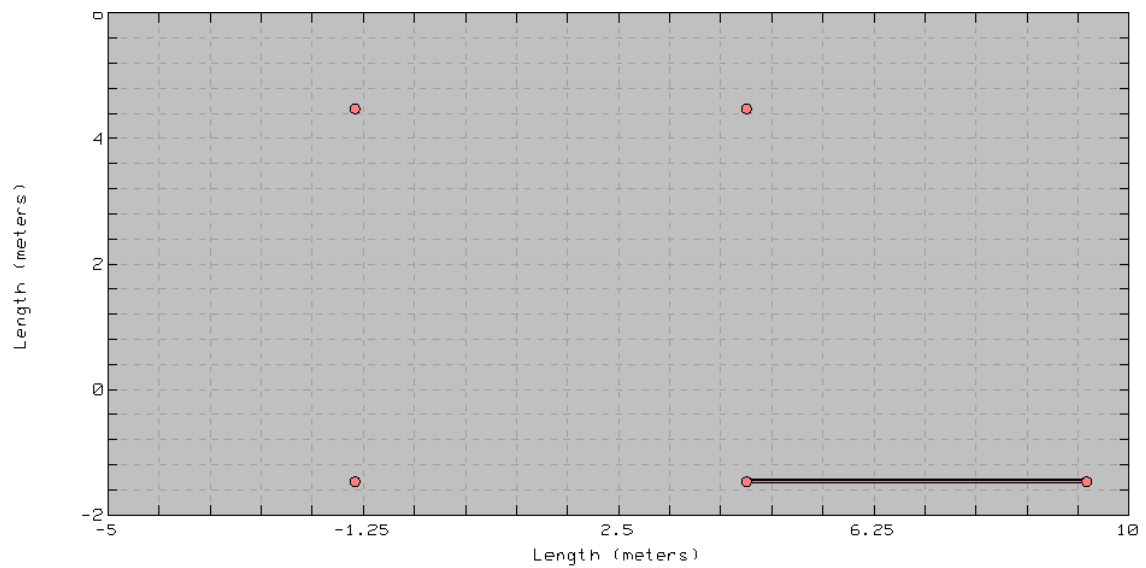
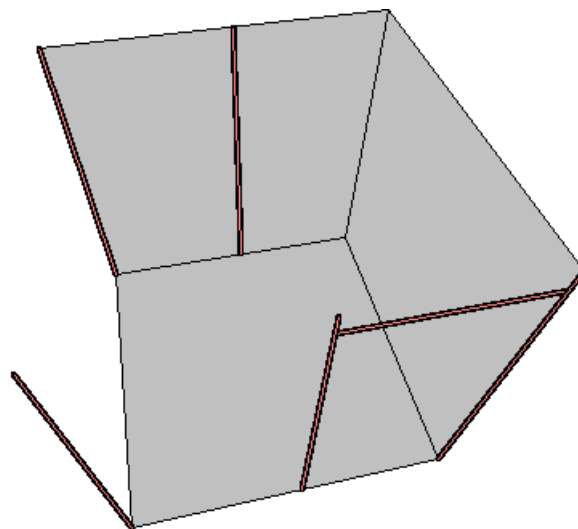


Figura 68

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 4.



En las Figura 69 y 70 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de los pozos en paralelo.

Figura 69

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 4.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☐	Primary	-1.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200
2	☐	Primary	-1.375	4.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200
3	☐	Primary	4.375	4.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200
4	☒	Primary	4.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200
5	☒	Primary	9.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200

Figura 70

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 4.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	4.375	-1.475	0.6	9.375	-1.475	0.6	1	Select		200

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 71

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 4.

Output Results

Ground Potential Rise 72546.3 volts
 Calculated Ground Resistance 6.64375 ohms
 Equivalent Resistance 6.63934 ohms

Warning: The GPR Voltage Exceeded the Line to Line Voltage of the Fault Location

Paso 4: Perfil de tensiones

Se aprecia que las tensiones de contacto y paso se encuentran por encima de los umbrales de toque y paso.

Figura 72

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 4.

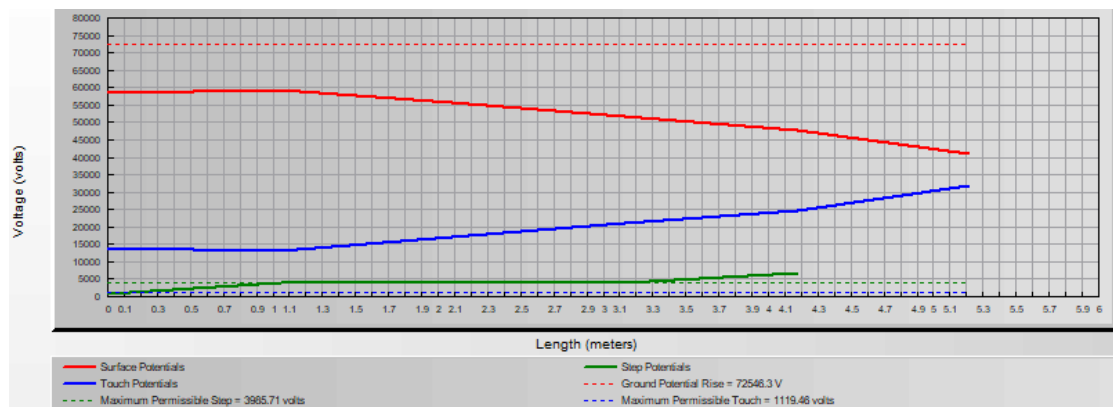
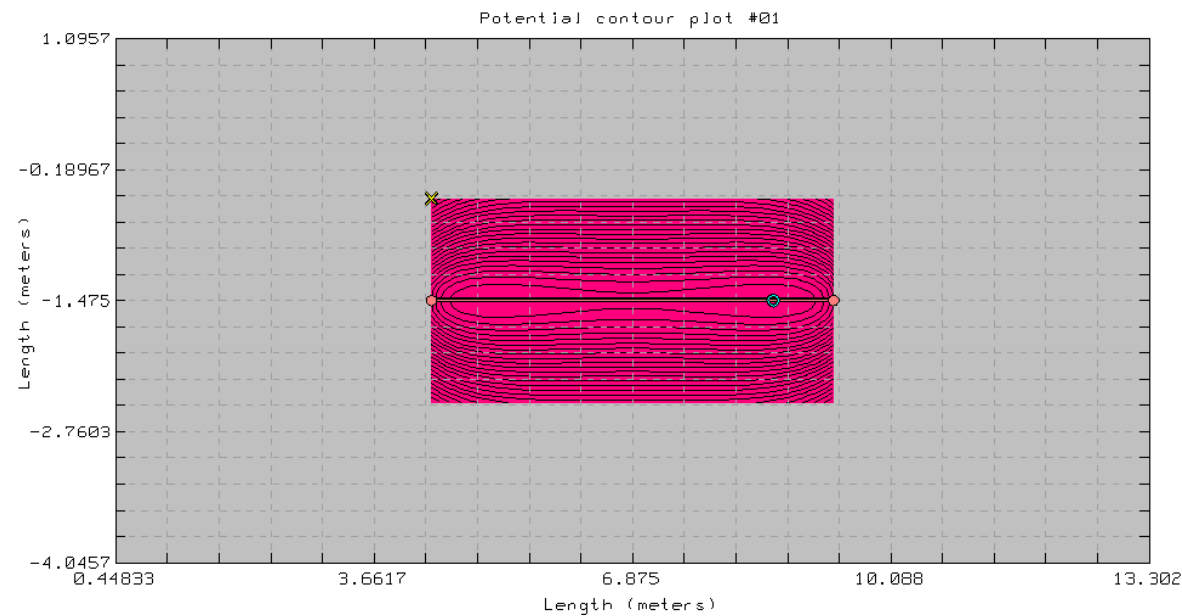


Figura 73

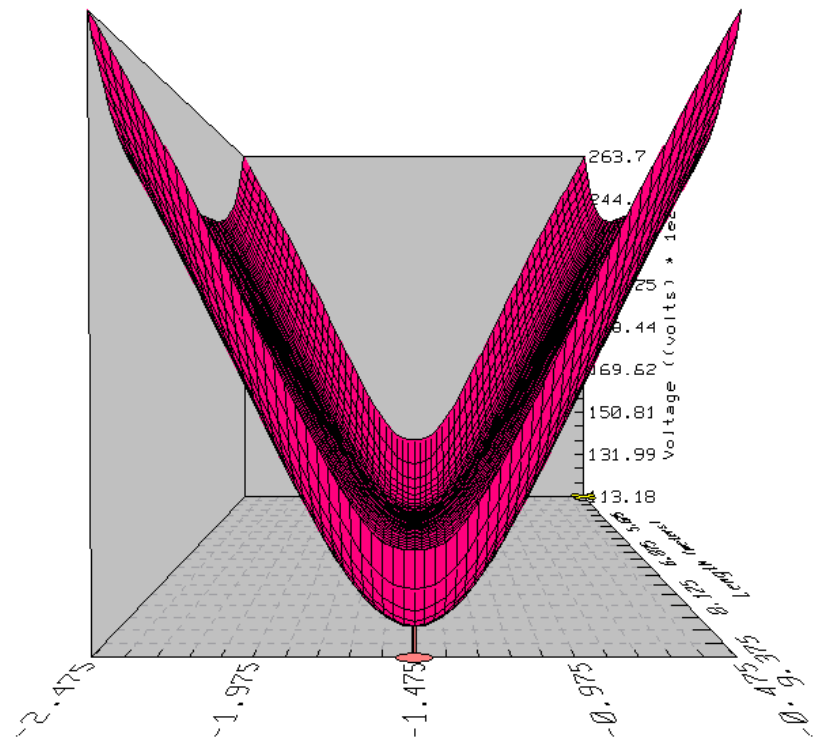
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 4.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 74

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 4.

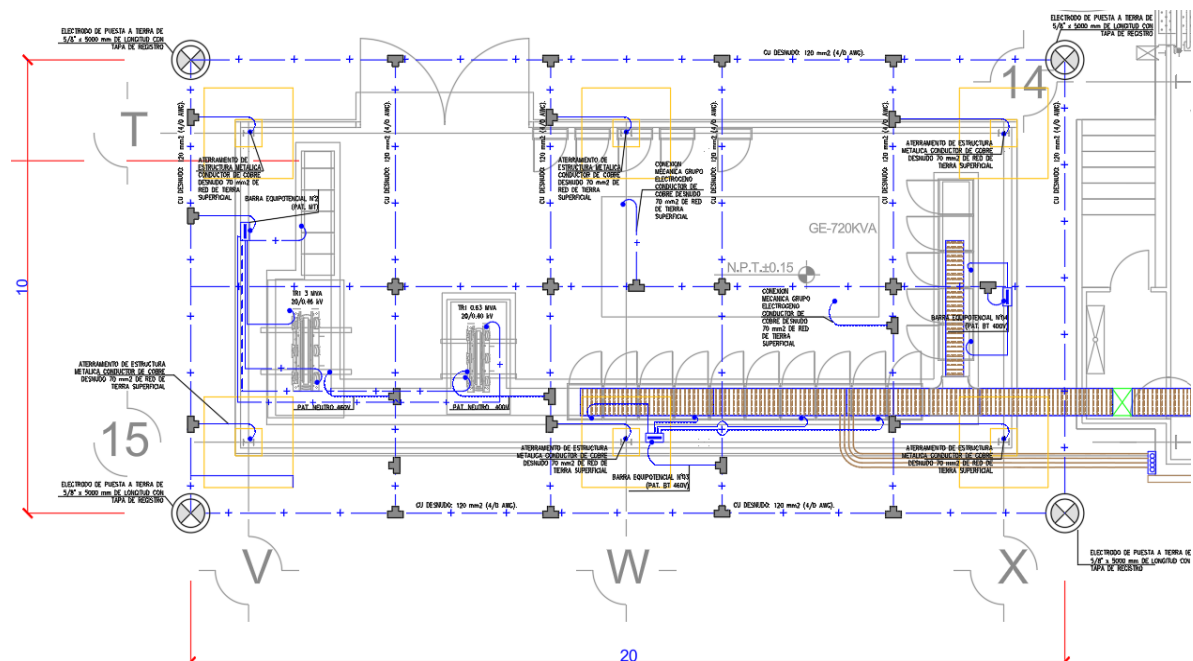


3.6 Caso 5

En la Figura 75 se muestra el layout de una malla a tierra que cubre el área de la Subestación N°1. El caso 5 es similar al caso 2, con la diferencia de contar con una mayor resistividad de suelo. Para el estudio de este caso se considera una capa superficial de losa de concreto de 15 cm de espesor, bajo techo, con resistividad superficial de 50,000 $\Omega\cdot m$.

Figura 75

Layout malla a tierra caso 5.



Nota: Elaboración propia.

3.6.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 200 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I₀, t_c, d)

De caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{95.50}{50000}\right)}{2(0.15) + 0.09} = 0.7697$$

$$E_{t50} = (1000 + 1.5(50000)(0.7696)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 9,633.82 \text{ V}$$

$$E_{s50} = (1000 + 6(50000)(0.7696)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 38,043.15 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 9.6 \text{ m}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$L_x = 20 \text{ m}$$

$$L_y = 10 \text{ m}$$

$$L_c = 110 \text{ m}$$

$$L_T = 119.60 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.05 \text{ m}$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Schwarz.

Cálculo de la resistencia de los conductores horizontales, resistencia de electrodos verticales, y resistencia mutua entre conductores y electrodos verticales.

$$2a = 0.2 \text{ m}$$

$$a' = \sqrt{2(0.1)(1)} = 0.447 \text{ m}$$

Hallando k1 y k2

$$\sqrt{A} = \sqrt{200} = 14.14 \text{ m}$$

$$\frac{\sqrt{A}}{10} = 1.414 \text{ m}$$

Del Caso 2, Lenght/width ratio=20/10 = 2, k1=1.1, k2=4.8

Reemplazando en la Ecuación 46 para hallar la resistencia de los conductores.

$$R_1 = \frac{95.50}{\pi(110)} \left[\ln \left(\frac{2(110)}{0.447} \right) + \frac{1.1(110)}{14.14} - 4.8 \right] = 2.75 \, \Omega$$

Reemplazando en la Ecuación 47 para halla la resistencia de los electrodos verticales.

$$R_2 = \frac{95.50}{2\pi(4)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.025} \right) - 1 + \frac{2(1.1)(2.4)}{14.14} (\sqrt{4} - 1)^2 \right] = 6.23 \, \Omega$$

Reemplazando en la Ecuación 48 para hallar la resistencia mutua

$$R_m = \frac{95.5}{\pi(110)} \left[\ln \left(\frac{2(110)}{2.4} \right) + \frac{1.1(110)}{14.14} - 4.8 + 1 \right] = 2.56 \, \Omega$$

Reemplazando R_1 , R_2 y R_m en la Ecuación 45 para hallar la resistencia de la malla.

$$R_g = \frac{2.75(6.23) - 2.56^2}{2.75 + 6.23 - 2(2.56)} = 2.74 \, \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

De los resultados anteriores:

$$I_G = 10,647.93 \, A$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$GPR = I_g \cdot R_g = 10,647.93(2.74) = 29,192.45 \, V$$

$GPR = 29,192.45 \, V > E_{t50} = 9,633.82 \, V$, continuamos con el paso 8.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular.

$$L_p = 2(10+20) = 60 \, m$$

$$n_a = \frac{2(110)}{60} = 3.67$$

$$n_b = \sqrt{\frac{60}{4(14.14)}} = 1.03$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 3.67(1.03)(1)(1) = 3.78$$

Al tener electrodos verticales en las esquinas, entonces $k_{ii} = 1$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{5^2}{16(1)(0.2)} + \frac{(5+2(1))^2}{8(5)(0.2)} - \frac{1}{4(0.2)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(3.78)-1)} \right) \right] = 0.30$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(3.78) = 1.20$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 110 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{20^2 + 10^2}} \right) \right] 9.6 = 126.14 \text{ m}$$

Reemplazando en la Ecuación 50 para hallar la tensión de malla

$$E_m = \frac{95.5(0.30)(1.2)(10,647.93)}{126.14} = 2,889.83 \text{ V}$$

Cálculo de la tensión de paso:

$$L_S = 0.75(110) + 0.85(9.6) = 90.66 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{5+1} + \frac{1}{5} (1 - 0.5^{3.78-2}) \right] = 0.26$$

Reemplazando en la Ecuación 62 para hallar la tensión de malla

$$E_s = \frac{95.5(0.26)(1.2)(10,647.93)}{90.66} = 3,471.10 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 2,889.83 \text{ V} < E_{t50} = 9,633.82 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 3,471.10 \text{ V} < E_{s50} = 38,043.15 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño.

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle.

3.6.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del modelo de suelo del caso 4 y agregando la capa superficial de 50,000 $\Omega - m$:

Figura 76

Cuadro de diálogo Soil Parameter CYMGRD Caso 5.

Soil Parameters

Title: Untitled

Soil Model: Two-Layer (from Soil Measurements)

Soil Measurement Method: Wenner

Soil Measurement Axis: SM1

Upper Layer Thickness: 1.89 meters

Upper Layer Material: User Defined

Upper Layer Resistivity: 158.12 ohm-m

Lower Layer Material: User Defined

Lower Layer Resistivity: 77.47 ohm-m

Air Characteristics: Ambient Temperature: 30.0 °C

Safety Parameters

IEEE-80(TM) 2013

Surface Layer Thickness: 0.15 meters

Surface Layer Material: User Defined

Surface Layer Resistivity: 50000.0 ohm-m

Shock Duration: 0.5 secs

Body Weight: 50 kg

Maximum Permissible Touch: 9637.38 volts

Maximum Permissible Step: 38057.37 volts

OK Cancel

Figura 77

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 5.

Output Results

Soil Model Measurement Axis

Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.769961
Maximum Permissible Touch Voltage	9637.38 volts
Maximum Permissible Step Voltage	38057.4 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

De caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 78 y 79 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 78

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 5.

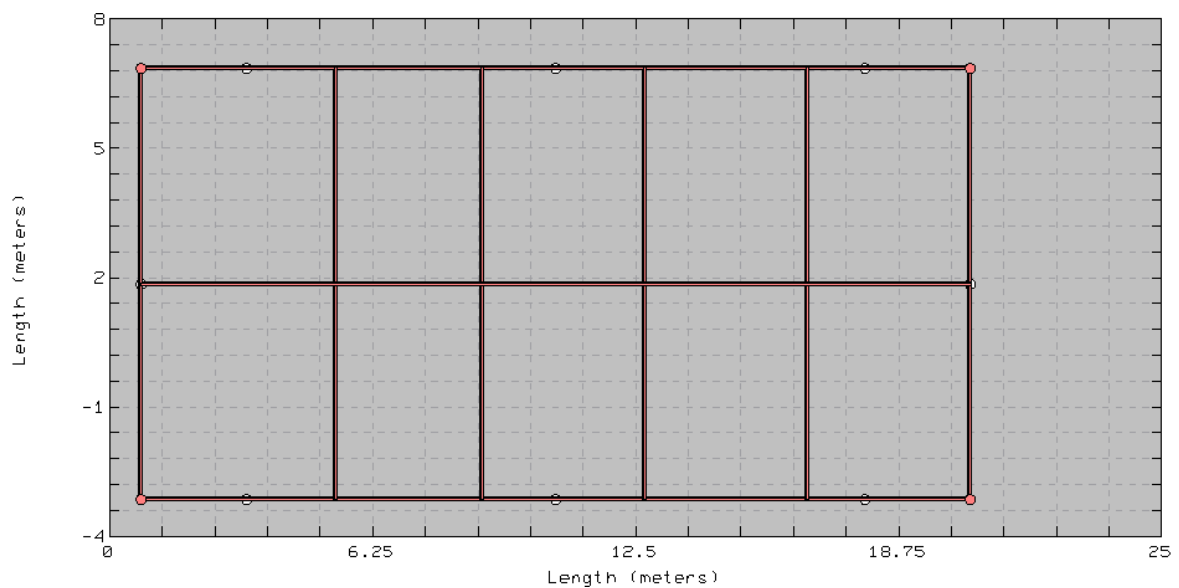
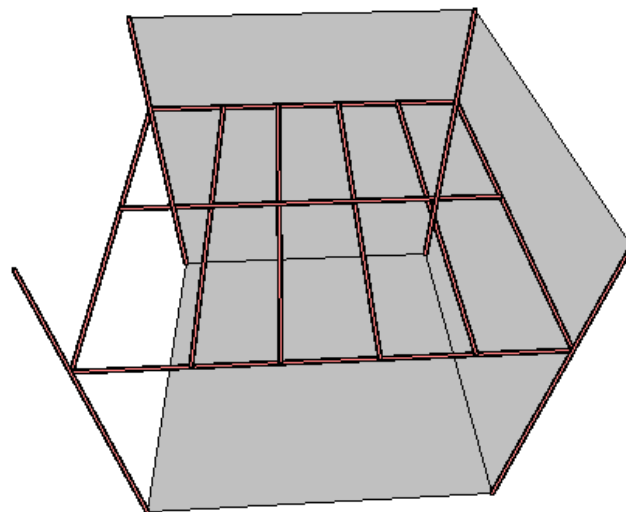


Figura 79

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 5.



En las Figura 80 y 81 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 80

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 5.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		200
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		200
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		200
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		200
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		200
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		200
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		200

Figura 81

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 5.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR:

Figura 82

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 5.

Output Results

Ground Potential Rise 27921.2 volts
 Calculated Ground Resistance 2.55597 ohms
 Equivalent Resistance 2.55532 ohms

Warning: The GPR Voltage Exceeded the Line to Line Voltage of the Fault Location

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 83

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 5.

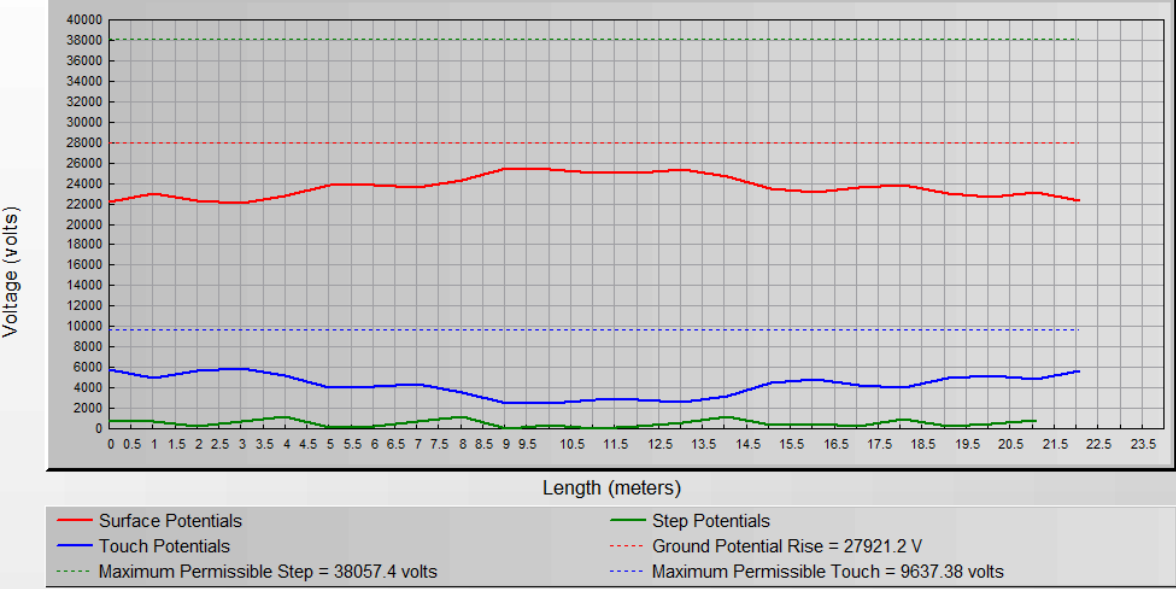
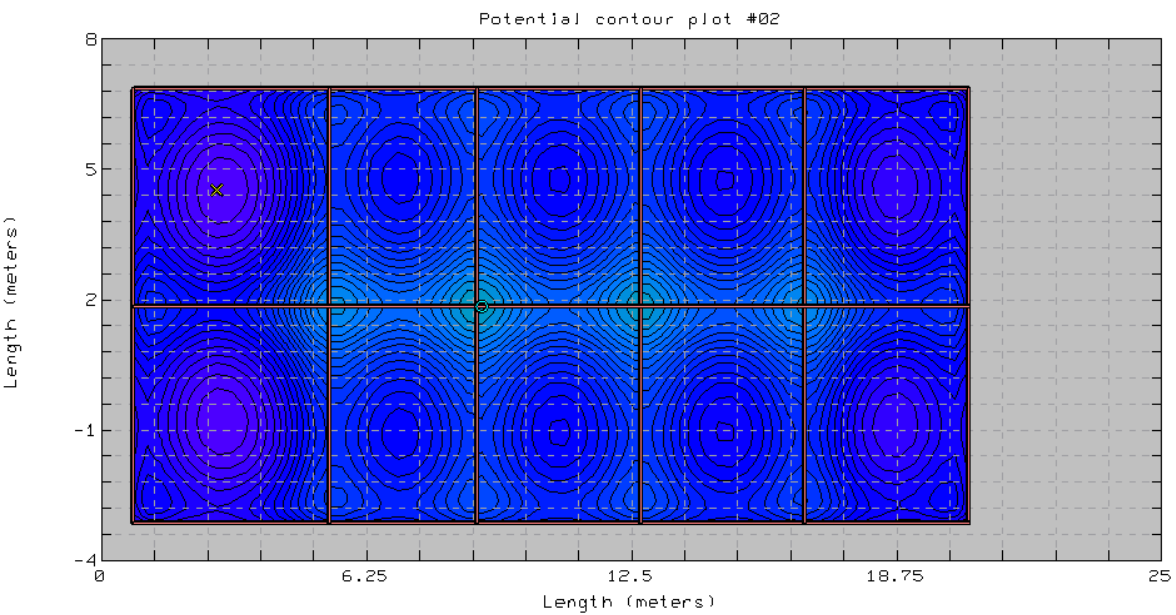


Figura 84

Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 5.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 85

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 5.

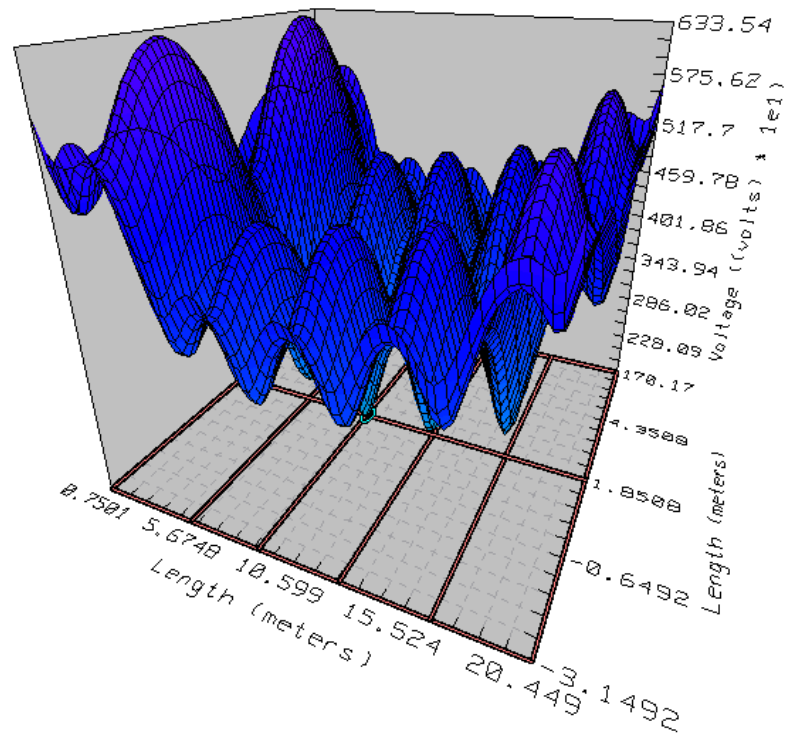
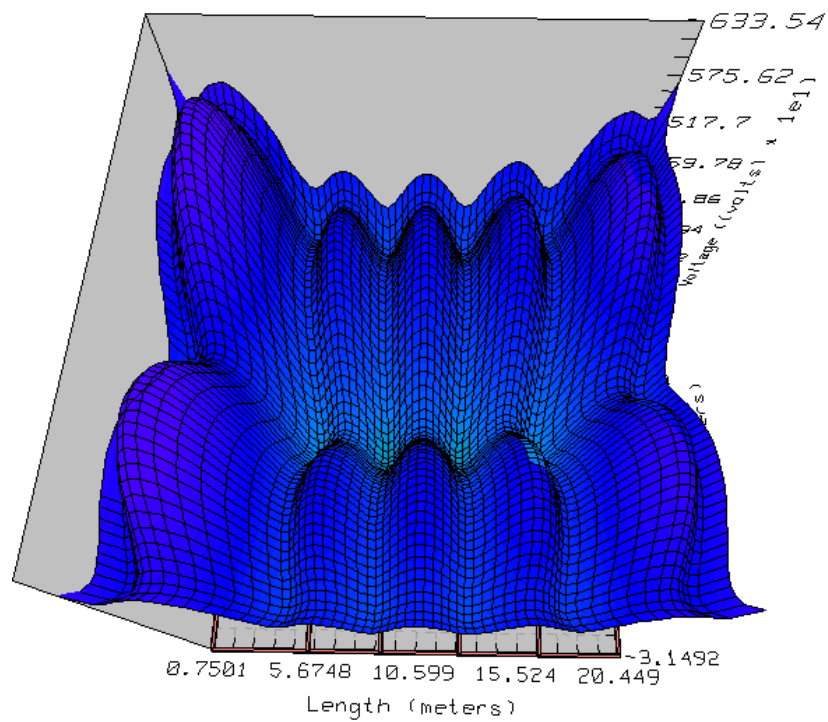


Figura 86

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 5.

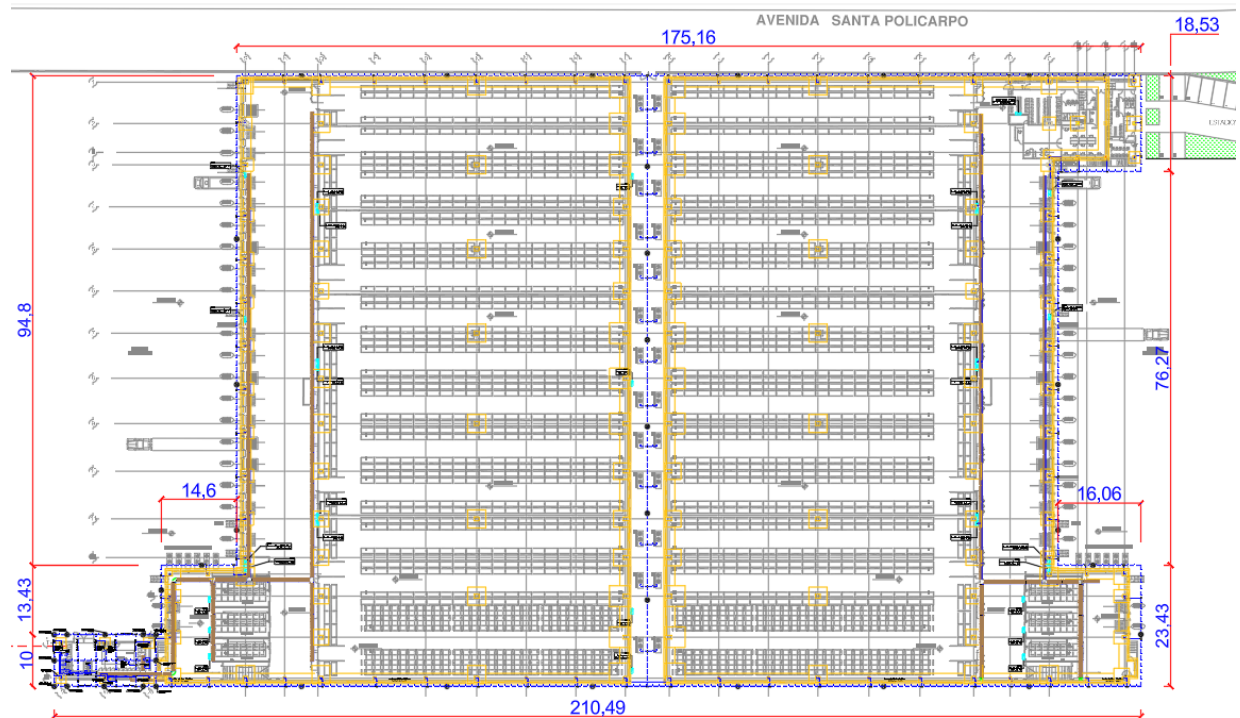


3.7 Caso 6

La Figura 87 muestra el layout de una malla a tierra que cubre el perímetro de naves. A diferencia del caso 3, este caso amerita una mayor cantidad de conductor y varillas verticales para enfrentar el nivel de resistividad.

Figura 87

Layout malla a tierra caso 6.



Nota: Elaboración propia.

3.7.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Igual que el caso 3, se hace la evaluación idealizando algunos pasos para efecto de estudio.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,251.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3lo, t_c , d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50} , E_{s50})

Del resultado del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D , n , L_C , L_T , h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 112.80 \text{ m}$$

$D = 145.779 \text{ m}$ (idealizando a una malla cuadrada de una sola cuadrícula de $21,251.67 \text{ m}^2$)

$$L_x = 175.16 \text{ m}$$

$$L_y = A/L_x = 121.33 \text{ m}$$

$$L_c = 2(175.16 + 121.33) = 592.98 \text{ m}$$

$$L_T = 112.8 + 592.97 = 705.78 \text{ m}$$

$$H = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.0158 \text{ m}$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Schwarz:

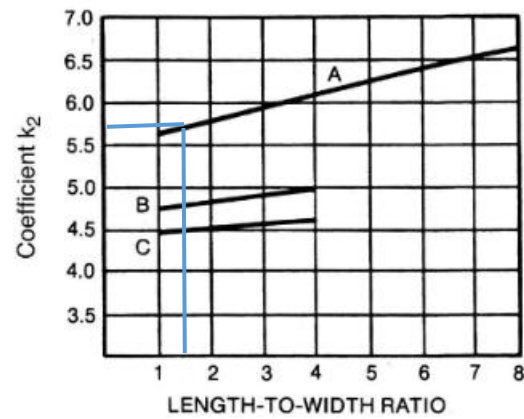
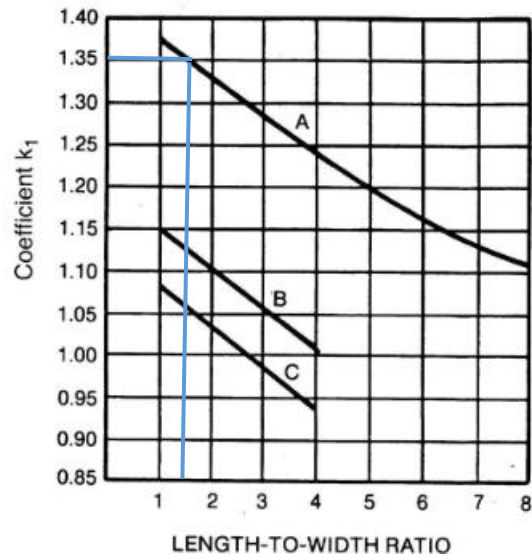
$$2a = 0.0141 \text{ m}$$

$$a' = \sqrt{2(0.00705)(1)} = 0.119 \text{ m}$$

$$\sqrt{A} = \sqrt{21,251.67} = 145.78 \text{ m}$$

La profundidad h es muy pequeña respecto al área, para el cálculo de k_1 y k_2 se asume $h \approx 0$.

$$\text{Length/width ratio} = 175.16/121.33 = 1.44, k_1 \approx 1.35, k_2 \approx 5.7$$



Entonces

$$R_1 = \frac{95.50}{\pi(592.98)} \left[\ln \left(\frac{2(592.98)}{0.119} \right) + \frac{1.35(592.98)}{145.78} - 5.7 \right] = 0.46 \, \Omega$$

$$R_2 = \frac{95.50}{2\pi(47)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.0079} \right) - 1 + \frac{2(1.35)(2.4)}{145.78} (\sqrt{47} - 1)^2 \right] = 0.84 \, \Omega$$

$$R_m = \frac{95.5}{\pi(592.98)} \left[\ln \left(\frac{2(592.98)}{2.4} \right) + \frac{1.35(592.98)}{145.78} - 5.7 + 1 \right] = 0.36 \, \Omega$$

$$R_g = \frac{0.46(0.84) - 0.36^2}{0.46 + 0.84 - 2(0.36)} = 0.44 \, \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , tf)

Del caso 1:

$$I_G = 10,647.93 \, A$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_g \cdot R_g = 10,647.93(0.44) = 4,720.26 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 4,720.26 \text{ V} > E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$, pasamos al paso 8.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular con varillas verticales en los vértices.

$$L_p = 2(175.16 + 121.33) = 592.98 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(592.98)}{592.98} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{592.98}{4(145.78)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.01)(1)(1) = 2.02$$

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{145.78^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(145.78 + 2(1))^2}{8(145.78)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.81$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.02) = 0.94$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 592.98 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{175.16^2 + 121.33^2}} \right) \right] 112.80 = 769.37 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(1.81)(0.94)(10,647.93)}{769.37} = 2,248.78 \text{ V}$$

Cálculo de la tensión de paso:

$$L_s = 0.75(592.98) + 0.85(112.8) = 540.62 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{145.78+1} + \frac{1}{145.78} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.16$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.94)(0.16)(10,647.93)}{540.62} = 286.03 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 2,248.78 \text{ V} > E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Se debe modificar el diseño, el rediseño evalúa en el caso 7.

3.7.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4:

Figura 88

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 6.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Igual a los casos anteriores seleccionamos:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 89 y 90 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 89

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 6.

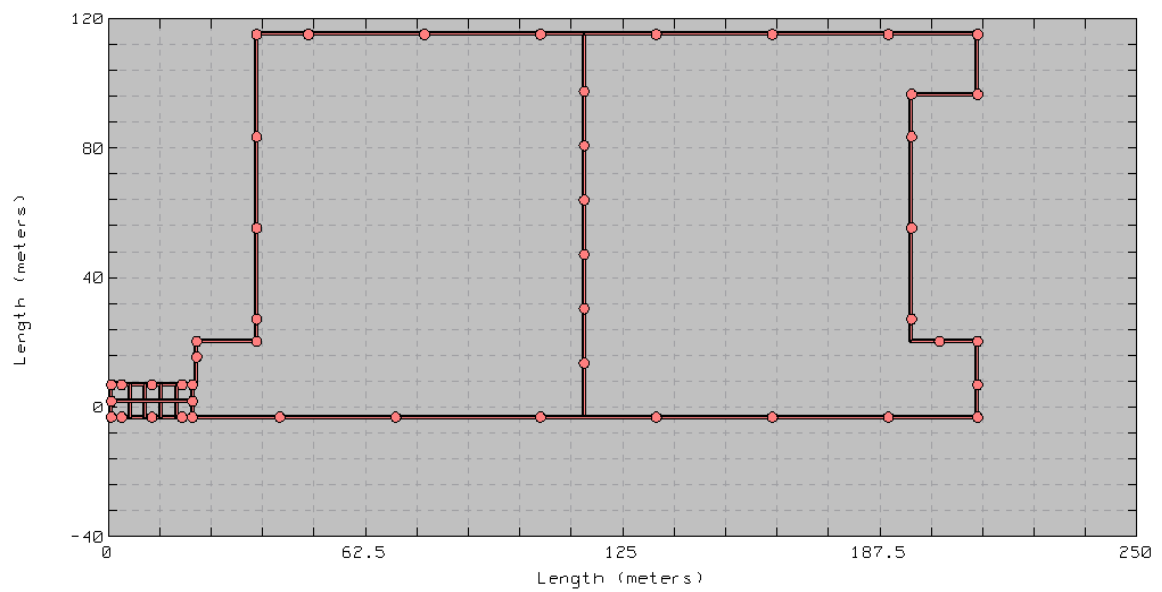
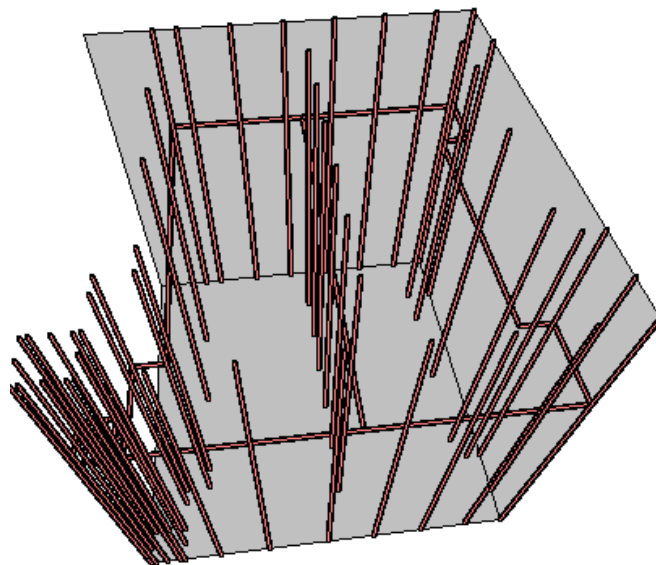


Figura 90

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 6.



En las Figura 91 y 92 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 91

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 6.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	36.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☒	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.877	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☒	Primary	211.244	-3.149	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1
18	☒	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
19	☒	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
20	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	96.556	1	1	Select		14.1
21	☒	Primary	195.187	20.284	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1

Figura 92

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 6.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☒	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☒	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☒	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☒	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☒	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☒	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☒	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☒	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☒	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☒	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☒	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☒	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☒	Primary	211.244	6.904	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☒	Primary	201.950	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☒	Primary	195.187	27.095	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☒	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☒	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☒	Primary	189.587	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☒	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☒	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☒	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☒	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☒	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☒	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☒	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☒	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
31	☒	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
32	☒	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
33	☒	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
34	☒	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
35	☒	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
36	☒	Primary	36.087	27.094	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
37	☒	Primary	21.487	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
38	☒	Primary	69.875	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
39	☒	Primary	41.686	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
40	☒	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
41	☒	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
42	☒	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
43	☒	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
44	☒	Primary	211.244	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
45	☒	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
46	☒	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
47	☒	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 93

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 6.

Output Results	
Ground Potential Rise	4364.73 volts
Calculated Ground Resistance	0.399471 ohms
Equivalent Resistance	0.399455 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

La tensión de contacto se encuentra por encima del umbral de contacto.

Figura 94

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 6.

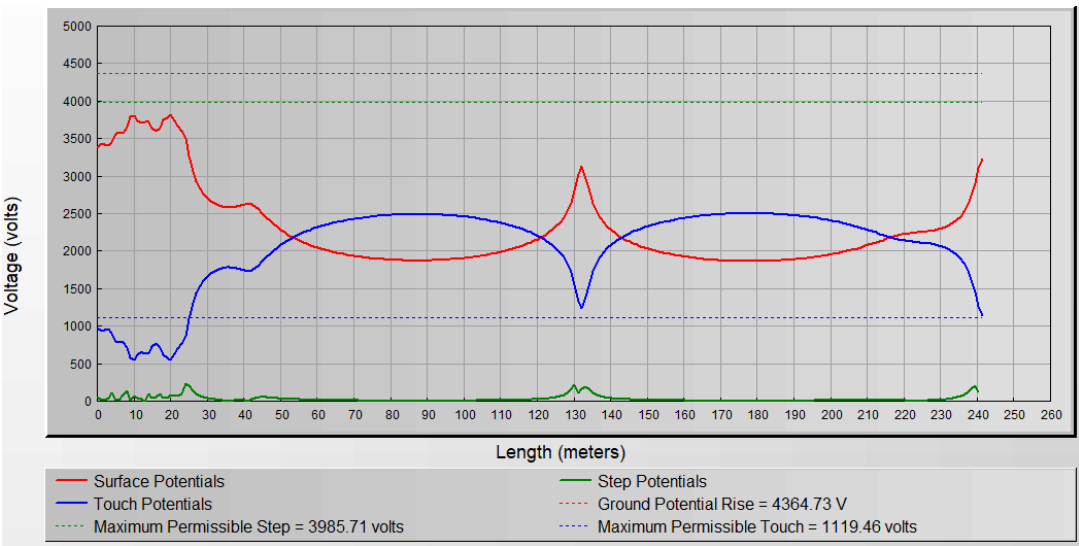
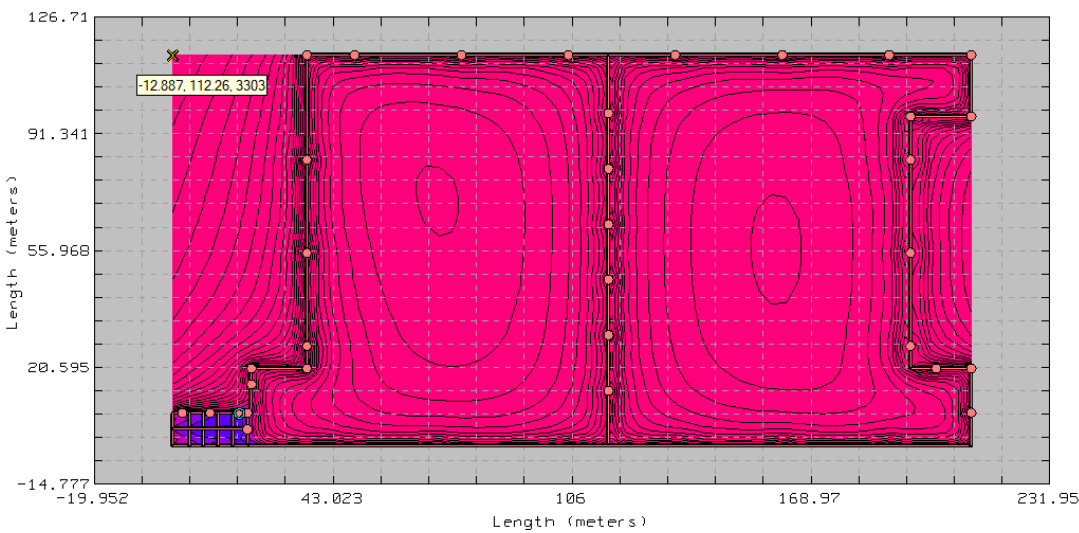


Figura 95

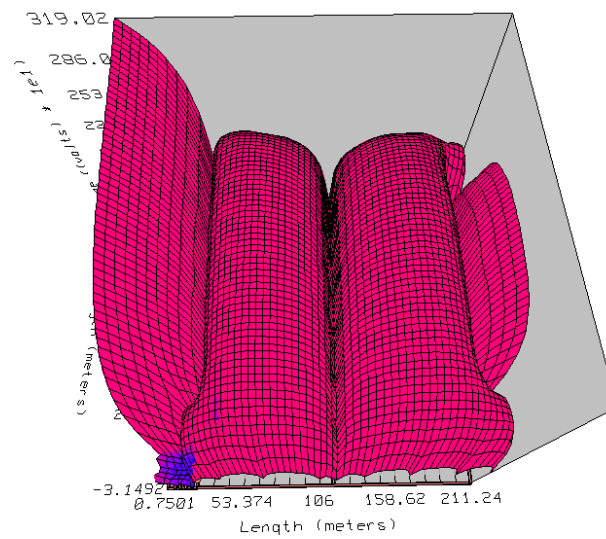
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 6.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 96

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 6.



3.8 Caso 7

La Figura 97 muestra el layout de una malla a tierra que cubre el área techada de naves y subestación. La malla cuenta con distribución de cuadrículas para el control de tensión superficial que no se logró en el caso 6.

Figura 97

Layout malla a tierra Caso 7.



Nota: Elaboración propia.

3.8.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A,ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,251.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

De los resultados anteriores tenemos:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 33.6 \, m$$

$$D = 15 \, m$$

$$L_x = 175.16 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 121.33 \, m$$

$$L_c = 3,130.21 \, m$$

$$L_T = 3,163.81 \, m$$

$$H = 1 \, m$$

$$2b = 0.05 \, m$$

$$n_R = 14$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Schwarz.

$$2a = 0.2 \, m$$

$$a' = \sqrt{2(0.1)(1)} = 0.447 \text{ m}$$

$$\sqrt{A} = \sqrt{21,251.67} = 145.78 \text{ m}$$

La profundidad h es muy pequeña respecto al área, para el cálculo de k1 y k2 se asume $h \approx 0$.

Del caso 6, Length/width ratio=175.16/121.33 = 1.44, $k_1 \approx 1.35$, $k_2 \approx 5.7$

Entonces

$$R_1 = \frac{95.50}{\pi(3,130.21)} \left[\ln \left(\frac{2(3,130.21)}{0.447} \right) + \frac{1.35(3,130.21)}{145.78} - 5.7 \right] = 0.32 \Omega$$

$$R_2 = \frac{95.50}{2\pi(14)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.025} \right) - 1 + \frac{2(1.35)(2.4)}{145.78} (\sqrt{14} - 1)^2 \right] = 1.76 \Omega$$

$$R_m = \frac{95.5}{\pi(3,130.21)} \left[\ln \left(\frac{2(3,130.21)}{2.4} \right) + \frac{1.35(3,130.21)}{145.78} - 5.7 + 1 \right] = 0.31 \Omega$$

$$R_g = \frac{0.32(1.76) - 0.31^2}{0.32 + 1.76 - 2(0.31)} = 0.318 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del caso 1:

$$I_G = 10,647.93 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 10,647.93(0.318) = 3,394.77 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 3,394.77 \text{ V} > E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$, continuamos con el paso 8.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(175.16 + 121.33) = 592.99 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(3,130.21)}{592.99} = 10.56$$

$$n_b = \sqrt{\frac{592.99}{4(145.78)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 10.56(1.01)(1)(1) = 10.65$$

Al tener electrodos verticales en las esquinas, entonces $k_{ii} = 1$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{15^2}{16(1)(0.2)} + \frac{(15+2(1))^2}{8(15)(0.2)} - \frac{1}{4(0.2)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(10.65)-1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.47$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(10.65) = 2.22$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 3,130.21 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{175.16^2 + 121.33^2}} \right) \right] 33.6 = 3,182.75 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(0.47)(2.22)(10,647.93)}{3,182.75} = 330.47 \text{ V}$$

Cálculo de la tensión de paso:

$$L_S = 0.75(3,130.21) + 0.85(33.6) = 2,376.22 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{15+1} + \frac{1}{15} (1 - 0.5^{10.56-2}) \right] = 0.20$$

La tensión de paso es:

$$E_s = \frac{95.5(0.20)(2.22)(10,647.93)}{2,376.22} = 190.17 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 330.47 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 190.17 \text{ V} < E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño.

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle.

3.8.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4:

Figura 98

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 7.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

De los resultados anteriores:

$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

Las Figuras 99 y 100 muestran el layout equivalente y modelo 3D respectivamente.

Figura 99

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 7.

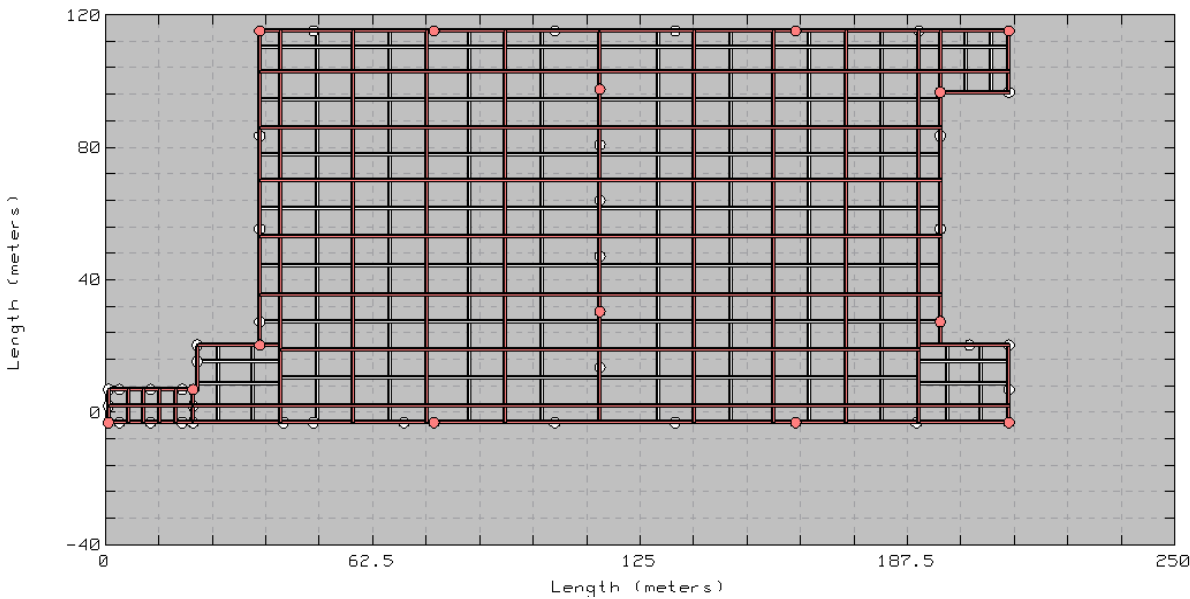
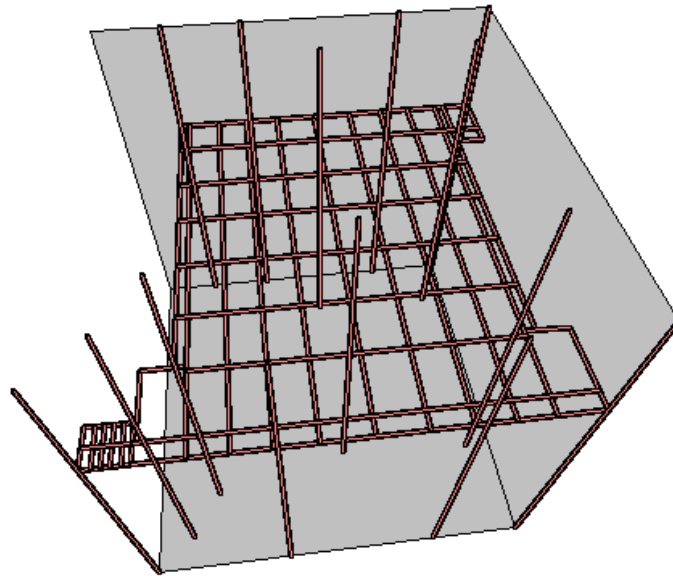


Figura 100

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 7.



Coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 101

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 7.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		200
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		200
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		200
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		200
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		200
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		200
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		200
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		200
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		200
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	41.087	20.284	1	1	Select		200
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		200
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		200
14	☒	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		200
15	☒	Primary	20.449	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		200
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		200
17	☒	Primary	211.244	-3.149	1	211.244	20.284	1	1	Select		200
18	☒	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		200
19	☒	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		200
20	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	115.085	1	1	Select		200
21	☒	Primary	190.187	20.284	1	211.244	20.284	1	1	Select		200
22	☒	Primary	41.087	-3.149	1	41.087	115.085	1	1	Select		200
23	☐	Primary	49.587	-3.149	1	49.587	115.085	1	1	Select		200
24	☒	Primary	58.087	-3.149	1	58.087	115.085	1	1	Select		200
25	☐	Primary	66.587	-3.149	1	66.587	115.085	1	1	Select		200
26	☒	Primary	75.087	-3.149	1	75.087	115.085	1	1	Select		200
27	☐	Primary	85.087	-3.149	1	85.087	115.085	1	1	Select		200
28	☒	Primary	93.587	-3.149	1	93.587	115.085	1	1	Select		200
29	☐	Primary	102.087	-3.149	1	102.087	115.085	1	1	Select		200
30	☒	Primary	190.187	-3.149	1	190.187	115.085	1	1	Select		200
31	☐	Primary	181.687	-3.149	1	181.687	115.085	1	1	Select		200
32	☒	Primary	173.187	-3.149	1	173.187	115.085	1	1	Select		200
33	☐	Primary	164.687	-3.149	1	164.687	115.085	1	1	Select		200
34	☒	Primary	156.187	-3.149	1	156.187	115.085	1	1	Select		200
35	☐	Primary	146.187	-3.149	1	146.187	115.085	1	1	Select		200
36	☒	Primary	137.687	-3.149	1	137.687	115.085	1	1	Select		200

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
36	☒	Primary	137.687	-3.149	1	137.687	115.085	1	1	Select		200
37	☐	Primary	129.187	-3.149	1	129.187	115.085	1	1	Select		200
38	☐	Primary	26.487	-3.149	1	26.487	20.284	1	1	Select		200
39	☐	Primary	34.487	-3.149	1	34.487	20.284	1	1	Select		200
40	☐	Primary	204.787	-3.149	1	204.787	20.284	1	1	Select		200
41	☐	Primary	196.787	-3.149	1	196.787	20.284	1	1	Select		200
42	☐	Primary	207.244	96.556	1	207.244	115.085	1	1	Select		200
43	☐	Primary	201.244	96.556	1	201.244	115.085	1	1	Select		200
44	☒	Primary	20.449	1.851	1	211.244	1.851	1	1	Select		200
45	☐	Primary	190.187	15.284	1	211.244	15.284	1	1	Select		200
46	☐	Primary	190.187	8.567	1	211.244	8.567	1	1	Select		200
47	☐	Primary	21.487	15.284	1	41.087	15.284	1	1	Select		200
48	☐	Primary	21.487	8.567	1	41.087	8.567	1	1	Select		200
49	☐	Primary	41.087	10.350	1	190.187	10.350	1	1	Select		200
50	☒	Primary	41.087	18.850	1	190.187	18.850	1	1	Select		200
51	☐	Primary	36.087	27.350	1	195.187	27.350	1	1	Select		200
52	☒	Primary	36.087	35.350	1	195.187	35.350	1	1	Select		200
53	☐	Primary	36.087	44.350	1	195.187	44.350	1	1	Select		200
54	☒	Primary	36.087	52.850	1	195.187	52.850	1	1	Select		200
55	☐	Primary	36.087	61.350	1	195.187	61.350	1	1	Select		200
56	☒	Primary	36.087	69.850	1	195.187	69.850	1	1	Select		200
57	☐	Primary	36.087	77.850	1	195.187	77.850	1	1	Select		200
58	☒	Primary	36.087	85.850	1	195.187	85.850	1	1	Select		200
59	☐	Primary	36.087	94.350	1	195.187	94.350	1	1	Select		200
60	☒	Primary	36.087	102.850	1	211.244	102.850	1	1	Select		200
61	☐	Primary	36.087	110.085	1	211.244	110.085	1	1	Select		200

Figura 102

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 7.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☐	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
2	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
3	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
4	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
5	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
6	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
7	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
8	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
9	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
10	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
11	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
12	☐	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
13	☐	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
14	☒	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
15	☐	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
16	☐	Primary	211.244	6.904	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
17	☐	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
18	☐	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
19	☐	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
20	☐	Primary	69.875	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
21	☐	Primary	41.686	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
22	☒	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
23	☒	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
24	☐	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
25	☒	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
26	☐	Primary	211.244	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
27	☒	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
28	☒	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
29	☐	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
30	☐	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
31	☐	Primary	48.639	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
32	☒	Primary	76.828	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
33	☐	Primary	201.950	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
34	☒	Primary	195.187	27.350	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
35	☐	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
36	☐	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
37	☐	Primary	195.187	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
38	☒	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
39	☐	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
40	☒	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
41	☐	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
42	☐	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
43	☐	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
44	☒	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
45	☐	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
46	☒	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
47	☐	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
48	☐	Primary	36.087	27.344	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
49	☐	Primary	21.487	15.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR:

Figura 103

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 7.

Output Results	
Ground Potential Rise	2777.64 volts
Calculated Ground Resistance	0.254212 ohms
Equivalent Resistance	0.254206 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran controlados.

Figura 104

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 7.

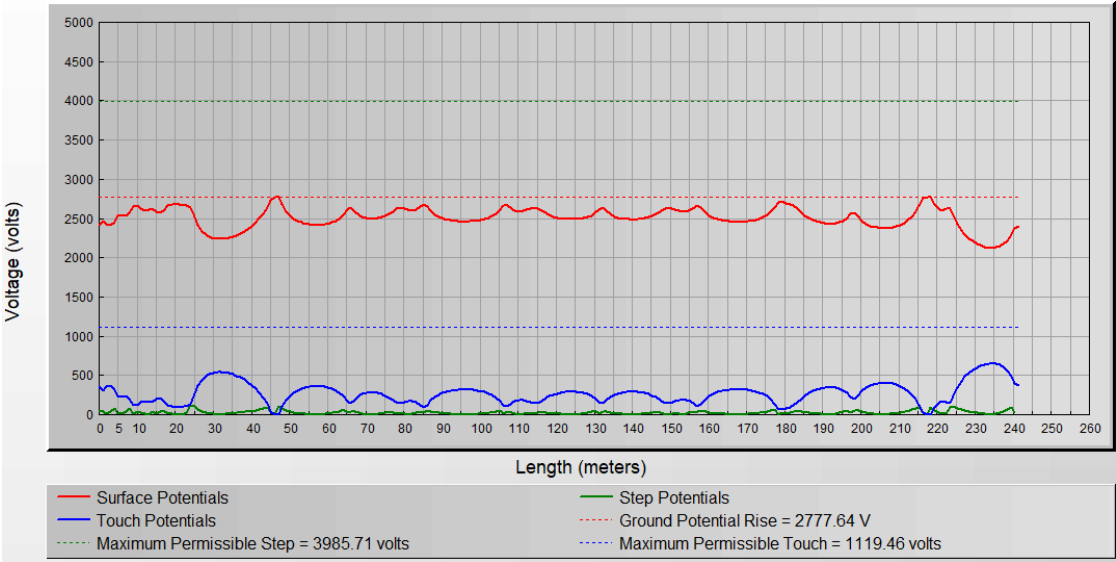
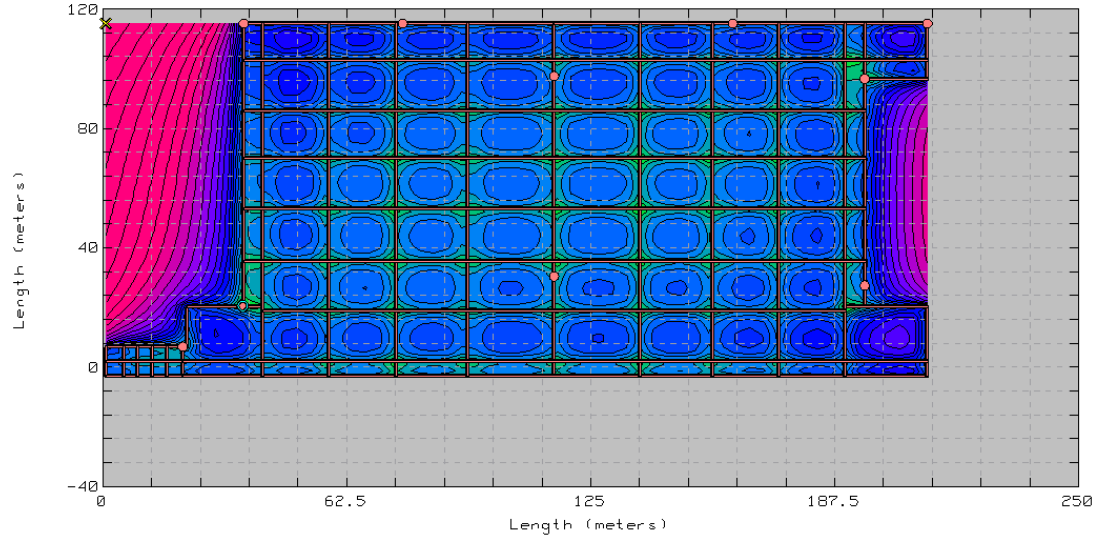


Figura 105

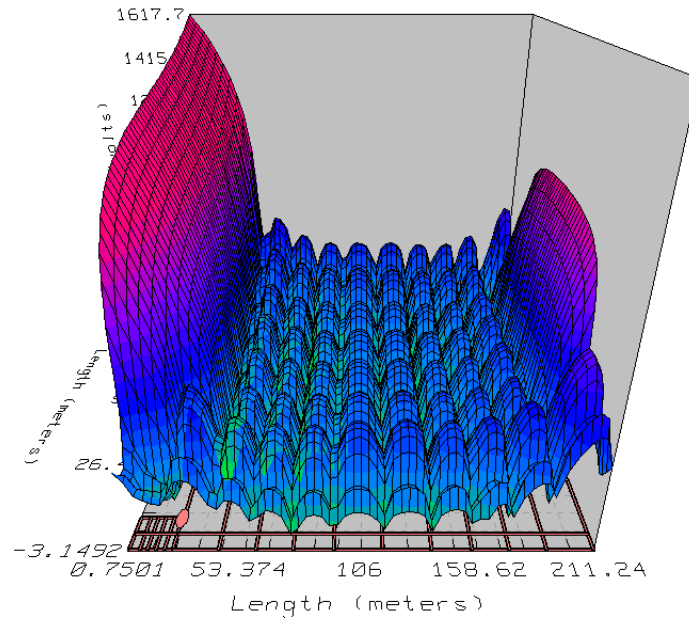
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 7.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 106

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 7.

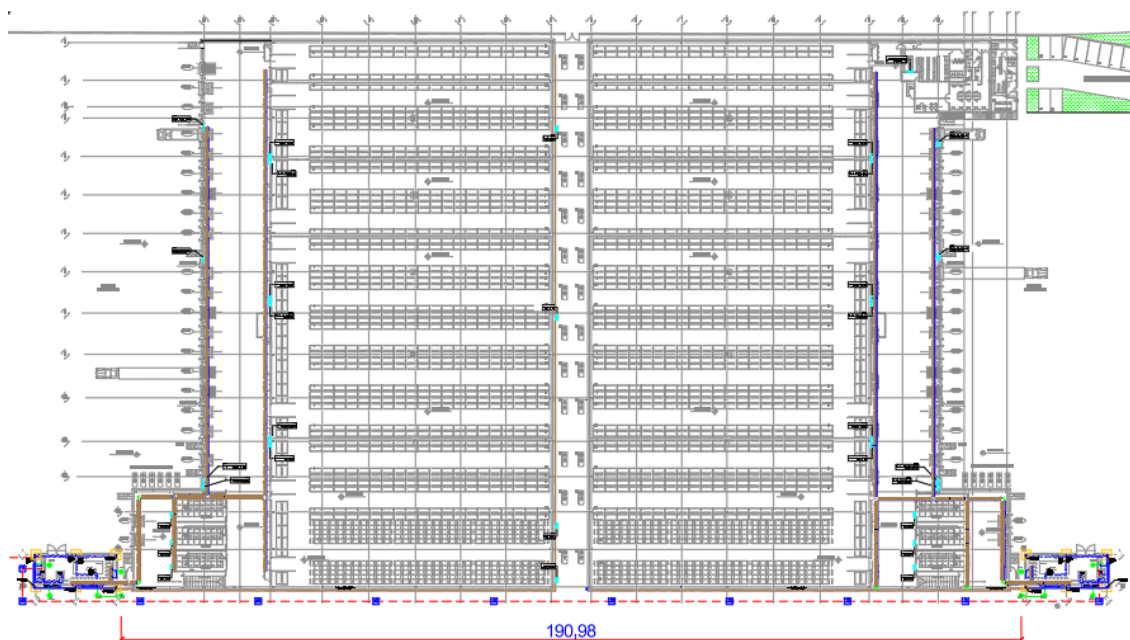


3.9 Caso 8

El caso 8 es similar al caso 1, pero con una segunda subestación. Ambas tienen pozos a tierra independientes y los resultados son los mismos.

Figura 107

Layout puesta a tierra caso 8.



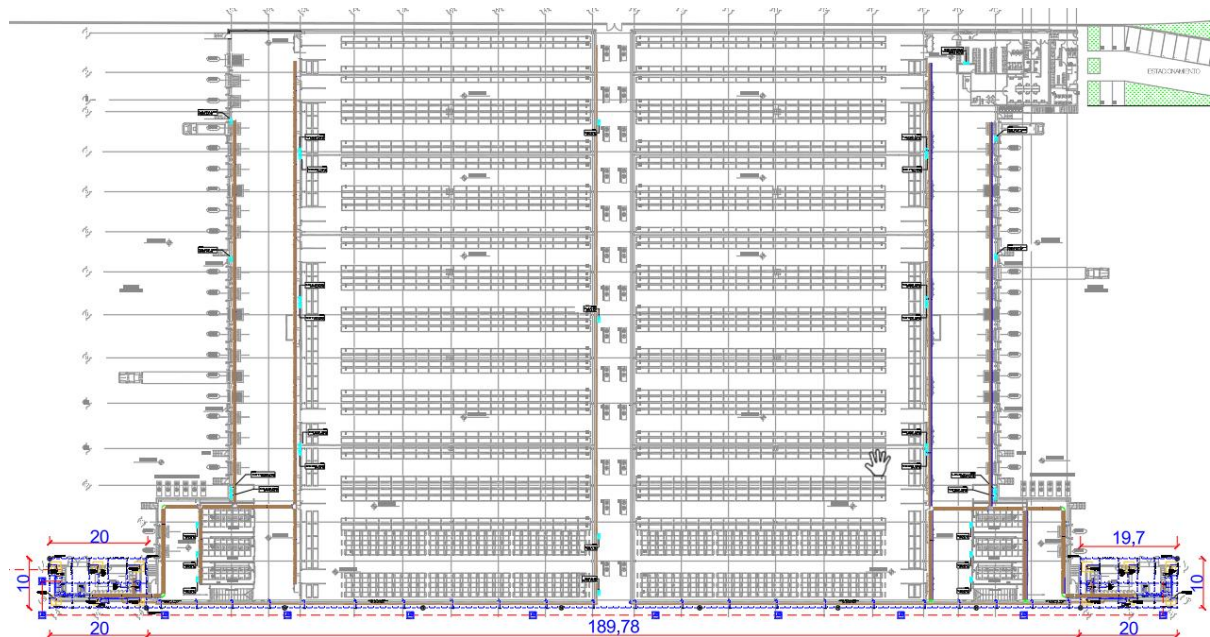
Nota: Elaboración propia.

3.10 Caso 9

En la Figura 108 se muestra el layout de dos mallas a tierra de 200 m² cada uno que cubren el área de la Subestación N°1 y Subestación N°2, estas mallas están interconectadas con 189.78 m de contrapeso enterrado a 1 m de profundidad al igual que las mallas.

Figura 108

Layout malla a tierra caso 9.



Nota: Elaboración propia.

3.10.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Este caso consiste en interconectar las dos mallas de las subestaciones, esto asegura mejores resultados que los del caso 2, sin embargo, no se puede obtener un resultado preciso de qué sucede en zonas externas a las mallas. Para efecto de estudio se considera una malla ideal equivalente de 40m de largo y 10m de ancho, los resultados solo son referenciales.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del resultado del caso 1 tenemos:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 400 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

De caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 1:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 9.6 \text{ m}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$L_x = 40 \text{ m}$$

$$L_y = 10 \text{ m}$$

$$L_c = 220 \text{ m}$$

$$L_T = 229.60 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.0158 \text{ m}$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Sverak.

$$R_g = 18.03 \left[\frac{1}{229.60} + \frac{1}{\sqrt{20(400)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 1\sqrt{\frac{20}{400}}} \right) \right] = 0.44$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G, t_f)

De los casos anteriores:

$$I_G = 10,647.93 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$GPR = I_g \cdot R_g = 10,647.93(0.44) = 4,737.96 \text{ V}$$

$GPR = 4,737.96 \text{ V} > E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$, continuamos con el paso 8.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(10+40) = 100 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(220)}{100} = 4.4$$

$$n_b = \sqrt{\frac{100}{4(20)}} = 1.12$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 4.4(1.12)(1)(1) = 4.92$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(4.92))^{\frac{2}{4.92}}} = 0.39$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{5^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(5+2(1))^2}{8(5)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.369}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(4.92)-1)} \right) \right] = 0.77$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(4.92) = 1.37$$

$$L_M = 220 + 9.6 = 229.6 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{18.03(0.77)(1.37)(10,647.93)}{229.6} = 884.96 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(220) + 0.85(9.6) = 173.16 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{5+1} + \frac{1}{5} (1 - 0.5^{4.92-2}) \right] = 0.27$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{18.03(0.27)(1.37)(10,647.93)}{173.16} = 406.95 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 884.96 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 406.95 \text{ V} < E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño.

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle.

3.10.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 109

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 9.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 110 y 111 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 110

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 9.

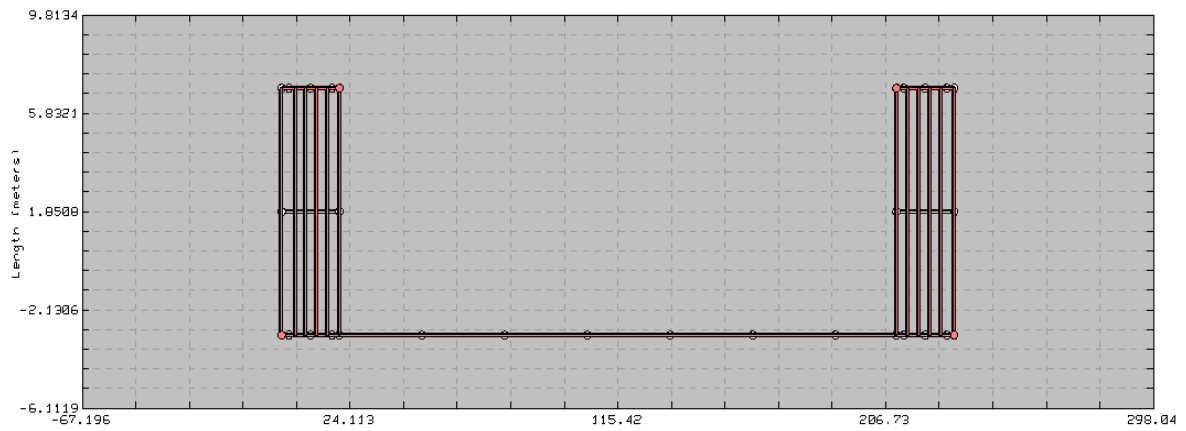
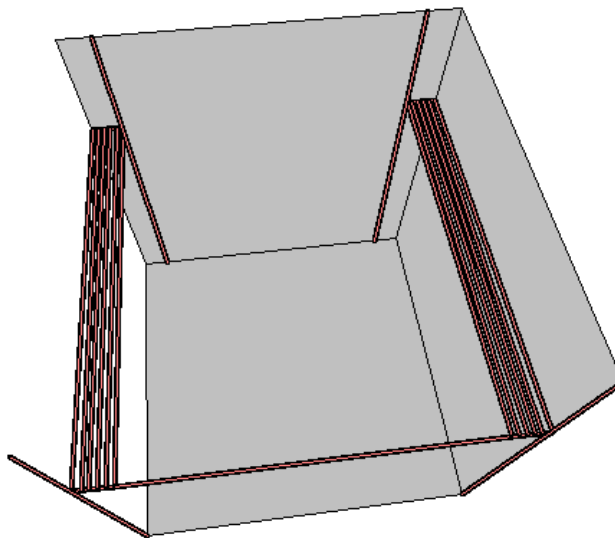


Figura 111

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 9.



En las Figuras 112 y 113 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 112

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 9.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	20.449	-3.149	1	210.396	-3.149	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	210.396	6.851	1	230.094	6.851	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	210.396	-3.149	1	210.396	6.851	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	230.094	-3.149	1	230.094	6.851	1	1	Select		14.1
14	☒	Primary	210.396	-3.149	1	230.094	-3.149	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	225.483	-3.149	1	225.483	6.851	1	1	Select		14.1
16	☒	Primary	221.983	-3.149	1	221.983	6.851	1	1	Select		14.1
17	☒	Primary	218.121	-3.149	1	218.121	6.851	1	1	Select		14.1
18	☒	Primary	214.259	-3.149	1	214.259	6.851	1	1	Select		14.1
19	☐	Primary	210.396	1.851	1	230.094	1.851	1	1	Select		14.1

Figura 113

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 9.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☐	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☐	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☐	Primary	230.094	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	210.396	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☒	Primary	230.094	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☒	Primary	210.396	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	230.094	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☐	Primary	210.396	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	220.245	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	220.245	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	227.594	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	227.594	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	212.896	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	212.896	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☐	Primary	48.638	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	76.827	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	105.016	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☐	Primary	133.205	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	161.394	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	189.583	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 114

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 9.

Output Results

Ground Potential Rise	1502.21 volts
Calculated Ground Resistance	0.137482 ohms
Equivalent Resistance	0.13748 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 115

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 9.

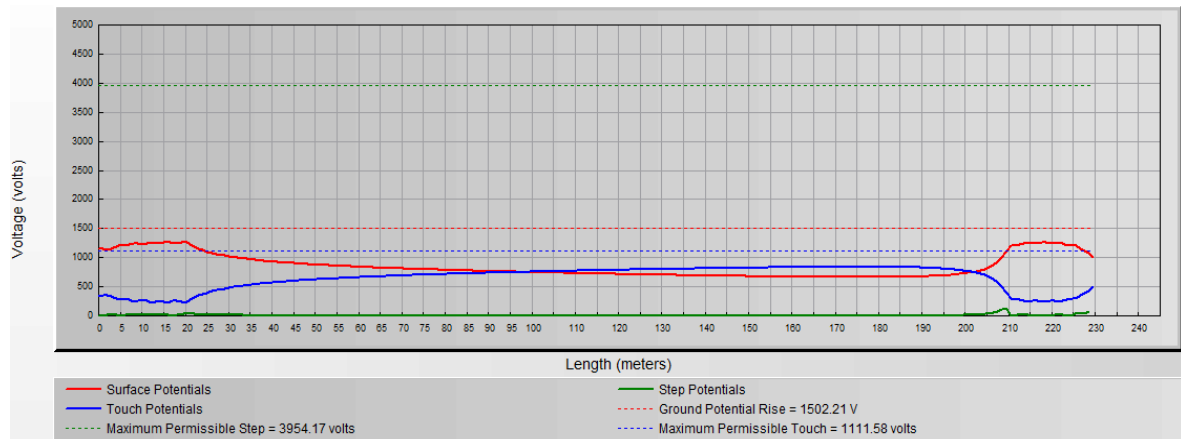
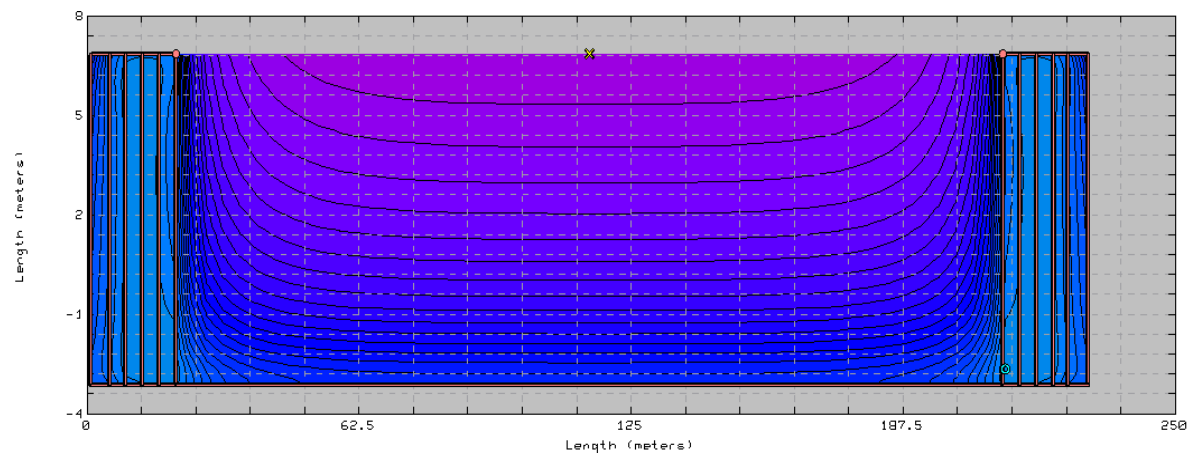


Figura 116

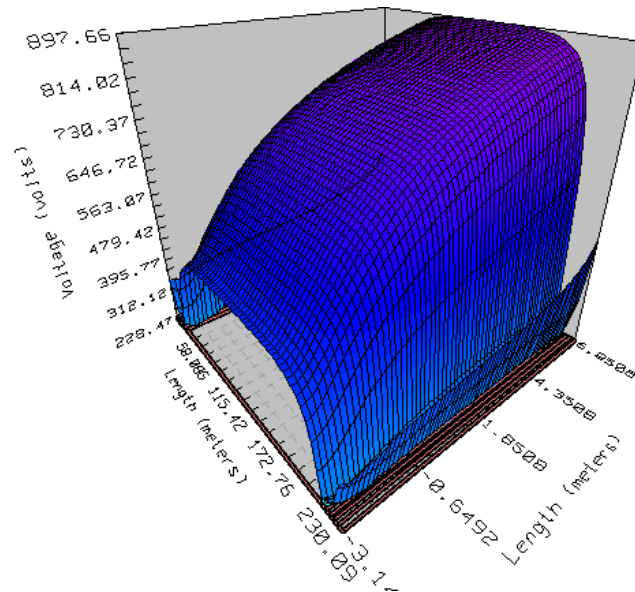
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 9.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 117

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 9.

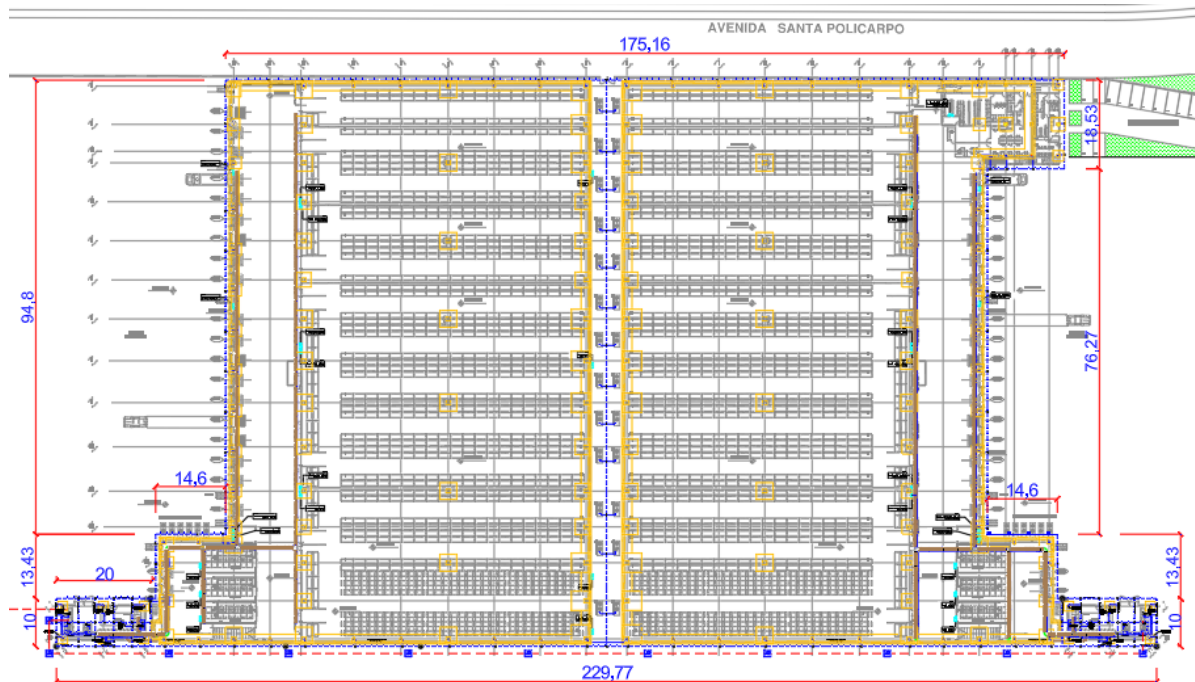


3.11 Caso 10

En la Figura 118 se muestra el layout de una malla a tierra que cubre el total del perímetro naves y las 02 subestaciones.

Figura 118

Layout malla a tierra caso 10.



Nota: Elaboración propia.

3.11.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Se hace la evaluación idealizando algunos pasos para efecto de estudio.

Paso 1: Data de campo (A,ρ)

Del caso 1:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,451.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 1:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \, V$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 9.6 \, m$$

D = 146.46 m (idealizando a una malla cuadrada de una sola cuadrícula de 21,451.67 m²)

$$L_x = 175.16 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 122.47 \, m$$

$$L_c = 2(175.16+122.47) = 595.26 \, m$$

$$L_T = 604.86 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.0158 \, m$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Sverak:

$$R_g = 18.03 \left[\frac{1}{604.86} + \frac{1}{\sqrt{20(21,451.67)}} \left(1 + \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{20}{21,451.67}}} \right) \right] = 0.08 \Omega$$

Paso 6: Corriente de la máxima corriente de la malla (I_G , tf)

Del caso 1:

$$I_G = 10,647.93 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 10,647.93(0.08) = 895.14 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 895.14 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$, podemos continuar con la ingeniería de detalle, pero por fines de estudio continuamos con los pasos siguientes.

Paso 8: Cálculo de la tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla:

Para una geometría rectangular con pocas varillas verticales

$$L_p = 2(175.16 + 122.47) = 595.26 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(595.26)}{595.26} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{595.26}{4(146.46)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.01)(1)(1) = 2.02$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(2.02))^{\frac{2}{2.02}}} = 0.25$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{146.46^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(146.46 + 2(1))^2}{8(146.46)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.25}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.82$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.02) = 0.94$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con pocos electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 595.26 + 9.6 = 604.86 \text{ m}$$

El voltaje de malla es

$$E_m = \frac{18.03(1.82)(0.94)(10,647.93)}{604.86} = 544.99 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(595.26) + 0.85(9.6) = 454.6 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{146.46+1} + \frac{1}{146.46} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.16$$

El voltaje de paso es

$$E_s = \frac{18.03(0.16)(0.94)(10,647.93)}{454.6} = 64.22 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 544.99 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 64.22 \text{ V} < E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 11: No requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle.

3.11.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 119

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 10.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 120 y 121 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 120

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 10.

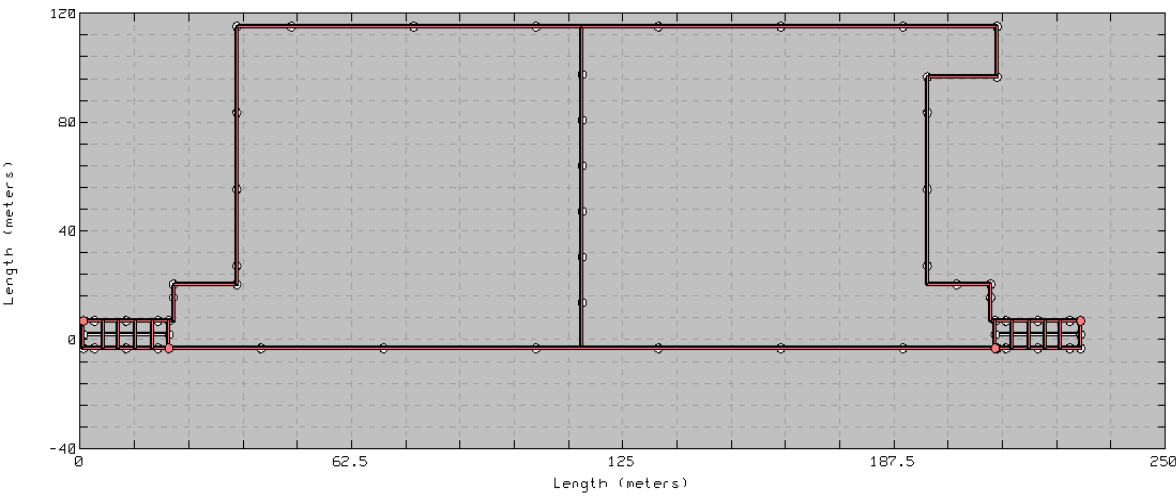
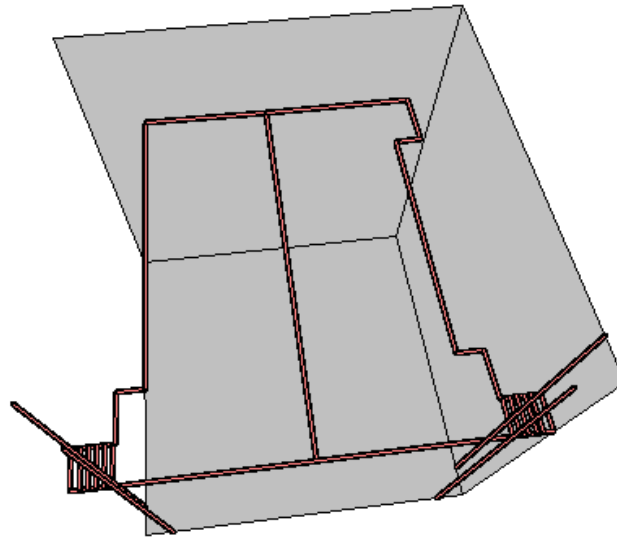


Figura 121

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 10.



En las Figuras 122 y 123 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 122

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 10.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	36.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☒	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.877	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☒	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
18	☒	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
19	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	96.556	1	1	Select		14.1
20	☒	Primary	195.187	20.284	1	209.787	20.284	1	1	Select		14.1
21	☒	Primary	209.787	6.851	1	230.523	6.851	1	1	Select		14.1
22	☒	Primary	210.824	-3.149	1	210.824	6.851	1	1	Select		14.1
23	☒	Primary	230.523	-3.149	1	230.523	6.851	1	1	Select		14.1
24	☒	Primary	211.244	-3.149	1	230.523	-3.149	1	1	Select		14.1
25	☒	Primary	225.912	-3.149	1	225.912	6.851	1	1	Select		14.1
26	☒	Primary	222.412	-3.149	1	222.412	6.851	1	1	Select		14.1
27	☒	Primary	218.550	-3.149	1	218.550	6.851	1	1	Select		14.1
28	☒	Primary	214.688	-3.149	1	214.688	6.851	1	1	Select		14.1
29	☐	Primary	210.824	1.851	1	230.523	1.851	1	1	Select		14.1
30	☒	Primary	209.787	6.851	1	209.787	20.284	1	1	Select		14.1

Figura 123

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 10.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☐	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☐	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☐	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☐	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☐	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	201.950	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☐	Primary	195.187	27.095	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	189.587	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☐	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☐	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
31	☐	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
32	☐	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
33	☐	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
34	☐	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
35	☐	Primary	36.087	27.094	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
36	☐	Primary	21.487	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
36	☐	Primary	21.487	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
37	☐	Primary	69.875	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
38	☐	Primary	41.686	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
39	☐	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
40	☐	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
41	☐	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
42	☐	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
43	☐	Primary	209.787	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
44	☐	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
45	☐	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
46	☐	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
47	☒	Primary	230.523	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
48	☒	Primary	210.824	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
49	☐	Primary	230.523	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
50	☐	Primary	210.824	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
51	☐	Primary	230.523	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
52	☐	Primary	210.824	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
53	☐	Primary	220.674	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
54	☐	Primary	220.674	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
55	☐	Primary	228.023	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
56	☐	Primary	228.023	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
57	☐	Primary	213.324	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
58	☐	Primary	213.324	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
59	☐	Primary	209.787	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 124

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 10.

Output Results

Ground Potential Rise	741.157 volts
Calculated Ground Resistance	0.0678302 ohms
Equivalent Resistance	0.0678297 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 125

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 10.

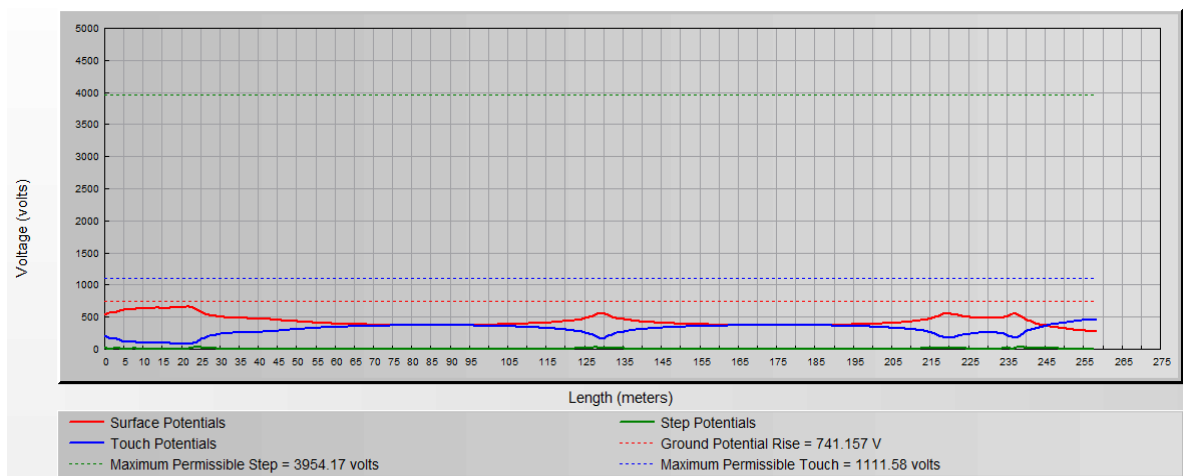
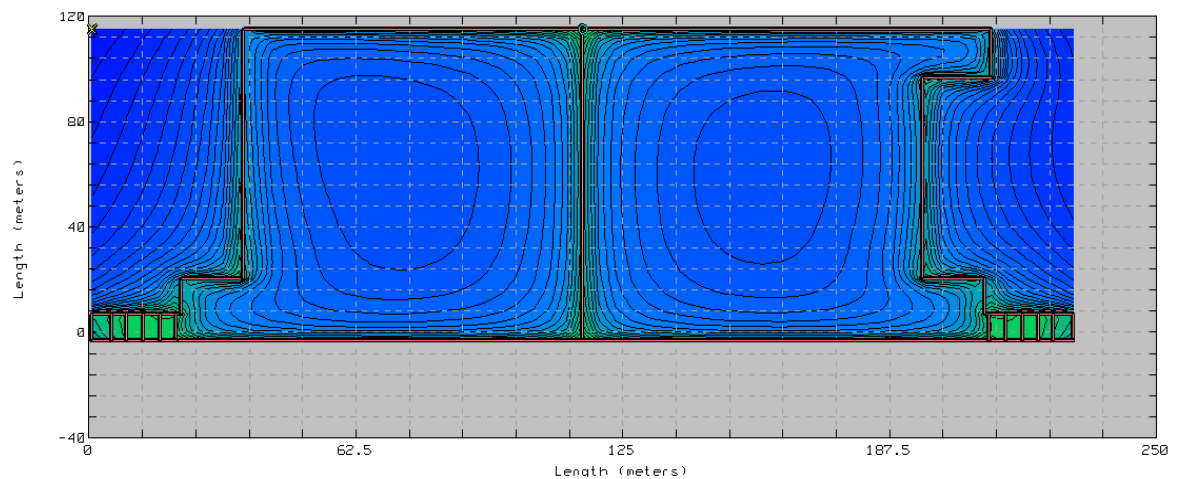


Figura 126

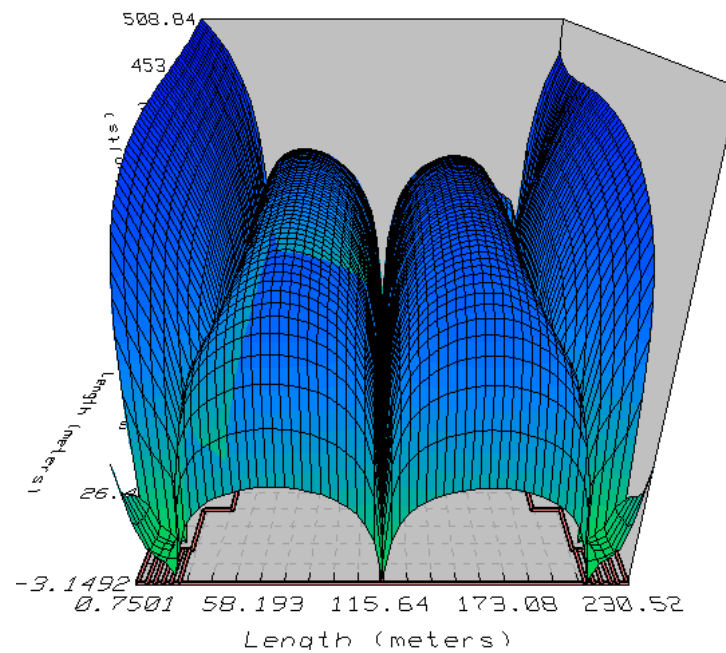
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 10.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 127

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 10.

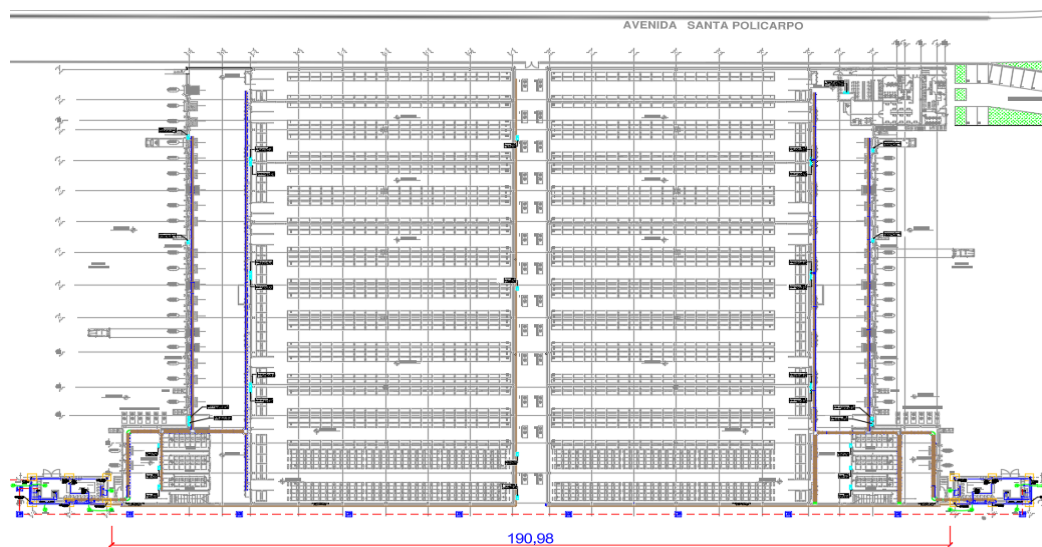


3.12 Caso 11

El caso 11 tiene resultados similares al caso 4, en este caso ambas subestaciones tienen pozos a tierra independientes, lo cual es una práctica común en plantas industriales.

Figura 128

Layout puesta a tierra caso 11.



Nota:

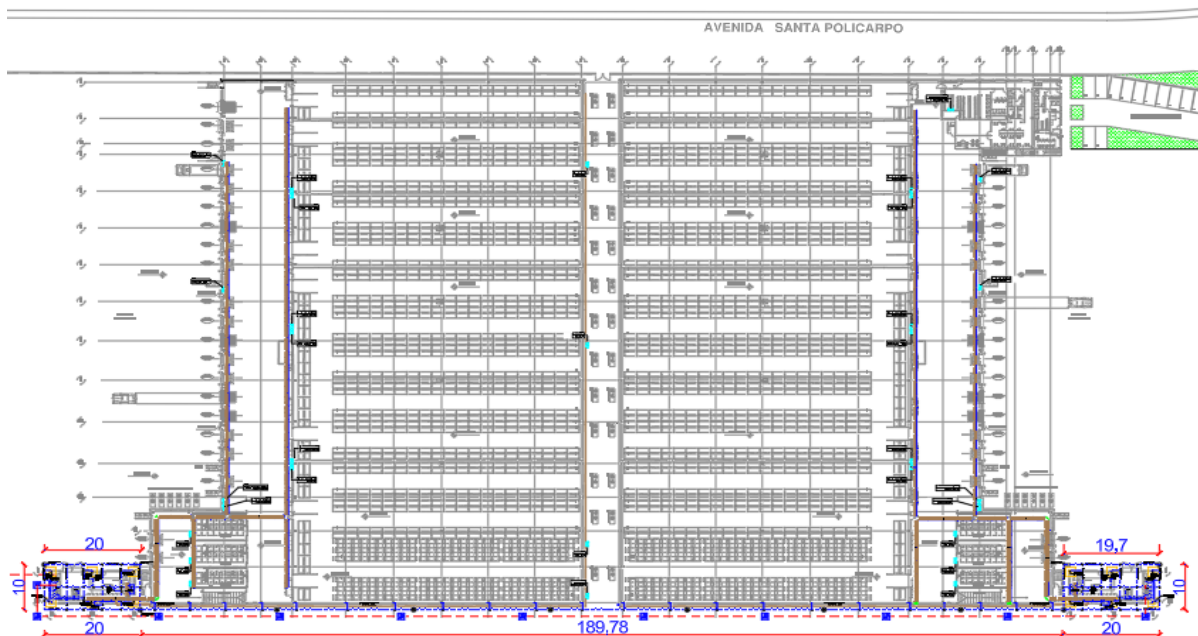
Elaboración propia.

3.13 Caso 12

En la Figura 129 se muestra el layout de dos mallas a tierra de 200 m² cada una que cubren el área de la Subestación N°1 y Subestación N°2, estas mallas están interconectadas con 189.78 m de contrapeso enterrado a 1 m de profundidad al igual que las mallas. El caso es similar al caso 9, con la diferencia que el caso 12 tiene un suelo con mayor resistividad.

Figura 129

Layout malla a tierra caso 12.



Nota: Elaboración propia.

3.13.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

La interconexión de las dos mallas de las subestaciones asegura mejores resultados que los del caso 5. La losa interna de cada subestación es de concreto semiseco de 50,000 Ω -m. Para efecto de estudio se considera una malla ideal equivalente de 40m de largo y 10m de ancho, los resultados dan una referencia para averiguar qué sucede dentro de las mallas.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 400 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

De caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

De caso 5:

$$C_s = 0.7697$$

$$E_{t50} = 9,633.82 \text{ V}$$

$$E_{s50} = 38,043.15 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 72 \text{ m}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$L_x = 40 \text{ m}$$

$$L_y = 10 \text{ m}$$

$$L_c = 220 \text{ m}$$

$$L_T = 292 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.05 \text{ m}$$

$$n_R = 30$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Schwarz.

$$2a = 0.2 \text{ m}$$

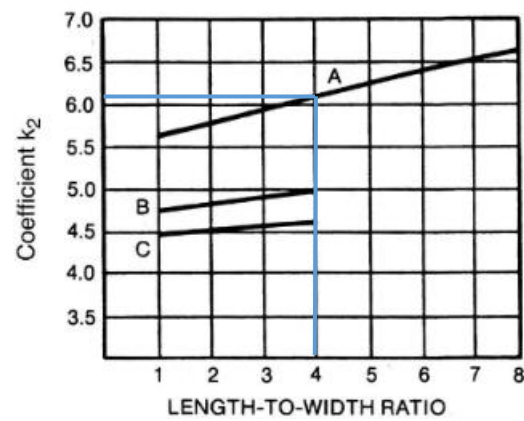
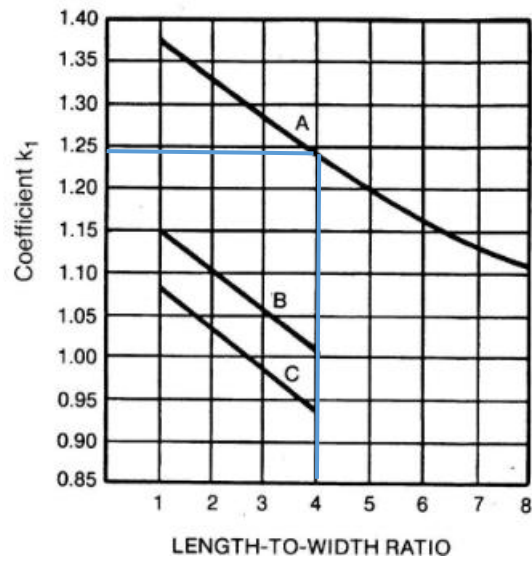
$$a' = \sqrt{2(0.1)(1)} = 0.447 \text{ m}$$

Hallando k1 y k2

$$\sqrt{A} = \sqrt{400} = 20 \text{ m}$$

$$\frac{\sqrt{A}}{10} = 2 \text{ m}$$

Length/width ratio=40/10 = 4, $k_1 \approx 1.24$, $k_2 \approx 6.1$



Entonces

$$R_1 = \frac{95.50}{\pi(220)} \left[\ln \left(\frac{2(220)}{0.447} \right) + \frac{1.24(220)}{20} - 6.1 \right] = 1.99 \, \Omega$$

$$R_2 = \frac{95.50}{2\pi(30)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.025} \right) - 1 + \frac{2(1.24)(2.4)}{20} (\sqrt{30} - 1)^2 \right] = 2.01 \, \Omega$$

$$R_m = \frac{95.5}{\pi(220)} \left[\ln \left(\frac{2(220)}{2.4} \right) + \frac{1.24(220)}{20} - 6.1 + 1 \right] = 1.9 \, \Omega$$

$$R_g = \frac{1.99(2.01) - 1.9^2}{1.99 + 2.01 - 2(1.9)} = R_g = 1.95 \, \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

De los casos anteriores:

$$I_G = 10,647.93 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_g \cdot R_g = 10,647.93(1.95) = 20,774.52 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 20,774.52 \text{ V} > E_{t50} = 9,633.82 \text{ V}$, continuamos con el paso 8.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(10+40) = 100 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(220)}{100} = 4.4$$

$$n_b = \sqrt{\frac{100}{4(20)}} = 1.12$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 4.4(1.12)(1)(1) = 4.92$$

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{5^2}{16(1)(0.2)} + \frac{(5+2(1))^2}{8(5)(0.2)} - \frac{1}{4(0.2)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(4.92)-1)} \right) \right] = 0.26$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(4.92) = 1.37$$

$$L_M = 220 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{40^2 + 10^2}} \right) \right] 72 = 336.71 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(0.26)(1.37)(10,647.93)}{336.71} = 1,095.13 \text{ V}$$

Cálculo de la tensión de paso:

$$L_S = 0.75(220) + 0.85(72) = 226.2 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{5+1} + \frac{1}{5} (1 - 0.5^{4.92-2}) \right] = 0.27$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.27)(1.37)(10,647.93)}{226.2} = 1,649.6 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 1,095.13 \text{ V} < E_{t50} = 9,633.82 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 1,649.6 \text{ V} < E_{s50} = 38,043.15 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: No se requiere ingeniería de detalle

3.13.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 5:

Figura 130

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 12.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.769961
Maximum Permissible Touch Voltage	9637.38 volts
Maximum Permissible Step Voltage	38057.4 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 132 y 133 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 131

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 12.

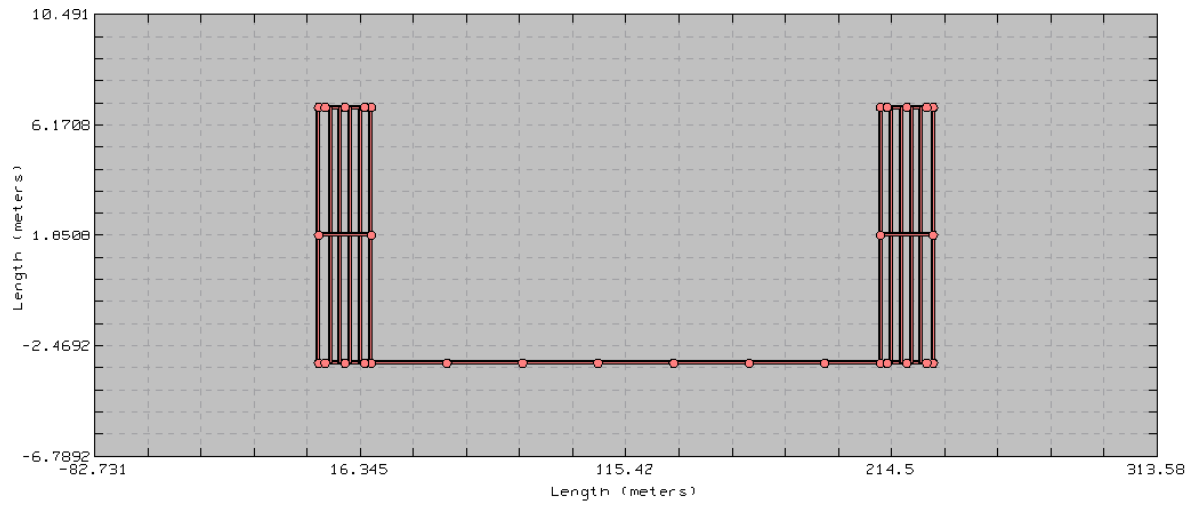
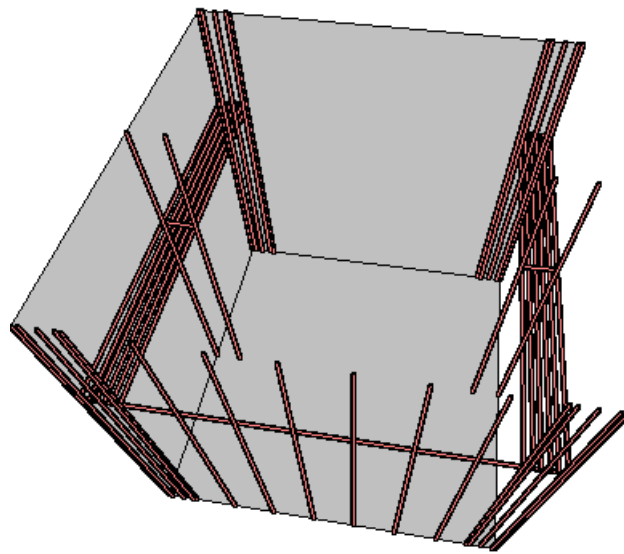


Figura 132

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 12.



En las Figura 133 y Figura 134 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 133

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 12.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		200
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		200
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		200
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		200
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		200
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		200
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		200
10	☒	Primary	20.449	-3.149	1	210.396	-3.149	1	1	Select		200
11	☒	Primary	210.396	6.851	1	230.094	6.851	1	1	Select		200
12	☒	Primary	210.396	-3.149	1	210.396	6.851	1	1	Select		200
13	☒	Primary	230.094	-3.149	1	230.094	6.851	1	1	Select		200
14	☒	Primary	210.396	-3.149	1	230.094	-3.149	1	1	Select		200
15	☒	Primary	225.483	-3.149	1	225.483	6.851	1	1	Select		200
16	☒	Primary	221.983	-3.149	1	221.983	6.851	1	1	Select		200
17	☒	Primary	218.121	-3.149	1	218.121	6.851	1	1	Select		200
18	☒	Primary	214.259	-3.149	1	214.259	6.851	1	1	Select		200
19	☒	Primary	210.396	1.851	1	230.094	1.851	1	1	Select		200

Figura 134

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 12.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
5	☒	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
6	☒	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
7	☒	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
8	☒	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
9	☒	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
10	☒	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
11	☒	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
12	☒	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
13	☒	Primary	230.094	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
14	☒	Primary	210.396	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
15	☒	Primary	230.094	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
16	☒	Primary	210.396	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
17	☒	Primary	230.094	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
18	☒	Primary	210.396	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
19	☒	Primary	220.245	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
20	☒	Primary	220.245	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
21	☒	Primary	227.594	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
22	☒	Primary	227.594	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
23	☒	Primary	212.896	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
24	☒	Primary	212.896	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
25	☒	Primary	48.638	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
26	☒	Primary	76.827	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
27	☒	Primary	105.016	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
28	☒	Primary	133.205	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
29	☒	Primary	161.394	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
30	☒	Primary	189.583	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 135

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 12.

Output Results

Ground Potential Rise	7083.81 volts
Calculated Ground Resistance	0.648343 ohms
Equivalent Resistance	0.648301 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 136

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 12.

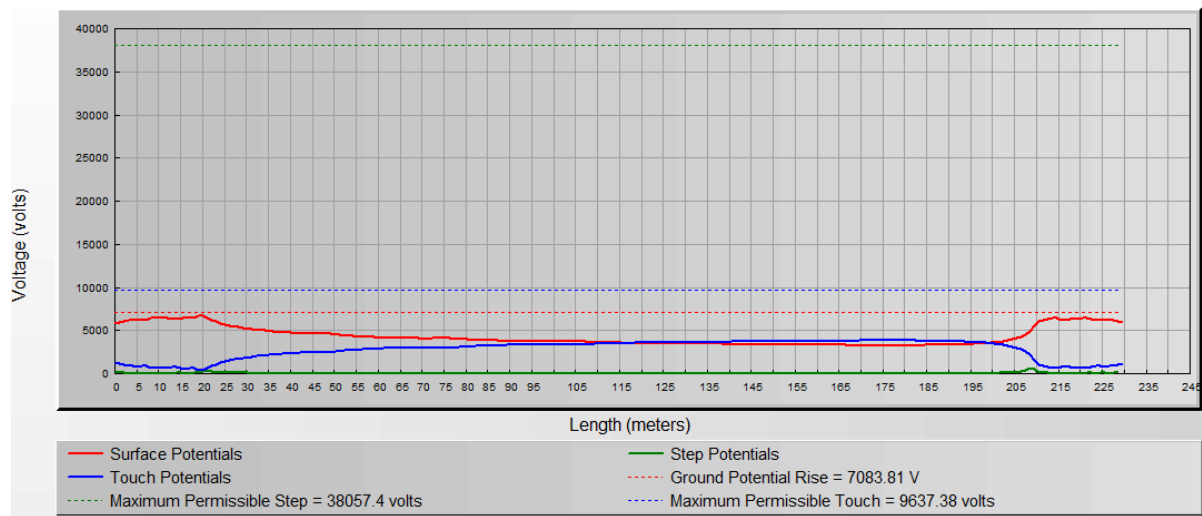
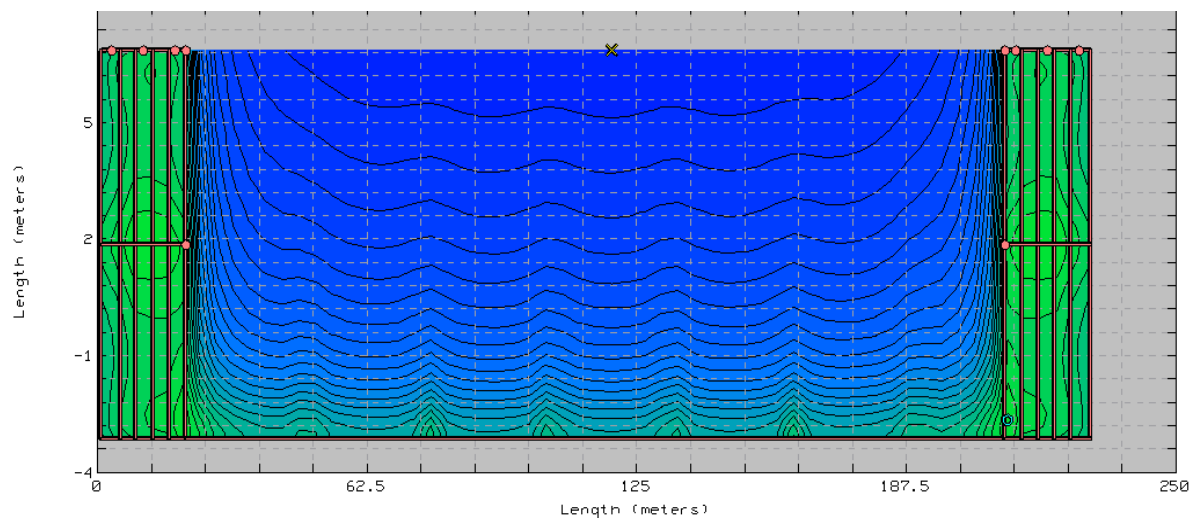


Figura 137

Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 12.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 12.



Figura 139

154

3.14.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Se hace la evaluación idealizando algunos pasos para efecto de estudio.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del resultado del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,451.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 141.6 \, m$$

D = 146.46 m (idealizando a una malla cuadrada de una sola cuadrícula de 21,451.67 m²)

$$L_x = 175.16 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 122.47 \, m$$

$$L_c = 2(175.16+122.47) = 595.26 \, m$$

$$L_T = 141.6+595.26 = 736.86 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.05 \, m$$

$$n_R = 59$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Schwarz:

$$2a = 0.2 \text{ m}$$

$$a' = \sqrt{2(0.1)(1)} = 0.447 \text{ m}$$

Hallando k_1 y k_2

$$\sqrt{A} = \sqrt{21,451.67} = 146.46 \text{ m}$$

La profundidad h es muy pequeña respecto al área, para el cálculo de k_1 y k_2 se asume $h \approx 0$.

Del Caso 6, Length/width ratio = $175.16/122.47 = 1.43$, $k_1 \approx 1.35$, $K_2 \approx 5.7$

Entonces

$$R_1 = \frac{95.50}{\pi(595.26)} \left[\ln \left(\frac{2(595.26)}{0.447} \right) + \frac{1.35(595.26)}{146.46} - 5.7 \right] = 0.39 \Omega$$

$$R_2 = \frac{95.50}{2\pi(59)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.025} \right) - 1 + \frac{2(1.35)(2.4)}{146.46} (\sqrt{59} - 1)^2 \right] = 0.59 \Omega$$

$$R_m = \frac{95.5}{\pi(595.26)} \left[\ln \left(\frac{2(595.26)}{2.4} \right) + \frac{1.35(595.26)}{146.46} - 5.7 + 1 \right] = 0.36 \Omega$$

$$R_g = \frac{0.39(0.59) - 0.36^2}{0.39 + 0.59 - 2(0.36)} = 0.38 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del caso 1:

$$I_G = 10,647.93 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 10,647.93(0.38) = 4,125.22 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 4,125.22 \text{ V} > E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$, pasamos al paso 8.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular con varillas verticales en los vértices.

$$L_p = 2(175.16 + 122.47) = 595.26 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(595.26)}{595.26} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{595.26}{4(146.46)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.01)(1)(1) = 2.02$$

$$K_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{146.46^2}{16(1)(0.2)} + \frac{(146.46 + 2(1))^2}{8(146.46)(0.2)} - \frac{1}{4(0.2)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right] = 1.38$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.02) = 0.94$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 595.26 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{175.16^2 + 122.47^2}} \right) \right] 141.6 = 816.68 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(1.38)(0.94)(10,647.93)}{816.68} = 1,624.78 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(595.26) + 0.85(141.6) = 566.8 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{146.46+1} + \frac{1}{146.46} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.16$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.16)(0.94)(10,647.93)}{566.8} = 272.75 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 1,624.78 \text{ V} > E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Se debe modificar el diseño, esto se evalúa en el caso 14.

3.14.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del resultado del caso 4:

Figura 140

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 13.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 141 y 142 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 141

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 13.

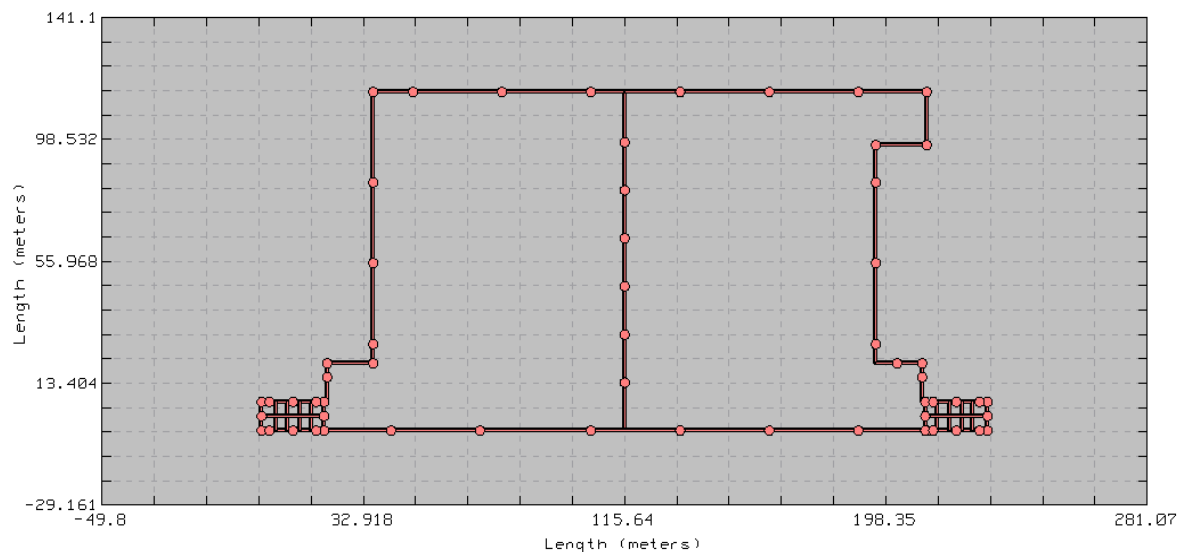
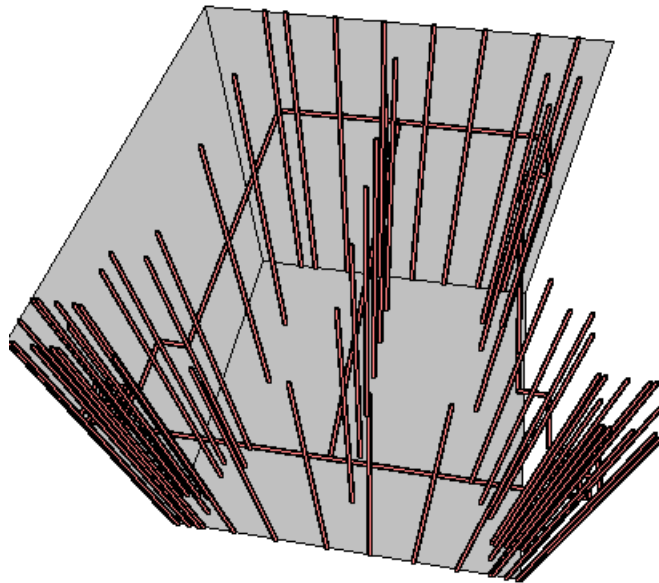


Figura 142

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 13



En las Figuras 143 y 144 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 143

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 13.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		200
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		200
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		200
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		200
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		200
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		200
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		200
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		200
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		200
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	36.087	20.284	1	1	Select		200
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		200
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		200
14	☒	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		200
15	☒	Primary	20.877	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		200
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		200
17	☒	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		200
18	☒	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		200
19	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	96.556	1	1	Select		200
20	☒	Primary	195.187	20.284	1	209.787	20.284	1	1	Select		200
21	☒	Primary	209.787	6.851	1	230.523	6.851	1	1	Select		200
22	☒	Primary	210.824	-3.149	1	210.824	6.851	1	1	Select		200
23	☒	Primary	230.523	-3.149	1	230.523	6.851	1	1	Select		200
24	☒	Primary	211.244	-3.149	1	230.523	-3.149	1	1	Select		200
25	☒	Primary	225.912	-3.149	1	225.912	6.851	1	1	Select		200
26	☒	Primary	222.412	-3.149	1	222.412	6.851	1	1	Select		200
27	☒	Primary	218.550	-3.149	1	218.550	6.851	1	1	Select		200
28	☒	Primary	214.688	-3.149	1	214.688	6.851	1	1	Select		200
29	☒	Primary	210.824	1.851	1	230.523	1.851	1	1	Select		200
30	☒	Primary	209.787	6.851	1	209.787	20.284	1	1	Select		200

Figura 144

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 13.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
5	☒	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
6	☒	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
7	☒	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
8	☒	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
9	☒	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
10	☒	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
11	☒	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
12	☒	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
13	☒	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
14	☒	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
15	☒	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
16	☒	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
17	☒	Primary	201.950	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
18	☒	Primary	195.187	27.095	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
19	☒	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
20	☒	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
21	☒	Primary	189.587	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
22	☒	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
23	☒	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
24	☒	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
25	☒	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
26	☒	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
27	☒	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
28	☒	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
29	☒	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
30	☒	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
31	☒	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
32	☒	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
33	☒	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
34	☒	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
35	☒	Primary	36.087	27.094	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
36	☒	Primary	21.487	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
37	☒	Primary	69.875	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
38	☒	Primary	41.686	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
39	☒	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
40	☒	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
41	☒	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
42	☒	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
43	☒	Primary	209.787	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
44	☒	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
45	☒	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
46	☒	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
47	☒	Primary	230.523	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
48	☒	Primary	210.824	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
49	☒	Primary	230.523	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
50	☒	Primary	210.824	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
51	☒	Primary	230.523	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
52	☒	Primary	210.824	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
53	☒	Primary	220.674	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
54	☒	Primary	220.674	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
55	☒	Primary	228.023	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
56	☒	Primary	228.023	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
57	☒	Primary	213.324	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
58	☒	Primary	213.324	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
59	☒	Primary	209.787	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 145

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 13.

Output Results

Ground Potential Rise	3525.57 volts
Calculated Ground Resistance	0.322666 ohms
Equivalent Resistance	0.322656 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de toque se encuentran por encima del umbral de toque.

Figura 146

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 13.

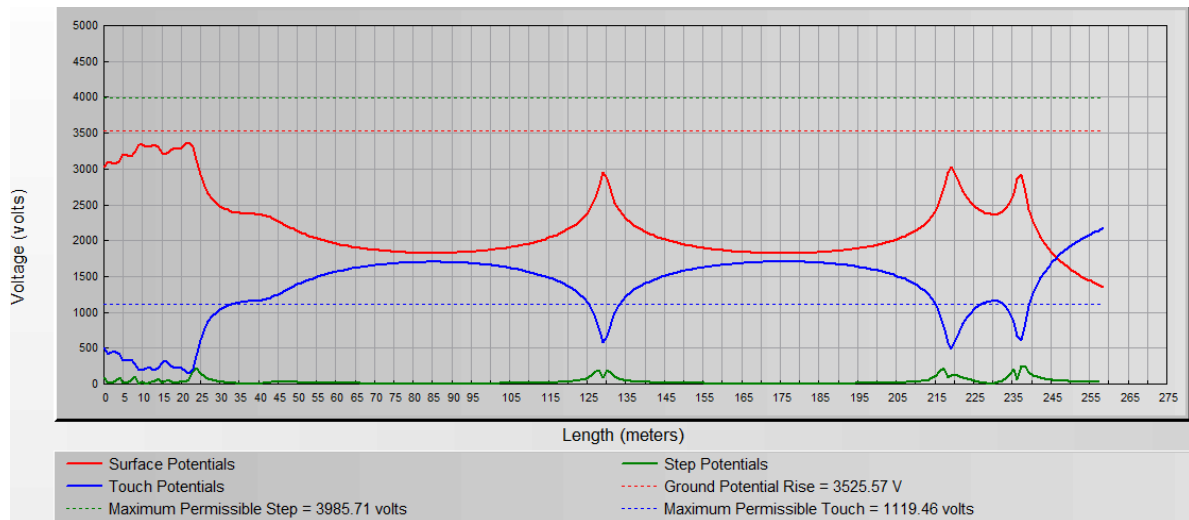
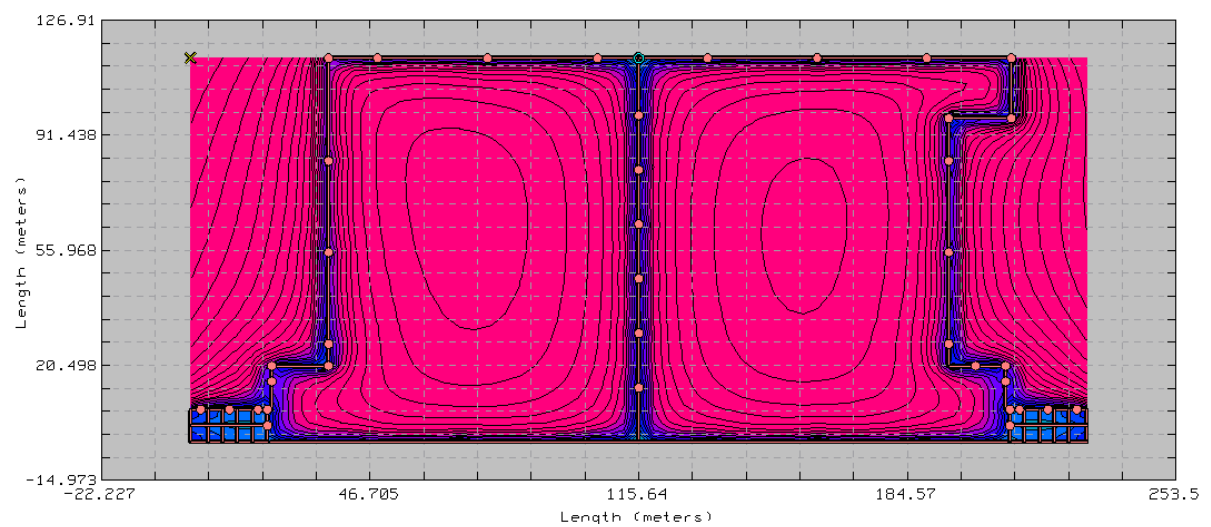


Figura 147

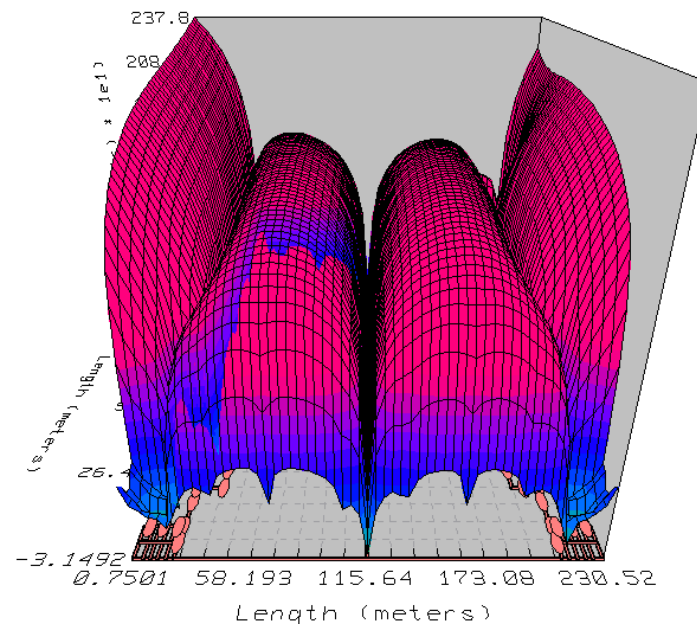
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 13.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 148

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 13.

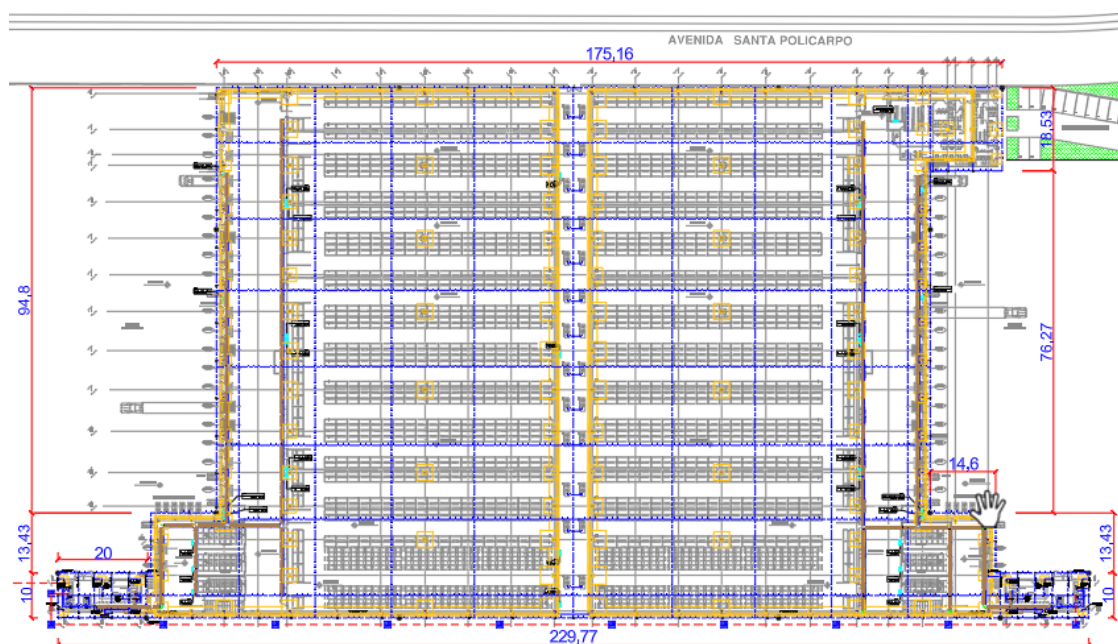


3.15 Caso 14

La Figura 149 muestra el layout de una malla a tierra que cubre el área techada de naves y 02 subestaciones. La malla cuenta con distribución de cuadrículas para el control de tensión superficial.

Figura 149

Layout malla a tierra caso 14.



Nota: Elaboración propia.

3.15.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,451.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3lo, tc, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50} , E_{s50})

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_c , L_T , h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 31.2 \, m$$

$$D = 15 \, m$$

$$L_x = 175.16 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 122.47 \, m$$

$$L_c = 3,157.85 \, m$$

$$L_T = 3,189.05 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.05 \, m$$

$$n_R = 13$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Schwarz.

$$2a = 0.2 \, m$$

$$a' = \sqrt{2(0.1)(1)} = 0.447 \text{ m}$$

Hallando k1 y k2

$$\sqrt{A} = \sqrt{21,451.67} = 146.46 \text{ m}$$

La profundidad h es muy pequeña respecto al área, para el cálculo de k1 y k2 se asume $h \approx 0$.

Del Caso 6, Length/width ratio=175.16/122.47 = 1.43, $k_1 \approx 1.35$, $k_2 \approx 5.7$

Entonces

$$R_1 = \frac{95.50}{\pi(3,157.85)} \left[\ln \left(\frac{2(3,157.85)}{0.447} \right) + \frac{1.35(3,157.85)}{146.46} - 5.7 \right] = 0.32 \Omega$$

$$R_2 = \frac{95.50}{2\pi(13)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.025} \right) - 1 + \frac{2(1.35)(2.4)}{146.46} (\sqrt{13} - 1)^2 \right] = 1.88 \Omega$$

$$R_m = \frac{95.5}{\pi(3,157.85)} \left[\ln \left(\frac{2(3,157.85)}{2.4} \right) + \frac{1.35(3,157.85)}{146.46} - 5.7 + 1 \right] = 0.31 \Omega$$

$$R_g = \frac{0.32(1.88) - 0.31^2}{0.32 + 1.88 - 2(0.31)} = R_g = 0.317 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del caso 1:

$$I_G = 10,647.93 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 10,647.93(0.317) = 3,378.22 \text{ V}$$

GPR = 3,378.22 V > $E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$, continuamos con el paso 8.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(175.16+122.47) = 595.26 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(3,157.85)}{595.26} = 10.61$$

$$n_b = \sqrt{\frac{595.26}{4(146.46)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 10.61(1.01)(1)(1) = 10.69$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(10.69))^{\frac{2}{10.69}}} = 0.56$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{15^2}{16(1)(0.2)} + \frac{(15+2(1))^2}{8(15)(0.2)} - \frac{1}{4(0.2)} \right) + \frac{0.56}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(10.69)-1)} \right) \right] = 0.57$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(10.69) = 2.23$$

$$L_M = 3,157.85 + 31.2 = 3,189.05 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(0.57)(2.23)(10,647.93)}{3,189.05} = 402.99 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(3,157.85) + 0.85(31.2) = 2,394.91 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{15+1} + \frac{1}{15} (1 - 0.5^{10.69-2}) \right] = 0.20$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.20)(2.23)(10,647.93)}{2,394.91} = 189.3 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 402.99 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 189.3 \text{ V} < E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.15.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4:

Figura 150

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 14.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$A_{mm^2} = 120\ mm^2$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 151 y 152 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 151

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 14.

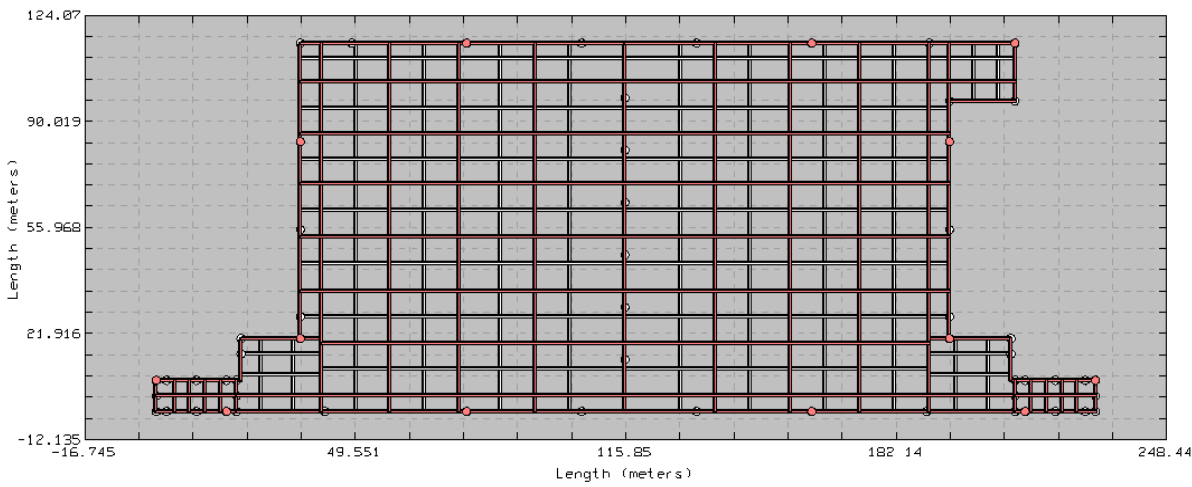
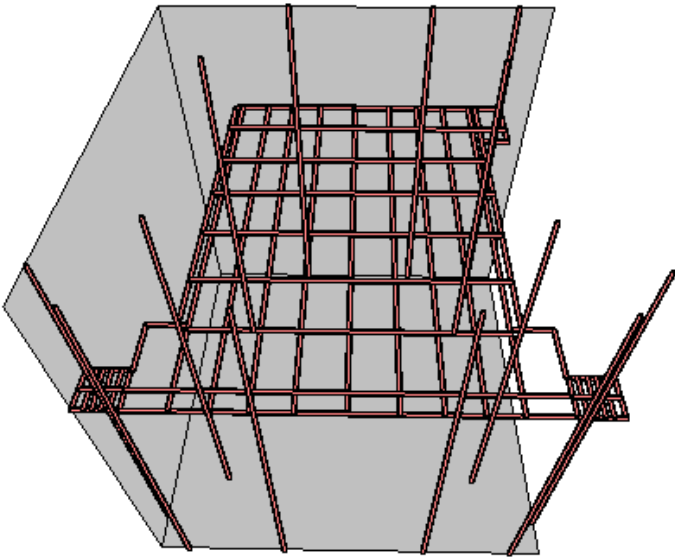


Figura 152

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 14.



Coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 153

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 14.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		200
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		200
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		200
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		200
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		200
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		200
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		200
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		200
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		200
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	41.087	20.284	1	1	Select		200
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		200
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		200
14	☒	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		200
15	☒	Primary	20.449	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		200
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		200
17	☒	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		200
18	☒	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		200
19	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	115.085	1	1	Select		200
20	☒	Primary	190.187	20.284	1	210.207	20.284	1	1	Select		200
21	☒	Primary	41.087	-3.149	1	41.087	115.085	1	1	Select		200
22	☐	Primary	49.587	-3.149	1	49.587	115.085	1	1	Select		200
23	☒	Primary	58.087	-3.149	1	58.087	115.085	1	1	Select		200
24	☐	Primary	66.587	-3.149	1	66.587	115.085	1	1	Select		200
25	☒	Primary	75.087	-3.149	1	75.087	115.085	1	1	Select		200
26	☐	Primary	85.087	-3.149	1	85.087	115.085	1	1	Select		200
27	☒	Primary	93.587	-3.149	1	93.587	115.085	1	1	Select		200
28	☐	Primary	102.087	-3.149	1	102.087	115.085	1	1	Select		200
29	☒	Primary	190.187	-3.149	1	190.187	115.085	1	1	Select		200
30	☐	Primary	181.687	-3.149	1	181.687	115.085	1	1	Select		200
31	☒	Primary	173.187	-3.149	1	173.187	115.085	1	1	Select		200
32	☐	Primary	164.687	-3.149	1	164.687	115.085	1	1	Select		200
33	☒	Primary	156.187	-3.149	1	156.187	115.085	1	1	Select		200
34	☐	Primary	146.187	-3.149	1	146.187	115.085	1	1	Select		200
35	☒	Primary	137.687	-3.149	1	137.687	115.085	1	1	Select		200
36	☐	Primary	129.187	-3.149	1	129.187	115.085	1	1	Select		200

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
37	☐	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
38	☐	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
39	☒	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
40	☐	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
41	☐	Primary	36.087	27.344	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
42	☐	Primary	21.487	15.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
43	☒	Primary	230.943	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
44	☐	Primary	230.943	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
45	☐	Primary	211.244	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
46	☐	Primary	230.943	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
47	☐	Primary	211.244	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
48	☐	Primary	221.094	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
49	☐	Primary	221.094	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
50	☐	Primary	228.443	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
51	☐	Primary	228.443	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
52	☒	Primary	213.744	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
53	☐	Primary	213.744	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
54	☒	Primary	195.187	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
55	☐	Primary	210.207	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
56	☐	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
57	☐	Primary	210.207	15.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
58	☐	Primary	42.106	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

Figura 154

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 14.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
2	☐	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
3	☐	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
4	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
5	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
6	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
7	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
8	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
9	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
10	☒	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
11	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
12	☐	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
13	☐	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
14	☒	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
15	☐	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
16	☐	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
17	☒	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
18	☐	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
19	☐	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
20	☒	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
21	☐	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
22	☐	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
23	☒	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
24	☐	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
25	☐	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
26	☒	Primary	76.828	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
27	☐	Primary	195.187	27.350	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
28	☐	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
29	☒	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
30	☐	Primary	190.187	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
31	☒	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
32	☐	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
33	☐	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
34	☐	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
35	☐	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
36	☐	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
37	☐	Primary	26.487	-3.149	1	26.487	20.284	1	1	Select		200
38	☐	Primary	34.487	-3.149	1	34.487	20.284	1	1	Select		200
39	☐	Primary	204.787	-3.149	1	204.787	20.284	1	1	Select		200
40	☐	Primary	196.787	-3.149	1	196.787	20.284	1	1	Select		200
41	☐	Primary	207.244	96.556	1	207.244	115.085	1	1	Select		200
42	☐	Primary	201.244	96.556	1	201.244	115.085	1	1	Select		200
43	☒	Primary	20.449	1.851	1	211.244	1.851	1	1	Select		200
44	☐	Primary	190.187	15.284	1	210.207	15.284	1	1	Select		200
45	☐	Primary	190.187	8.567	1	210.207	8.567	1	1	Select		200
46	☐	Primary	21.487	15.284	1	41.087	15.284	1	1	Select		200
47	☐	Primary	21.487	8.567	1	41.087	8.567	1	1	Select		200
48	☐	Primary	41.087	10.350	1	190.187	10.350	1	1	Select		200
49	☒	Primary	41.087	18.850	1	190.187	18.850	1	1	Select		200
50	☐	Primary	36.087	27.350	1	195.187	27.350	1	1	Select		200
51	☒	Primary	36.087	35.350	1	195.187	35.350	1	1	Select		200
52	☐	Primary	36.087	44.350	1	195.187	44.350	1	1	Select		200
53	☒	Primary	36.087	52.850	1	195.187	52.850	1	1	Select		200
54	☐	Primary	36.087	61.350	1	195.187	61.350	1	1	Select		200
55	☒	Primary	36.087	69.850	1	195.187	69.850	1	1	Select		200
56	☐	Primary	36.087	77.850	1	195.187	77.850	1	1	Select		200
57	☒	Primary	36.087	85.850	1	195.187	85.850	1	1	Select		200
58	☐	Primary	36.087	94.350	1	195.187	94.350	1	1	Select		200
59	☒	Primary	36.087	102.850	1	211.244	102.850	1	1	Select		200
60	☐	Primary	36.087	110.085	1	211.244	110.085	1	1	Select		200
61	☒	Primary	210.207	6.851	1	230.943	6.851	1	1	Select		200
62	☒	Primary	211.244	-3.149	1	211.244	6.851	1	1	Select		200
63	☒	Primary	230.943	-3.149	1	230.943	6.851	1	1	Select		200
64	☒	Primary	211.244	-3.149	1	230.943	-3.149	1	1	Select		200
65	☒	Primary	226.332	-3.149	1	226.332	6.851	1	1	Select		200
66	☒	Primary	222.832	-3.149	1	222.832	6.851	1	1	Select		200
67	☒	Primary	218.970	-3.149	1	218.970	6.851	1	1	Select		200
68	☒	Primary	215.108	-3.149	1	215.108	6.851	1	1	Select		200
69	☒	Primary	211.244	1.851	1	230.943	1.851	1	1	Select		200
70	☒	Primary	210.207	6.851	1	210.207	20.284	1	1	Select		200

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR:

Figura 155

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 14.

Output Results

Ground Potential Rise	2726.14 volts
Calculated Ground Resistance	0.249499 ohms
Equivalent Resistance	0.249493 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso están controladas, salvo en exterior a la malla.

Figura 156

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 14.

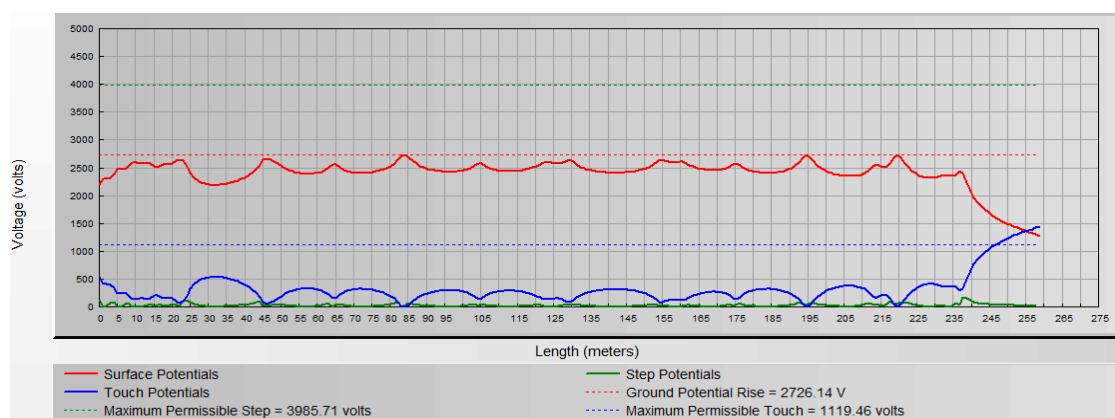
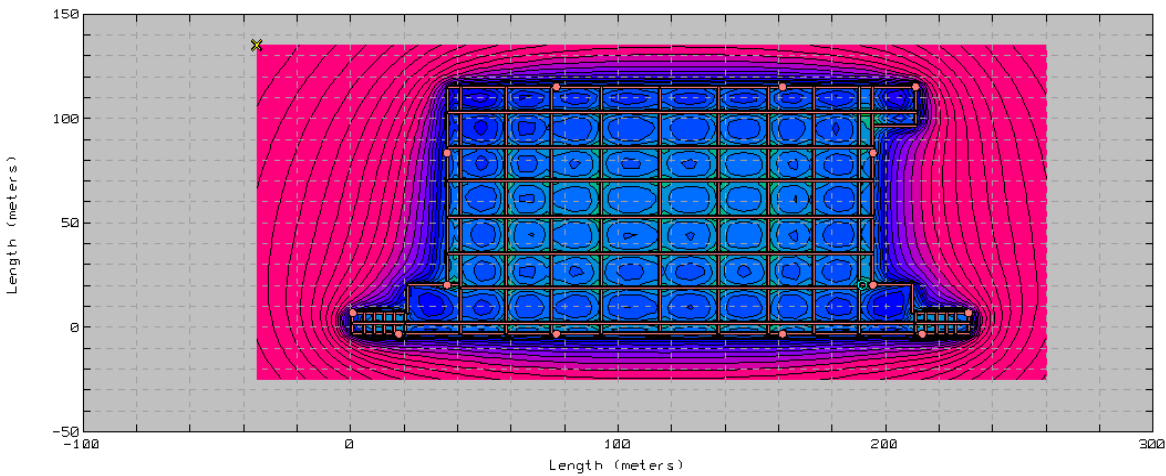


Figura 157

Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 14.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 158

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 14.

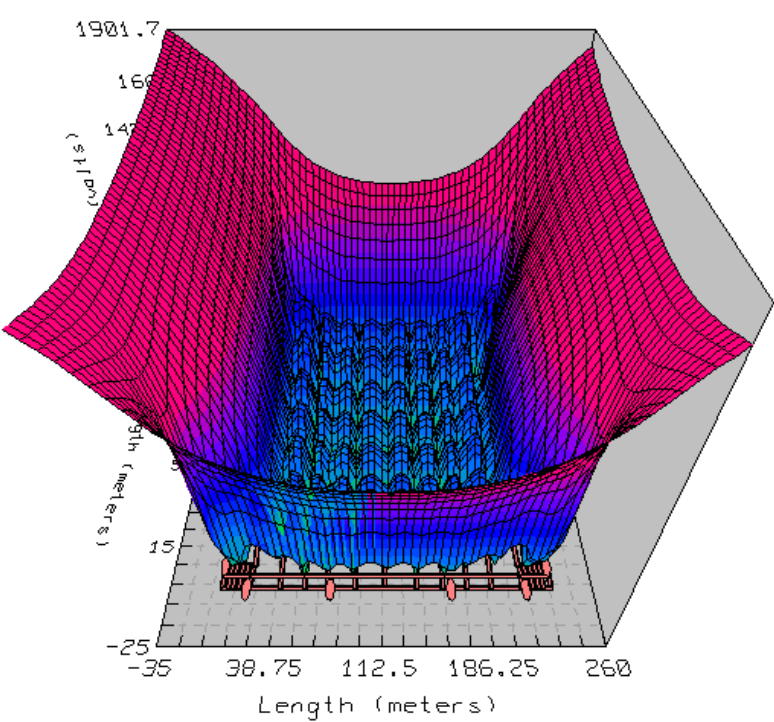
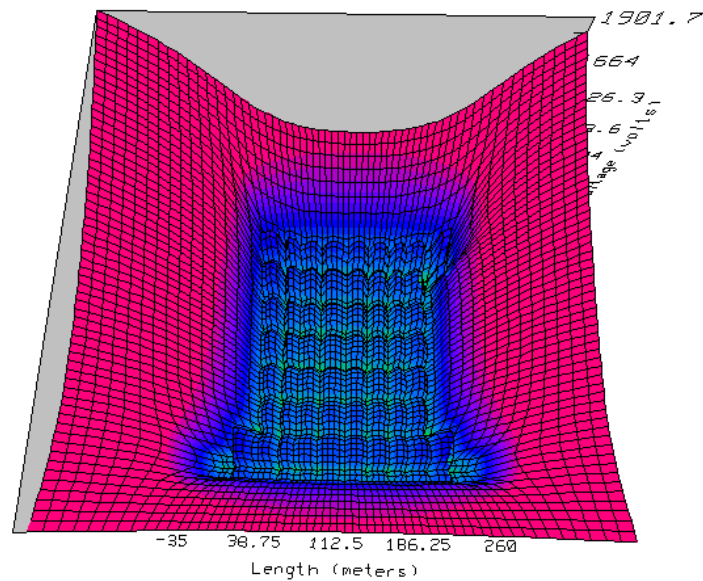


Figura 159

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 14.

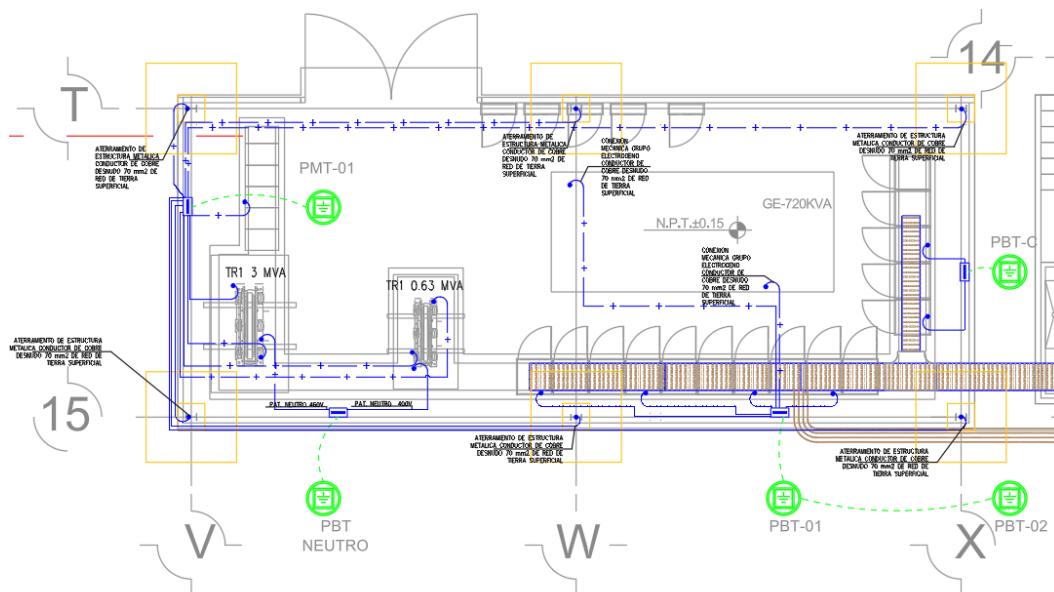


3.16 Caso 15

Este caso es similar al caso 1, con la gran diferencia que la corriente de falla a tierra en media tensión es baja, 160 A, esta corriente será la base de cálculo en los casos siguientes. La Figura 160 muestra el layout con pozos a tierra independientes.

Figura 160

Layout malla a tierra caso 15.



Nota: Elaboración propia.

3.16.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 1:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre un pozo a tierra geoméricamente ante gradientes de potencial podría presumirse que es cero.

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I₀, t_c, d)

De la Tabla 15:

$$3I_0 \text{ en media tensión} = 160.0 \, A$$

$$3I_0 \text{ en baja tensión} = 31,678.0 \, A$$

La corriente de falla para la selección del conductor principal es:

$$3I_0(C_p) = 31,678.0(1.25) = 39.598 \, kA$$

Del resultado del caso 1, la sección mínima del conductor es:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 1:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \, V$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$2b = 0.05 \, m$$

$$n_R = 1$$

Paso 5: Resistencias del pozo a tierra

$$R_g = \frac{18.03}{2\pi \cdot 2.4} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.025} \right) - 1 \right] = 4.26 \, \Omega$$

Paso 6: Corriente del pozo a tierra (I_G, t_f)

Se asume la duración de la falla $t_f = 0.5$ s, y para un sistema de utilización en media tensión $X/R = 10$. Reemplazando en las Ecuaciones 36 y 37:

$$T_a = 10 \left(\frac{1}{2\pi(60)} \right) = 0.02652$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.02652}{0.5} \left(1 - e^{-\frac{2(0.5)}{0.02652}} \right)} = D_f = 1.0262$$

Para un sistema de utilización radial, $S_f = 1$, reemplazando en la Ecuación 41:

$$I_G = (1.25)(1.0262)(160) = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 205.24(4.26) = 874.88 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 874.88 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$. El pozo a tierra podría limitar las tensiones peligrosas.

3.16.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del resultado del caso 1:

Figura 161

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 15.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Se carga la información del estudio de cortocircuito de la Tabla 14, la duración de la falla, la relación X/R . Para un sistema de utilización radial, la contribución remota es

100%, Rtg y Rdg no se aplica debido a que Sf es igual a 1, es decir, toda la corriente de falla es conducido por el pozo a tierra.

Figura 162

Cuadro para carga de corriente de falla, duración de la falla, X/R, porcentaje de contribución CYMGRD Caso 15.

	Enabled	Bus ID	LL-Voltage (KV)	LG Fault Current (amps)	Fault Duration (secs)	Remote Contribution (%)	LG X/R	Rtg (ohms)	Transmission Lines	Rdg (ohms)	Distribution Feeders
1	☒	Unknown	22.9	205.24	0.5	100	10	15	0	25	0

Se carga la especificación de la impedancia en paralelo al cable alimentador de media tensión a la planta, que, para sistemas de utilización es de valor infinito.

Figura 163

Cuadro de diálogo para carga de parámetros de la red CYMGRD Caso 15.

Se selecciona el material del conductor y el electrodo vertical (jabalina).

Figura 164

Cuadro de diálogo para selección de material de conductor y electrodo CYMGRD Caso

15.

	Enabled	Type	Material	Conductivity	Alpha Factor (1/C°)	Pr (μohm-cm)	TCAP (J/cm3-°C)	Tm
1	☐	Conductor	Copper anneal	100	0.00393	1.72	3.42	1083
2	☒	Conductor	Copper comm	97	0.00381	1.78	3.42	1084
3	☐	Conductor	Copper clad s	40	0.00378	4.4	3.85	1084
4	☐	Conductor	Copper clad s	30	0.00378	5.86	3.85	1084
5	☐	Conductor	Aluminum EC	61	0.00403	2.86	2.56	657
6	☐	Conductor	Aluminum 500	53.5	0.00353	3.22	2.6	652
7	☐	Conductor	Aluminum 620	52.5	0.00347	3.28	2.6	654
8	☐	Conductor	Aluminum cla	20.3	0.0036	8.48	3.58	657
9	☐	Conductor	Copper Strip	58	0.0038	1.78	3.475	1083
10	☒	Rod	Copper clad s	20	0.00378	8.62	3.85	1084
11	☐	Rod	Aluminum EC	61	0.00403	2.86	2.56	657
12	☐	Rod	Aluminum 500	53.5	0.00353	3.22	2.6	652
13	☐	Rod	Aluminum 620	52.5	0.00347	3.28	2.6	654
14	☐	Rod	Steel 1020	10.8	0.0016	15.9	3.28	1510
15	☐	Rod	Stainless clad	9.8	0.0016	17.5	4.44	1400
16	☐	Rod	Zinc-coated st	8.6	0.0032	20.1	3.93	419
17	☐	Rod	Stainless stee	2.4	0.0013	72	4.03	1400

Para el diseño usaremos conductor de cobre de 120 mm2 y varilla de cobre de 5/8", conforme los resultados del paso 2 de la metodología IEEE.

Paso 3: Análisis del pozo a tierra

Se visualiza el layout equivalente en Figura 165.

Figura 165

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 15.

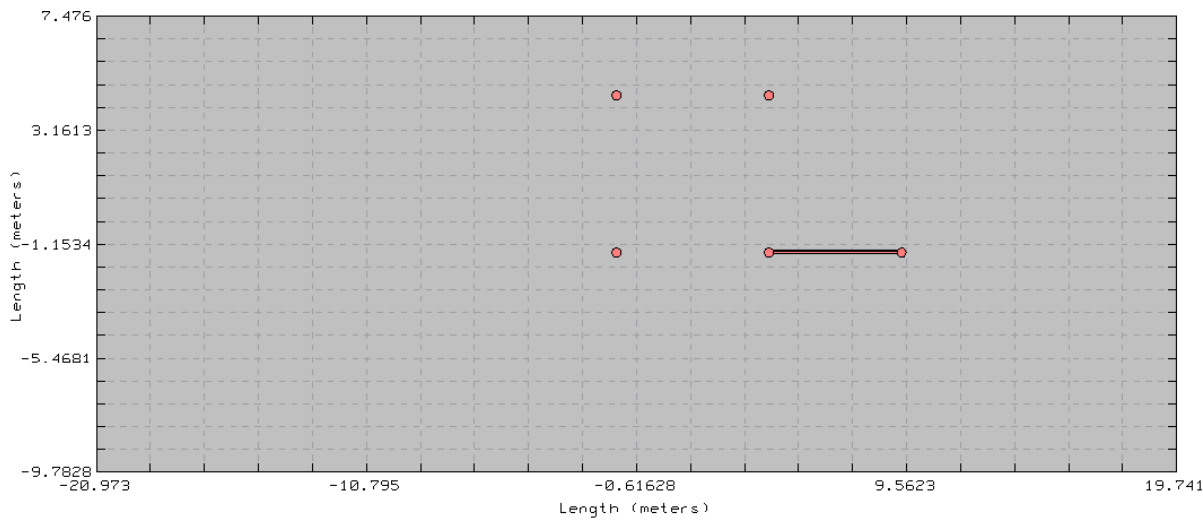
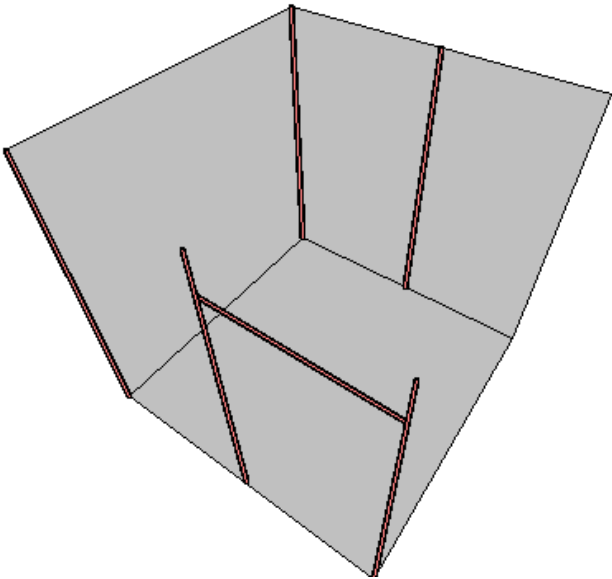


Figura 166

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 15.



En las Figuras 167 y 168 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos del pozo a tierra.

Figura 167

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 15.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	4.375	-1.475	0.6	9.375	-1.475	0.6	1	Select		14.1

Figura 168

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 15.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	-1.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
2	☒	Primary	-1.375	4.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
3	☒	Primary	4.375	4.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
4	☒	Primary	4.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
5	☒	Primary	9.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

A continuación los resultados del cálculo de la resistencia de 01 pozo a tierra y el GPR.

Figura 169

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 15

Output Results	
Ground Potential Rise	1163.64 volts
Calculated Ground Resistance	5.52805 ohms
Equivalent Resistance	5.525 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

El software muestra el GPR y tensión superficial producto de una falla a tierra, se aprecia que la tensión de toque se acerca al umbral de toque.

Figura 170

Perfil de tensiones generados CYMGRD caso 15.

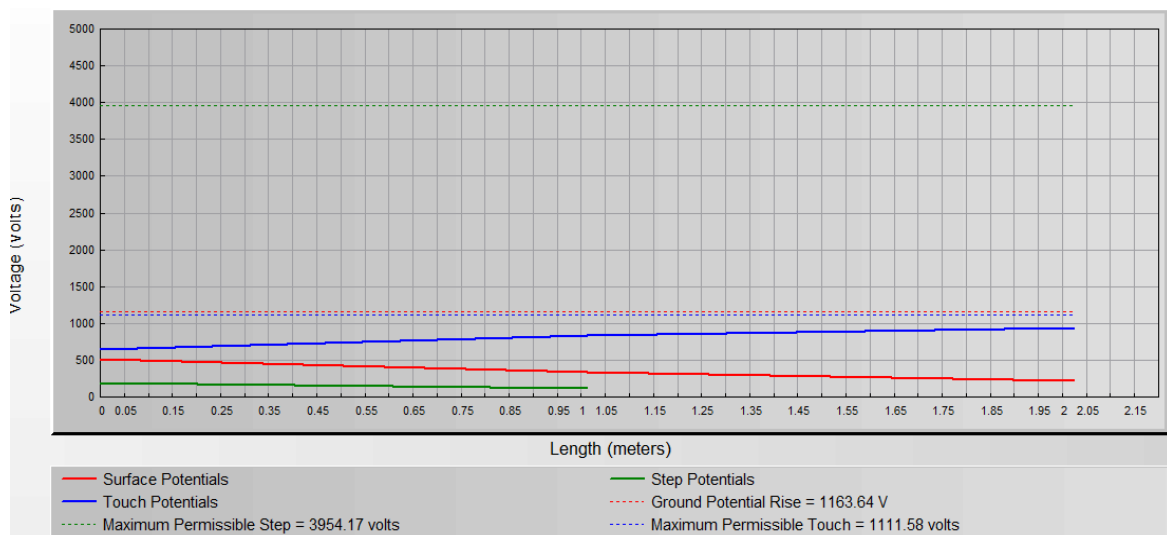
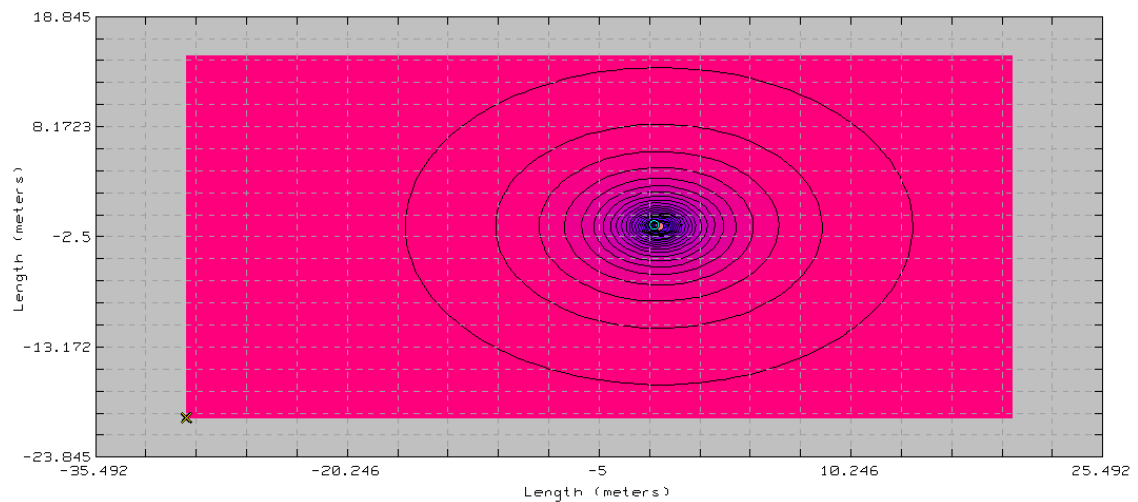


Figura 171

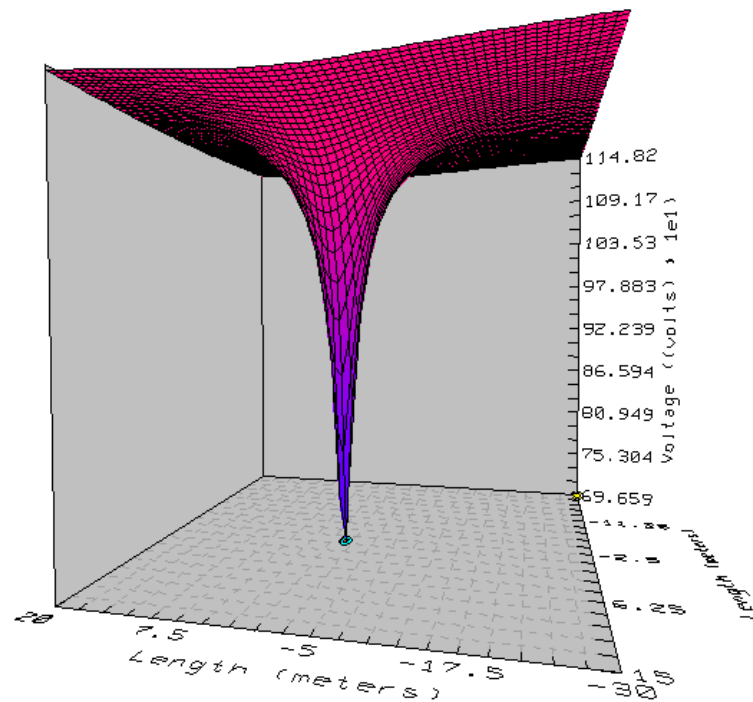
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 15.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 172

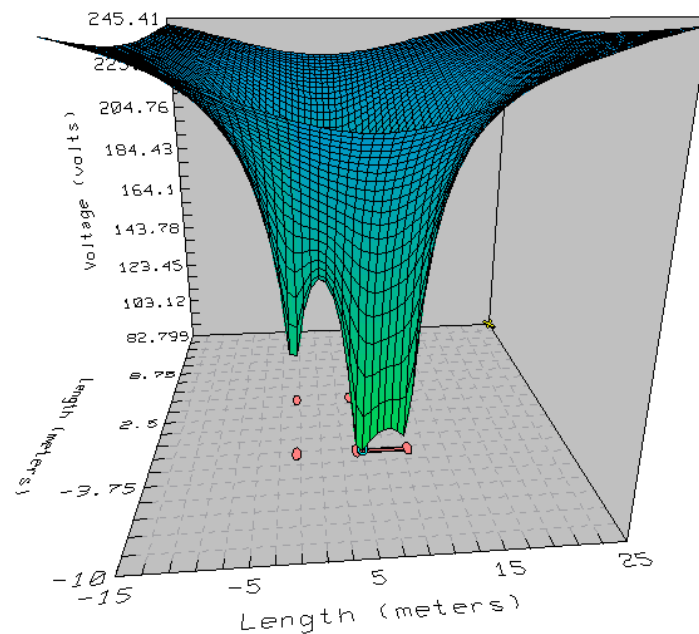
Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 15.



Si se agrega un segundo pozo a tierra en paralelo, se reduce las tensiones superficiales con se aprecia a continuación:

Figura 173

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 15 – Adición de 01 pozo en paralelo.

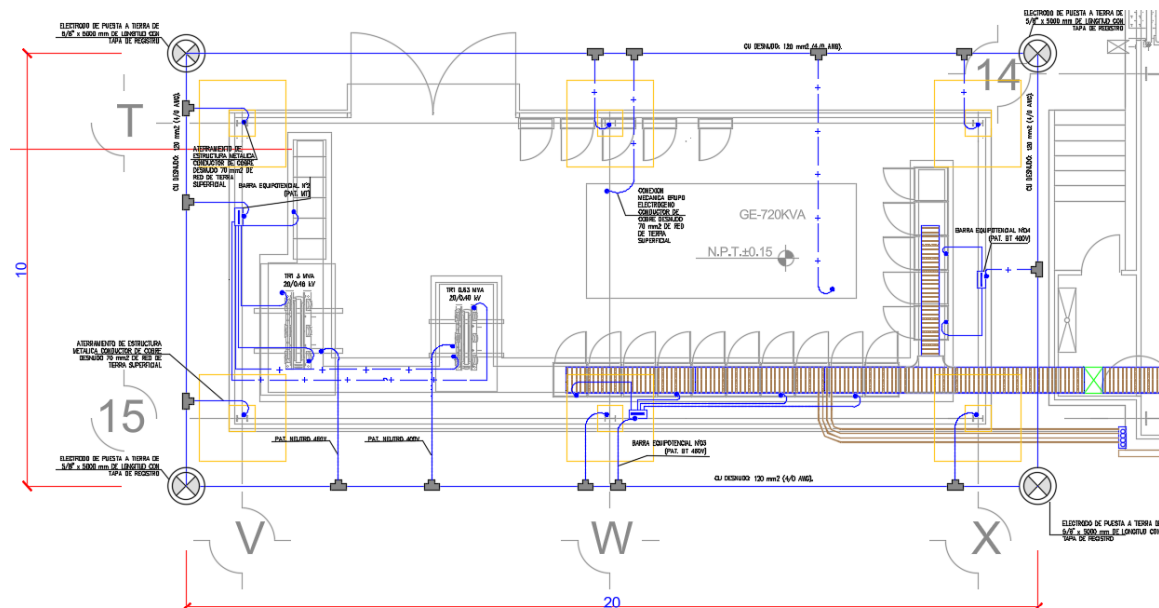


3.17 Caso 16

Caso similar al caso 2, pero con una corriente de falla mucho menor, es la razón que la malla propuesta solo cubre el perímetro de la subestación.

Figura 174

Layout malla a tierra caso 16.



Nota: Elaboración propia.

3.17.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A , ρ)

Del caso 1:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 200 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor ($3I_0$, t_c , d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50} , E_{s50})

Del caso 1:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 9.6 \text{ m}$$

$$D = 14.14 \text{ m}$$

$$L_x = 20 \text{ m}$$

$$L_y = 10 \text{ m}$$

$$L_c = 60 \text{ m}$$

$$L_T = 69.6 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.0158 \text{ m}$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Schwarz.

$$2a = 0.0141 \text{ m}$$

$$a' = \sqrt{2(0.00705)(1)} = 0.119 \text{ m}$$

Hallando k1 y k2

$$\sqrt{A} = \sqrt{200} = 14.14 \text{ m}$$

$$\frac{\sqrt{A}}{10} = 1.414 \text{ m}$$

Del Caso 2, Length/width ratio=20/10 = 2, k1≈1.1, k2≈4.8

Entonces

$$R_1 = \frac{18.03}{\pi(60)} \left[\ln \left(\frac{2(60)}{0.119} \right) + \frac{1.1(60)}{14.14} - 4.8 \right] = 0.65 \Omega$$

$$R_2 = \frac{18.03}{2\pi(4)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.0079} \right) - 1 + \frac{2(1.1)(2.4)}{14.14} (\sqrt{4} - 1)^2 \right] = 1.52 \Omega$$

$$R_m = \frac{18.03}{\pi(60)} \left[\ln \left(\frac{2(60)}{2.4} \right) + \frac{1.1(60)}{14.14} - 4.8 + 1 \right] = 0.46 \Omega$$

$$R_g = \frac{0.65(1.52) - 0.46^2}{0.65 + 1.52 - 2(0.46)} = 0.62 \Omega$$

Paso 6: Corriente de la máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = I_G \cdot R_g = 205.24(0.62) = 127.54 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 127.54 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$. Condición suficiente para asegurar el control de tensiones peligrosos dentro de la subestación.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(10+20) = 60 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(60)}{60} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{60}{4(14.14)}} = 1.03$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.03)(1)(1) = 2.06$$

Al tener electrodos verticales en las esquinas, entonces $k_{ii} = 1$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{14.41^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(14.14 + 2(1))^2}{8(14.14)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.06) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.08$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.06) = 0.95$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 60 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{20^2 + 10^2}} \right) \right] 9.6 = 76.14 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{18.03(1.08)(0.95)(205.24)}{76.14} = 49.89 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_s = 0.75(60) + 0.85(9.6) = 53.16 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{14.14+1} + \frac{1}{14.14} (1 - 0.5^{2.06-2}) \right] = 0.18$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{18.03(0.18)(0.95)(205.24)}{53.16} = 11.96 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 49.89 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 11.96 \text{ V} < E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 11: No requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.17.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 175

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 16.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 176 y 177 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 176

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 16.

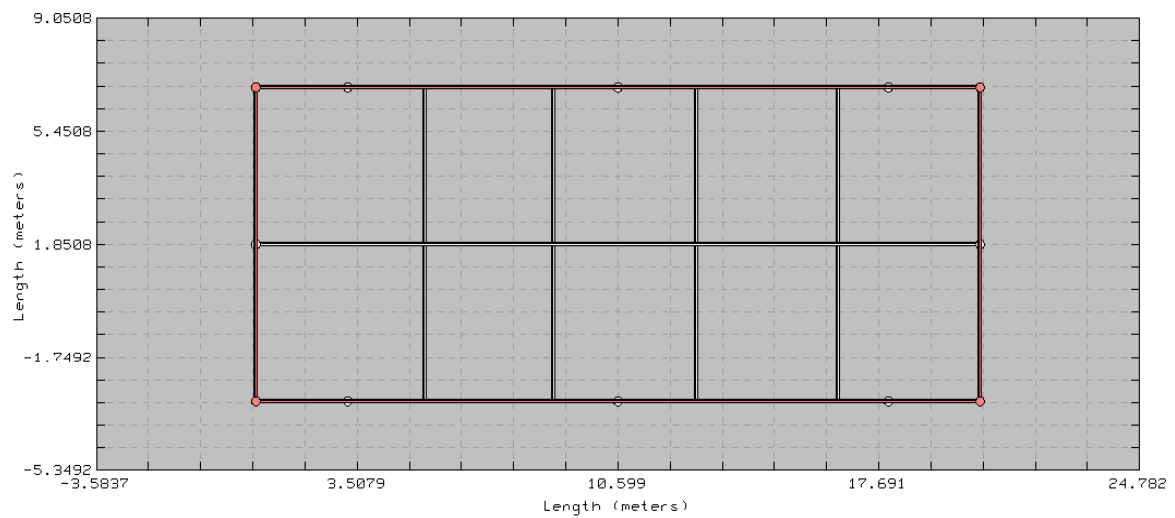
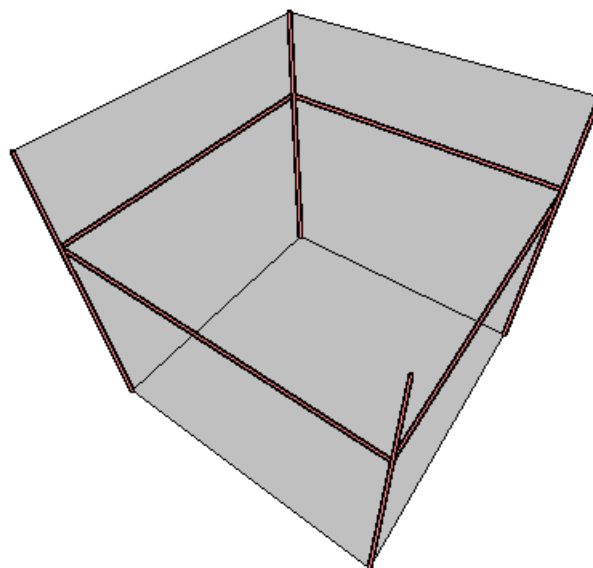


Figura 177

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 16.



En las Figuras 178 y Figura 179 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 178

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 16.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1

Figura 179

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 16.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR:

Figura 180

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 16.

Output Results

Ground Potential Rise	125.36 volts
Calculated Ground Resistance	0.595248 ohms
Equivalent Resistance	0.595213 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Se aprecia que las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 181

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 16.

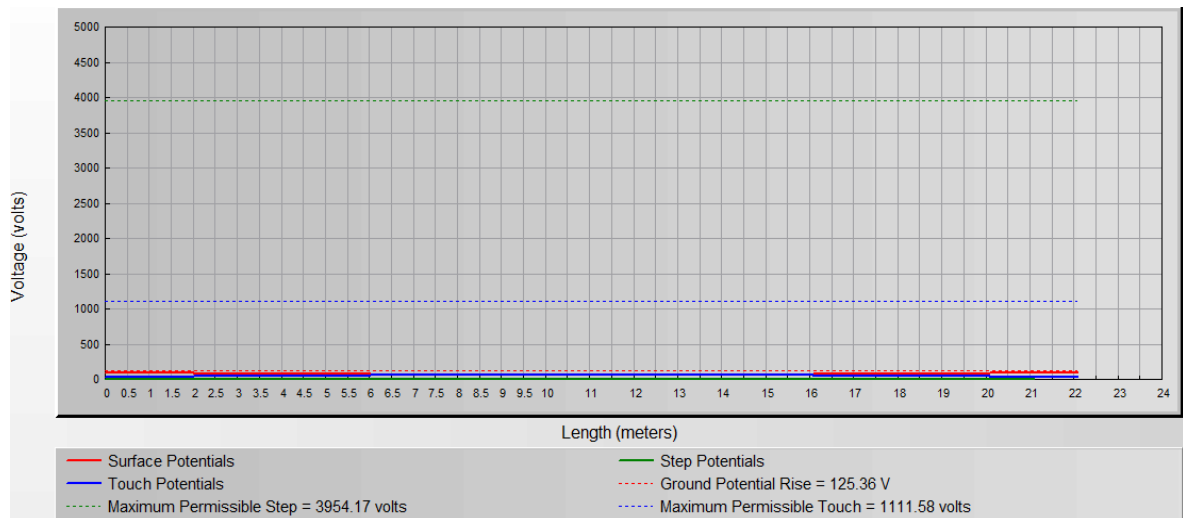
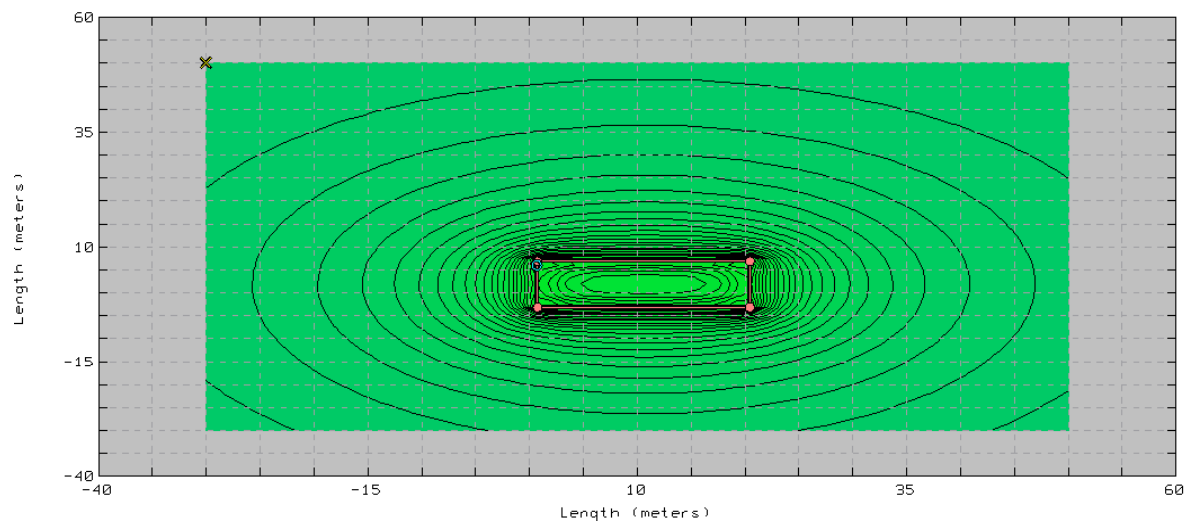


Figura 182

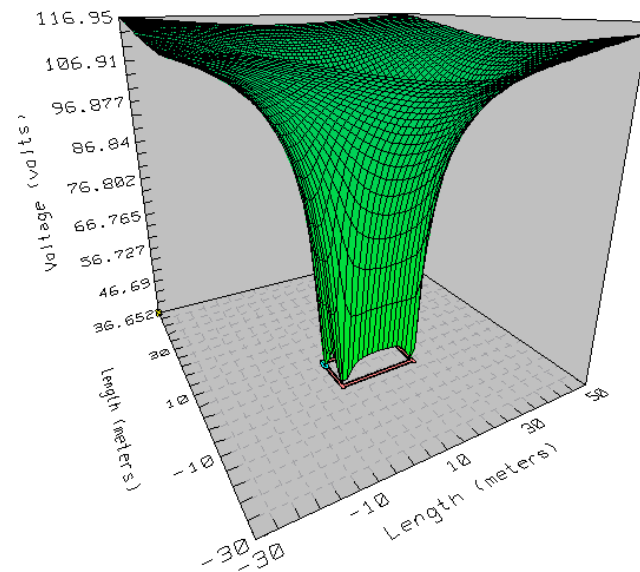
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 16.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 183

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 16.

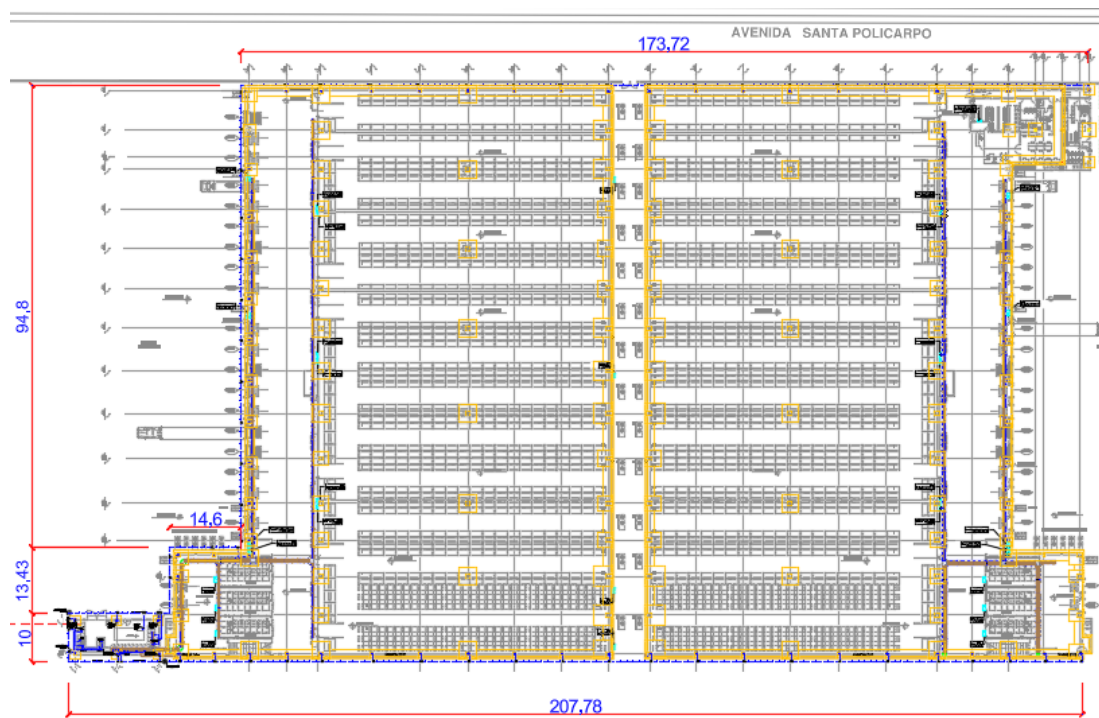


3.18 Caso 17

En la Figura 184 se muestra el layout de una malla a tierra que cubre casi el total del perímetro naves. El caso es similar al caso 3, pero con una corriente mucho menor.

Figura 184

Layout malla a tierra caso 17.



Nota: Elaboración propia.

3.18.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Idealizando los pasos para efecto de estudio:

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 1:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,251.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 1:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \, V$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 4.8 \, m$$

D= 145.78 m (idealizando a una malla cuadrada de una sola cuadrícula de 21,251.67 m²)

$$L_x = 173.72 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 122.33 \, m$$

$$L_c = 2(173.72+122.33) = 592.10 \, m$$

$$L_T = 596.91 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.0158 \, m$$

$$n_R = 2$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Sverak por tratarse de una malla con muy pocas varillas verticales.

$$R_g = 18.03 \left[\frac{1}{596.91} + \frac{1}{\sqrt{20(21,251.67)}} \left(1 + \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{20}{21,251.67}}} \right) \right] = 0.08 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(0.08) = 17.39 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 17.39 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$, por fines de estudio continuamos con los pasos siguientes.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular con pocas varillas verticales

$$L_p = 2(173.72 + 122.33) = 592.10 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(592.10)}{592.10} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{592.10}{4(145.78)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.01)(1)(1) = 2.02$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(2.02))^{\frac{2}{2.02}}} = 0.25$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{145.78^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(145.78 + 2(1))^2}{8(145.78)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.25}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.82$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.02) = 0.94$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con pocos electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 592.10 + 4.8 = 596.91 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{18.03(1.82)(0.94)(205.24)}{596.91} = 10.63 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(592.10) + 0.85(4.8) = 448.16 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{145.78+1} + \frac{1}{145.78} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.16$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{18.03(0.16)(0.94)(205.24)}{448.16} = 1.26 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 10.63 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 1.26 \text{ V} < E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 11: No requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.18.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 185

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 17.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$A_{mm^2} = 120\ mm^2$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 186 y 187 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 186

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 17.

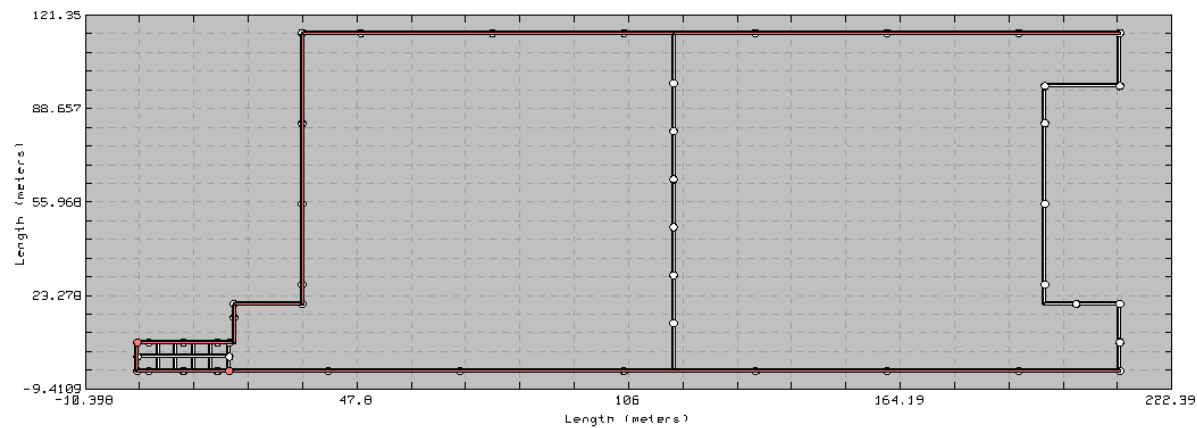
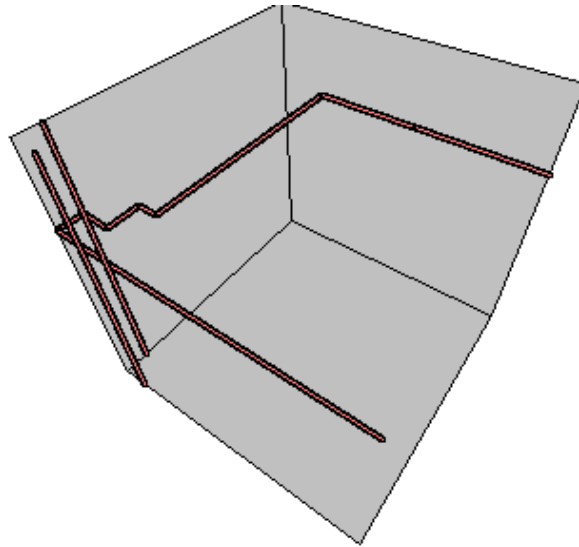


Figura 187

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 17.



En las Figuras 188 y 189 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 188

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 17.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☐	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	36.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☐	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.877	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☐	Primary	211.244	-3.149	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1
18	☐	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
19	☐	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
20	☐	Primary	195.187	20.284	1	195.187	96.556	1	1	Select		14.1
21	☐	Primary	195.187	20.284	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1

Figura 189

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 17.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 190

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 17.

Output Results	
Ground Potential Rise	19.0261 volts
Calculated Ground Resistance	0.0903374 ohms
Equivalent Resistance	0.0903366 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 191

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 17.

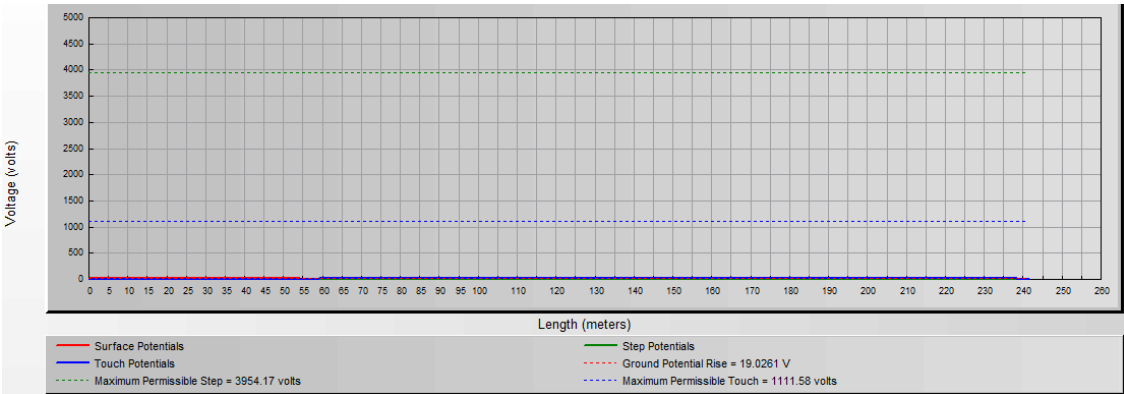
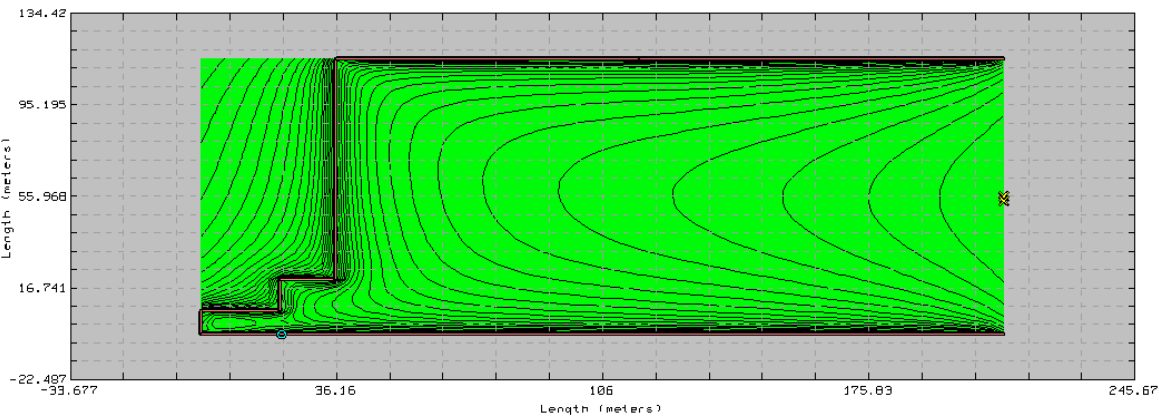


Figura 192

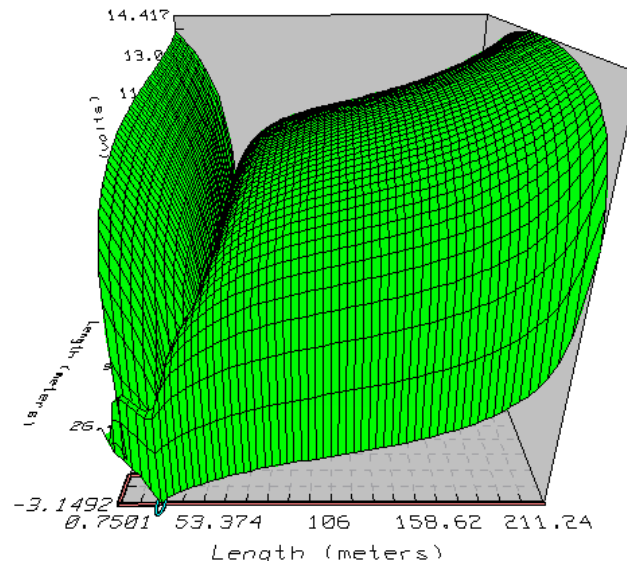
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 17.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 193

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 17.

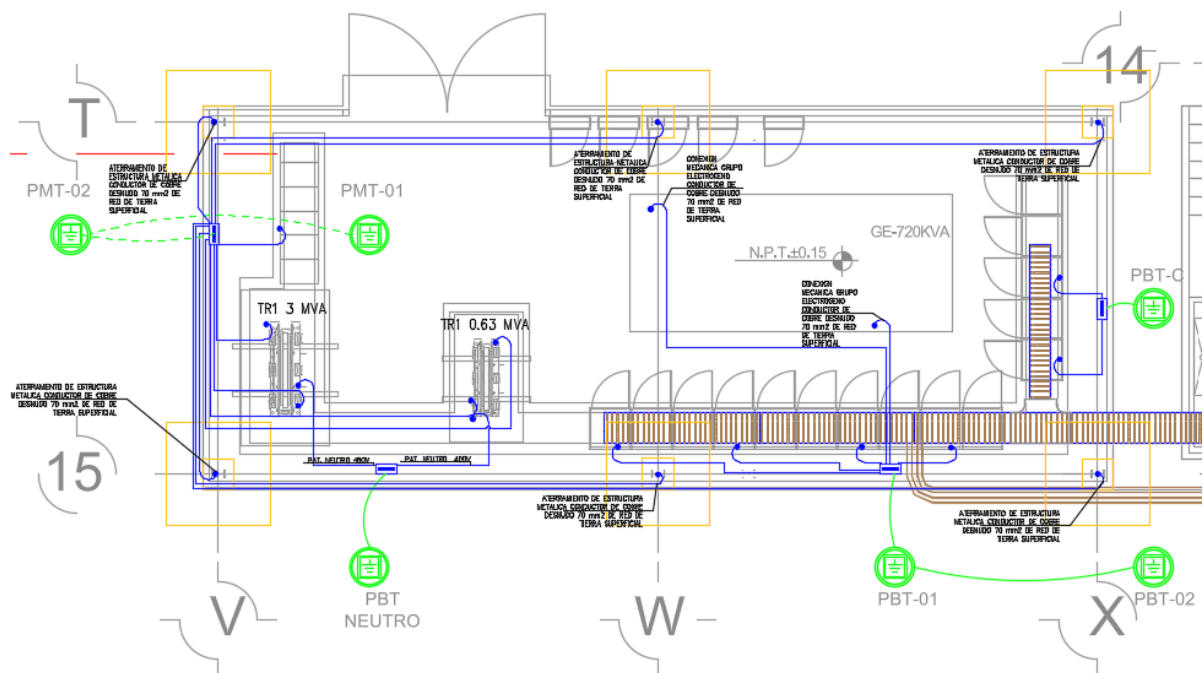


3.19 Caso 18

En la Figura 194 se muestra el layout de pozos a tierra individuales que rodean la subestación N°1. El caso es similar al caso 4 con la diferencia que la corriente de falla es mucho menor.

Figura 194

Layout puesta a tierra Caso 18.



Nota: Elaboración propia.

3.19.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

De del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3lo, t_c , d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50} , E_{s50})

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C , L_T , h)

Para pozos a tierra:

$L_r = 5 \, m$ (varillas largas para efecto de estudio)

$2b = 0.2 \, m$ (se asume el efecto de tratamiento con cemento conductivo)

$$n_R = 2$$

Paso 5: Resistencias del pozo a tierra

$$R_g = \frac{95.50}{2\pi(2)(5)} \left[\ln \left(\frac{4(5)}{0.1} \right) - 1 \right] = 8.28 \, \Omega$$

Paso 6: Corriente del pozo a tierra (I_G , t_f)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \, A$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$GPR = 205.24(8.28) = 1,700.13 \, V$$

$$GPR = 1,700.13 \, V > E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

3.19.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4:

Figura 195

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 18.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

$A_{mm^2} = 120\ mm^2$

Paso 3: Análisis del pozo a tierra

En las Figuras 196 y 197 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 196

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 18.

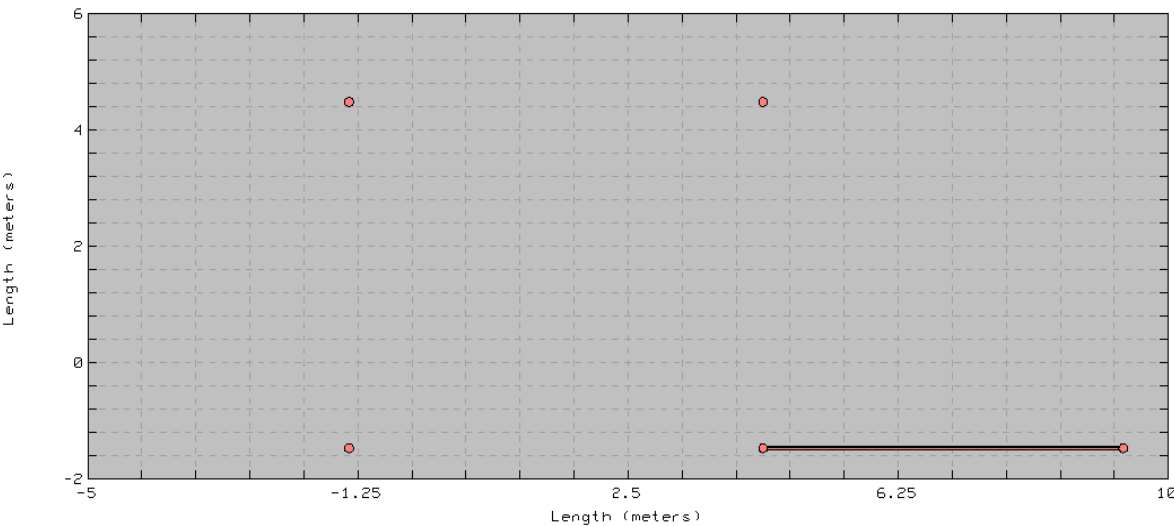
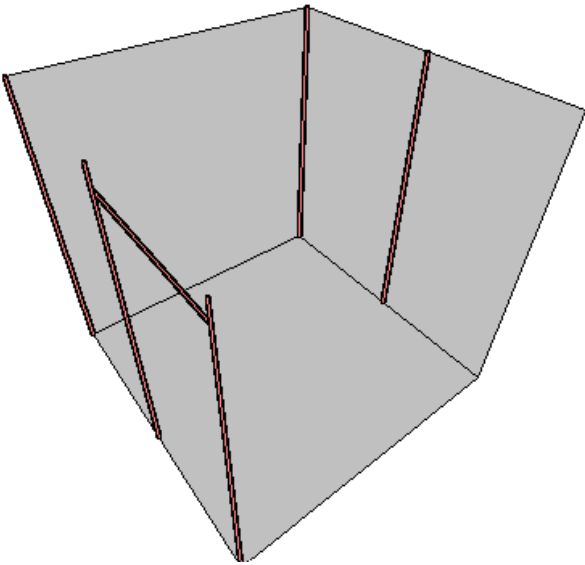


Figura 197

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 18.



En las Figuras 198 y 199 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de los pozos en paralelo.

Figura 198

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 18.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	4.375	-1.475	0.6	9.375	-1.475	0.6	1	Select		200

Figura 199

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 18.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☐	Primary	-1.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200
2	☐	Primary	-1.375	4.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200
3	☐	Primary	4.375	4.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200
4	☒	Primary	4.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200
5	☒	Primary	9.375	-1.475	0.3	0	0	0	1	1	1	5	Select		200

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 200

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 18.

Output Results	
Ground Potential Rise	1398.34 volts
Calculated Ground Resistance	6.64375 ohms
Equivalent Resistance	6.63934 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

En el rango evaluado, la tensión de contacto se encuentra cerca al umbral de contacto, para distancia más alejadas la tensión de toque es igual al GPR.

Figura 201

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 18.

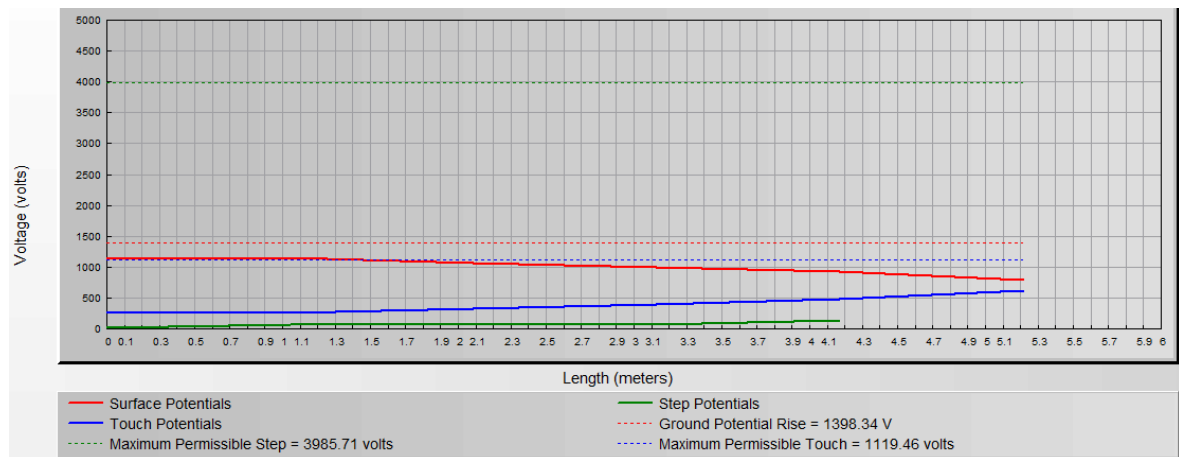
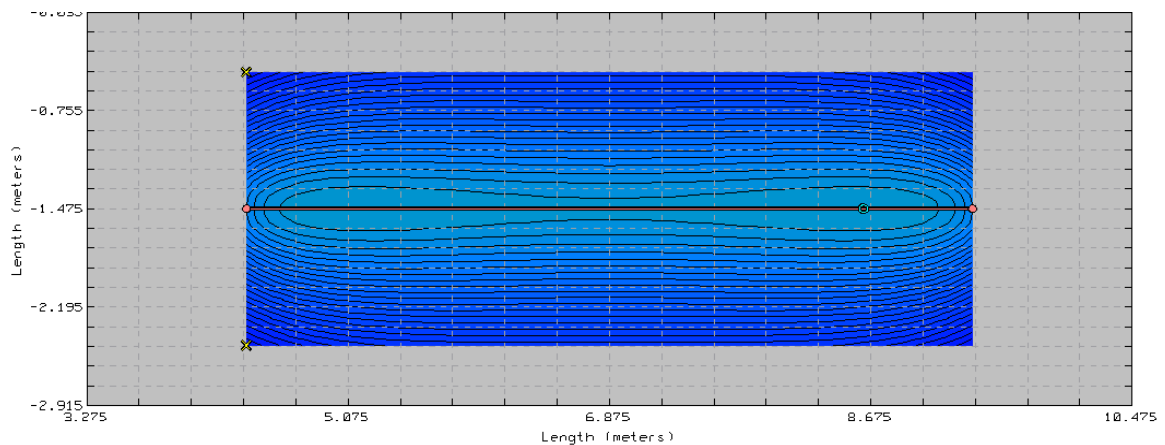


Figura 202

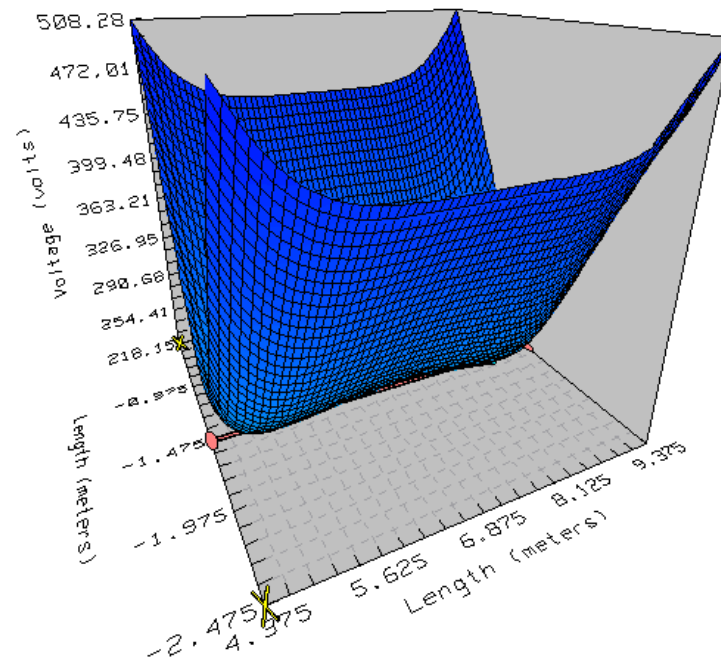
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 18.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 203

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 18.

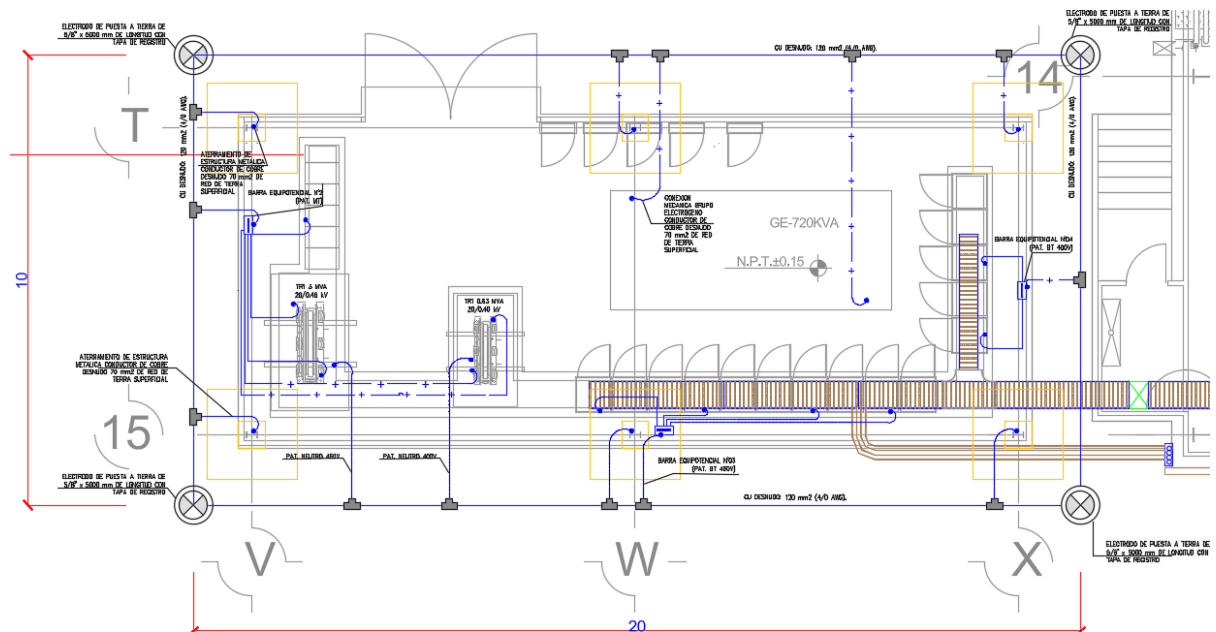


3.20 Caso 19

Caso similar al caso 5, pero con una corriente de falla mucho menor.

Figura 204

Layout malla a tierra Caso 19.



3.20.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.5 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 200 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 4 tenemos:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, LC, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 9.6 \, m$$

$$D = 14.14 \, m$$

$$L_x = 20 \, m$$

$$L_y = 10 \, m$$

$$L_c = 60 \, m$$

$$L_T = 69.6 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.05 \, m$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Schwarz.

$$2a = 0.2 \, m$$

$$a' = \sqrt{2(0.1)(1)} = 0.447 \text{ m}$$

Hallando k1 y k2

$$\sqrt{A} = \sqrt{200} = 14.14 \text{ m}$$

$$\frac{\sqrt{A}}{10} = 1.414 \text{ m}$$

Del Caso 2, Length/width ratio=20/10 = 2, k1≈1.1, k2≈4.8

Entonces

$$R_1 = \frac{95.5}{\pi(60)} \left[\ln \left(\frac{2(60)}{0.447} \right) + \frac{1.1(60)}{14.14} - 4.8 \right] = 2.77 \Omega$$

$$R_2 = \frac{95.5}{2\pi(4)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.025} \right) - 1 + \frac{2(1.1)(2.4)}{14.14} (\sqrt{4} - 1)^2 \right] = 6.23 \Omega$$

$$R_m = \frac{95.5}{\pi(60)} \left[\ln \left(\frac{2(60)}{2.4} \right) + \frac{1.1(60)}{14.14} - 4.8 + 1 \right] = 2.42 \Omega$$

$$R_g = \frac{2.77(6.23) - 2.42^2}{2.77 + 6.23 - 2(2.42)} = 2.73 \Omega$$

Paso 6: Corriente de la máxima corriente de la malla (I_G, t_f)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(2.73) = 561.76 \text{ V}$$

$$\text{GPR} = 561.76 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V. Condición suficiente para asegurar el control}$$

de tensiones peligrosos dentro de la subestación.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(10+20) = 60 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(60)}{60} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{60}{4(14.14)}} = 1.03$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.03)(1)(1) = 2.06$$

Al tener electrodos verticales en las esquinas, entonces $k_{ii} = 1$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{14.41^2}{16(1)(0.2)} + \frac{(14.14+2(1))^2}{8(14.14)(0.2)} - \frac{1}{4(0.2)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.06)-1)} \right) \right] = 0.66$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.06) = 0.95$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 60 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{20^2 + 10^2}} \right) \right] 9.6 = 76.14 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(0.66)(0.95)(205.24)}{76.14} = 161.08 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(60) + 0.85(9.6) = 53.16 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{14.14+1} + \frac{1}{14.14} (1 - 0.5^{2.06-2}) \right] = 0.18$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.18)(0.95)(205.24)}{53.16} = 63.35 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 161.08 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 63.35 \text{ V} < E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.20.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4 tenemos:

Figura 205

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 19.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

Del caso 1:

$A_{mm^2} = 120\text{ mm}^2$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 207 y 208 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 206

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 19.

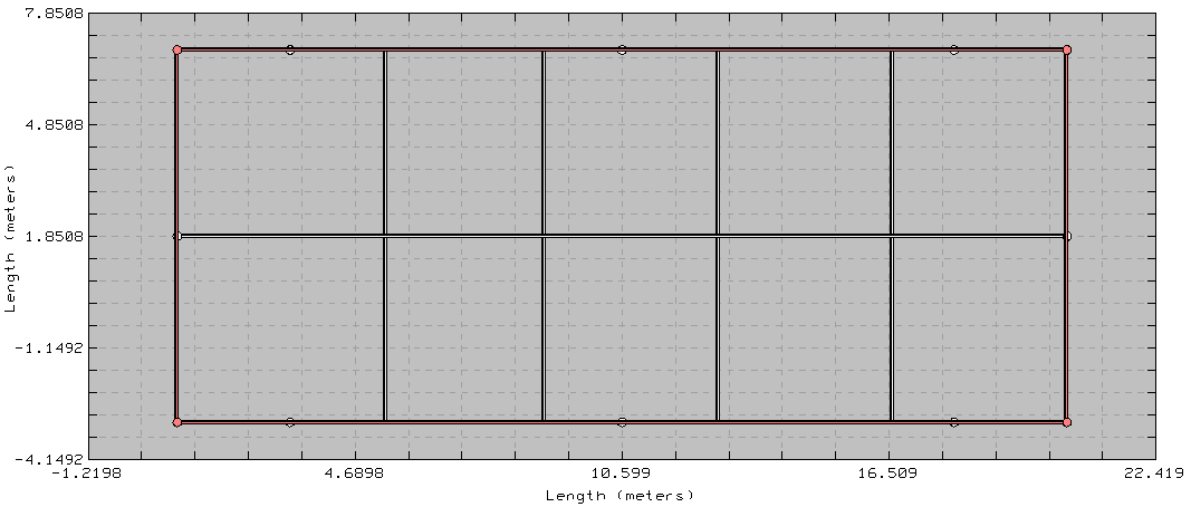
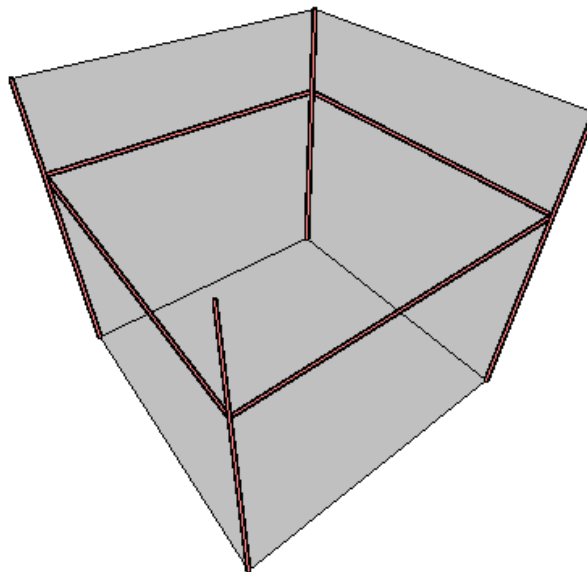


Figura 207

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 19.



En las Figuras 208 y 209 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 208

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 19.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		200
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		200
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		200
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		200
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		200
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		200
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		200
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		200

Figura 209

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 19.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		50

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR:

Figura 210

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 19.

Output Results	
Ground Potential Rise	614.506 volts
Calculated Ground Resistance	2.91854 ohms
Equivalent Resistance	2.91769 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 211

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 19.

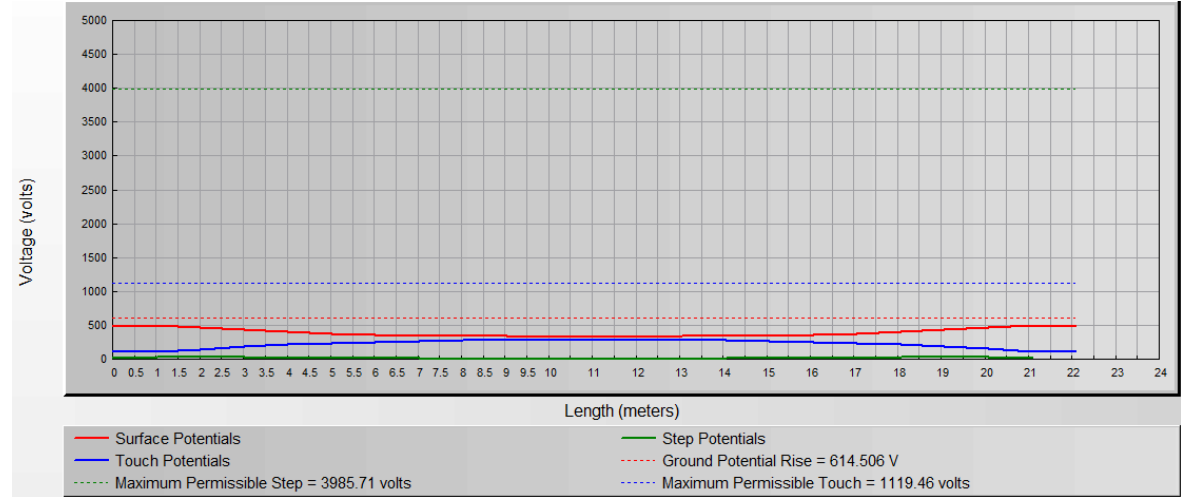
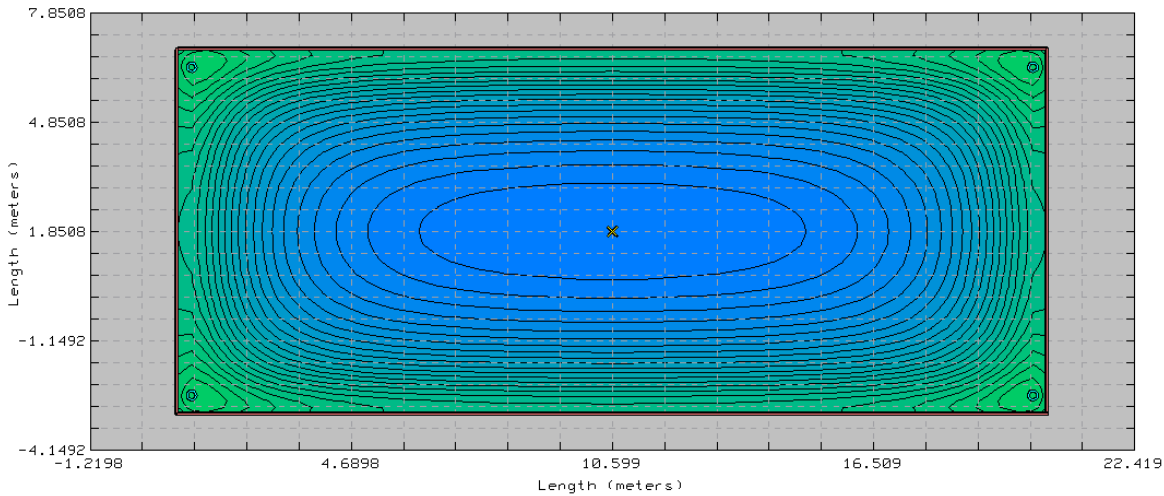


Figura 212

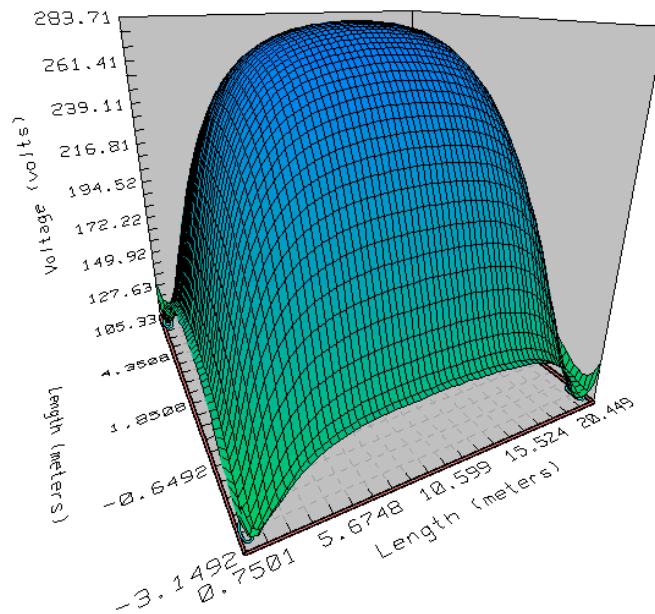
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 19.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 213

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 19.

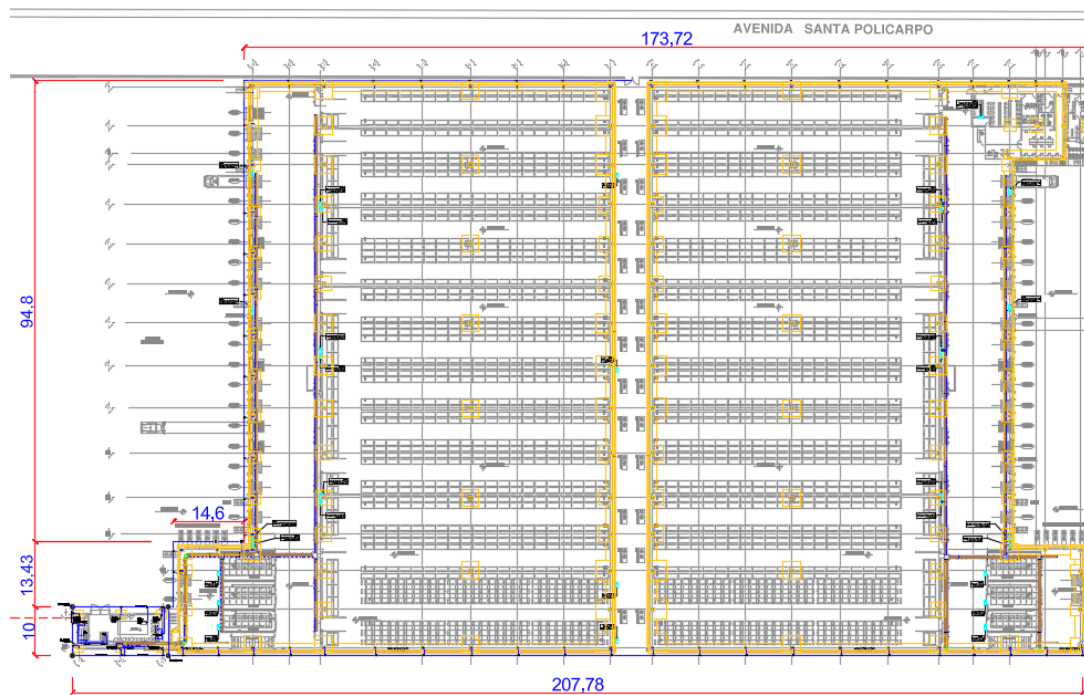


3.21 Caso 20

En la Figura 214 se muestra el layout de una malla a tierra que cubre casi el total del perímetro nave. El caso es similar al caso 6, pero con una corriente mucho menor.

Figura 214

Layout malla a tierra caso 20.



Nota: Elaboración propia.

3.21.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Idealizando los pasos para efecto de estudio:

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.5 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,251.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 9.6 \, m$$

D = 145.78 m (idealizando a una malla cuadrada de una sola cuadrícula de 21,251.67 m²)

$$L_x = 173.72 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 122.33 \, m$$

$$L_c = 2(173.72+122.33) = 592.10 \, m$$

$$L_T = 601.71 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.0158 \, m$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Sverak por tratarse de una malla con muy pocas varillas verticales.

$$R_g = 95.5 \left[\frac{1}{61.71} + \frac{1}{\sqrt{20(21,251.67)}} \left(1 + \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{20}{21,251.67}}} \right) \right] = 0.45 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(0.45) = 91.8 \text{ V}$$

$\text{GPR} = 91.8 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$, por fines de estudio continuamos con los pasos siguientes.

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular con pocas varillas verticales

$$L_p = 2(173.72 + 122.33) = 592.10 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(592.10)}{592.10} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{592.10}{4(145.78)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.01)(1)(1) = 2.02$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(2.02))^{\frac{2}{2.02}}} = 0.25$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{145.78^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(145.78 + 2(1))^2}{8(145.78)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.25}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.82$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.02) = 0.94$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con pocos electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 592.10 + 9.6 = 601.71 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(1.82)(0.94)(205.24)}{601.71} = 55.86 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(592.10) + 0.85(9.6) = 452.24 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{145.78+1} + \frac{1}{145.78} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.16$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.16)(0.94)(205.24)}{452.24} = 6.59 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 55.86 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 6.59 \text{ V} < E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.21.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4:

Figura 215

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 20.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

$A_{mm^2} = 120\ mm^2$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 216 y 217 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 216

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 20.

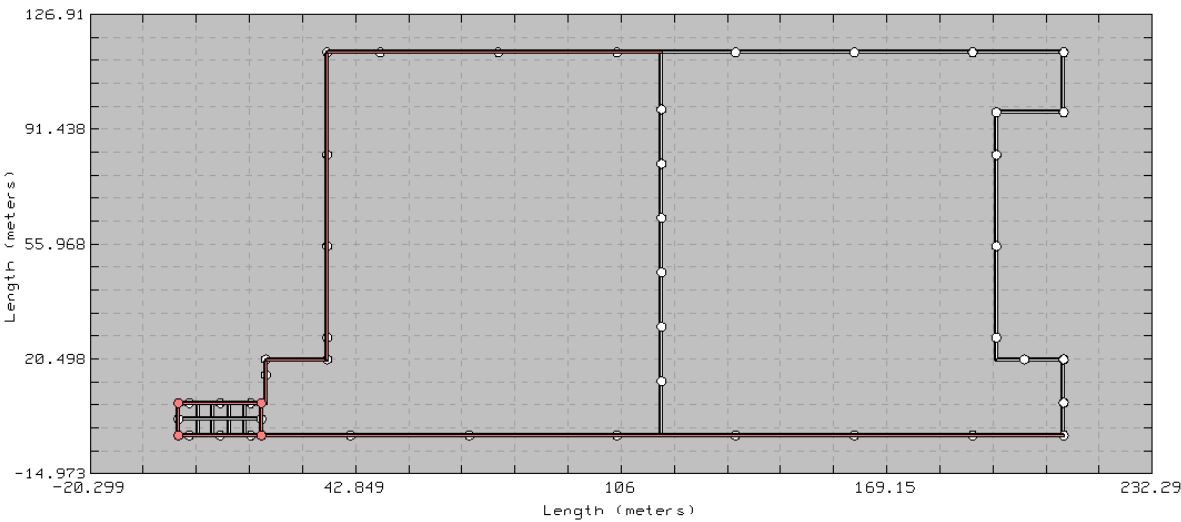
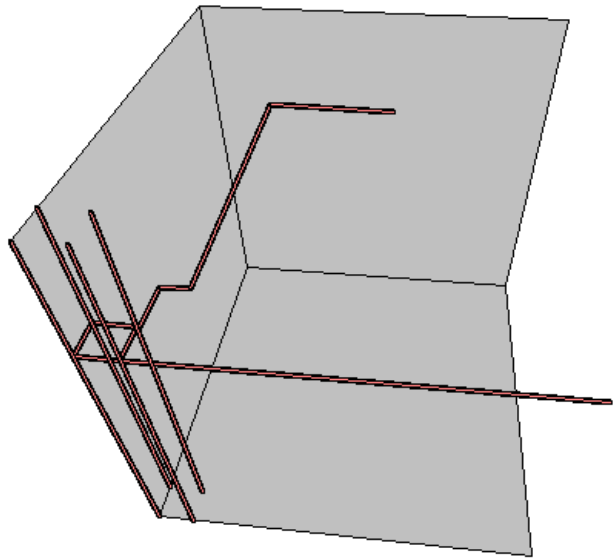


Figura 217

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 20.



En las Figuras 218 y 219 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 218

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 20.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	36.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☐	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.877	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☐	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☐	Primary	211.244	-3.149	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1
18	☐	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
19	☐	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
20	☐	Primary	195.187	20.284	1	195.187	96.556	1	1	Select		14.1
21	☐	Primary	195.187	20.284	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1

Figura 219

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 20.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 220

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 20.

Output Results	
Ground Potential Rise	138.843 volts
Calculated Ground Resistance	0.659273 ohms
Equivalent Resistance	0.65923 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 221

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 20.

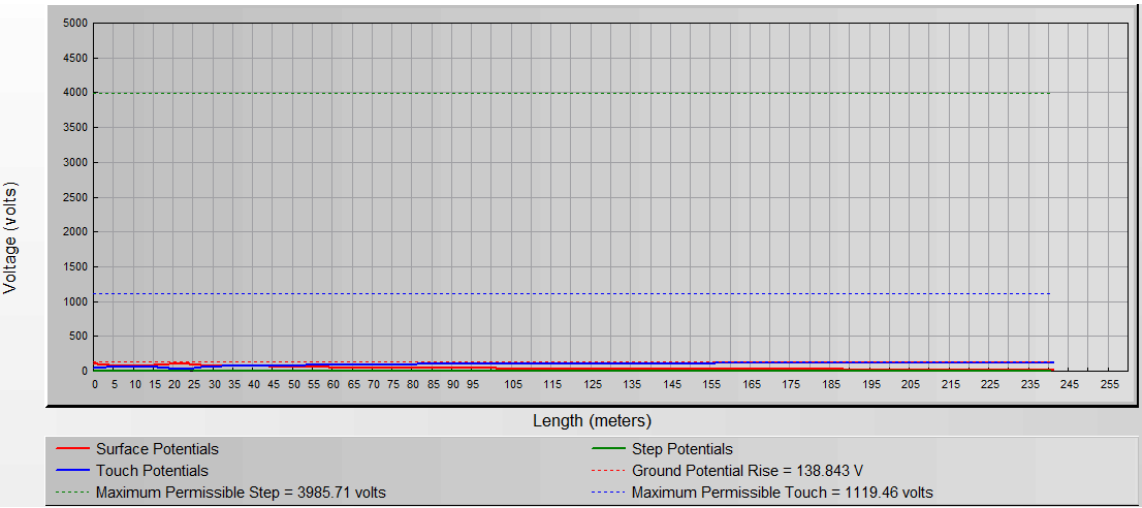
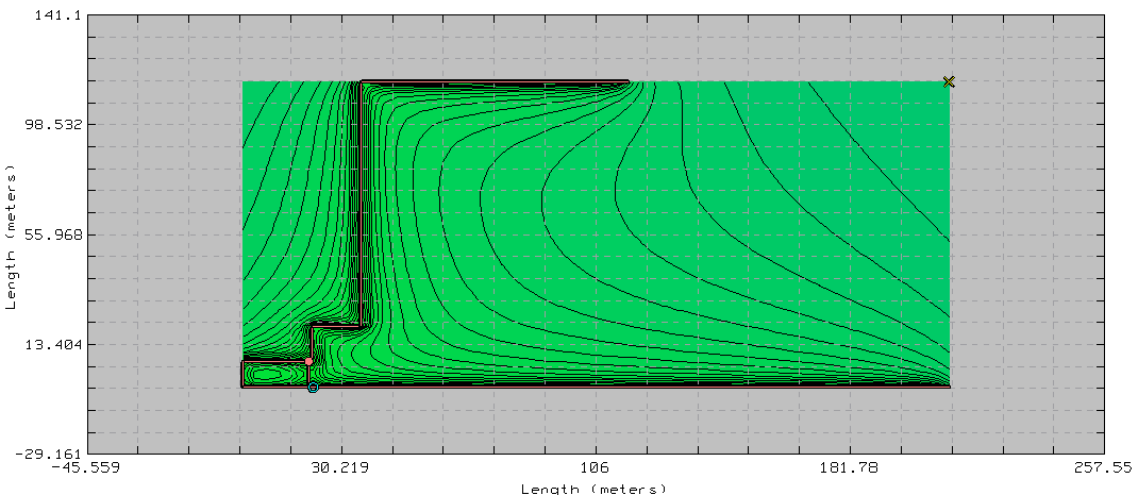


Figura 222

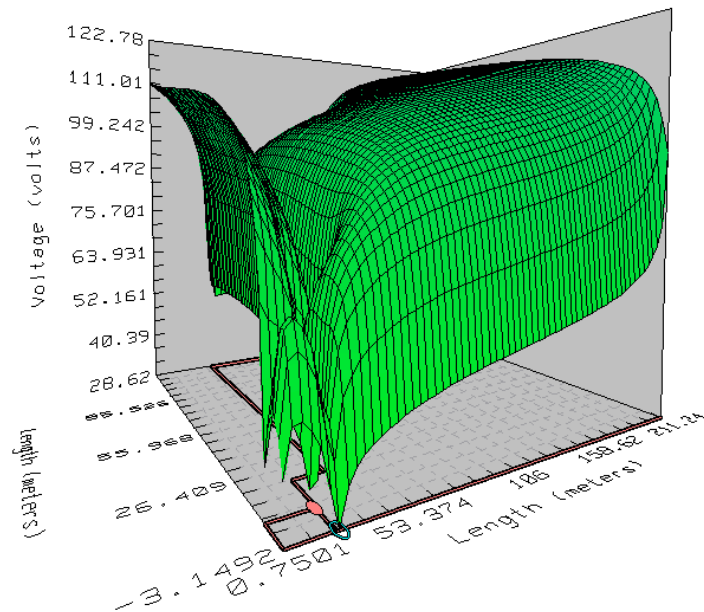
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 20.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 223

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 20.

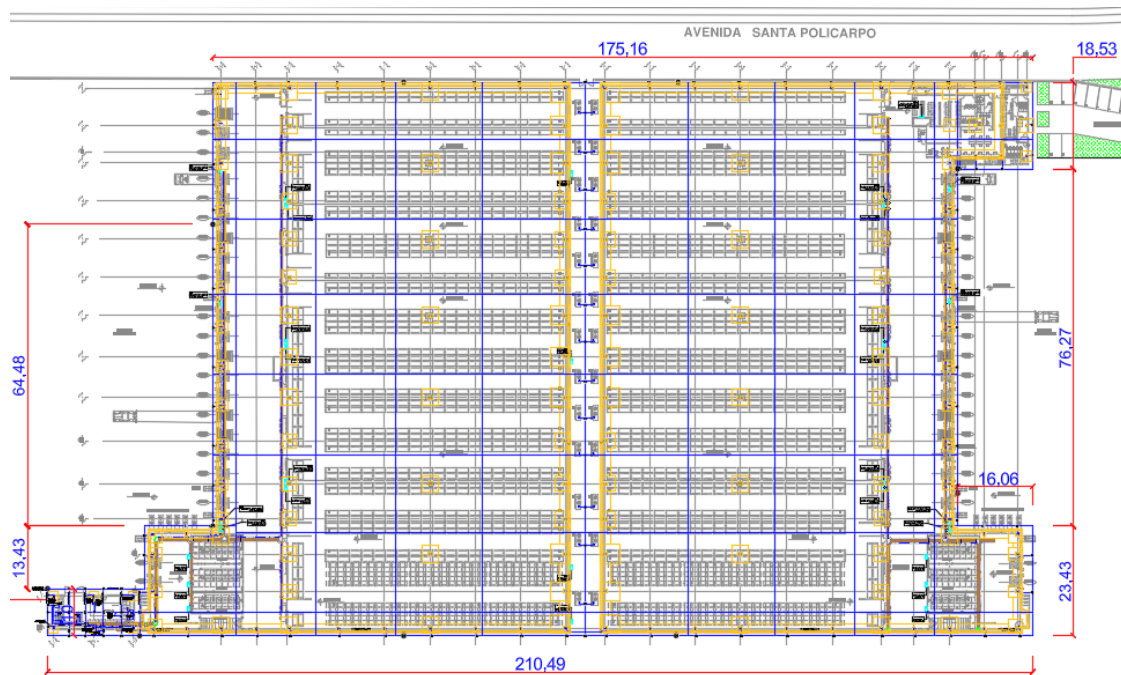


3.22 Caso 21

La Figura 224 muestra el layout de una malla a tierra con cuadrículas internas que cubre el área techada de naves y subestación.

Figura 224

Layout malla a tierra caso 21.



Nota: Elaboración propia.

3.22.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,251.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3lo, t_c, d)

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \, V$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 24 \, m$$

$$D = 15 \, m$$

$$L_x = 175.16 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 121.33 \, m$$

$$L_c = 3,130.21 \, m$$

$$L_T = 3,154.21 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.0158 \, m$$

$$n_R = 10$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Schwarz.

$$2a = 0.0141 \, m$$

$$a' = \sqrt{2(0.0075)(1)} = 0.119 \, m$$

Hallando k1 y k2

$$\sqrt{A} = \sqrt{21,251.67} = 145.78 \text{ m}$$

La profundidad h es muy pequeña respecto al área, para el cálculo de k1 y k2 se asume $h \approx 0$.

Del Caso 6, Length/width ratio = $175.16/121.33 = 1.44$, $k1 \approx 1.35$, $k2 \approx 5.7$

Entonces

$$R_1 = \frac{95.50}{\pi(3,130.21)} \left[\ln \left(\frac{2(3,130.21)}{0.119} \right) + \frac{1.35(3,130.21)}{145.78} - 5.7 \right] = 0.33 \Omega$$

$$R_2 = \frac{95.50}{2\pi(10)(2.4)} \left[\ln \left(\frac{4(2.4)}{0.0079} \right) - 1 + \frac{2(1.35)(2.4)}{145.78} (\sqrt{10} - 1)^2 \right] = 3.12 \Omega$$

$$R_m = \frac{95.5}{\pi(3,130.21)} \left[\ln \left(\frac{2(3,130.21)}{2.4} \right) + \frac{1.35(3,130.21)}{145.78} - 5.7 + 1 \right] = 0.31 \Omega$$

$$R_g = \frac{0.33(3.12) - 0.31^2}{0.33 + 3.12 - 2(0.31)} = 0.33 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(0.33) = 65.44 \text{ V}$$

$$\text{GPR} = 65.44 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(175.16+121.33) = 592.99 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(3,130.21)}{592.99} = 10.56$$

$$n_b = \sqrt{\frac{592.99}{4(145.78)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 10.56(1.01)(1)(1) = 10.65$$

$$k_{ii} = 1$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{15^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(15+2(1))^2}{8(15)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{1}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(10.65)-1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.89$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(10.65) = 2.22$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 3,130.21 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.4}{\sqrt{175.16^2 + 121.33^2}} \right) \right] 24 = 3,167.74 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(0.89)(2.22)(205.24)}{3,167.74} = 12.2 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(3,130.21) + 0.85(24) = 2,368.06 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{15+1} + \frac{1}{15} (1 - 0.5^{10.56-2}) \right] = 0.20$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.20)(2.22)(10,647.93)}{2,368.06} = 3.68 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 12.2 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 3.68 \text{ V} < E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.22.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4:

Figura 225

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 21.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

$A_{mm^2} = 120\text{ mm}^2$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 226 y 227 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 226

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 21.

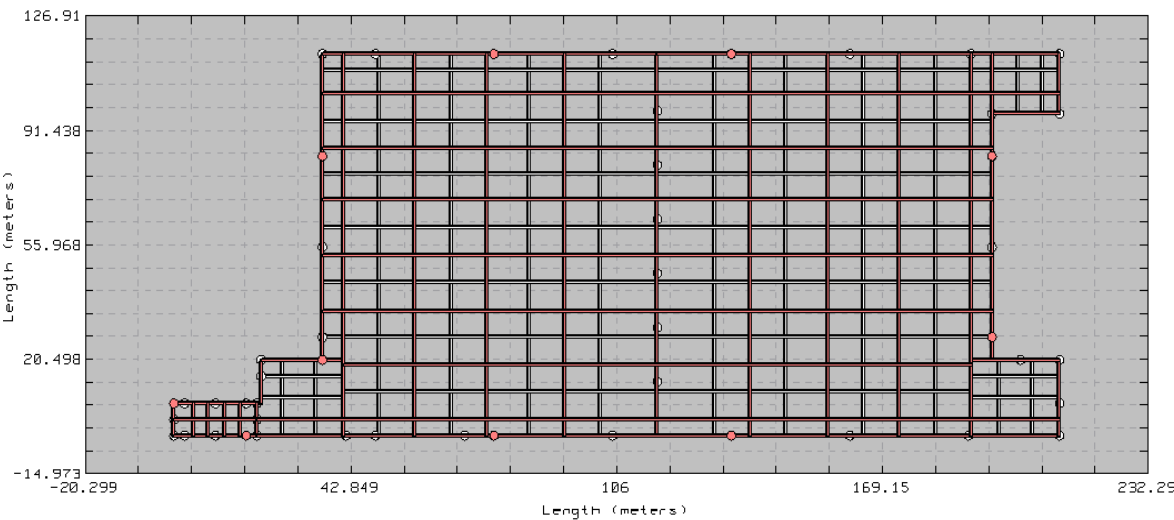
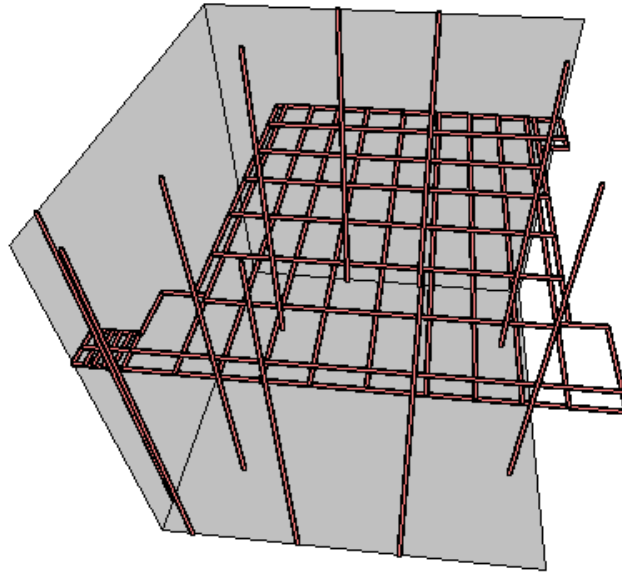


Figura 227

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 21.



Coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 228

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 21.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☒	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☒	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☒	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☒	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	41.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☒	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.449	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☒	Primary	211.244	-3.149	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1
18	☒	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
19	☒	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
20	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	115.085	1	1	Select		14.1
21	☒	Primary	190.187	20.284	1	211.244	20.284	1	1	Select		14.1
22	☒	Primary	41.087	-3.149	1	41.087	115.085	1	1	Select		14.1
23	☐	Primary	49.587	-3.149	1	49.587	115.085	1	1	Select		14.1
24	☒	Primary	58.087	-3.149	1	58.087	115.085	1	1	Select		14.1
25	☐	Primary	66.587	-3.149	1	66.587	115.085	1	1	Select		14.1
26	☒	Primary	75.087	-3.149	1	75.087	115.085	1	1	Select		14.1
27	☐	Primary	85.087	-3.149	1	85.087	115.085	1	1	Select		14.1
28	☒	Primary	93.587	-3.149	1	93.587	115.085	1	1	Select		14.1
29	☐	Primary	102.087	-3.149	1	102.087	115.085	1	1	Select		14.1
30	☒	Primary	190.187	-3.149	1	190.187	115.085	1	1	Select		14.1
31	☐	Primary	181.687	-3.149	1	181.687	115.085	1	1	Select		14.1
32	☒	Primary	173.187	-3.149	1	173.187	115.085	1	1	Select		14.1
33	☐	Primary	164.687	-3.149	1	164.687	115.085	1	1	Select		14.1
34	☒	Primary	156.187	-3.149	1	156.187	115.085	1	1	Select		14.1
35	☐	Primary	146.187	-3.149	1	146.187	115.085	1	1	Select		14.1
36	☒	Primary	137.687	-3.149	1	137.687	115.085	1	1	Select		14.1

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
37	☐	Primary	129.187	-3.149	1	129.187	115.085	1	1	Select		14.1
38	☐	Primary	26.487	-3.149	1	26.487	20.284	1	1	Select		14.1
39	☐	Primary	34.487	-3.149	1	34.487	20.284	1	1	Select		14.1
40	☐	Primary	204.787	-3.149	1	204.787	20.284	1	1	Select		14.1
41	☐	Primary	196.787	-3.149	1	196.787	20.284	1	1	Select		14.1
42	☐	Primary	207.244	96.556	1	207.244	115.085	1	1	Select		14.1
43	☐	Primary	201.244	96.556	1	201.244	115.085	1	1	Select		14.1
44	☒	Primary	20.449	1.851	1	211.244	1.851	1	1	Select		14.1
45	☐	Primary	190.187	15.284	1	211.244	15.284	1	1	Select		14.1
46	☐	Primary	190.187	8.567	1	211.244	8.567	1	1	Select		14.1
47	☐	Primary	21.487	15.284	1	41.087	15.284	1	1	Select		14.1
48	☐	Primary	21.487	8.567	1	41.087	8.567	1	1	Select		14.1
49	☐	Primary	41.087	10.350	1	190.187	10.350	1	1	Select		14.1
50	☒	Primary	41.087	18.850	1	190.187	18.850	1	1	Select		14.1
51	☐	Primary	36.087	27.350	1	195.187	27.350	1	1	Select		14.1
52	☒	Primary	36.087	35.350	1	195.187	35.350	1	1	Select		14.1
53	☐	Primary	36.087	44.350	1	195.187	44.350	1	1	Select		14.1
54	☒	Primary	36.087	52.850	1	195.187	52.850	1	1	Select		14.1
55	☐	Primary	36.087	61.350	1	195.187	61.350	1	1	Select		14.1
56	☒	Primary	36.087	69.850	1	195.187	69.850	1	1	Select		14.1
57	☐	Primary	36.087	77.850	1	195.187	77.850	1	1	Select		14.1
58	☒	Primary	36.087	85.850	1	195.187	85.850	1	1	Select		14.1
59	☐	Primary	36.087	94.350	1	195.187	94.350	1	1	Select		14.1
60	☒	Primary	36.087	102.850	1	211.244	102.850	1	1	Select		14.1
61	☐	Primary	36.087	110.085	1	211.244	110.085	1	1	Select		14.1

Figura 229

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 21.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☐	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☐	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☒	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☒	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☐	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☐	Primary	211.244	6.904	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☒	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	69.875	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	41.686	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☐	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	211.244	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☒	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
31	☐	Primary	48.639	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
32	☒	Primary	76.828	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
33	☐	Primary	201.950	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
34	☒	Primary	195.187	27.350	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
35	☐	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
36	☒	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil	Elements per Rod in lower soil	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
37	☐	Primary	190.187	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
38	☐	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
39	☒	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
40	☐	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
41	☐	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
42	☐	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
43	☐	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
44	☐	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
45	☐	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
46	☒	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
47	☐	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
48	☐	Primary	36.087	27.344	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
49	☐	Primary	21.487	15.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR:

Figura 230

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 21.

Output Results	
Ground Potential Rise	58.5357 volts
Calculated Ground Resistance	0.277937 ohms
Equivalent Resistance	0.277929 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 231

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 21.

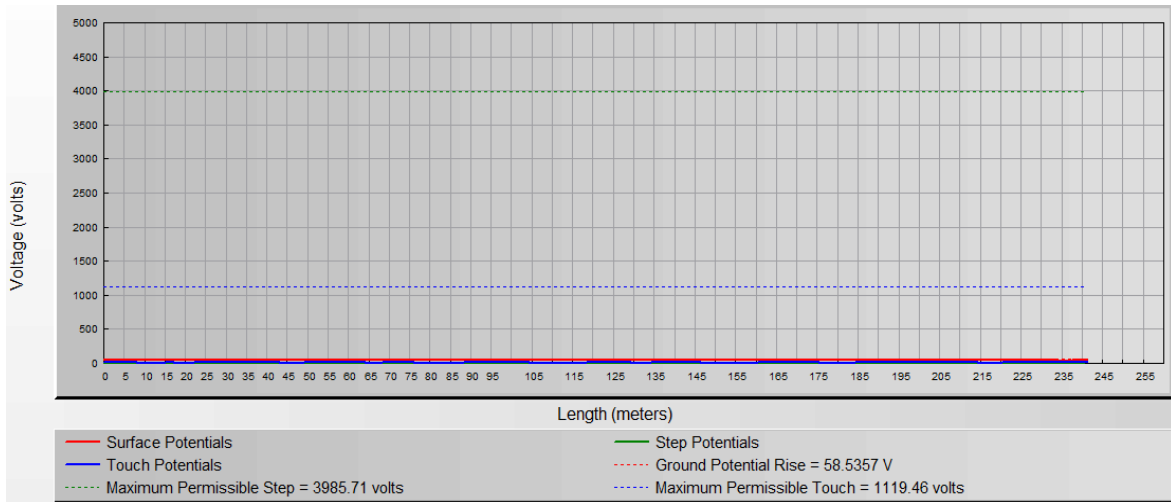
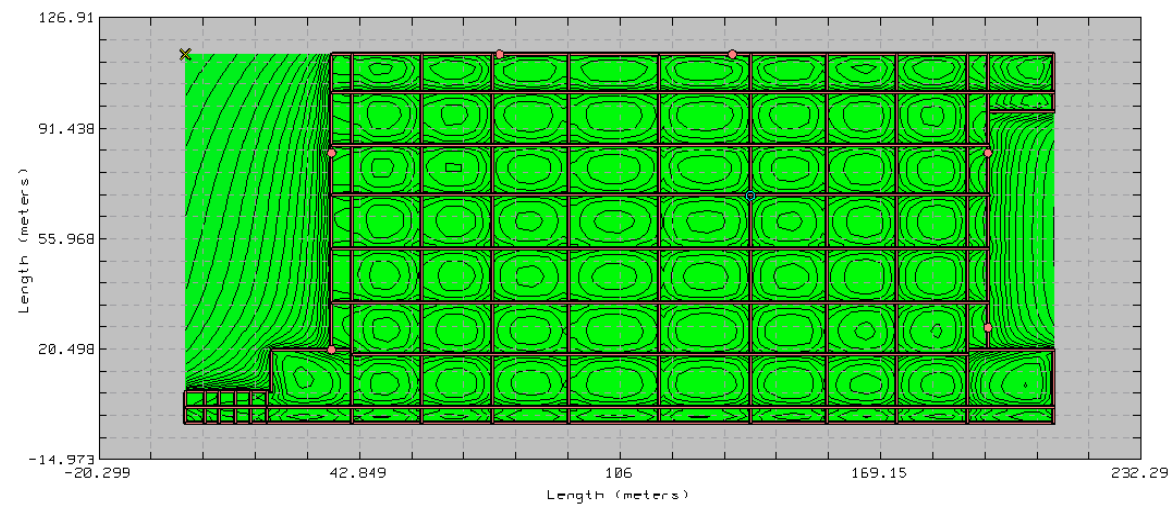


Figura 232

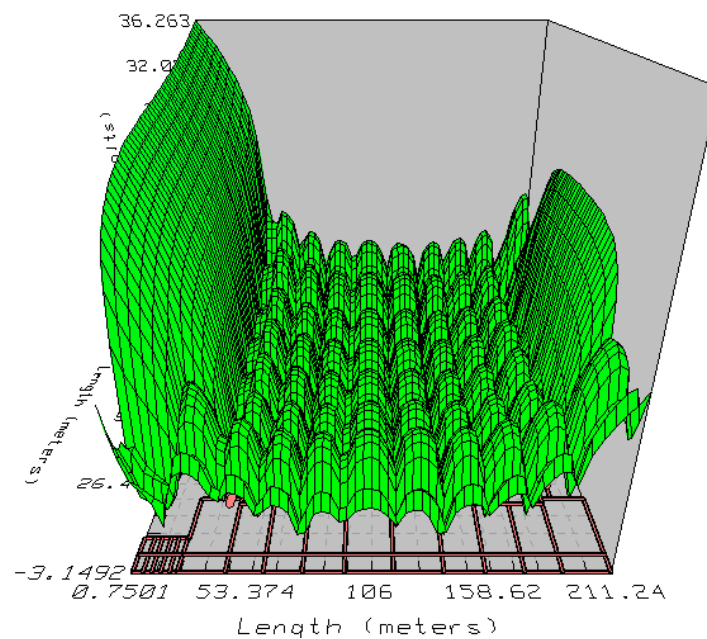
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 21.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 233

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 21.

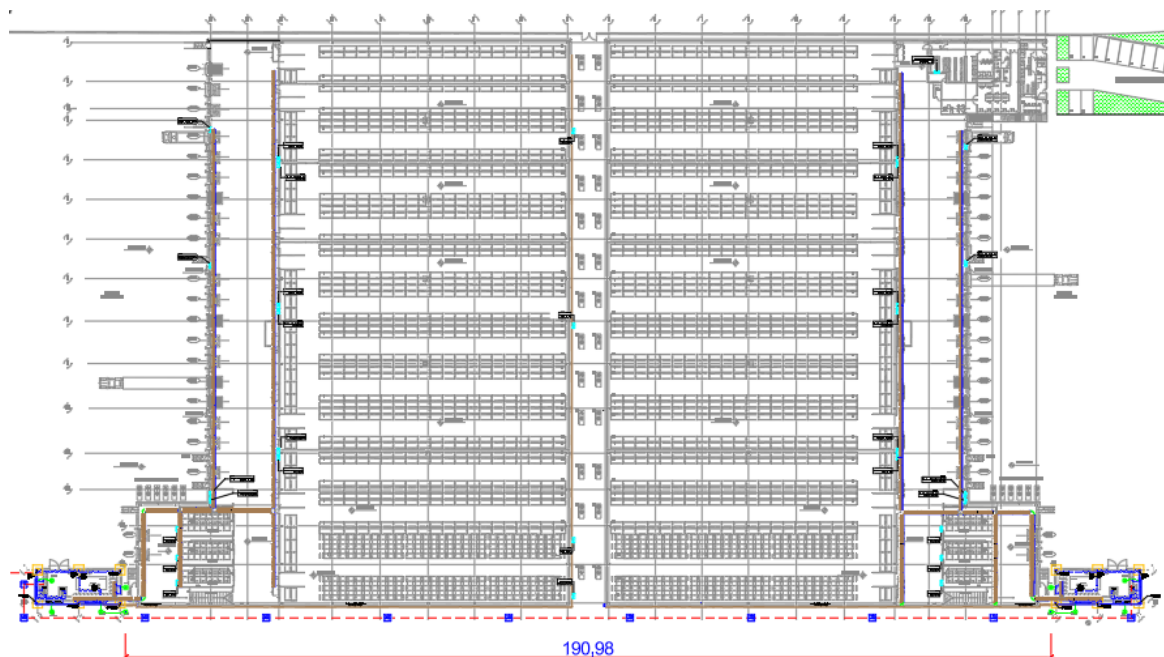


3.23 Caso 22

El caso 22 es similar al caso 15, pero con una segunda subestación. Ambas tienen pozos a tierra independientes, y los resultados son iguales en ambos casos.

Figura 234

Layout puesta a tierra caso 22.



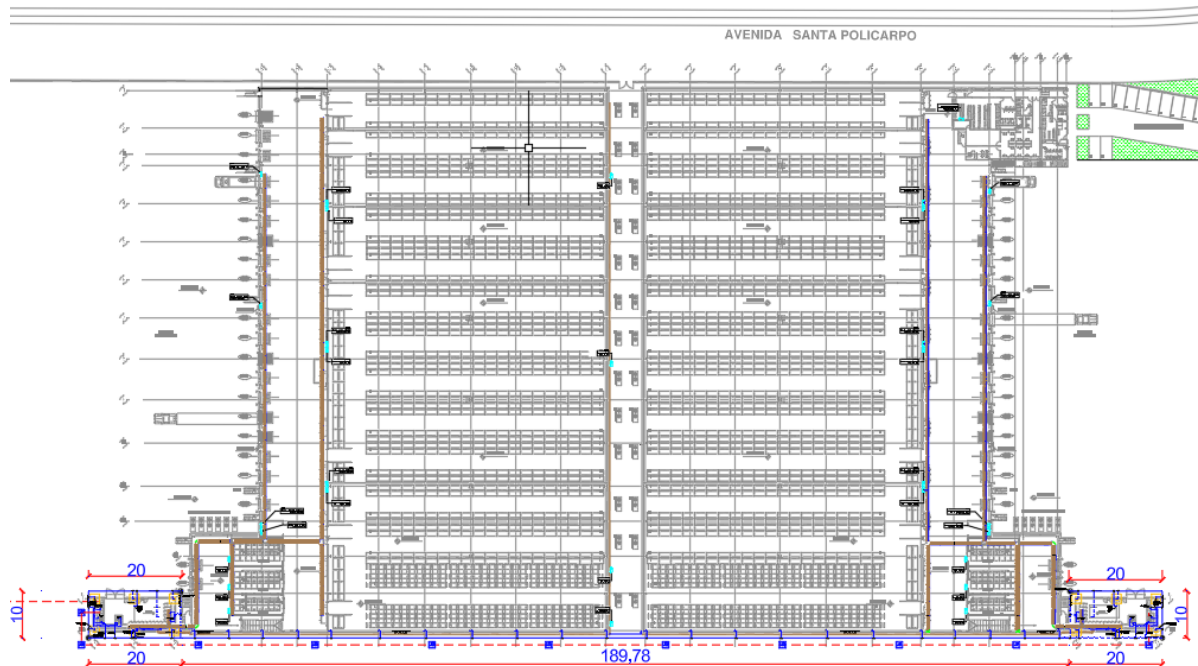
Nota: Elaboración propia.

3.24 Caso 23

En la Figura 235 se muestra el layout de dos mallas a tierra de 200 m² cada uno que cubren el perímetro de la Subestación N°1 y Subestación N°2, estas mallas están interconectadas con 189.78 m de contrapeso enterrado a 1 m de profundidad.

Figura 235

Layout malla a tierra caso 23.



Nota: Elaboración propia.

3.24.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Puede analizarse la malla de cada subestación por separado, sin embargo, no se puede obtener un resultado preciso, especialmente de qué sucede en zonas externas a las mallas. Para efecto de estudio se considera una malla ideal equivalente de 40m de largo y 10m de ancho, los resultados solo son referenciales.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del resultado del caso 1 tenemos:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 400 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I₀, t_c, d)

De resultados anteriores tenemos:

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50} , E_{s50})

Del resultado del caso 1 tenemos:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D , n , L_C , L_T , h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 9.6 \text{ m}$$

$$D = 20 \text{ m}$$

$$L_x = 40 \text{ m}$$

$$L_y = 10 \text{ m}$$

$$L_c = 120 \text{ m}$$

$$L_T = 129.60 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.0158 \text{ m}$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Sverak.

$$R_g = 18.03 \left[\frac{1}{129.60} + \frac{1}{\sqrt{20(400)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 1\sqrt{\frac{20}{400}}} \right) \right] = R_g = 0.51$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_i)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(0.51) = 103.76 \text{ V}$$

$$\text{GPR} = 103.76 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(10+40) = 100 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(120)}{100} = 2.4$$

$$n_b = \sqrt{\frac{100}{4(20)}} = 1.12$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2.4(1.12)(1)(1) = 2.68$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(2.68))^{\frac{2}{2.68}}} = 0.29$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{20^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(20+2(1))^2}{8(20)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.29}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.68)-1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.19$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.68) = 1.04$$

$$L_M = 120 + 9.6 = 129.6 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{18.03(1.19)(1.04)(205.24)}{129.6} = 35.38 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(120) + 0.85(9.6) = 98.16 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{20+1} + \frac{1}{20} (1 - 0.5^{2.68-2}) \right] = 0.18$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{18.03(0.18)(1.04)(205.24)}{98.16} = 7.08 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 35.38 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 7.08 \text{ V} < E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.24.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 236

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 23.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 237 y 238 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 237

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 23.

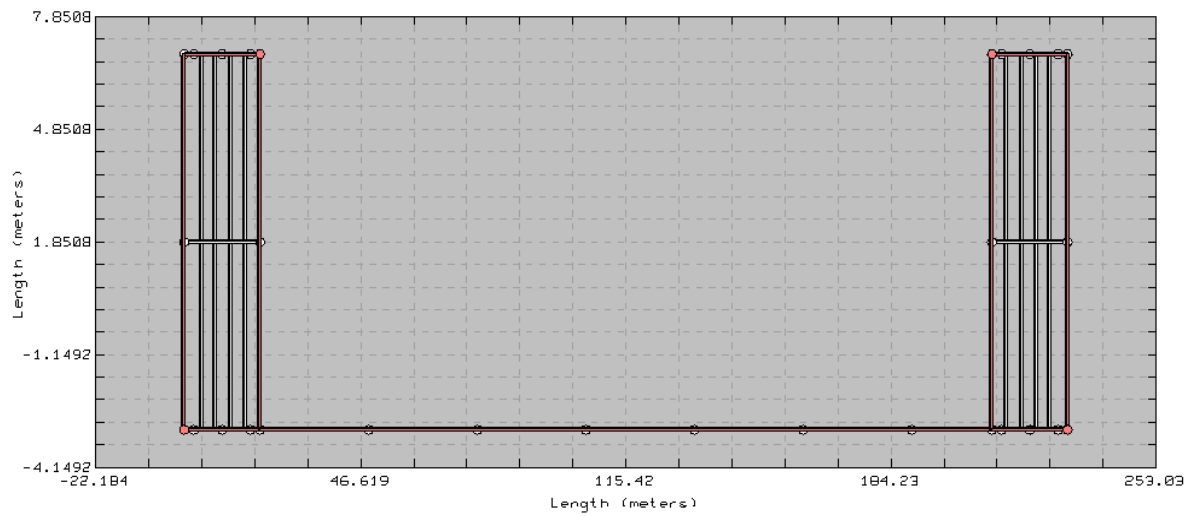
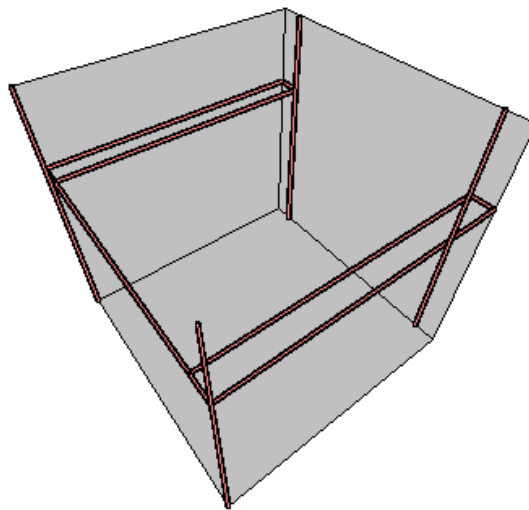


Figura 238

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 23.



En las Figuras 239 y 240 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 239

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 23.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	20.449	-3.149	1	210.396	-3.149	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	210.396	6.851	1	230.094	6.851	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	210.396	-3.149	1	210.396	6.851	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	230.094	-3.149	1	230.094	6.851	1	1	Select		14.1
14	☒	Primary	210.396	-3.149	1	230.094	-3.149	1	1	Select		14.1
15	☐	Primary	225.483	-3.149	1	225.483	6.851	1	1	Select		14.1
16	☐	Primary	221.983	-3.149	1	221.983	6.851	1	1	Select		14.1
17	☐	Primary	218.121	-3.149	1	218.121	6.851	1	1	Select		14.1
18	☐	Primary	214.259	-3.149	1	214.259	6.851	1	1	Select		14.1
19	☐	Primary	210.396	1.851	1	230.094	1.851	1	1	Select		14.1

Figura 240

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 23.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☐	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☐	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☐	Primary	230.094	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	210.396	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☒	Primary	230.094	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☒	Primary	210.396	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	230.094	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☐	Primary	210.396	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	220.245	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	220.245	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	227.594	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	227.594	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	212.896	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	212.896	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☐	Primary	48.638	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	76.827	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	105.016	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☐	Primary	133.205	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	161.394	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	189.583	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 241

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 23.

Output Results

Ground Potential Rise	30.4131 volts
Calculated Ground Resistance	0.144404 ohms
Equivalent Resistance	0.144402 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 242

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 23.

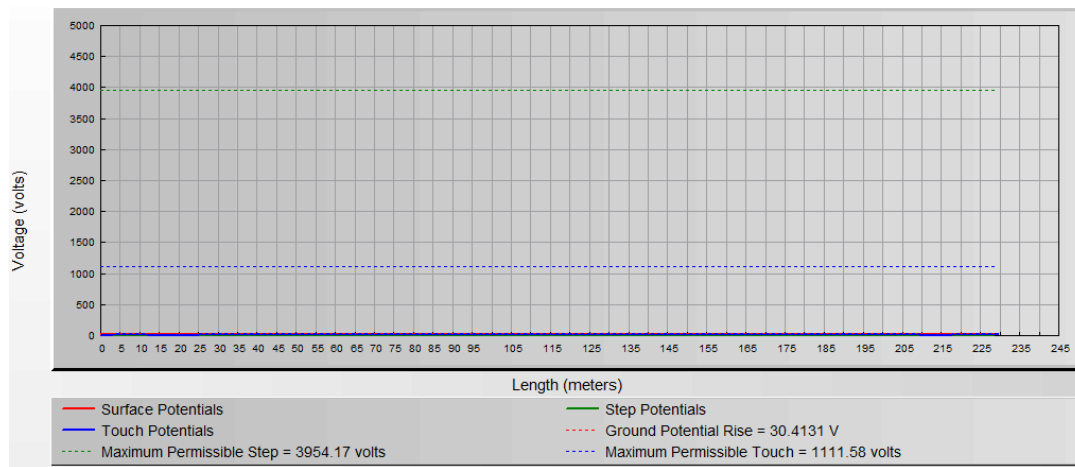
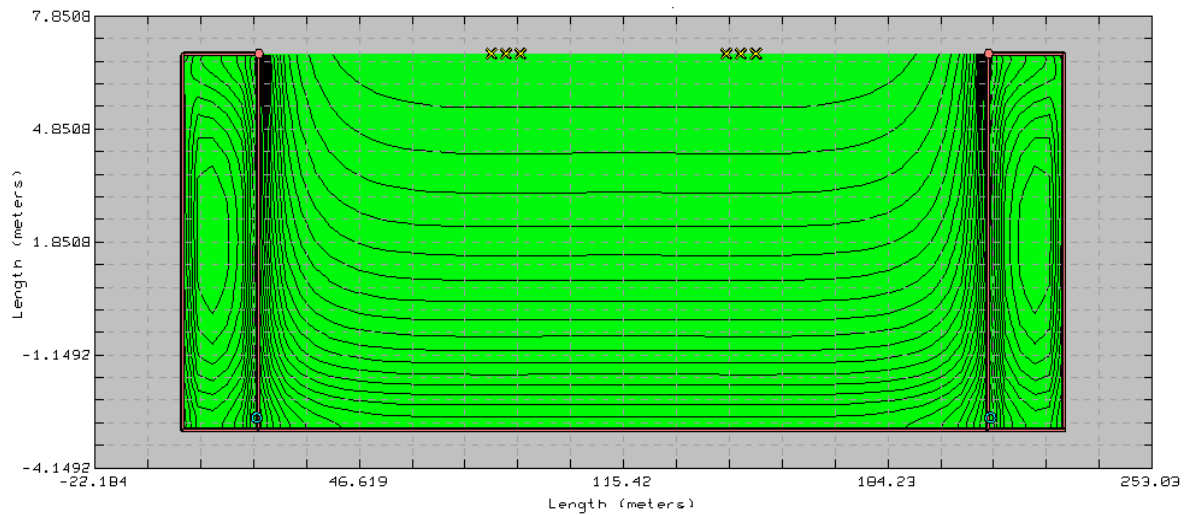


Figura 243

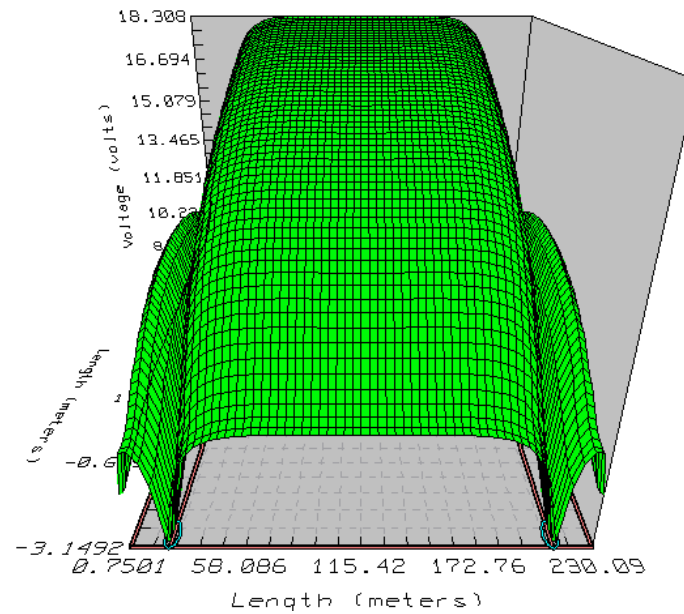
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 23.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 244

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 23.

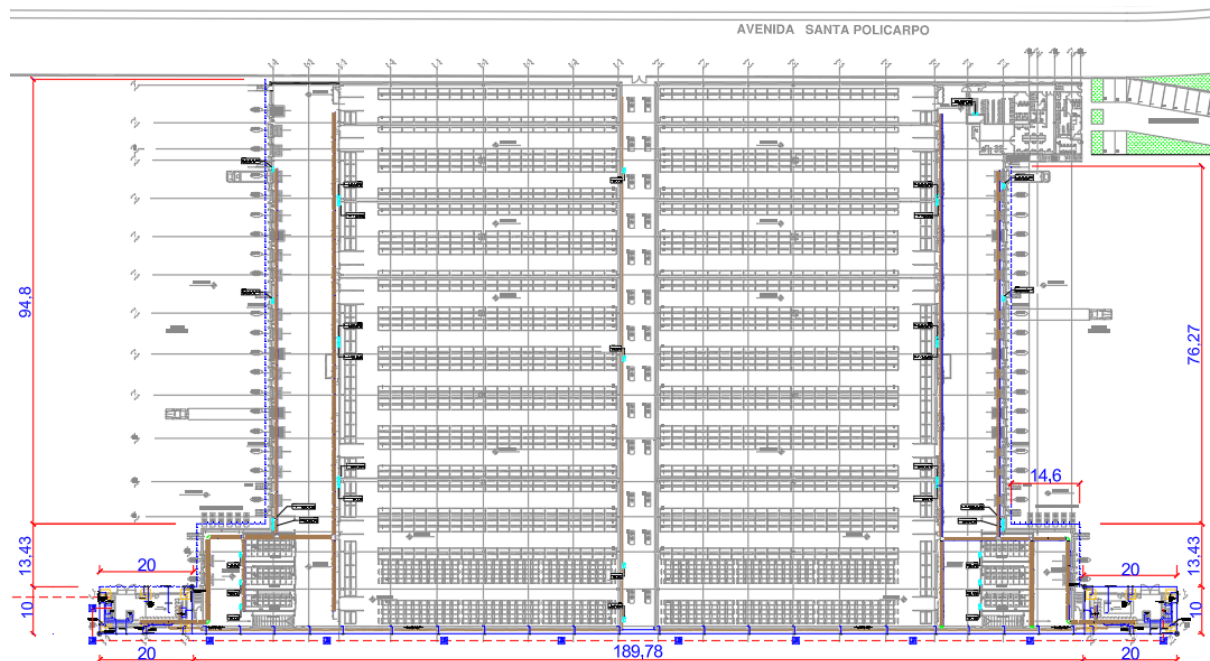


3.25 Caso 24

En la Figura 245 se muestra el layout de una malla a tierra que cubre el total del perímetro naves y las 02 subestaciones.

Figura 245

Layout malla a tierra caso 24.



3.25.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Se hace la evaluación idealizando algunos pasos para efecto de estudio.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 1:

$$\rho_{a(av1)} = 18.03 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,451.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 1:

$$C_s = 0.7701$$

$$E_{t50} = 1,111.51 \, V$$

$$E_{s50} = 3,953.89 \, V$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \, m$$

$$L_R = 9.6 \, m$$

D = 146.46 m (idealizando a una malla cuadrada de una sola cuadrícula de 21,451.67 m²)

$$L_x = 175.16 \, m$$

$$L_y = A/L_x = 122.47 \, m$$

$$L_c = 2(175.16+122.47) = 595.26 \, m$$

$$L_T = 604.86 \, m$$

$$h = 1 \, m$$

$$2b = 0.0158 \, m$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Sverak:

$$R_g = 18.03 \left[\frac{1}{604.86} + \frac{1}{\sqrt{20(21,451.67)}} \left(1 + \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{20}{21,451.67}}} \right) \right] = 0.08$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G , t_f)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(0.08) = 17.25 \text{ V}$$

$$\text{GPR} = 17.25 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular con pocas varillas verticales

$$L_p = 2(175.16 + 122.47) = 595.26 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(595.26)}{595.26} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{595.26}{4(146.46)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.01)(1)(1) = 2.02$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(2.02))^{\frac{2}{2.02}}} = 0.25$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{146.46^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(146.46 + 2(1))^2}{8(146.46)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.25}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.82$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.02) = 0.94$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con pocos electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 595.26 + 9.6 = 604.86 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{18.03(1.82)(0.94)(205.24)}{604.86} = 10.5 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(595.26) + 0.85(9.6) = 454.6 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{146.46+1} + \frac{1}{146.46} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.16$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{18.03(0.16)(0.94)(205.24)}{454.6} = 1.24 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 10.5 \text{ V} < E_{t50} = 1,111.51 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 1.24 \text{ V} < E_{s50} = 3,953.89 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.25.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 246

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 24.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	2 meters
Upper Layer Resistivity	19.29 ohm-m
Lower Layer Resistivity	15.74 ohm-m
RMS Error	3.07 %
Reduction Factor Cs	0.770121
Maximum Permissible Touch Voltage	1111.58 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3954.17 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

$A_{mm^2} = 120\text{ mm}^2$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 247 y 248 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 247

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 24.

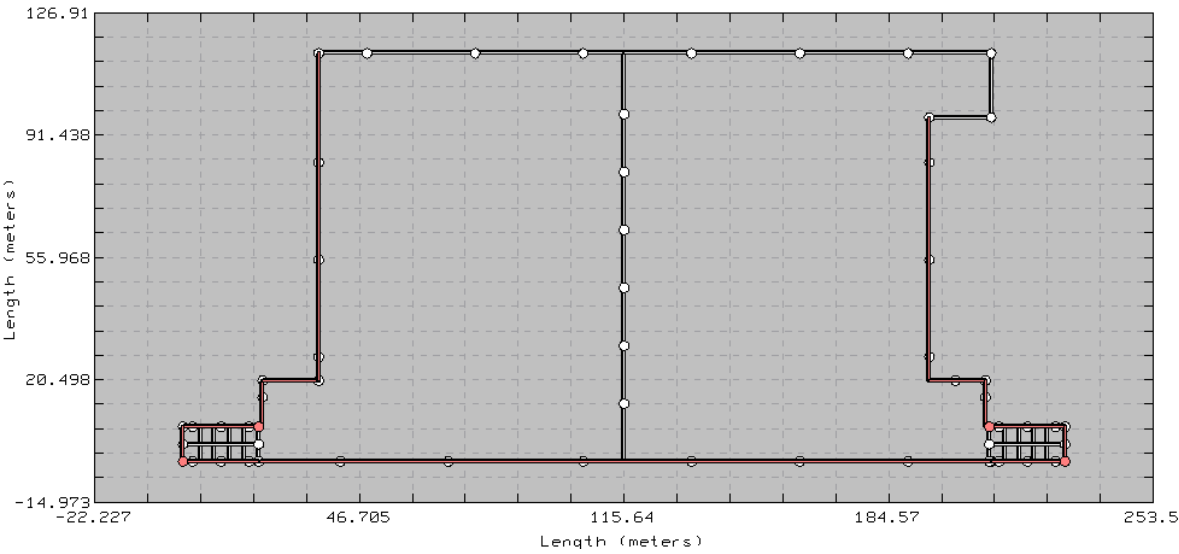
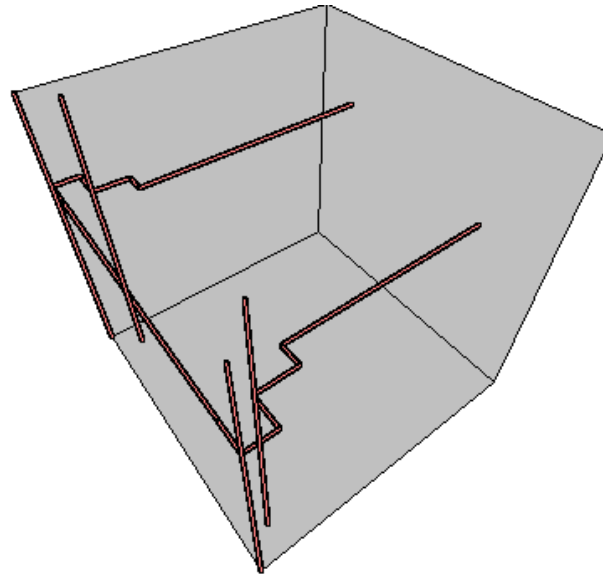


Figura 248

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 24.



En las Figuras 249 y 250 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 249

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 24.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☐	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	36.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☐	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☐	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.877	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☐	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☐	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
18	☐	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
19	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	96.556	1	1	Select		14.1
20	☒	Primary	195.187	20.284	1	209.787	20.284	1	1	Select		14.1
21	☒	Primary	209.787	6.851	1	230.523	6.851	1	1	Select		14.1
22	☐	Primary	210.824	-3.149	1	210.824	6.851	1	1	Select		14.1
23	☒	Primary	230.523	-3.149	1	230.523	6.851	1	1	Select		14.1
24	☒	Primary	211.244	-3.149	1	230.523	-3.149	1	1	Select		14.1
25	☐	Primary	225.912	-3.149	1	225.912	6.851	1	1	Select		14.1
26	☐	Primary	222.412	-3.149	1	222.412	6.851	1	1	Select		14.1
27	☐	Primary	218.550	-3.149	1	218.550	6.851	1	1	Select		14.1
28	☐	Primary	214.688	-3.149	1	214.688	6.851	1	1	Select		14.1
29	☐	Primary	210.824	1.851	1	230.523	1.851	1	1	Select		14.1
30	☒	Primary	209.787	6.851	1	209.787	20.284	1	1	Select		14.1

Figura 250

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 24.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☐	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	0.033	Select		15.8
2	☐	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☐	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☐	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☐	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	201.950	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☐	Primary	195.187	27.095	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	189.587	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☐	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☐	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
31	☐	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
32	☐	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
33	☐	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
34	☐	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
35	☐	Primary	36.087	27.094	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
36	☐	Primary	21.487	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
37	☐	Primary	69.875	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
38	☐	Primary	41.686	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
39	☐	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
40	☐	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
41	☐	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
42	☐	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
43	☐	Primary	209.787	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
44	☐	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
45	☐	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
46	☐	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
47	☐	Primary	230.523	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
48	☐	Primary	210.824	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
49	☒	Primary	230.523	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
50	☒	Primary	210.824	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
51	☐	Primary	230.523	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
52	☐	Primary	210.824	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
53	☐	Primary	220.674	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
54	☐	Primary	220.674	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
55	☐	Primary	228.023	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
56	☐	Primary	228.023	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
57	☐	Primary	213.324	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
58	☐	Primary	213.324	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
59	☐	Primary	209.787	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 251

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 24.

Output Results

Ground Potential Rise	20.1511 volts
Calculated Ground Resistance	0.0956788 ohms
Equivalent Resistance	0.0956779 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 252

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 24.

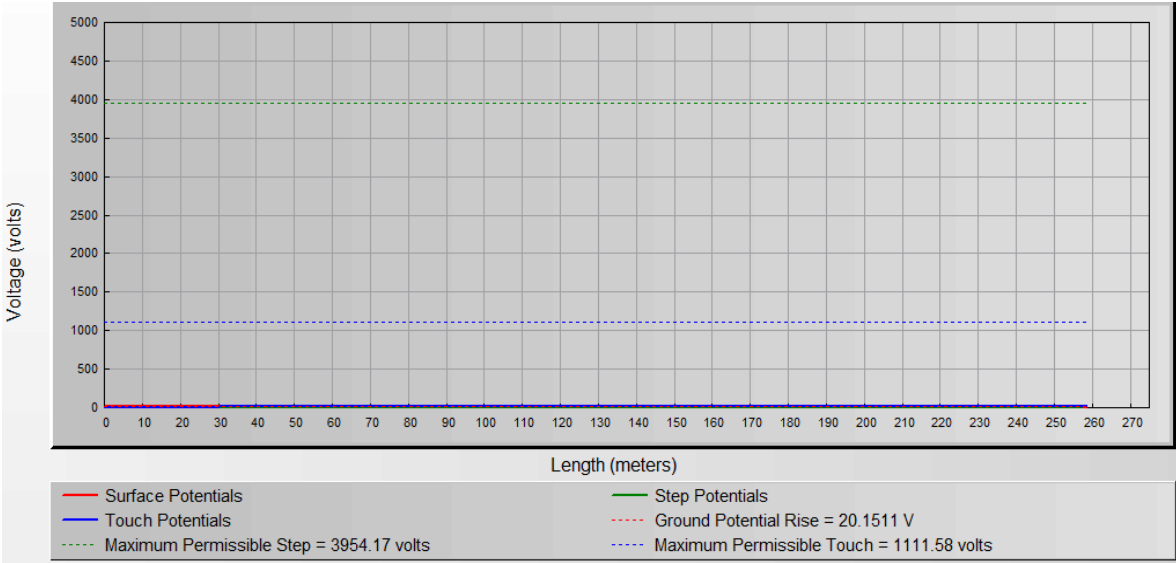
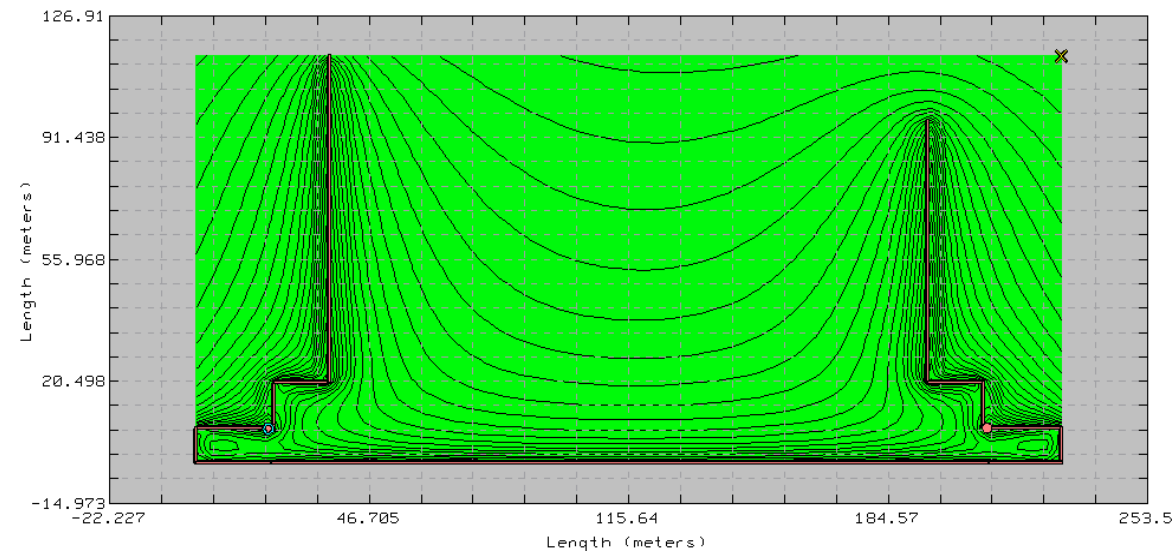


Figura 253

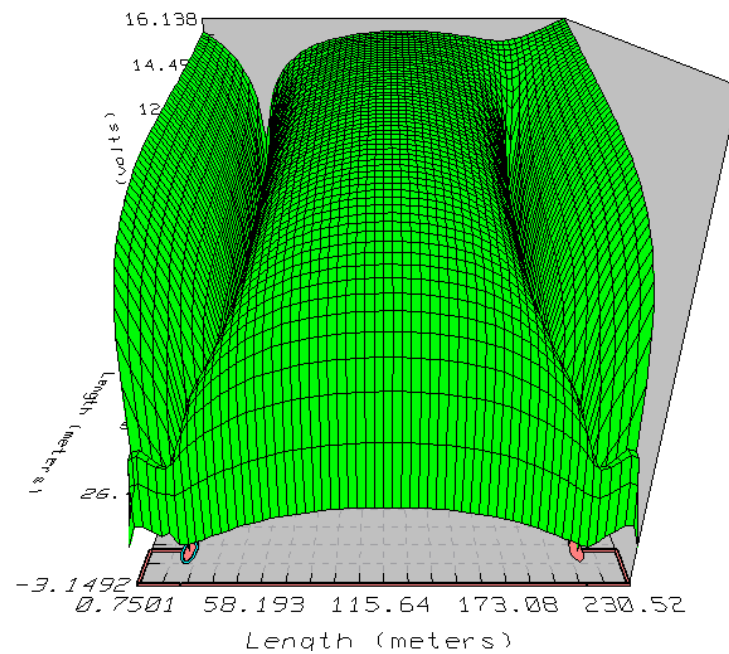
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 24.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 254

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 24.

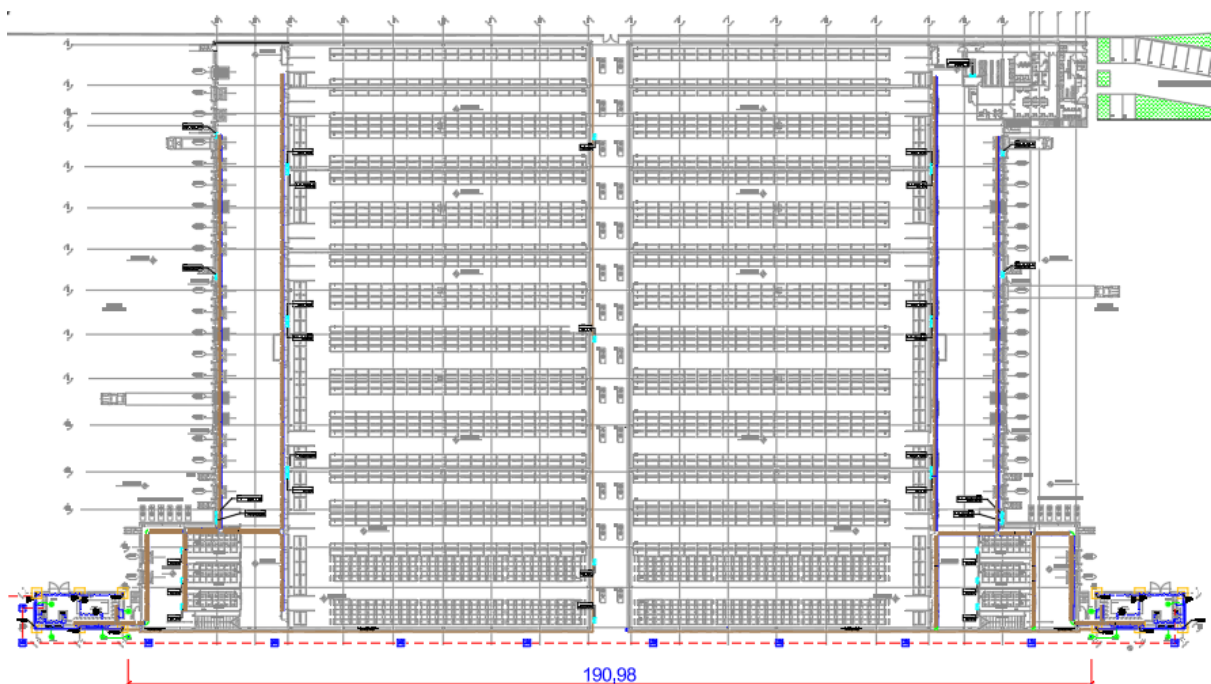


3.26 Caso 25

El caso 25 es similar al caso 18, pero con una segunda subestación, ambas con pozos a tierra independientes y resultados de cálculo iguales.

Figura 255

Layout puesta a tierra Caso 25.



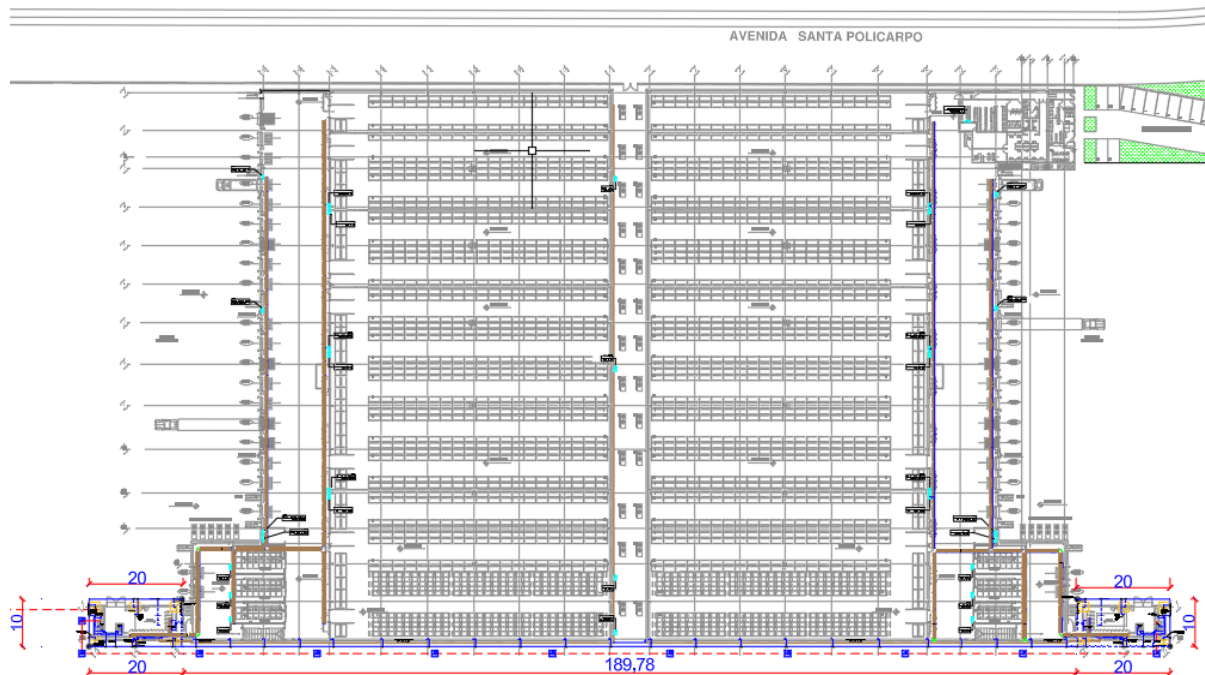
Nota: Elaboración propia.

3.27 Caso 26

La Figura 256 muestra el layout de dos mallas a tierra de 200 m² que están interconectadas con 189.78 m de contrapeso enterrado a 1 m de profundidad.

Figura 256

Layout malla a tierra caso 26.



Nota: Elaboración propia.

3.27.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Para efecto de estudio se considera una malla ideal equivalente de 40m de largo y 10m de ancho, los resultados solo son referenciales.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del del caso 4 tenemos:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 400 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 9.6 \text{ m}$$

$$D = 20 \text{ m}$$

$$L_x = 40 \text{ m}$$

$$L_y = 10 \text{ m}$$

$$L_c = 120 \text{ m}$$

$$L_T = 129.6 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.0158 \text{ m}$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Se aplica las expresiones de Sverak.

$$R_g = 95.5 \left[\frac{1}{129.60} + \frac{1}{\sqrt{20(400)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 1\sqrt{\frac{20}{400}}} \right) \right] = 2.68 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G, t_f)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(2.68) = 549.44 \text{ V}$$

$$\text{GPR} = 549.44 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular

$$L_p = 2(10+40) = 100 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(120)}{100} = 2.4$$

$$n_b = \sqrt{\frac{100}{4(20)}} = 1.12$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2.4(1.12)(1)(1) = 2.68$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(2.68))^{\frac{2}{2.68}}} = 0.29$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{20^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(20+2(1))^2}{8(20)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.29}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.68)-1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.19$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.68) = 1.04$$

$$L_M = 120 + 9.6 = 129.6 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(1.19)(1.04)(205.24)}{129.6} = 187.36 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(120) + 0.85(9.6) = 98.16 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{20+1} + \frac{1}{20} (1 - 0.5^{2.68-2}) \right] = 0.18$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.18)(1.04)(205.24)}{98.16} = 37.48 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 187.36 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 37.48 \text{ V} < E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.27.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4:

Figura 257

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 26.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 258 y 261 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 258

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 26.

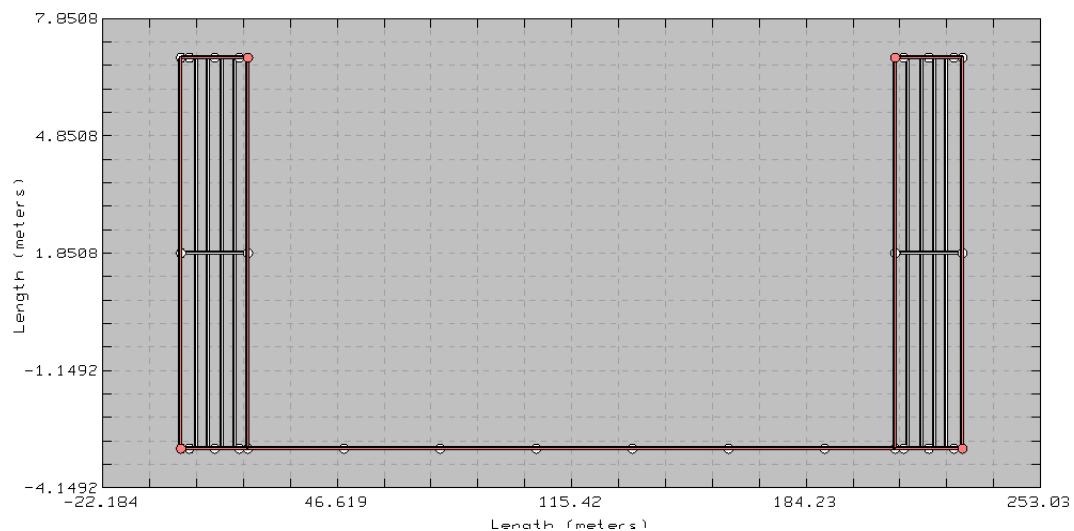
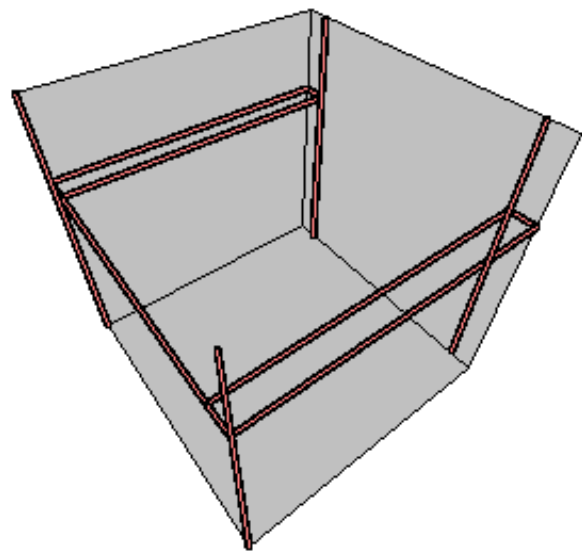


Figura 259

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 26.



En las Figuras 260 y 261 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 260

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 26.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	20.449	-3.149	1	210.396	-3.149	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	210.396	6.851	1	230.094	6.851	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	210.396	-3.149	1	210.396	6.851	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	230.094	-3.149	1	230.094	6.851	1	1	Select		14.1
14	☒	Primary	210.396	-3.149	1	230.094	-3.149	1	1	Select		14.1
15	☐	Primary	225.483	-3.149	1	225.483	6.851	1	1	Select		14.1
16	☐	Primary	221.983	-3.149	1	221.983	6.851	1	1	Select		14.1
17	☐	Primary	218.121	-3.149	1	218.121	6.851	1	1	Select		14.1
18	☐	Primary	214.259	-3.149	1	214.259	6.851	1	1	Select		14.1
19	☐	Primary	210.396	1.851	1	230.094	1.851	1	1	Select		14.1

Figura 261

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 26.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☐	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☐	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☒	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☒	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☐	Primary	230.094	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	210.396	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☒	Primary	230.094	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☒	Primary	210.396	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	230.094	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☐	Primary	210.396	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	220.245	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	220.245	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	227.594	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	227.594	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	212.896	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	212.896	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☐	Primary	48.638	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	76.827	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	105.016	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☐	Primary	133.205	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	161.394	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	189.583	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 262

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 26.

Output Results

Ground Potential Rise	190.873 volts
Calculated Ground Resistance	0.90635 ohms
Equivalent Resistance	0.906268 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran controlados.

Figura 263

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 26.

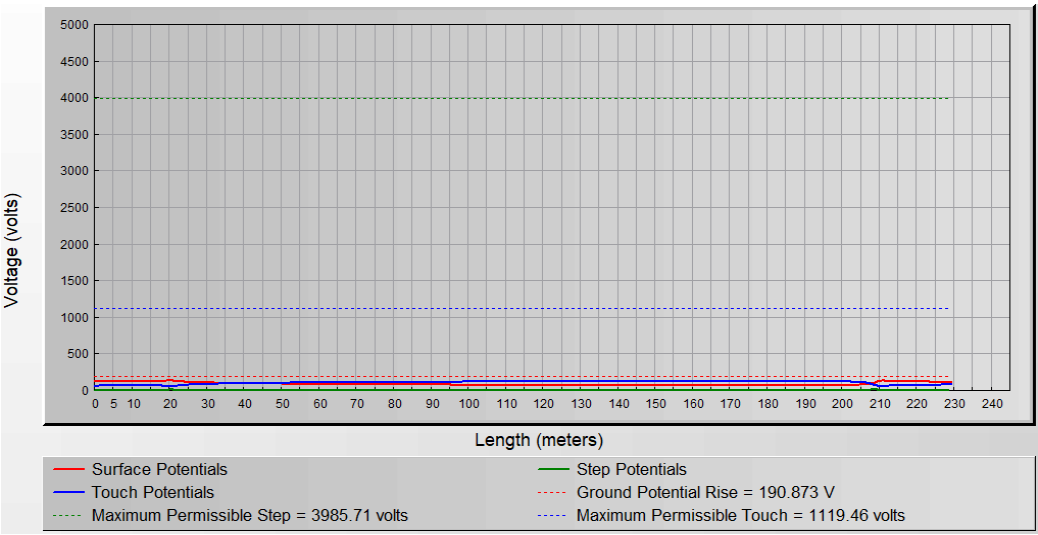
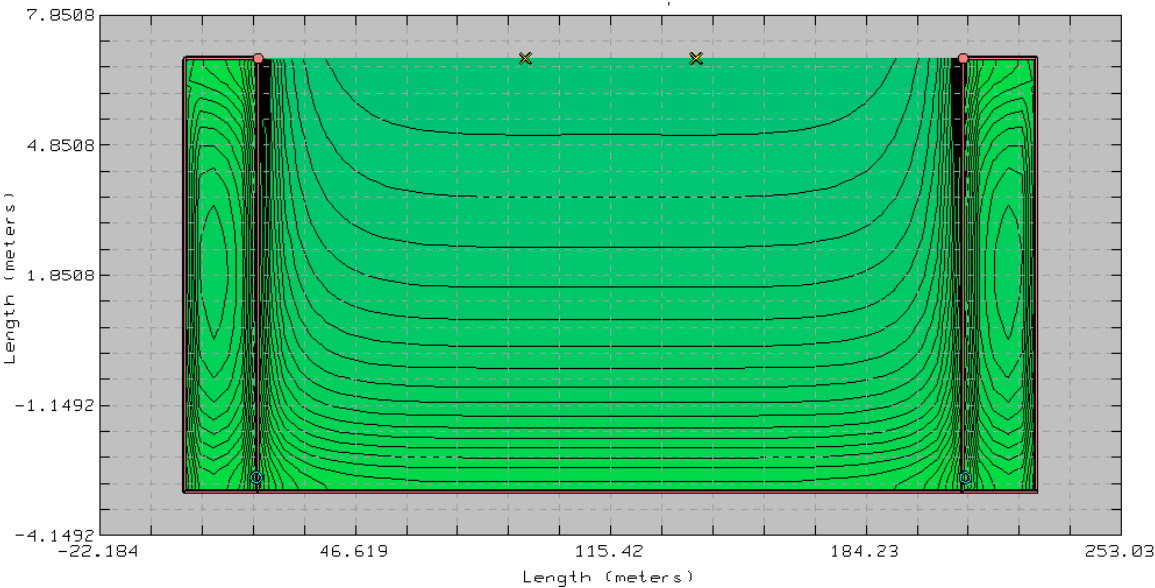


Figura 264

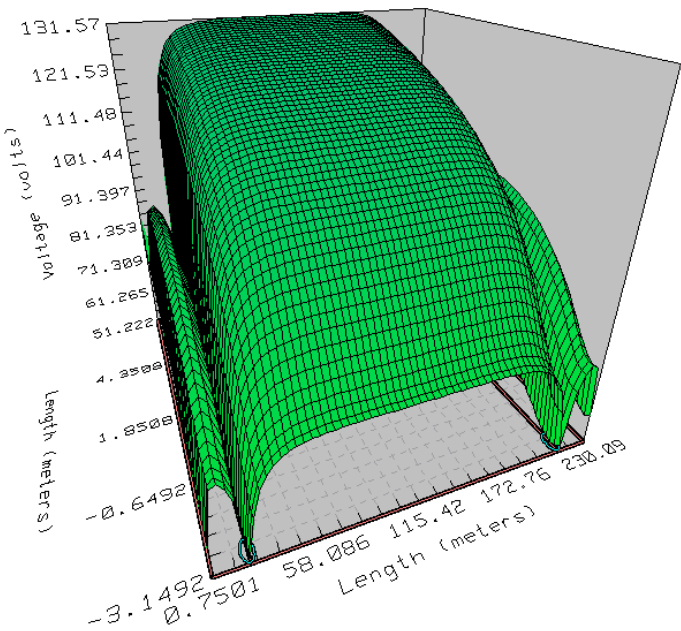
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 26.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 265

Gráfica 3D de la tensión superficial CYMGRD Caso 26.

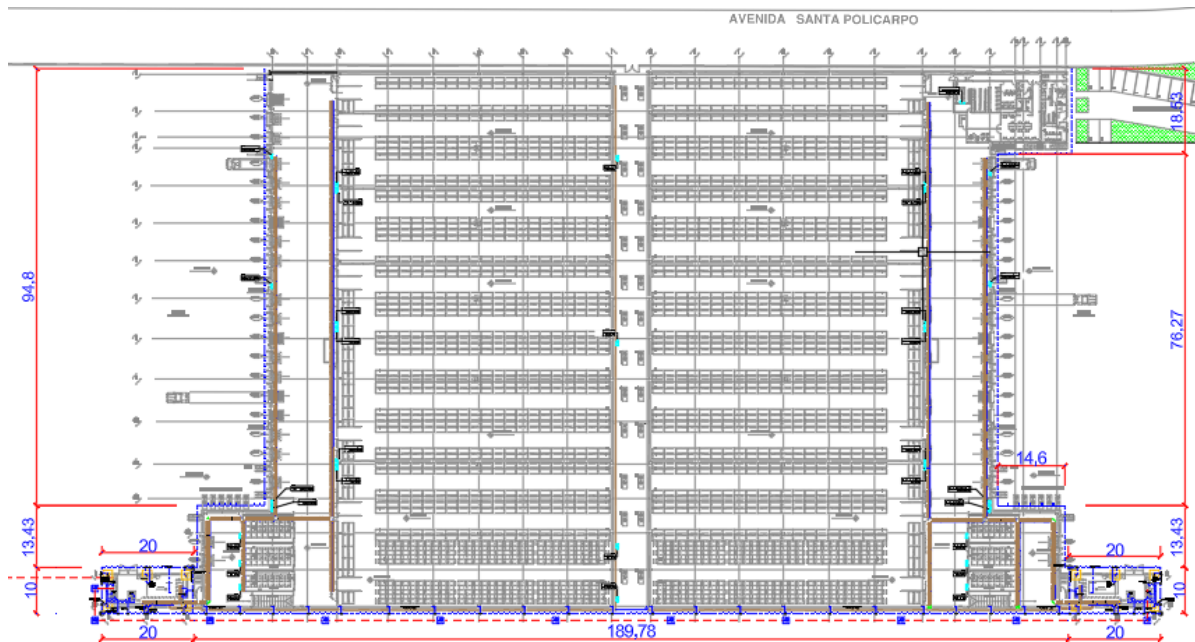


3.28 Caso 27

La Figura 266 muestra el layout de las 02 mallas a tierra de las subestación N°1 y N°2 interconectadas con contrapeso de 189.78 m, esta configuración cubre casi todo perímetro de la nave industrial.

Figura 266

Layout malla a tierra caso 27.



Nota: Elaboración propia.

3.28.1 Modelamiento basado en metodología IEEE Std 80-2013

Se hace la evaluación idealizando algunos pasos para efecto de estudio.

Paso 1: Data de campo (A, ρ)

Del caso 4:

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

El área A que cubre la malla es 21,451.67 m².

Paso 2: Dimensionamiento del conductor (3I_o, t_c, d)

Del caso 1:

$$A_{mm^2} = 120 \, mm^2$$

Paso 3: Criterio de toque y paso (E_{t50}, E_{s50})

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 9.6 \text{ m}$$

D = 146.46 m (idealizando a una malla cuadrada de una sola cuadrícula de 21,451.67 m²)

$$L_x = 175.16 \text{ m}$$

$$L_y = A/L_x = 122.47 \text{ m}$$

$$L_c = 2(175.16+122.47) = 595.26 \text{ m}$$

$$L_T = 9.6+595.26 = 604.86 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.0158 \text{ m}$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Sverak:

$$R_g = 95.5 \left[\frac{1}{604.86} + \frac{1}{\sqrt{20(21,451.67)}} \left(1 + \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{20}{21,451.67}}} \right) \right] = 0.45 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G, t_i)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(0.45) = 91.36 \text{ V}$$

$$\text{GPR} = 91.36 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular con pocas varillas verticales

$$L_p = 2(175.16 + 122.47) = 595.26 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(595.26)}{595.26} = 2$$

$$n_b = \sqrt{\frac{595.26}{4(146.46)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 2(1.01)(1)(1) = 2.02$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(2.02))^{\frac{2}{2.02}}} = 0.25$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{146.46^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(146.46 + 2(1))^2}{8(146.46)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) + \frac{0.25}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(2.02) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 1.82$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(2.02) = 0.94$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con pocos electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 595.26 + 9.6 = 604.86 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(1.82)(0.94)(205.24)}{604.86} = 55.62 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(595.26) + 0.85(9.6) = 454.6 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{146.46+1} + \frac{1}{146.46} (1 - 0.5^{2.02-2}) \right] = 0.16$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.16)(0.94)(205.24)}{454.6} = 6.55 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 55.62 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 6.55 \text{ V} < E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.28.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 1:

Figura 267

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 27.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

Las Figuras 268 y 269 muestran el layout equivalente y modelo 3D.

Figura 268

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 27.

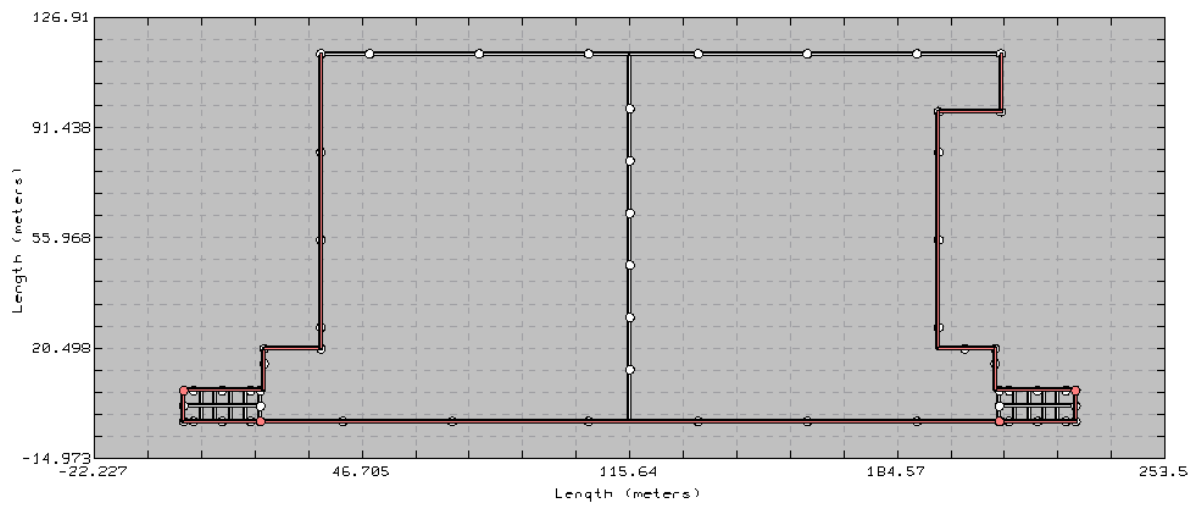
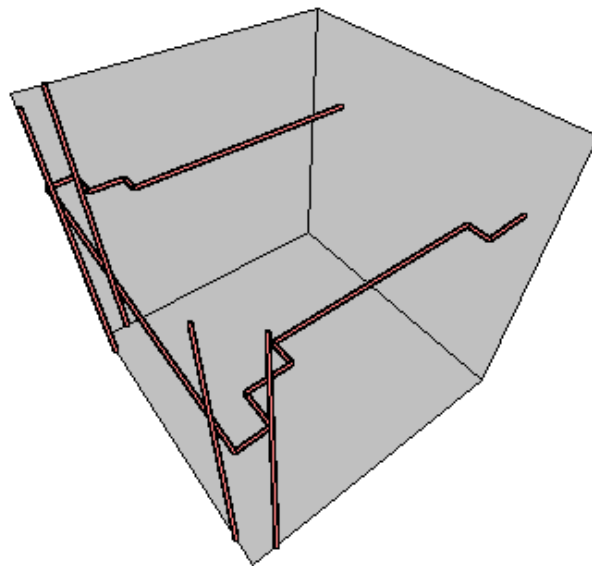


Figura 269

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 27.



En las Figuras 270 y 271 el programa muestra las coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 270

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 27.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☐	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☐	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	36.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☐	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☐	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.877	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☐	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☒	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
18	☒	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
19	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	96.556	1	1	Select		14.1
20	☒	Primary	195.187	20.284	1	209.787	20.284	1	1	Select		14.1
21	☒	Primary	209.787	6.851	1	230.523	6.851	1	1	Select		14.1
22	☐	Primary	210.824	-3.149	1	210.824	6.851	1	1	Select		14.1
23	☒	Primary	230.523	-3.149	1	230.523	6.851	1	1	Select		14.1
24	☒	Primary	211.244	-3.149	1	230.523	-3.149	1	1	Select		14.1
25	☐	Primary	225.912	-3.149	1	225.912	6.851	1	1	Select		14.1
26	☐	Primary	222.412	-3.149	1	222.412	6.851	1	1	Select		14.1
27	☐	Primary	218.550	-3.149	1	218.550	6.851	1	1	Select		14.1
28	☐	Primary	214.688	-3.149	1	214.688	6.851	1	1	Select		14.1
29	☐	Primary	210.824	1.851	1	230.523	1.851	1	1	Select		14.1
30	☒	Primary	209.787	6.851	1	209.787	20.284	1	1	Select		14.1

Figura 271

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 27.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☐	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☐	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☐	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☐	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☐	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	201.950	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☐	Primary	195.187	27.095	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	189.587	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☐	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☐	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
31	☐	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
32	☐	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
33	☐	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
34	☐	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
35	☐	Primary	36.087	27.094	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
36	☐	Primary	21.487	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
37	☐	Primary	69.875	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
38	☐	Primary	41.686	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
39	☐	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
40	☐	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
41	☐	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
42	☐	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
43	☐	Primary	209.787	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
44	☐	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
45	☐	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
46	☐	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
47	☒	Primary	230.523	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
48	☒	Primary	210.824	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
49	☐	Primary	230.523	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
50	☐	Primary	210.824	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
51	☐	Primary	230.523	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
52	☐	Primary	210.824	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
53	☐	Primary	220.674	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
54	☐	Primary	220.674	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
55	☐	Primary	228.023	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
56	☐	Primary	228.023	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
57	☐	Primary	213.324	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
58	☐	Primary	213.324	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
59	☐	Primary	209.787	15.465	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR.

Figura 272

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 27.

Output Results

Ground Potential Rise	117.487 volts
Calculated Ground Resistance	0.557864 ohms
Equivalent Resistance	0.557833 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso.

Figura 273

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 27.

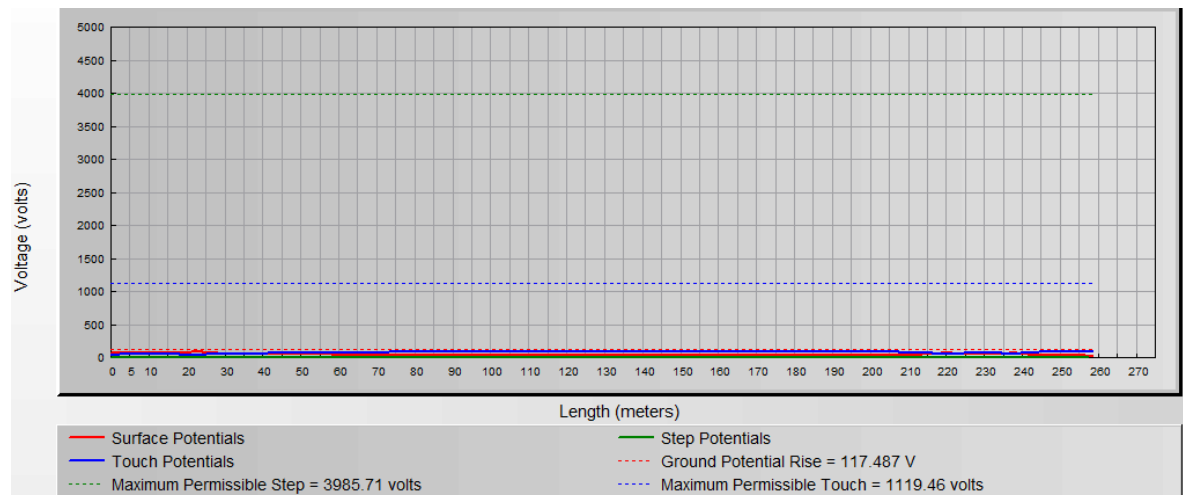
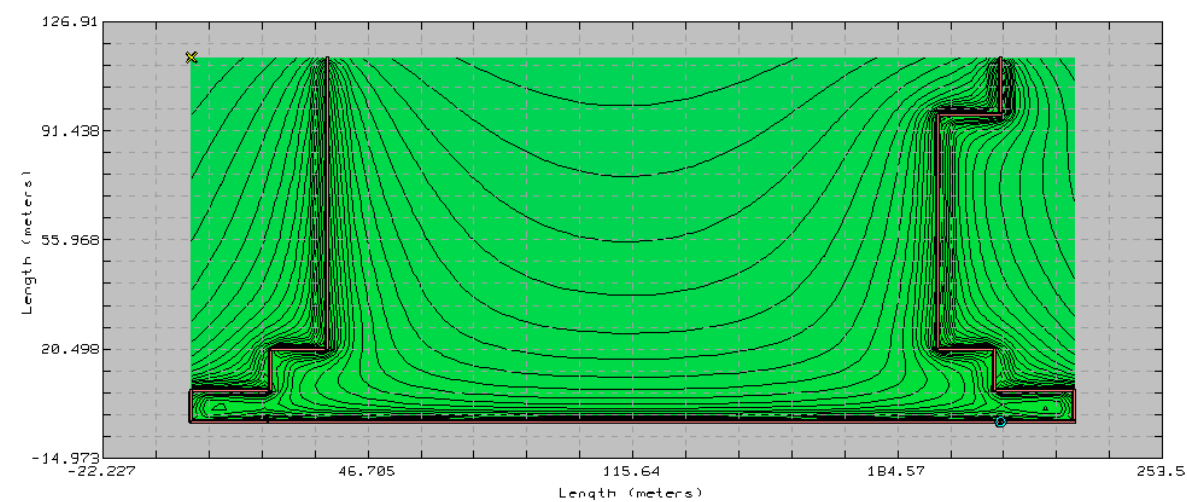


Figura 274

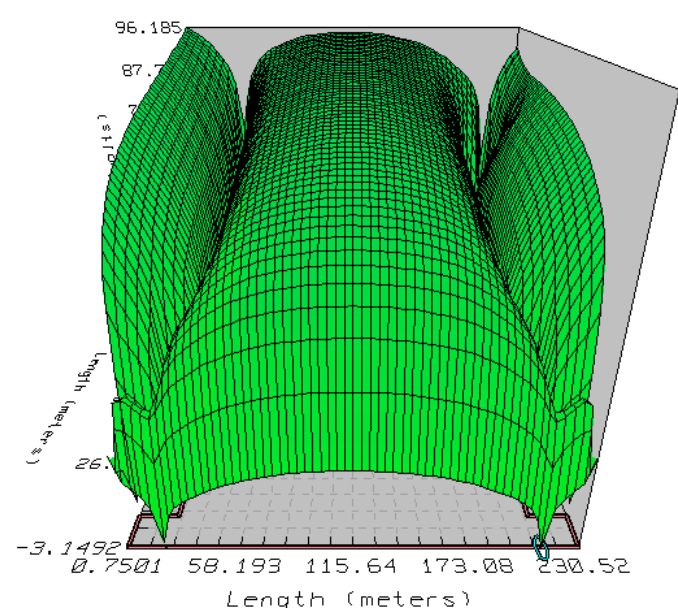
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 27.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

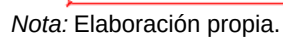
Figura 275

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 27.



La Figura 276 muestra el layout de una malla a tierra que cubre el área techada de naves y 02 subestaciones, este caso ejemplifica que dada las condiciones favorables no es necesario construir una malla a tierra con mucha robusta.

Layout malla a tierra caso 28.



Paso 1: Data de campo (A , ρ)

$$\rho_{a(av1)} = 95.50 \, \Omega - m$$

Paso 2: Dimensionamiento del conductor ($3I_0$, t_c , d)

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Del caso 4:

$$C_s = 0.7736$$

$$E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

$$E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 4: Diseño inicial (D, n, L_C, L_T, h)

$$L_r = 2.4 \text{ m}$$

$$L_R = 9.6 \text{ m}$$

$$D = 15 \text{ m}$$

$$L_x = 175.16 \text{ m}$$

$$L_y = A/L_x = 122.47 \text{ m}$$

$$L_c = 3,157.85 \text{ m}$$

$$L_T = 3,167.45 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ m}$$

$$2b = 0.0158 \text{ m}$$

$$n_R = 4$$

Paso 5: Resistencia de la malla a tierra

Aplicando las expresiones de Sverak:

$$R_g = 95.5 \left[\frac{1}{3,167.45} + \frac{1}{\sqrt{20(21,451.67)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 1\sqrt{\frac{20}{21,451.67}}} \right) \right] = 0.32 \Omega$$

Paso 6: Máxima corriente de la malla (I_G, t_i)

Del caso 15:

$$I_G = 205.24 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo del GPR

$$\text{GPR} = 205.24(0.32) = 65.15 \text{ V}$$

$$\text{GPR} = 65.15 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 8: Cálculo de tensión de malla y tensión de paso

Cálculo de tensión de malla para una geometría rectangular con pocas varillas verticales

$$L_p = 2(175.16 + 122.47) = 595.26 \text{ m}$$

$$n_a = \frac{2(3,157.85)}{595.26} = 10.61$$

$$n_b = \sqrt{\frac{595.26}{4(146.46)}} = 1.01$$

$$n_c = 1$$

$$n_d = 1$$

$$n = 10.61(1.01)(1)(1) = 10.69$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2(10.69))^{\frac{2}{10.69}}} = 0.56$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.41$$

Reemplazando:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{146.46^2}{16(1)(0.0141)} + \frac{(146.46 + 2(1))^2}{8(146.46)(0.0141)} - \frac{1}{4(0.0141)} \right) \right. \\ \left. + \frac{0.56}{1.41} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi(2(10.69) - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.99$$

$$k_i = 0.644 + 0.148(10.69) = 2.23$$

La longitud efectiva enterrada para mallas con pocos electrodos verticales en las esquinas se calcula:

$$L_M = 3,157.85 + 9.6 = 3,167.45 \text{ m}$$

La tensión de malla es

$$E_m = \frac{95.5(0.99)(2.23)(205.24)}{3,167.45} = 13.64 \text{ V}$$

Cálculo de tensión de paso:

$$L_S = 0.75(3,157.85) + 0.85(9.6) = 2,376.55 \text{ m}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1)} + \frac{1}{146.46+1} + \frac{1}{146.46} (1 - 0.5^{10.69-2}) \right] = 0.20$$

La tensión de paso es

$$E_s = \frac{95.5(0.2)(2.23)(205.24)}{2,376.55} = 3.68 \text{ V}$$

Paso 9: Comparación E_m vs E_{t50}

$$E_m = 13.64 \text{ V} < E_{t50} = 1,115.91 \text{ V}$$

Paso 10: Comparación E_s vs E_{s50}

$$E_s = 3.68 \text{ V} < E_{s50} = 3,971.48 \text{ V}$$

Paso 11: No se requiere rediseño

Paso 12: Se puede pasar a ingeniería de detalle

3.29.2 Modelamiento mediante software CYMGRD

Paso 1: Análisis del suelo

Del caso 4:

Figura 277

Cuadro de resultados del modelo del suelo biestratificado CYMGRD Caso 28.

Output Results	
Soil Model Measurement Axis	
Upper Layer Thickness	1.89 meters
Upper Layer Resistivity	158.12 ohm-m
Lower Layer Resistivity	77.47 ohm-m
RMS Error	2.79 %
Reduction Factor Cs	0.776529
Maximum Permissible Touch Voltage	1119.46 volts
Maximum Permissible Step Voltage	3985.71 volts

Paso 2: Dimensionamiento del electrodo

$$A_{mm^2} = 120 \text{ mm}^2$$

Paso 3: Análisis de la malla a tierra

En las Figuras 278 y 279 se observa el layout equivalente y el modelo 3D respectivamente.

Figura 278

Layout del diseño propuesto visto en software CYMGRD Caso 28.

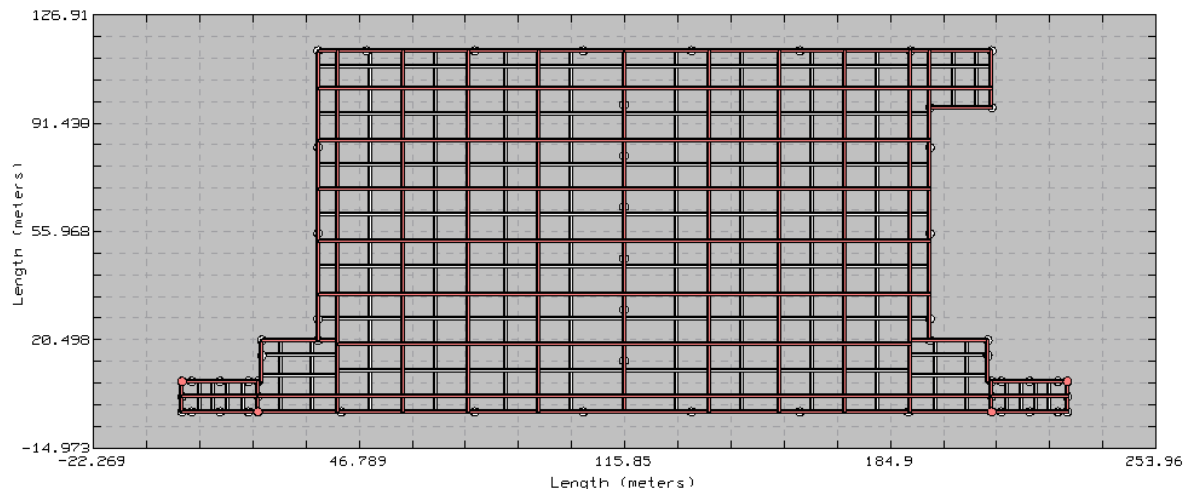
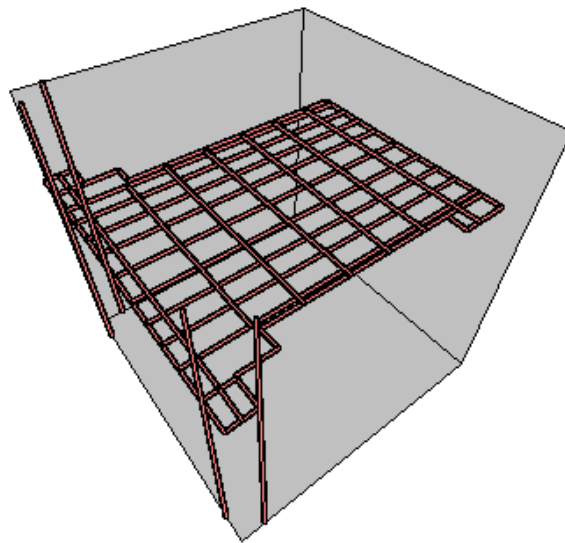


Figura 279

Vista en 3D del diseño CYMGRD Caso 28.



Coordenadas espaciales de los elementos de la malla a tierra.

Figura 280

Coordenadas espaciales de conductor CYMGRD Caso 28.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Conductor elements	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	1	21.487	6.851	1	1	Select		14.1
2	☒	Primary	20.449	-3.149	1	20.449	6.851	1	1	Select		14.1
3	☒	Primary	0.750	-3.149	1	0.750	6.851	1	1	Select		14.1
4	☒	Primary	0.750	-3.149	1	20.449	-3.149	1	1	Select		14.1
5	☐	Primary	5.361	-3.149	1	5.361	6.851	1	1	Select		14.1
6	☐	Primary	8.861	-3.149	1	8.861	6.851	1	1	Select		14.1
7	☐	Primary	12.723	-3.149	1	12.723	6.851	1	1	Select		14.1
8	☐	Primary	16.585	-3.149	1	16.585	6.851	1	1	Select		14.1
9	☒	Primary	0.750	1.851	1	20.449	1.851	1	1	Select		14.1
10	☒	Primary	21.487	6.851	1	21.487	20.284	1	1	Select		14.1
11	☒	Primary	21.487	20.284	1	41.087	20.284	1	1	Select		14.1
12	☒	Primary	36.087	20.284	1	36.087	115.085	1	1	Select		14.1
13	☒	Primary	36.087	115.085	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
14	☒	Primary	115.637	-3.149	1	115.637	115.085	1	1	Select		14.1
15	☒	Primary	20.449	-3.149	1	211.244	-3.149	1	1	Select		14.1
16	☒	Primary	115.637	115.085	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
17	☒	Primary	211.244	96.556	1	211.244	115.085	1	1	Select		14.1
18	☒	Primary	195.187	96.556	1	211.244	96.556	1	1	Select		14.1
19	☒	Primary	195.187	20.284	1	195.187	115.085	1	1	Select		14.1
20	☒	Primary	190.187	20.284	1	210.207	20.284	1	1	Select		14.1
21	☒	Primary	41.087	-3.149	1	41.087	115.085	1	1	Select		14.1
22	☐	Primary	49.587	-3.149	1	49.587	115.085	1	1	Select		14.1
23	☒	Primary	58.087	-3.149	1	58.087	115.085	1	1	Select		14.1
24	☐	Primary	66.587	-3.149	1	66.587	115.085	1	1	Select		14.1
25	☒	Primary	75.087	-3.149	1	75.087	115.085	1	1	Select		14.1
26	☐	Primary	85.087	-3.149	1	85.087	115.085	1	1	Select		14.1
27	☒	Primary	93.587	-3.149	1	93.587	115.085	1	1	Select		14.1
28	☐	Primary	102.087	-3.149	1	102.087	115.085	1	1	Select		14.1
29	☒	Primary	190.187	-3.149	1	190.187	115.085	1	1	Select		14.1
30	☐	Primary	181.687	-3.149	1	181.687	115.085	1	1	Select		14.1
31	☒	Primary	173.187	-3.149	1	173.187	115.085	1	1	Select		14.1
32	☐	Primary	164.687	-3.149	1	164.687	115.085	1	1	Select		14.1
33	☒	Primary	156.187	-3.149	1	156.187	115.085	1	1	Select		14.1
34	☐	Primary	146.187	-3.149	1	146.187	115.085	1	1	Select		14.1
35	☒	Primary	137.687	-3.149	1	137.687	115.085	1	1	Select		14.1
36	☐	Primary	129.187	-3.149	1	129.187	115.085	1	1	Select		14.1
37	☐	Primary	26.487	-3.149	1	26.487	20.284	1	1	Select		14.1
38	☐	Primary	34.487	-3.149	1	34.487	20.284	1	1	Select		14.1
39	☐	Primary	204.787	-3.149	1	204.787	20.284	1	1	Select		14.1
40	☐	Primary	196.787	-3.149	1	196.787	20.284	1	1	Select		14.1
41	☐	Primary	207.244	96.556	1	207.244	115.085	1	1	Select		14.1
42	☐	Primary	201.244	96.556	1	201.244	115.085	1	1	Select		14.1
43	☒	Primary	20.449	1.851	1	211.244	1.851	1	1	Select		14.1
44	☐	Primary	190.187	15.284	1	210.207	15.284	1	1	Select		14.1
45	☐	Primary	190.187	8.567	1	210.207	8.567	1	1	Select		14.1
46	☐	Primary	21.487	15.284	1	41.087	15.284	1	1	Select		14.1
47	☐	Primary	21.487	8.567	1	41.087	8.567	1	1	Select		14.1
48	☐	Primary	41.087	10.350	1	190.187	10.350	1	1	Select		14.1
49	☒	Primary	41.087	18.850	1	190.187	18.850	1	1	Select		14.1
50	☐	Primary	36.087	27.350	1	195.187	27.350	1	1	Select		14.1
51	☒	Primary	36.087	35.350	1	195.187	35.350	1	1	Select		14.1
52	☐	Primary	36.087	44.350	1	195.187	44.350	1	1	Select		14.1
53	☒	Primary	36.087	52.850	1	195.187	52.850	1	1	Select		14.1
54	☐	Primary	36.087	61.350	1	195.187	61.350	1	1	Select		14.1
55	☒	Primary	36.087	69.850	1	195.187	69.850	1	1	Select		14.1
56	☐	Primary	36.087	77.850	1	195.187	77.850	1	1	Select		14.1
57	☒	Primary	36.087	85.850	1	195.187	85.850	1	1	Select		14.1
58	☐	Primary	36.087	94.350	1	195.187	94.350	1	1	Select		14.1
59	☒	Primary	36.087	102.850	1	211.244	102.850	1	1	Select		14.1
60	☐	Primary	36.087	110.085	1	211.244	110.085	1	1	Select		14.1
61	☒	Primary	210.207	6.851	1	230.943	6.851	1	1	Select		14.1
62	☒	Primary	211.244	-3.149	1	211.244	6.851	1	1	Select		14.1
63	☒	Primary	230.943	-3.149	1	230.943	6.851	1	1	Select		14.1
64	☒	Primary	211.244	-3.149	1	230.943	-3.149	1	1	Select		14.1
65	☐	Primary	226.332	-3.149	1	226.332	6.851	1	1	Select		14.1
66	☐	Primary	222.832	-3.149	1	222.832	6.851	1	1	Select		14.1
67	☐	Primary	218.970	-3.149	1	218.970	6.851	1	1	Select		14.1
68	☐	Primary	215.108	-3.149	1	215.108	6.851	1	1	Select		14.1
69	☒	Primary	211.244	1.851	1	230.943	1.851	1	1	Select		14.1
70	☒	Primary	210.207	6.851	1	210.207	20.284	1	1	Select		14.1

Figura 281

Coordenadas espaciales del electrodo CYMGRD Caso 28.

	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
1	☒	Primary	0.750	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
2	☐	Primary	0.750	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
3	☐	Primary	20.449	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
4	☐	Primary	0.750	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
5	☐	Primary	20.449	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
6	☐	Primary	10.599	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
7	☐	Primary	10.599	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
8	☐	Primary	3.250	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
9	☐	Primary	3.250	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
10	☐	Primary	17.949	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
11	☐	Primary	17.949	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
12	☐	Primary	105.018	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
13	☐	Primary	133.208	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
14	☐	Primary	161.398	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
15	☐	Primary	189.587	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
16	☐	Primary	105.018	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
17	☐	Primary	36.087	83.472	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
18	☐	Primary	36.087	55.283	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
19	☐	Primary	36.087	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
20	☐	Primary	211.244	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
21	☐	Primary	211.244	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
22	☐	Primary	195.187	96.556	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
23	☐	Primary	36.087	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
24	☐	Primary	21.487	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
25	☒	Primary	20.449	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
26	☐	Primary	76.828	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
27	☐	Primary	195.187	27.350	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
28	☐	Primary	195.187	55.281	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
29	☐	Primary	195.187	83.471	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
30	☐	Primary	190.187	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
31	☐	Primary	161.398	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
32	☐	Primary	133.208	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
33	☐	Primary	115.637	97.512	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
34	☐	Primary	115.637	80.723	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
35	☐	Primary	115.637	63.934	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
36	☐	Primary	115.637	47.145	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
	Enabled	Type	X1 (m)	Y1 (m)	Z1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	Z2 (m)	Number of Rods along axis	Elements per Rod in upper soil layer	Elements per Rod in lower soil layer	Length (m)	Material	Size	Diameter (mm)
37	☐	Primary	115.637	30.356	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
38	☐	Primary	115.637	13.567	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
39	☐	Primary	76.828	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
40	☐	Primary	48.639	115.085	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
41	☐	Primary	36.087	27.344	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
42	☐	Primary	21.487	15.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
43	☒	Primary	230.943	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
44	☐	Primary	230.943	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
45	☐	Primary	211.244	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
46	☐	Primary	230.943	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
47	☐	Primary	211.244	1.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
48	☐	Primary	221.094	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
49	☐	Primary	221.094	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
50	☐	Primary	228.443	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
51	☐	Primary	228.443	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
52	☐	Primary	213.744	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
53	☐	Primary	213.744	6.851	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
54	☐	Primary	195.187	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
55	☐	Primary	210.207	20.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
56	☒	Primary	211.244	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
57	☐	Primary	210.207	15.284	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8
58	☐	Primary	42.106	-3.149	0.3	0	0	0	1	1	1	2.4	Select		15.8

Resultados del cálculo de la resistencia de la malla a tierra y el GPR:

Figura 282

Resultados de GPR y Rg CYMGRD Caso 28.

Output Results

Ground Potential Rise	57.6952 volts
Calculated Ground Resistance	0.273946 ohms
Equivalent Resistance	0.273938 ohms

Paso 4: Perfil de tensiones

Las tensiones de contacto y paso se encuentran por debajo de los umbrales de contacto y paso, salvo exterior a la malla.

Figura 283

Perfil de tensiones generados CYMGRD Caso 28.

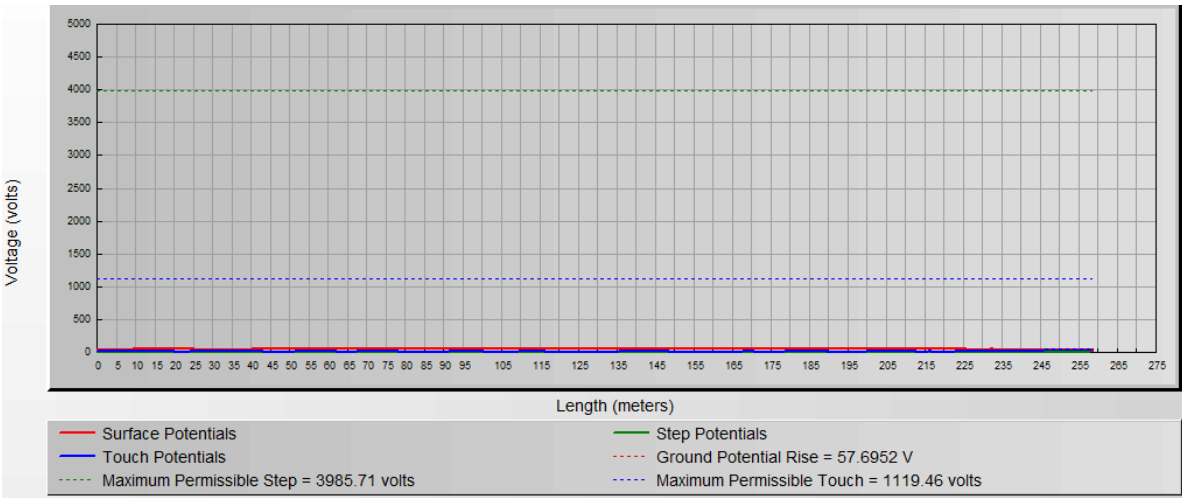
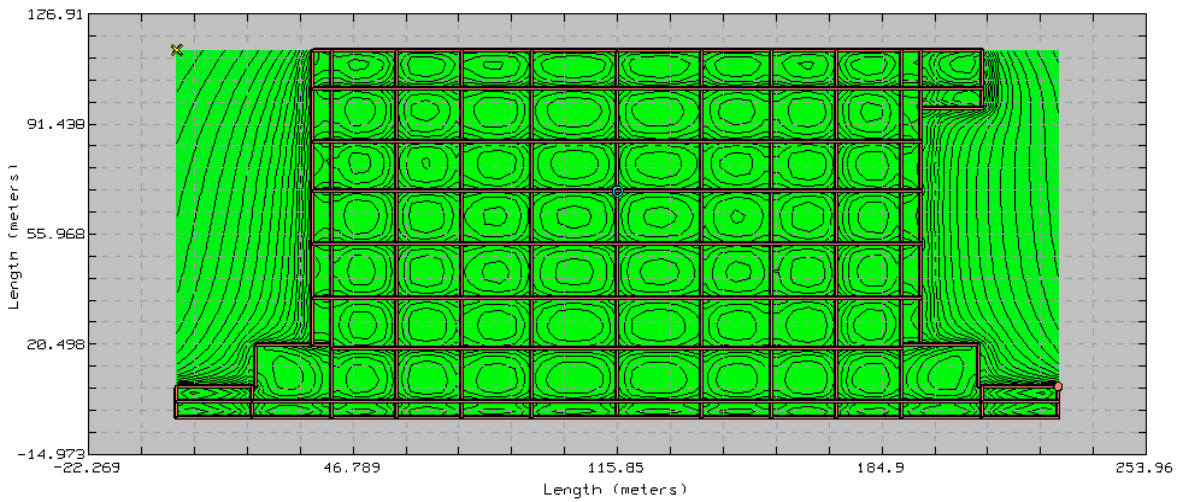


Figura 284

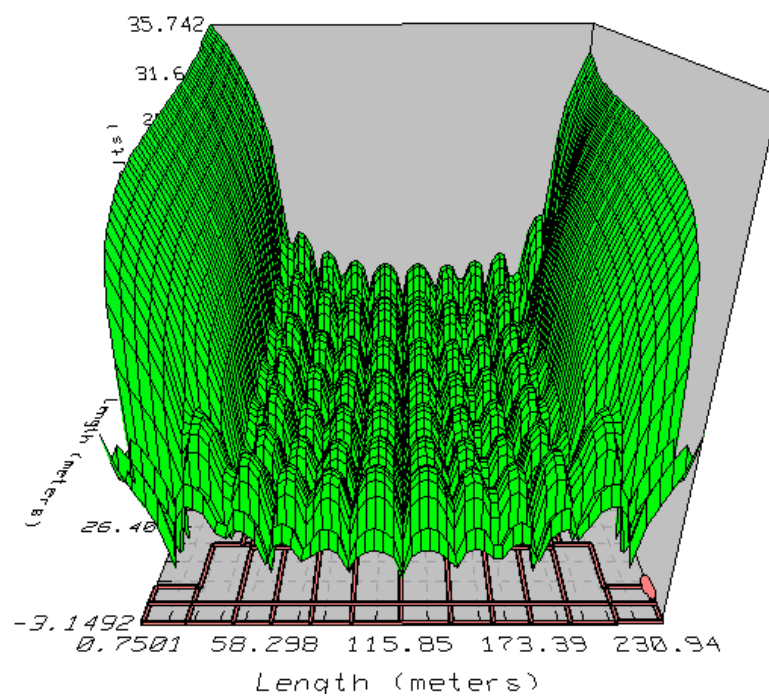
Curvas de nivel generados CYMGRD Caso 28.



Paso 5: Gráfica 3D de la tensión superficial

Figura 285

Gráfica 3D de la tensión de contacto CYMGRD Caso 28.



Capítulo IV: Resultados, Contrastación de Hipótesis y

Discusión de Resultados

4.1 Resultados

En la Tabla 16 se muestra los resultados de diseño de los 28 casos evaluados con el software CYMGRD y en la Tabla 17 los resultados de diseño de la metodología IEEE Std 80-2013.

A partir del análisis de las Tablas 16 y 17 se genera la Tabla 18 orientada a responder si cada uno de los 28 casos son seguros o no, y cuál es su costo. En la Tabla 18, la columna “¿Es seguro?” determina si la puesta a tierra protege a las personas por lo menos dentro del área que circunscribe la malla a tierra luego de pasar las validaciones exigidas en los pasos 9 y 10 de la metodología IEEE Std 80-2013 y los reportes gráficos 3D del CYMGRD. Como plus, a esta tabla se agregó la columna “Costo S/”, que representa la inversión para la obra el cual sabemos que finalmente es un factor decisivo para la decisión de la construcción.

Tabla 16

Resultados de diseño de los 28 casos evaluados con el software CYMGRD.

Caso	Cs CYM	Et50 CYM [V]	Es50 CYM [V]	IG [A]	Df	Amín CYM mm2	Φ varilla	Sf	GPR CYM [V]	Rg CYM [Ω]	Em CYM [V]	Es CYM [V]
1	0.7701	1111.58	3954.17	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	60370.1	5.53	60370.1	9570.16
2	0.7701	1111.58	3954.17	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	4781.2	0.44	993.44	128.94
3	0.7701	1111.58	3954.17	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	985.01	0.09	746.21	49.37
4	0.7765	1119.46	3985.71	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	72546.3	6.64	72546.3	6889.66
5	0.7697	9637.38	38057.4	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	27921.2	2.55	6335.39	1206.79
6	0.7765	1119.46	3985.71	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	4364.73	0.4	3190.18	234.36
7	0.7765	1119.46	3985.71	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	2777.64	0.25	652.6	125.76
8	0.7701	1111.58	3954.17	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	60370.1	5.53	60370.1	9570.16
9	0.7701	1111.58	3954.17	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	1502.21	0.14	897.66	111.34
10	0.7701	1111.58	3954.17	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	741.16	0.07	508.84	37.75
11	0.7765	1119.46	3985.71	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	72546.3	6.64	72546.3	6889.66
12	0.7697	9637.38	38057.4	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	7083.81	0.65	4111.4	596.03
13	0.7765	1119.46	3985.71	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	3525.57	0.32	2378.03	246.84
14	0.7765	1119.46	3985.71	10647.93	1.0262	67.4	5/8"	1	2726.14	0.25	713.13	179.45
15	0.7701	1111.58	3954.17	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	1163.64	5.53	1163.64	184.46
16	0.7701	1111.58	3954.17	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	125.36	0.6	59.77	5.41
17	0.7701	1111.58	3954.17	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	19.02	0.09	14.41	0.85
18	0.7765	1119.46	3985.71	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	1398.34	6.64	1398.34	610.26
19	0.7765	1119.46	3985.71	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	614.51	2.91	283.71	38.12
20	0.7765	1119.46	3985.71	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	138.84	0.66	122.78	9.47
21	0.7765	1119.46	3985.71	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	58.53	0.28	36.26	2.16
22	0.7701	1111.58	3954.17	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	1163.64	5.53	1163.64	184.46
23	0.7701	1111.58	3954.17	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	30.41	0.14	18.3	2.37
24	0.7701	1111.58	3954.17	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	20.15	0.1	16.13	1.15
25	0.7765	1119.46	3985.71	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	1398.34	6.64	1398.34	610.26
26	0.7765	1119.46	3985.71	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	190.87	0.91	131.57	17.31
27	0.7765	1119.46	3985.71	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	117.48	0.56	96.18	8.24
28	0.7765	1119.46	3985.71	205.24	1.0262	67.4	5/8"	1	57.69	0.27	35.74	3.2

Nota: Elaboración propia.

Tabla 17

Resultados de diseño de los 28 casos evaluados con la metodología IEEE Std 80-2013.

Caso	Cs IEEE	Et50 IEEE V	Es50 IEEE V	IG A	Df	Amín IEEE mm2	Φ varilla	Sf	GPR IEEE V	Rg IEEE Ω	Em IEEE V	Es IEEE V
1	0.7701	1111.51	3953.89	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	45389.93	4.26	45389.93	
2	0.7701	1111.51	3953.89	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	5899.76	0.55	900.88	494.26
3	0.7701	1111.51	3953.89	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	894.42	0.08	547.35	64.56
4	0.7736	1115.91	3971.48	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	47126.3	4.43	47126.3	
5	0.7697	9633.82	38043.15	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	29192.45	2.74	2889.53	3471.1
6	0.7736	1115.91	3971.48	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	4720.25	0.44	2247.78	286.03
7	0.7736	1115.91	3971.48	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	3529.49	0.33	629.82	190.18
8	0.7701	1111.51	3953.89	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	45389.93	4.26	45389.93	
9	0.7701	1111.51	3953.89	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	4737.96	0.44	884.96	406.95
10	0.7701	1111.51	3953.89	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	897.63	0.08	547.98	64.55
11	0.7736	1115.91	3971.48	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	47126.3	4.43	47126.3	
12	0.7697	9633.82	38043.15	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	20774.52	1.95	1095.13	1649.6
13	0.7736	1115.91	3971.48	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	4125.22	0.38	1624.78	272.75
14	0.7736	1115.91	3971.48	10647.93	1.0262	120	5/8"	1	3378.22	0.32	402.99	189.3
15	0.7701	1111.51	3953.89	205.24	1.0262	120	5/8"	1	874.88	4.26	874.88	
16	0.7701	1111.51	3953.89	205.24	1.0262	120	5/8"	1	127.54	0.62	49.89	11.96
17	0.7701	1111.51	3953.89	205.24	1.0262	120	5/8"	1	17.39	0.08	10.63	1.26
18	0.7736	1115.91	3971.48	205.24	1.0262	120	5/8"	1	1700.13	8.28	1700.13	
19	0.7736	1115.91	3971.48	205.24	1.0262	120	5/8"	1	561.76	2.73	161.08	63.35
20	0.7736	1115.91	3971.48	205.24	1.0262	120	5/8"	1	91.8	0.45	55.86	6.59
21	0.7736	1115.91	3971.48	205.24	1.0262	120	5/8"	1	65.44	0.32	12.2	3.68
22	0.7701	1111.51	3953.89	205.24	1.0262	120	5/8"	1	874.88	4.26	874.88	
23	0.7701	1111.51	3953.89	205.24	1.0262	120	5/8"	1	103.76	0.51	35.38	7.08
24	0.7701	1111.51	3953.89	205.24	1.0262	120	5/8"	1	17.25	0.08	10.5	1.24
25	0.7736	1115.91	3971.48	205.24	1.0262	120	5/8"	1	1700.13	8.28	1700.13	
26	0.7736	1115.91	3971.48	205.24	1.0262	120	5/8"	1	549.44	2.68	187.36	37.48
27	0.7736	1115.91	3971.48	205.24	1.0262	120	5/8"	1	91.36	0.45	55.62	6.55
28	0.7736	1115.91	3971.48	205.24	1.0262	120	5/8"	1	65.15	0.32	13.64	3.68

Nota: Elaboración propia.

Tabla 18*Resultado final de los casos.*

Caso	Configuración	Resistividad	N° SE	Icc [A]	Ps [Ω-m]	Área [m2]	¿ES SEGURO?	Costo [S/]
1	Pozos a tierra independientes	Baja	1	8301	5000	-	NO	11,191.82
2	Malla a tierra subestación	Baja	1	8301	5000	200	Sí**	46,020.32
3	Malla a tierra perímetro naves	Baja	1	8301	5000	21251.67	Sí	86,476.21
4	Pozos a tierra independientes	Media	1	8301	5000	-	NO	14,360.43
5	Malla a tierra subestación	Media	1	8301	50000	200	Sí***	75,430.99
6	Malla a tierra perímetro naves	Media	1	8301	5000	21251.67	NO	200,356.00
7	Malla a tierra reticulado fino	Media	1	8301	5000	21251.67	Sí****	747,350.23
8	Pozos a tierra independientes	Baja	2	8301	5000	-	NO	21,500.21
9	Malla a tierra subestación	Baja	2	8301	5000	400	Sí**	72,708.51
10	Malla a tierra perímetro naves	Baja	2	8301	5000	21451.67	Sí	144,236.14
11	Pozos a tierra independientes	Media	2	8301	5000	-	NO	25,308.19
12	Malla a tierra subestación	Media	2	8301	50000	400	Sí***	254,397.61
13	Malla a tierra perímetro naves	Media	2	8301	5000	21451.67	NO	242,761.90
14	Malla a tierra reticulado fino	Media	2	8301	5000	21451.67	Sí****	806,697.07
15	Pozos a tierra independientes	Baja	1	160	5000	-	NO	11,191.82
16	Malla a tierra subestación	Baja	1	160	5000	200	Sí	23,981.04
17	Malla a tierra perímetro naves	Baja	1	160	5000	21251.67	Sí	65,681.25
18	Pozos a tierra independientes	Media	1	160	5000	-	NO	14,360.43
19	Malla a tierra subestación	Media	1	160	5000	200	Sí	59,838.32
20	Malla a tierra perímetro naves	Media	1	160	5000	21251.67	Sí	77,626.75
21	Malla a tierra reticulado fino	Media	1	160	5000	21251.67	Sí	392,599.51
22	Pozos a tierra independientes	Baja	2	160	5000	-	NO	21,500.21
23	Malla a tierra subestación	Baja	2	160	5000	400	Sí	62,795.05
24	Malla a tierra perímetro naves	Baja	2	160	5000	21451.67	Sí	91,202.10
25	Pozos a tierra independientes	Media	2	160	5000	-	NO	25,308.19
26	Malla a tierra subestación	Media	2	160	5000	400	Sí	59,672.28
27	Malla a tierra perímetro naves	Media	2	160	5000	21451.67	Sí	95,185.54
28	Malla a tierra reticulado fino	Media	2	160	5000	21451.67	Sí	388,592.25

Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 19 se realiza la contrastación de hipótesis, que se expliquen más adelante en la discusión de resultados. En general los resultados logran dar respuestas a las hipótesis planteadas.

4.2 Contrastación de Hipótesis

Tabla 19

Contrastación de hipótesis.

Hipótesis	Contrastación
General	General
El modelamiento de 28 casos, considerando variaciones en el área de la malla, la corriente de falla, el perfil resistivo del suelo y la cantidad de subestaciones permitirá identificar la relación existente entre el área de la malla y las tensiones de toque y paso en sistemas de puesta a tierra.	En base a los resultados de las Tablas 15, 16 y 17, se ha encontrado relaciones cualitativas entre el área y geometría de una malla versus el perfil de tensiones generados durante una falla a tierra. Los resultados permiten tener una idea clara de qué sucede con el perfil de tensiones dentro y fuera de una malla a tierra, especialmente en áreas de procesos principales y otras menos relevantes como patios, inclusive se puede dar una opinión de qué sucede más allá del cerco perimetral de una planta industrial.
Específico	Específico
La comparación de los resultados obtenidos mediante el IEEE Std 80-2013 y el software CYMGRD proporcionará a los lectores criterios técnicos para escoger la opción adecuada acorde a cada proyecto.	De los resultados hallados se aprecia claramente la diferencia de resultados entre el procedimiento de cálculo del IEEE Std 80-2013 y el software CYMGRD. De los 28 casos, se nota las limitantes de cada una, especialmente la del IEEE Std 80-2013 para geometrías irregulares y ni qué decir de geometrías complejas.
El análisis de la ineficacia de los pozos a tierra frente a tensiones peligrosas evidenciará la necesidad de evaluar las tensiones de toque y paso en el diseño de sistemas de puesta a tierra.	Queda demostrado que existe el peligro para el personal e instalaciones en cuanto a contar solo con pozos a tierra y no una malla a tierra. Las variables que los proyectistas deben tener en cuenta adicionalmente a la resistencia de la puesta a tierra, son las tensiones de toque y paso.
La aplicación práctica de los conceptos teóricos del IEEE Std 80-2013 en casos reales en Perú contribuirá a transformar la visión tradicional de los proyectistas sobre el diseño de sistemas de puesta a tierra.	El trabajo, en sus capítulos teóricos y 28 casos prácticos, fomenta al lector a realizar una correcta validación de un sistema de puesta a tierra avalada por los conceptos teóricos que brinda el IEEE Std 80-2013.
Conocer los montos de inversión permitirá establecer una relación precio-seguridad y servir como referencia para tomar decisiones de construcción.	El trabajo cumple con el plus de calcular el monto de inversión, que en la mayoría de los casos es el factor decisivo durante la fase de construcción de una planta, para los 28 casos logra dar a conocer el precio de la seguridad.

Nota: Elaboración propia.

4.3 Discusión de Resultados

- En los casos con alta corriente de falla a tierra (casos 1 al 14, $I_G=10,647.93$ A), se nota un gran impacto positivo al interconectar las mallas a tierra de 02 subestaciones, el tramo de contrapeso de interconexión ayuda a la disminución de R_g , GPR, E_m y E_s . En los casos 2 y 9, el GPR bajó de 4.781 kV a 1.502 kV, E_m bajó

de 0.993 kV a 0.897 kV; en los casos 5 y 9, el GPR bajó de 27.921 kV a 7.083 kV, y E_m bajó de 6.335 kV a 4.111 kV.

- En los casos con baja corriente de falla a tierra (casos 15 al 28, $I_G=205.24$ A), el interconectar las mallas a tierra de 02 subestaciones no refleja impacto adicional, debido a que una falla en cualquier subestación ocasiona un GPR menor a E_{t50} como se aprecia en los resultados de los casos 16 y 23, y casos 19 y 26. Es importante tener en cuenta que el bajo nivel de corriente de falla a tierra puede elevarse en un futuro, debido al cambio de nivel de tensión para mayor capacidad de transmisión de potencia acorde a la planificación de cada empresa distribuidora.
- En los casos 16, 19, 23, 26, casos con baja corriente de falla a tierra ($I_G=205.24$ A) y mallas que cubren solo el área de las subestaciones; generan GPR menor a E_{t50} , lo cual es una condición de seguridad en toda la extensión de la planta; de esta condición puede deducirse que no hay necesidad de contar con mallas más grandes; sin embargo durante la fase de ingeniería también se evalúa otras consideraciones para extender la malla, tales como, hacer más sencillo el aterramiento superficial, estándar del cliente.
- En los casos 15 y 22, casos con pozos a tierra independientes, el valor del GPR alcanza un 104.68 % respecto a E_{t50} , y en los casos 18 y 25 alcanza un 124.91 %. E_{t50} es por definición el umbral de seguridad por tensión de contacto, entonces estos casos no son seguros; además que, el problema recurrente con los pozos a tierra es que su valor es muy cambiante en el tiempo, usualmente solo existe un cable que interconecta el pozo con la masa, la falta de mantenimiento de los accesorios de conexión y la corrosión originan incremento de resistencia por falso contacto.
- Los casos 2 y 9, casos marcados con “**” en la columna ¿Es seguro? de la Tabla 18, son seguros dentro del área de las mallas de las subestaciones, E_m resulta menor que E_{t50} ; el problema es que esto no se cumple fuera de ellas, la tensión superficial podría llegar a ser igual al GPR dentro de las naves industriales.

- Los casos 5 y 12, casos marcados con “***” en la columna ¿Es seguro? de la Tabla 18, son relativamente seguros dentro del área de las mallas de las subestaciones, el problema es que E_m y el GPR son valores altos que pueden vencer el aislamiento de equipos de media y baja tensión. El IEEE Std 80-2013 limita el GPR a 5kV o al valor de aislamiento de equipos. Estos casos cuentan con un piso de concreto semiseco en las subestaciones, razón de obtener un E_{t50} alto (9,637.38 V), entonces, las naves industriales y áreas externas como patios podrían quedar expuestas incluso al GPR, dependiendo el material de los pisos.
- Los casos 7 y 14, marcados con “****” en la columna ¿Es seguro? de la Tabla 18, son casos con malla a tierra con reticulado que cubre toda el área de naves industriales y subestaciones, es seguro dentro de estas áreas; sin embargo, yendo a situaciones más extremas tal como lo menciona el IEEE Std 80-2013, los patios y pasillos externos donde no se extiende la malla, podrían quedar expuestos a tensiones transferidas que podría llegar al valor del GPR, el mismo estándar recomienda colocar medios aislantes para evitar la transferencia de estos potenciales, seguir esta recomendación en plantas industriales es muy complicado y poco práctico de realizar.
- Los resultados de los cálculos mediante la metodología IEEE Std 80-2013 son solo referenciales, como se mencionó en el capítulo anterior, el IEEE Std 80-2013 garantiza buenos resultados para geometrías regulares (cuadrada, rectangular, T, L). En el presente estudio se propuso la evaluación con esta metodología por 02 razones: a) Por fines académicos para poner en práctica el procedimiento de cálculo conforme al diagrama de bloques de la Figura 23 el cual estructura la validación rigurosa que debe tener todo diseño. b) Para averiguar qué tan cercano son los resultados para aquellas mallas irregulares calculadas con un modelo idealizado a una forma regular.
- Los resultados del software CYMGRD y la metodología IEEE Std 80-2013 varían de poco a significativo, conforme la geometría de la malla se hace más irregular.

En el presente trabajo, se considera los resultados del software CYMGRD como referencia para evaluar la seguridad de las personas e instalaciones, debido a que la herramienta de cálculo por elementos finitos de este software garantiza su aplicación para cualquier geometría de los 28 casos propuestos, especialmente para los casos con dos subestaciones.

- Si la evaluación solo consistiese en el cumplimiento que R_g sea menor a 25Ω , caeríamos en el error de que todos los casos serían seguros, contradiciendo los resultados, especialmente los casos con los clásicos pozos a tierra independientes, donde se observa que el GPR puede llegar a valores múltiples de la tensión de servicio línea - línea del suministro eléctrico.
- Para los casos con pozos a tierra independientes se considera que E_m puede llegar al valor del GPR a una distancia moderada medida desde el pozo a tierra.
- Contar con los montos de inversión de los 28 casos ayuda a decidir qué caso es el apropiado según la combinación de variables independientes. Incluso ayuda a decidir si pudiese optarse por una solución intermedia. Los montos de inversión dependen de las áreas de las mallas, que a su vez dependen de la extensión de las plantas industriales, así que cada planta tiene su propio análisis de inversiones.
- El diseño de los 28 casos está basado en la medición de la resistividad de suelo de 02 lugares diferentes. Resistividades mayores hubiesen causado que varios casos pasen de ser seguros a no seguros.
- Un punto a tener en cuenta es la probabilidad de ocurrencia de una falla a tierra en media o alta tensión dentro de una planta industrial, inclusive sumar la probabilidad que un personal se encuentre en una situación que lo deje expuesto, teniendo presente que una falla de este tipo debe ser despejado en no más de 500 ms por el sistema de protección de la planta o del distribuidor de energía.

Conclusiones

El modelamiento basado en el análisis de 28 casos de diseño ha permitido establecer criterios técnicos fundamentales para el dimensionamiento de mallas a tierra en plantas industriales, asegurando condiciones de seguridad para las personas ante fallas a tierra. La aplicación de software de simulación ha posibilitado una evaluación precisa de las tensiones de paso y toque. Los resultados hallados cercioran que un modelamiento riguroso es indispensable para mitigar riesgos eléctricos de manera efectiva.

Es vital contar con la medición de la resistividad del terreno, sin este dato no es posible garantizar un diseño seguro para las personas e instalaciones. En caso de haber usado valores estimados basados en tablas de clasificación de suelos, los resultados hallados arrastrarían mucho margen de error.

Para realizar un diseño seguro y óptimo económicamente, el proyectista debe contar con información de, distribución de subestaciones y tableros, corriente de falla a tierra, medición de resistividad del terreno, procesos que se realiza en la planta, y muy importante el material del piso. La mayoría de las plantas tienen gran parte de su predio con piso de concreto por diseño de arquitectura, un concreto semiseco o seco ayuda a elevar el umbral de tensiones de toque y paso lo cual favorece en economizar una malla.

El nivel de cortocircuito a tierra en media y alta tensión para sistemas de utilización está supeditado al nivel de tensión y el régimen del neutro del transformador de potencia del distribuidor de energía, el proyectista debe estar al tanto de este tema para considerar las corrientes a largo plazo. Es probable que en algunos proyectos de gran industria hasta justifique la compra de una resistencia limitadora de corriente en el neutro, dependerá de cuánto ahorro se logre en la implementación de la malla a tierra.

Se ha visto que es positivo la interconexión de mallas que cubran por lo menos áreas de las subestaciones interna en la planta, ayuda a formar un anillo que baja la resistencia, GPR , E_m , E_s ; sin embargo, la interconexión también depende de la distancia de separación de las subestaciones, existen plantas con áreas muy extensas donde

probablemente solo sea necesario una malla por subestación y áreas de procesos asociadas a esta.

Queda demostrado 04 formas de bajar las tensiones de toque dentro de una malla a tierra, a) distribuyendo varillas verticales en las esquinas y perímetro de la malla, b) aumentando la profundidad de las varillas verticales, c) disminuyendo la dimensión de los reticulados, d) hacer más pequeño el reticulado perimetral. Existen otras formas como, por ejemplo, aumentar la profundidad de enterramiento de la zona perimetral.

Queda demostrado que los pozos a tierra individuales son peligrosos, no protegen contra tensiones generados en una falla tierra, no es suficiente que las evaluaciones de seguridad del personal e instalaciones solo se basen en resistencias de puesta a tierra.

Si se requiere una memoria de cálculo confiable para el diseño de una malla a tierra, la metodología de cálculo del IEEE Std 80-2013 solo puede usarse para geometrías regulares, y con mayor razón si se trata de mallas grandes; para estos casos es preferible el uso de software basado en elementos finitos, uno de los software potentes y más comerciales es el CYMGRD.

Para algunos proyectos es apropiado técnica y económicamente ampliar el área de una malla, que tratar de reducir las tensiones de toque dentro de la malla inicial. En resumen, se protege más área a un precio similar.

Recomendaciones

Evitar el uso de pozos a tierra independientes como sistema de puesta a tierra en plantas industriales, el presente trabajo reconfirma la recomendación del IEEE Std 80-2013.

Es recomendable el empleo de software como el CYMGRD para aplicaciones en plantas especialmente con geometría irregular o compleja. Es probable que, para mallas pequeñas a medianas algo irregulares, se pueda usar con discreción la metodología de cálculo del IEEE Std 80-2013.

Toda planta debe contar por lo menos con una protección homopolar en media tensión basado en un estudio de coordinación de protecciones y con pruebas de campo del relé de protección. Esto debe complementarse con protección diferencial en todos los circuitos de baja tensión.

El proyectista debe marcar una postura para la definición de la geometría de la malla a tierra desde un inicio; el cliente tiene el derecho de conocer la alternativa segura y el precio para tal, no se debe asumir por default que el cliente prefiere la economía. El proyectista debe considerar todos los factores, y por los menos hacer las recomendaciones priorizando la seguridad, quizás con ello se logre soluciones intermedias a causa de la presión del cliente para abaratar costos.

Para plantas con 02 o más subestaciones, y, dependiendo de la combinación de las variables independientes de una planta en particular y la extensión de esta, evaluar técnica y económicamente la interconexión de las mallas de las subestaciones.

Para los lectores, tomar solo como referencia la relación de inversión versus la seguridad de la Tabla 18, cada planta en particular guarda una relación particular.

Referencias bibliográficas

- Aliaga, W. (2020). *Evaluación de un sistema de puesta a tierra para la seguridad d en subestaciones de alta tensión* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/21656>
- American Institute of Electrical Engineers. (1961). *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE Std 80-1961. <https://standards.ieee.org/ieee/80/6874/>
- Astudillo, C., Cajamarca, M. (2012). *Cálculo de sistemas de puesta a tierra aplicación de la norma IEEE Std 80-2000* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/694>
- Canales, F. (2011). *Nociones específicas para puestas a tierra en instalaciones mineras* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104264>
- Casas Ospina, F. (2013). *Tierras: Soporte de la Seguridad Eléctrica*. Grupo Editorial Patria.
- Castro, L. (2020). *Diseño de un sistema de puesta a tierra para mejorar las condiciones de operación del área de cancha de materiales CPSAA* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio digital Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/56705>
- Dawalibi, F., Bouchard, M. y Muhedkar, D. (1980). Survey on power system grounding design practices. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 99(4), 1396-1405.
- Dawalibi, F. (1980). Ground Fault Current Distribution Between Soil and Neutral Conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 99(2), 452-460.
- Domínguez, E. (2022). *Diseño de mallas de puesta a tierra bajo la norma IEEE STD 80-2013 con macros en Excel* [Tesis de pregrado, Institución Universitaria Pascual Bravo]. Repositorio Pascual Bravo.

- <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/32/browse?type=author&order=ASC&rpp=20&value=Dom%C3%ADnguez+Villa%2C+Edwin+Alberto>
- Guzman, J. (2021). *Diseño de un prototipo de puesta a tierra para la protección efectiva en la industria ligera en el distrito de san Agustín de cajas* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12126>
- Hipólito, V. (2008). *Valores permisibles de resistencias de puestas a tierra de protección en redes eléctricas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/9624>
- Huamani, A. (2018). *Sistema de puesta a tierra bajo gradiente del alimentador de bolas de molino con tierra tipo IV mejorado* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional UNSA. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/40deab61-7c6f-4951-b43b-7f9bbb3d225e>
- IEEE. (2002). *Standard for Qualifying Permanent Connections in Substation Grounding*. IEEE Std 837-2014. <https://standards.ieee.org/ieee/837/4422/>
- IEEE. (2005). *Powering and Grounding Electronic Equipment*. IEEE Std 1100-2005. <https://standards.ieee.org/ieee/1100/3055/>
- IEEE. (2007). *Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE Std 142-2007. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4396963>
- IEEE. (2012). *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. IEEE Std 81-2012. <https://standards.ieee.org/ieee/81/4889/>
- IEEE. (2013). *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. IEEE Std 80-2013. <https://standards.ieee.org/ieee/80/4089/>
- IEEE. (2017). *National Electrical Safety Code*. NESC 2023. <https://standards.ieee.org/products-programs/nesc/>
- IEC. (1997). *Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section2: Earthing and cabling*. IEC TR 61000-5-2-1997. <https://webstore.iec.ch/en/publication/4234>

- IEC. (2007). *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*. IEC 60479-1-2018. <https://webstore.iec.ch/en/publication/62980>
- Leon, J. (2022). *Análisis de la influencia de los parámetros del suelo en los modelos de líneas de transmisión y sistema de aterramiento durante sobretensiones transitorias* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/24868>
- Ministerio de Energía y Minas. (2006). *Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006*. CNE Utilización 2006. <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/738607-037-2006-mem-dm>
- Ministerio de Energía y Minas. (2011). *Código Nacional de Electricidad - Suministro 2011*. CNE Suministro 2011. <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/738581-0214-2011-mem-dm>
- Quispe, A. (2008). *Problemática en las instalaciones de los sistemas de puesta a tierra en redes de distribución* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/10280>
- Ramírez, J. y Cano, E. (2010). *Sistemas de puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. Blanecolor Ltda. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8215/eduardoantoniocanoplat a.2010.pdf>
- Sampieri, R., Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill México.
- Yanque, J. (2010). *Alta tensión y técnicas de pruebas – Cap II Técnicas de aterramiento eléctrico*. Universidad Nacional de Ingeniería, FIEE, Lima.
- Yanque, M. (2006). *Diseño de redes de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/909>

Anexos

Anexo A:	Matriz de Consistencia.	1
Anexo B:	Normativa Peruana De Referencia.	2

Anexo A: Matriz de Consistencia.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES		DISEÑO METODOLÓGICO	UNIDAD DE ANÁLISIS
¿Cuál es la mejor configuración para un sistema de puesta a tierra en plantas industriales en Perú para garantizar la seguridad del personal durante fallas a tierra?	General Modelar el sistema de puesta a tierra en plantas industriales, basado en el estándar IEEE Std 80-2013 y el software CYMGRD, para garantizar la protección de las personas.	General El modelamiento de 28 casos, considerando variaciones en el área de la malla, la corriente de falla, el perfil resistivo del suelo y la cantidad de subestaciones permitirá identificar la relación existente entre el área de la malla y las tensiones de toque y paso en sistemas de puesta a tierra.	Independiente	Modelamiento de puesta a tierra con variables: resistividad del suelo, corriente de falla, área de la malla, material de capa superficial y número de subestaciones.	a. Tipo de Investigación: Aplicada. b.Enfoque de la investigación: Mixto. c.Nivel de investigación: Correlacional. d.Diseño de la investigación: Experimental.	Mallas a tierra en una planta industrial hipotética, diferenciadas por combinación de variables.
	Específico Diseñar mallas a tierra con el estándar IEEE Std 80-2013 y el software CYMGRD.	Específico La comparación de los resultados obtenidos mediante el IEEE Std 80-2013 y el software CYMGRD proporcionará a los lectores criterios técnicos para escoger la opción adecuada acorde a cada proyecto.				
	Analizar la ineficacia de pozos a tierra ante tensiones peligrosas.	El análisis de la ineficacia de los pozos a tierra frente a tensiones peligrosas evidenciará la necesidad de evaluar las tensiones de toque y paso en el diseño de sistemas de puesta a tierra.	Dependiente	Seguridad de personas: tensión de contacto, tensión de paso, resistencia de la malla y Ground Potential Rise (GPR).		
	Aplicar teoría del IEEE Std 80-2013 a casos reales en Perú.	La aplicación práctica de los conceptos teóricos del IEEE Std 80-2013 en casos reales en Perú contribuirá a transformar la visión tradicional de los proyectistas sobre el diseño de sistemas de puesta a tierra.				
	Evaluar la relación costo-seguridad.	Conocer los montos de inversión permitirá establecer una relación precio-seguridad y servir como referencia para tomar decisiones de construcción.				

Anexo B: *Normativa Peruana De Referencia.*

El Perú cuenta con normas eléctricas donde se encuentran directrices para los diferentes menesteres asociados a la industria eléctrica, entre los principales tenemos, el Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006, Código Nacional de Electricidad – Suministro 2011, NTP 370.303: “Instalaciones eléctricas en edificios - Protección para garantizar la seguridad. Protección contra choques eléctricos”, NTP 370.053: “Seguridad Eléctrica – Elección de Materiales eléctricos en las instalaciones interiores para puesta a tierra. Conductores de Protección”. Parte del contenido de estas normas ha sido traducido y adaptado principalmente de versiones antiguas de las normas americanas como la NESC (National Electrical Safety Code), por ello puede encontrarse algunas aparentes incongruencias. Para el tópico de puesta a tierra, la normativa peruana es muy general y poco estructurada, sin embargo, bajo una mirada integral, puede resumirse que recomienda validar aparte de la resistencia de puesta a tierra, las tensiones de toque y paso, y el potencial superficial del suelo a valores que no impacten sistemas sensibles como los de comunicaciones.

Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006:

Sección 30: Conductores. Nos define que el color de conductores de puesta a tierra debe tener un acabado externo continuo, ya sea verde o verde con una o más franjas amarillas.

Sección 60: Puesta a tierra y enlace equipotencial. Está orientado a edificaciones, instalaciones interiores, salvo contadas recomendaciones que pueden aplicar a equipos en industrias. Esta sección incluso es el más contradictorio, en algunos puntos aparenta facultar el uso de electrodos individuales, incluso hay conceptos desfasados a las buenas prácticas, pero finalmente recomienda validar tensiones de toque y paso adicionalmente. Lamentablemente la mayor parte de práctica peruana para instalación e ingeniería de puesta a tierra en industrias se ha valido, ya sea por omisión o desconocimiento, de estas aparentes contradicciones para no hacer las validaciones de tensiones de toque y paso.

Sección 190: Instalaciones de Alta Tensión. Hace referencia a mallas a tierra para subestaciones (de aplicación en media y alta tensión). Hace énfasis en las tensiones de toque y paso, toma de referencia al IEEE Std 80, puede usarse para tener en cuenta algunas recomendaciones particulares para fines de diseño.

Consideraciones principales del Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006

A continuación, se describe las recomendaciones principales de esta norma relacionados a la puesta a tierra para plantas industriales.

- Todos los circuitos derivados deberán estar dotados con interruptor diferencial con sensibilidad de 30 mA.
- Se acepta como medidas que proveen una protección adicional a la puesta a tierra, las siguientes acciones: aislamiento eléctrico, separación física de los circuitos y barreras mecánicas contra contacto accidental.
- Cuando se ponen a tierra sistemas, circuitos, equipo eléctrico, pararrayos, armaduras de cables, y otras canalizaciones, las tierras deben ser dispuestas de tal manera que no se presenten corrientes permanentes indeseables en los conductores de puesta a tierra.
- Debe aplicarse métodos o materiales que minimicen la acción galvánica cuando se utilice metales diferentes.
- Una varilla debe contar con un diámetro no menor a 16 mm (5/8") para electrodos de acero-cobre y 13 mm (1/2") para electrodos de cobre, la longitud no debe ser menor a 2 m.
- La sección del conductor de enlace equipotencial no debe ser menor que aquellas dadas en la tabla a continuación, pero en ningún caso necesita ser mayor que el conductor de mayor sección no puesto a tierra en el circuito.

Máxima capacidad o ajuste de dispositivo de sobrecorriente de los circuitos protegidos	Mínima sección nominal del conductor requerido
(A)	(mm2)
20	2.5
30	4
40	6
60	6
100	10
200	16
300	25
400	25
500	35
600	50
800	50
1000	70
1200	95
1600	120
2000	150
2500	185

Nota: Adaptada del Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006. Mínima sección de conductores para enlaces equipotenciales de canalizaciones y equipos.

- Los cables de protección que acompañan a los alimentadores, entre tablero general y tableros periféricos, deben tener una capacidad nominal no menor que la indicada en la siguiente tabla.

Máxima corriente del conductor de acometida de mayor sección o el equivalente para conductores múltiples	Sección del conductor de cobre de puesta a tierra
(A)	(mm2)
100 o menos	10
101 a 125	16
126 a 165	25
166 a 200	25
201 a 260	35
261 a 355	50
356 a 475	70
Sobre 475	95

Nota: Adaptada del Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006. Mínima sección de conductores de tierra para sistemas a.c. o conductores de tierra comunes.

- Para cables de tierra de una canalización de acometida, de una cubierta metálica, del equipo de conexión, donde el sistema de corriente alterna no está puesto a tierra en el lugar, se emplea la siguiente tabla.

Máxima de conducción del conductor de mayor sección de la acometida o el equivalente para conductores múltiples (A)	Sección del conductor de cobre de puesta a tierra (mm²)	Diámetro de tubería metálica pesada (mm)	Diámetro de tubería metálica liviana (mm)
60	10	20	25
100	10	25	35
200	16	35	40
400	25	65	65
600	50	80	105
800	50	105	105
Sobre 800	70	155	-

Nota: Adaptada del Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006. Mínima sección de conductores de tierra para canalizaciones y equipos de conexión.

- Aunque la sección 60 faculta el uso de cable de cobre 16 mm² para enlazar entre sí electrodos de puesta a tierra, la sección 190 generaliza la recomendación de uso de calibre mínimo 70mm² para estructuras, equipos de potencia y electrodos de malla a tierra.
- En lugares donde la concentración de rocas a profundidades menores a 1.2 m sea significativa, puede optarse por instalar conductores horizontales a 600 mm bajo el piso terminado. Para situaciones complejas es posible la instalación a menor profundidad considerando la cobertura de 450 mm de material granulado o 100 mm de concreto.
- Según el CNE (2006), los electrodos verticales deben estar separados al menos 2m o la longitud de estos, incluyendo los utilizados para circuitos de señales, radio, protección contra descargas atmosféricas o cualquier otro propósito, (...) y éstos deben ser enlazados juntos, mediante un conductor de cobre no menor que 16 mm². Se debe tener en cuenta que la técnica actual recomienda separaciones de por lo menos 2 veces la longitud de los electrodos, e interconexión con cable 70 mm² como mínimo.

- La siguiente cita es el usado por la práctica común para la justificación de empleo de pozos a tierra individuales y aislados cuidando solo la resistencia, aunque, si se lee bien, la norma también señala el cuidado de tensiones de contacto; según el CNE (2006), el valor de la resistencia de la puesta a tierra debe ser tal que, cualquier masa no pueda dar lugar a tensiones de contacto superiores a las permitidas y no debe ser mayor a 25 Ω . Cuando un electrodo simple, consistente en una varilla, tenga una resistencia a tierra mayor de 25 Ω , es necesario instalar un electrodo adicional.
- Si en un sistema eléctrico que opera por encima de 5 kV se emplea un dispositivo de puesta a tierra del neutro, es necesario garantizar la desconexión automática del sistema ante la detección de una falla a tierra, salvo en los casos en que: la corriente de falla a tierra se limite a un máximo de 5 A, o se disponga de una alarma, ya sea visual, audible o ambas, que permita identificar e indicar de manera clara la presencia de la falla.
- Cuando el nivel de cortocircuito supere a 30 kA, se debe tener especial cuidado en incrementar la sección de los conductores de tierra, garantizando que no sufran daños térmicos o haya peligro de incendio en los casos más críticos de falla que podría darse en la red.
- El máximo valor de la resistencia de una puesta a tierra debe ser tal que no provoque un GPR arriba de 5,000 V para cualquier condición del suelo (mojado, seco, congelado), en caso no sea posible, se admite un GPR no superior al máximo nivel de aislamiento del equipo de comunicaciones. Complementariamente, los valores de tensiones de toque y paso dentro de la puesta a tierra de la planta no deben sobrepasar lo señalado en la siguiente tabla que fue calculada a partir de la norma IEEE Std 80 para $\rho_s = 3000 \Omega\cdot m$, $h_s=0.15$ m, $t_s=0.5$ s, así que para fines de diseño solo es referencial.

Tipo de suelo	ρ (Ω -m)	Tensión de paso para ts 0.5s (V)	Tensión de contacto para ts 0.5s (V)	Tensión de contacto para ts 1s (V)	Tensión de contacto para ts 1s (V)
Orgánico mojado	10	174	166	123	118
Húmedo	100	263	188	186	133
Seco	1000	1154	405	816	286
Grava 105 mm	3000	3143	885	2216	626
Cama de roca	10000	10065	2569	7116	1816

Nota: Adaptada del Código Nacional de Electricidad – Utilización 2006. Tensiones de toque y paso tolerables.

- Se debe aterrar armaduras de cables, shield de terminaciones de media tensión, canalizaciones, tuberías, pantallas de guarda y tableros, con conductores de cobre no menores de 25 mm².
- El neutro de un transformador de un sistema puesto a tierra, debe ser aterrado con un conductor de cobre no menor de 70 mm², el cual debe tener una capacidad de conducción suficiente para la máxima corriente de falla a tierra del transformador.

Consideraciones principales del Código Nacional de Electricidad – Suministro 2011

Las siguientes indicaciones, aplican principalmente para puestas a tierra de redes de distribución primaria y secundaria:

- En sistemas donde el neutro no está conectado a tierra, el responsable debe asegurar la protección de las personas frente a posibles tensiones peligrosas derivadas de fallas a tierra, para lo cual se debe considerar la implementación de un sistema de puesta a tierra adecuado, junto con la rápida intervención del sistema de protección.
- En cualquier sistema de suministro, ya sea con neutro o sin neutro, el responsable debe garantizar en todo momento que el sistema de protección tenga la capacidad de detectar y desconectar fallas originadas por la caída de conductores o por contacto fase-tierra, con el fin de prevenir riesgos asociados a tensiones de contacto y de paso peligrosas.

- En sistemas de baja tensión con neutro y múltiples puestas a tierra, la resistencia de puesta a tierra del neutro, medida en los puntos más críticos con todas las conexiones activas, no debe exceder los siguientes límites: 6 Ω en centros urbanos o áreas urbano-rurales, y 10 Ω en localidades remotas o zonas rurales.