



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DISEÑO DE MALLA A TIERRA CONFORME A LA NORMATIVA IEEE 80 USANDO EL
SOFTWARE ETAP PARA MITIGAR DESCARGAS ELÉCTRICAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Gino Jeampierre Falcones Bohórquez
Daniel Alexander López Castillo

TUTOR: Ing. Ervin Geovanny Solano Villegas, MSc.

Guayaquil – Ecuador

2025

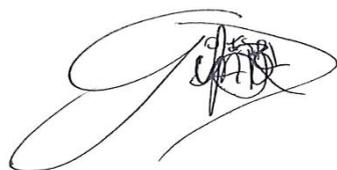
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Gino Jeampierre Falcones Bohórquez con documento de identificación N° 0953750643 y Daniel Alexander López Castillo con documento de identificación N° 0928067925; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

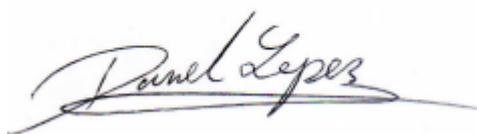
Guayaquil, 26 de febrero del año 2025

Atentamente,



Gino Jeampierre Falcones Bohórquez

0953750643



Daniel Alexander López Castillo

0928067925

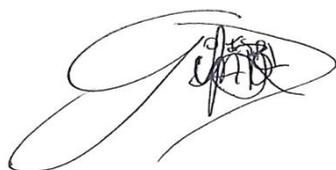
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Gino Jeampierre Falcones Bohórquez con número de identificación N° 0953750643 y Daniel Alexander López Castillo con número de identificación N° 0928067925, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del Proyecto Técnico: DISEÑO DE MALLA A TIERRA CONFORME A LA NORMATIVA IEEE 80 USANDO EL SOFTWARE ETAP PARA MITIGAR DESCARGAS ELÉCTRICAS el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de febrero del año 2025.

Atentamente,



Gino Jeampierre Falcones Bohórquez

0953750643



Daniel Alexander López Castillo

0928067925

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ervin Geovanny Solano Villegas con documento de identificación N° 0923481915, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE MALLA A TIERRA CONFORME A LA NORMATIVA IEEE 80 USANDO EL SOFTWARE ETAP PARA MITIGAR DESCARGAS ELÉCTRICAS, realizado por Gino Jeampierre Falcones Bohórquez con documento de identificación N° 0953750643 y por Daniel Alexander López Castillo con documento de identificación N° 0928067925, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de febrero del año 2025.

Atentamente,



Ervin Geovanny Solano Villegas

0923481915

DEDICATORIA

Dedico este proyecto A Dios, por ser mi guía, mi luz y mi refugio en cada paso de este camino. Gracias por brindarme la sabiduría y la fortaleza para afrontar los momentos más desafiantes en el transcurso de esta meta personal, por enseñarme a confiar en tu voluntad y por ser siempre mi fuente de esperanza. Este logro es una prueba más de tu amor y de tu presencia constante en mi vida.

A mis padres, quiénes con su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido la fuerza que me impulsó a seguir adelante en todo momento. Gracias por enseñarme el verdadero significado del esfuerzo, del sacrificio y la perseverancia. Siempre fueron y serán la motivación para seguir adelante junto a mi hermano. Juntos conforman la familia que siempre me ha estado alentando a cumplir mis metas.

A mis amigos, quienes me han acompañado y han sido parte esencial de este viaje. Gracias por estar a mi lado en cada momento, por esa alegría contagiosa en los días de cansancio. Gracias por las risas, por los momentos de distracción que me permitieron recargar energías, y por ser un pilar de comprensión y aliento. Este logro también se lo dedico a ustedes.

Gino Jeampierre Falcones Bohórquez

A mis padres, mi pilar y mi razón de ser. Su amor inquebrantable y su apoyo constante han sido la fuerza que me impulsó a seguir adelante en los momentos más difíciles. Gracias por enseñarme el verdadero significado del esfuerzo, del sacrificio y la perseverancia. Ustedes me han dado no solo la vida, sino también los valores y las herramientas necesarias para alcanzar mis metas. Esta tesis es una pequeña muestra de su esfuerzo, y es para ustedes, que siempre han creído en mí incluso cuando yo dudaba de mí mismo.

A mis amigos, por su apoyo incondicional, por estar a mi lado en cada etapa de este proceso. Gracias por ser mi refugio cuando el cansancio me vencía, por las palabras de aliento, las risas y la compañía que tanto necesitaba en los momentos de incertidumbre. Gracias por compartir conmigo los momentos de alegría y también aquellos de frustración, por ser un recordatorio constante de que no estamos así.

Daniel Alexander López Castillo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme salud y sabiduría a lo largo de mi vida. A mis padres, a mi hermano, mi familia la cual me acompaña día a día, no me alcanzan las palabras suficientes para expresarles mi gratitud. Gracias por su amor infinito, por todo el sacrificio y apoyo que me han dado desde siempre. Ustedes han sido mi pilar y mi ejemplo, enseñándome que con esfuerzo y dedicación todo se puede alcanzar. Esta tesis, aunque es el resultado de mi arduo trabajo y esfuerzo, también es el reflejo de todo lo que ustedes me han inculcado y aconsejado.

A mis amigos, aquellos que también formaron parte en este largo camino. Gracias por estar siempre a mi lado, por brindarme su apoyo, su comprensión y sus sonrisas cuando más los necesito. Cada momento compartido con ustedes me ha permitido seguir adelante en este trayecto, gracias por tantos momentos de alegría.

Gino Jeampierre Falcones Bohórquez

A Dios, por ser mi guía en todo momento. Gracias por darme la fuerza y la paciencia para enfrentar cada reto. Sin Su amor y apoyo, este logro no sería más que un sueño le

A mis padres, por su amor incondicional y por ser siempre mi apoyo inquebrantable. Ustedes han estado conmigo en cada paso, alentándome a seguir, incluso cuando el camino parecía difícil. Esta tesis es tanto fruto de mi esfuerzo como de su dedicación y confianza e

A mis amigos, por ser mi refugio y mi motivación. Gracias por su compañía, sus risas y sus palabras de aliento. En los momentos más complicados, ustedes fueron una fuente de energía y esperanza, y no puedo dejar de agradecerles por estar siempre presentes, incluso

A mi novia, con su paciencia, comprensión y ánimo, estuvo a mi lado en cada paso del camino.

Y a todas las personas que, de alguna u otra forma, han sido parte de este viaje, les agradezco profundamente.

Daniel Alexander López Castillo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
ACRÓNIMOS.....	xvii
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Título	1
1.2. Introducción	1
1.3. Planteamiento del problema	1
1.4. Justificación.....	2
1.4.1. Justificación del problema:.....	2
1.4.2. Justificación académica.....	2
1.4.3. Justificación económica	2
1.4.4. Justificación social	2
1.5. Delimitación del problema	3
1.6. Beneficiarios del análisis de estudio	3
1.7. Objetivos	3
1.7.1. Objetivo general	3
1.7.2. Objetivos específicos.....	4
1.7.3. Objetivos primordiales de un sistema de puesta a tierra	4
1.8. Metodología y equipos	4
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	5

2.1.	Fundamentación Teórica	5
2.1.1.	Intención de una puesta a tierra.....	5
2.2.	Tipos más comunes de puesta a tierra	5
2.2.1.	Puesta a tierra de operación.....	5
2.2.2.	Puesta a tierra de protección.....	5
2.3.	Beneficios sobre diseño de mallas a tierra en subestaciones eléctricas	6
2.4.	Tipos de mallas de tierra	6
2.4.1.	Malla de tierra convencional	6
2.4.2.	Malla de tierra en anillo	6
2.4.3.	Malla de tierra en estrella	6
2.4.4.	Malla de tierra en parrilla	6
2.5.	Utilidades de un diseño adecuado de la malla.....	7
2.6.	Resistividad del terreno	7
2.7.	Características eléctricas del terreno	8
2.8.	Componentes que influyen en la resistividad de la superficie	8
2.9.	Mejorador de resistividad del suelo – FAVIGEL	9
2.9.1.	Principales características del mejorador de resistividad-FAVIGEL	9
2.10.	Comprensión de las medidas de resistividad del terreno	9
2.10.1.	Modelo de suelo uniforme.....	10
2.10.2.	Modelo de suelo de dos capas	10
2.11.	Impactos de la corriente, tensiones de toque y paso en el cuerpo humano	11
2.12.	Voltaje de paso.....	12
2.13.	Voltaje de Contacto	12
2.14.	Valores aceptables de las tensiones de paso	13
2.15.	Criterios de diseño de mallas utilizando la norma IEEE-80	14
2.16.	Parámetros críticos	14
2.16.1.	Corriente máxima para disipar por la malla.....	14
2.17.	Tipos de Contactos	14
2.17.1.	Contacto directo	14
2.17.2.	Contacto indirecto	15
2.18.	Sistemas de protección considerados en la ITC-BT-24 del REBT.....	17
2.19.	Efectos que produce la corriente eléctrica.....	17

2.20.	Efectos que produce la corriente eléctrica.....	18
2.20.1.	Valores tolerables por el cuerpo humano	18
2.21.	Impedancia del cuerpo humano.....	19
2.21.1.	Impedancia interna	19
2.21.2.	Tabla del valor de la resistencia del cuerpo humano en función de los puntos de la trayectoria de la corriente	20
2.21.3.	Impedancia en la piel.....	20
2.21.4.	Tabla de la impedancia total del cuerpo para trayecto mano a mano, a 50 hercios y superficie de contacto considerable	20
2.22.	Influencia de la superficie de contacto	21
2.23.	Resistividad superficial ps	21
2.24.	Factor de reducción de la capa externa	21
2.25.	Concepto de corrientes simétricas y asimétricas	21
2.25.1.	Corrientes simétricas	21
2.25.2.	Corrientes asimétricas	21
2.25.3.	Corriente simétrica de la falla hacia tierra IF	21
2.26.	Factor de reducción Df	22
2.27.	Factor de crecimiento Cp	22
2.28.	Determinación del factor de división de corriente Sf	22
2.29.	Duración de la falla tf y la duración del choque eléctrico ts	24
2.30.	Geometría sobre la malla.....	24
2.31.	Elección de la sección del conductor	24
2.32.	Tabla de conductores de la Norma IEEE-80	25
2.33.	Elevación del potencial de tierra - (GPR)	25
2.34.	Cálculos simplificados	26
2.35.	Ecuaciones de Schwarz para suelo homogéneo	26
2.36.	Determinación de la tensión máxima de la malla	27
2.37.	Medición de resistividad del suelo	28
2.38.	Medición de Wenner o de los 4 puntos	29
2.39.	Algoritmo de diseño según IEEE80	30
2.40.	Excel.....	32
2.41.	ETAP	32

3.	CAPÍTULO III	33
3.1.	Cálculo de corrientes simétricas y asimétricas.....	33
3.2.	Determinación de las corrientes de falla	33
3.2.1.	Determinación de la impedancia equivalente de secuencia positiva (Z1) en AT respecto a la barra de 115 kV	34
3.2.2.	Determinación de la impedancia equivalente de secuencia cero (Z0) en AT respecto a la barra de 115 kV	34
3.2.3.	Determinación de la impedancia equivalente de secuencia positiva (Z1) en BT respecto a la barra de 13.2 kV	35
3.2.4.	Determinación de la impedancia equivalente de secuencia cero (Z0) en BT respecto a la barra de 13.2 kV	35
3.2.5.	Determinación de la corriente simétrica en el lado de AT.....	35
3.2.6.	Determinación de la corriente simétrica en el lado de BT	36
3.3.	Modelado considerando un terreno uniforme:	36
3.4.	Método estadístico para determinar la resistividad que se debe utilizar en el diseño de la malla de suelos definidos como terreno uniforme:.....	37
3.5.	Distribución normal estándar acumulada	40
3.6.	Caso de estudio N° 1: Malla cuadrada sin electrodos	42
3.7.	Caso de estudio N° 2: Malla rectangular sin electrodos	48
3.8.	Caso de estudio N° 3: Malla cuadrada con electrodos en las esquinas 52	
3.9.	Caso de estudio N° 4: Malla rectangular con electrodos	56
3.10.	Cálculos de Excel – Caso 1	59
3.10.1.	Cálculos de Excel – Caso 1 añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL..	61
3.11.	Cálculos de Excel – Caso 2	63
3.11.1.	Cálculos de Excel – Caso 2 añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL..	65
3.12.	Cálculos de Excel – Caso 3	67
3.12.1.	Cálculos de Excel – Caso 3 añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL..	69
3.13.	Cálculos de Excel – Caso 4	71
3.13.1.	Cálculos de Excel – Caso 4 añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL..	73
3.14.	Elaboración de la malla a tierra en ETAP	75
3.14.1.	Entrada de datos de conductores del Caso 1	75
3.14.2.	Caso 1 – Añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL.....	79

3.14.3.	Entrada de datos de conductores del Caso 2	80
3.14.4.	Caso 2 – Añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL.....	85
3.14.5.	Entrada de datos de conductores del Caso 3	86
3.14.6.	Caso 3 – Añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL.....	91
3.14.7.	Entrada de datos de conductores del Caso 4	92
3.14.8.	Caso 4 – Añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL.....	98
3.15.	Efectos que se producen por un mal diseño de malla	99
4.	Capítulo IV	100
4.1.	Análisis y resultados.....	100
4.1.1.	Comparación entre los resultados de los voltajes de paso	100
4.1.2.	Comparación entre los resultados de los voltajes de paso usando mejorador de resistividad - FAVIGEL.....	100
4.1.3.	Comparación entre los resultados de los voltajes de la malla	100
4.1.4.	Comparación entre los resultados de los voltajes de paso usando mejorador de resistividad - FAVIGEL.....	101
4.1.5.	Análisis de los resultados obtenidos.....	101
4.2.	Análisis de los resultados referente a la seguridad de la malla	101
4.2.1.	Análisis de resultados caso 1 – Piel húmeda y piel seca	101
4.2.2.	Análisis de resultados caso 1 con mejorador – Piel húmeda y piel seca.....	102
4.2.3.	Análisis de resultados caso 2 – Piel húmeda y piel seca	102
4.2.4.	Análisis de resultados caso 2 con mejorador – Piel húmeda y piel seca.....	103
4.2.5.	Análisis de resultados caso 3 – Piel húmeda y piel seca	103
4.2.6.	Análisis de resultados caso 3 con mejorador – Piel húmeda y piel seca.....	104
4.2.7.	Análisis de resultados caso 4 – Piel húmeda y piel seca	105
4.2.8.	Análisis de resultados caso 4 con mejorador – Piel húmeda y piel seca.....	105
4.3.	PRESUPUESTO:	106
	CONCLUSIONES	107
	RECOMENDACIONES	108
	REFERENCIAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación de resistividad.....	7
Figura 2: Mejorador de resistividad - FAVIGEL.....	9
Figura 3: Gráfico de Sunde	11
Figura 4: Tensión de Toque o Contacto.....	13
Figura 5: Gráficas V_{ca} vs (T_s) admisible.....	13
Figura 6: Tensión de contacto en un contacto directo	15
Figura 7: Tensión de contacto indirecto	16
Figura 8: Principales efectos directos e indirectos de la corriente eléctrica.....	16
Figura 9: Método de Medición - Wenner (4 puntos).....	29
Figura 10: Programa Excel.....	32
Figura 11: Pantalla del Software ETAP.....	32
Figura 12: Diagrama unifilar del sistema en estudio.....	33
Figura 13: Diseño preliminar de la malla.....	37
Figura 14: Diseño inicial de la malla – Caso número 1	44
Figura 15: Malla rectangular sin electrodos - Caso número 2	48
Figura 16: Malla cuadrada con electrodos en las esquinas - Caso número 3.....	52
Figura 17: Malla rectangular con electrodos – Caso número 4.....	56
Figura 18: Datos del suelo.....	59
Figura 19: Geometría de la malla	59
Figura 20: Parámetros eléctricos	59
Figura 21: Conductor de la malla	60
Figura 22: Datos de voltajes permisibles	60
Figura 23: Resultados obtenidos de la malla (Macro).....	61
Figura 24: Datos del suelo con mejorador FAVIGEL	61
Figura 25: Resultados obtenidos de la malla (Macro).....	62
Figura 26: Datos del suelo.....	63
Figura 27: Geometría de la malla	63
Figura 28: Parámetros eléctricos	63
Figura 29: Conductor de la malla	64
Figura 30: Datos de voltajes permisibles	64
Figura 31: Resultados obtenidos de la malla (Macro).....	65
Figura 32: Datos del suelo con mejorador FAVIGEL	65
Figura 33: Resultados obtenidos de la malla (Macro).....	66
Figura 34: Datos del suelo.....	67
Figura 35: Geometría de la malla	67
Figura 36: Parámetros eléctricos	67
Figura 37: Conductor de la malla	68
Figura 38: Datos de voltajes permisibles	68
Figura 39: Resultados obtenidos de la malla (Macro).....	69
Figura 40: Datos del suelo con mejorador FAVIGEL	69

Figura 41: Resultados obtenidos de la malla (Macro).....	70
Figura 42: Datos del suelo.....	71
Figura 43: Geometría de la malla.....	71
Figura 44: Parámetros eléctricos.....	71
Figura 45: Conductor de la malla.....	72
Figura 46: Datos de voltajes permisibles.....	72
Figura 47: Resultados obtenidos de la malla (Macro).....	73
Figura 48: Datos del suelo con mejorador FAVIGEL.....	73
Figura 49: Resultados obtenidos de la malla (Macro).....	74
Figura 50: Editor del grupo IEEE - Conductores.....	75
Figura 51: Editor del grupo IEEE - Varillas.....	76
Figura 52: Editor de suelos - Información.....	76
Figura 53: Ubicación de los conductores.....	77
Figura 54: Capas del terreno.....	78
Figura 55: Editor de casos de estudio de GRD 1.....	78
Figura 56: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 1.....	79
Figura 57: Editor de suelo añadiendo mejorador - FAVIGEL.....	79
Figura 58: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 1 usando mejorador.....	80
Figura 59: Editor del grupo IEEE - Conductores.....	80
Figura 60: Editor del grupo IEEE - Varillas.....	81
Figura 61: Editor de suelos – Información.....	82
Figura 62: Ubicación de los conductores.....	83
Figura 63: Capas del terreno.....	83
Figura 64: Editor de casos de estudio de GRD 2.....	84
Figura 65: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 2.....	85
Figura 66: Editor de suelo añadiendo mejorador - FAVIGEL.....	85
Figura 67: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 2 usando mejorador.....	86
Figura 68: Editor del grupo IEEE - Conductores.....	86
Figura 69: Editor del grupo IEEE - Varillas.....	87
Figura 70: Editor de suelos – Información.....	88
Figura 71: Ubicación de los conductores y las varillas.....	89
Figura 72: Capas del terreno.....	89
Figura 73: Editor de casos de estudio de GRD 3.....	90
Figura 74: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 3.....	91
Figura 75: Editor de suelo añadiendo mejorador - FAVIGEL.....	91
Figura 76: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD3 usando mejorador.....	92
Figura 77: Editor del grupo IEEE - Conductores.....	92
Figura 78: Editor del grupo IEEE - Varillas.....	93
Figura 79: Editor de suelos – Información.....	94
Figura 80: Ubicación de los conductores y las varillas.....	95
Figura 81: Capas del terreno.....	96
Figura 82: Editor de casos de estudio de GRD para GRD 4.....	96

Figura 83: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 4	97
Figura 84: Editor de suelo añadiendo mejorador - FAVIGEL.....	98
Figura 85: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 4 usando mejorador	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de los sistemas de protección	17
Tabla 2: Efecto de la corriente eléctrica	18
Tabla 3: Efectos de la corriente eléctrica en humanos	18
Tabla 4: Tabla del valor de la resistencia del cuerpo humano en función de los puntos de la trayectoria de la corriente.	20
Tabla 5: Tabla de la impedancia total del cuerpo para trayecto mano a mano.	20
Tabla 6: Impedancias equivalentes de cables de guarda de líneas de transmisión y neutro de distribución.	23
Tabla 7: Constantes de los materiales conductores	25
Tabla 8: Aplicación de la distribución normal para el cálculo	38
Tabla 9: Distribución normal acumulada	40
Tabla 10: Ejemplo de utilización.....	41
Tabla 11: Definiciones de a	41
Tabla 12: Información de campo.....	42
Tabla 13: Dimensión de la malla.....	44
Tabla 14: Medidas de los conductores	44
Tabla 15: Glosario del paso 8	46
Tabla 16: Dimensión de la malla.....	48
Tabla 17: Medidas de los conductores	48
Tabla 18: Dimensión de la malla.....	52
Tabla 19: Dimensión de la malla.....	56
Tabla 20: Datos para conductores - Caso 1	75
Tabla 21: Datos del suelo - Caso 1	77
Tabla 22: Datos para conductores - Caso 2	81
Tabla 23: Datos del suelo – Caso 2	82
Tabla 24: Datos para conductores - Caso 3	87
Tabla 25: Datos de las varillas - Caso 3	88
Tabla 26: Datos del suelo - Caso 3	88
Tabla 27: Datos para conductores - Caso 4.....	93
Tabla 28: Datos de las varillas - Caso 4	94
Tabla 29: Datos del suelo - Caso 4	95
Tabla 30: Comparación de resultados – Ep.....	100
Tabla 31: Comparación de resultados – Ep – FAVIGEL.....	100
Tabla 32: Comparación de resultados – Em.....	100
Tabla 33: Comparación de resultados – Em – FAVIGEL.....	101
Tabla 34: Valores del presupuesto	106

RESUMEN

El presente trabajo aborda el diseño de una malla a tierra conforme a la normativa IEEE 80 usando el software ETAP para mitigar descargas eléctricas. Un inconveniente común que surge durante los respectivos diseños de los sistemas de puesta a tierra (SPT), existen diversos criterios de diseño ya sean estos de carácter técnico o económico, en pocas ocasiones se llevan a cabo los cálculos correctos, toma y recolección de información sobre la resistencia del suelo y el grado de profundidad en el cual se lleva a cabo. Utilizando el programa ETAP, software de ingeniería que nos ayuda para el diseño, análisis y simulación de sistemas eléctricos, incluyendo la secuencia de fallas, análisis de cortocircuitos y diseños de puesta a tierra. Con el cual esperamos lograr un diseño efectivo y eficiente.

El diseño de la malla de puesta a tierra tiene la virtud de reducir las descargas eléctricas y a su vez mejora la fiabilidad del sistema eléctrico en general, prolongando la vida útil de los equipos eléctricos y así reducir el costo de mantenimientos.

Se busca realizar un diseño que cumpla con los debidos requisitos de seguridad establecidos por la norma, con el fin de reducir riesgos ante descargas eléctricas peligrosas que podrían poner en peligro la integridad humana y perjudicar los elementos del sistema.

ABSTRACT

This paper addresses the design of a grounding grid in accordance with the IEEE 80 standard, using the ETAP software to mitigate electrical discharges. A common drawback in the design of grounding systems (SPT) is the presence of various design criteria, whether technical or economic. In many cases, the correct calculations are not performed, including the collection of information on soil resistance and the depth at which the grounding system is installed. By using the ETAP program, engineering software that aids in the design, analysis and simulation of electrical systems, including the fault sequences, short circuit analysis and grounding designs. We aim to achieve an effective and efficient design.

The design of the grounding grid has the advantage of reducing electrical discharges, which in turn improves the overall reliability of the electrical system, prolongs the useful life of electrical equipment, and reduces maintenance costs.

The aim is to create a design that meets the safety requirements established by the standard in order to reduce risks from dangerous electrical discharges that could endanger human safety and harm the system's components.

ACRÓNIMOS

- V: Voltaje nominal del circuito (V)
- I: Corriente nominal del circuito (A)
- mA: Mili Amperios
- R: Resistencia (Ω)
- P: Potencia aparente (W)
- kV: Kilovoltios (V)
- kVA: Kilovoltios amperios (VA)
- S: Es la sección del conductor (mm^2)
- SPT: Sistema de puesta a tierra
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónico
- 1F: Monofásico
- 2F: Bifásico
- 3F: Trifásico

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Título

Diseño de malla a tierra conforme a la normativa IEEE 80 usando el software ETAP para mitigar descargas eléctricas.

1.2. Introducción

Se establece un conjunto de directrices y recomendaciones esenciales para el diseño, instalación y mantenimiento para sistemas de puesta a tierra en instalaciones eléctricas. Esta norma juega un papel fundamental en el resguardo de las personas y equipos frente a los riesgos derivados de posibles fallas eléctricas, como descargas o cortocircuitos. A través de las especificaciones de la norma IEEE 80 se busca garantizar que las instalaciones sean seguras, minimizando las probabilidades de accidentes eléctricos y protegiendo tanto las estructuras como los sistemas eléctricos de posibles daños mencionados en [2].

Uno de los aspectos clave de la norma IEEE 80 es su enfoque integral, ya que no solo proporciona lineamientos técnicos sobre cómo instalar y verificar un sistema de aterrizaje, sino que también tiene en cuenta factores como las condiciones del suelo, la resistencia de los materiales y la correcta distribución de los conductores de puesta a tierra. Esto se traduce en un diseño que no solo cumple con los requisitos mínimos de seguridad, sino que a la vez maximiza la eficiencia operativa de la instalación eléctrica conforme a [3].

La implementación adecuada de esta normativa es fundamental en una amplia gama de aplicaciones, desde instalaciones industriales hasta infraestructuras de energía. Gracias a su amplia aceptación y aplicación internacional, IEEE 80 se ha convertido en una herramienta de referencia para ingenieros y técnicos de todo el mundo, quienes se apoyan en sus directrices para asegurar que las instalaciones eléctricas funcionen de manera fiable y segura. En resumen, IEEE 80 no solo protege frente a los peligros eléctricos, sino que también contribuye a la longevidad y eficiencia de los sistemas, garantizando una operación segura a largo plazo [3].

1.3. Planteamiento del problema

El incorrecto diseño de una malla de puesta a tierra o en su defecto la implementación de un SPT, puede permitir la aparición de corrientes de falla las cuales pueden perjudicar tanto a las personas que se encuentren en el lugar como a los equipos que integren el sistema por lo cual se debe contar con un diseño válido que cumpla con la norma [1].

La puesta a tierra es un componente necesario en la protección eléctrica de las instalaciones industriales, la malla a tierra nos ayuda a proteger tanto los diferentes elementos eléctricos que se puedan encontrar en la industria ante sobretensiones y picos de voltajes al igual que la integridad de las personas como se menciona en [1]. Existen riesgos de contactos eléctricos: Este tipo de incidentes surgen cuando el individuo se encuentra en contacto con componentes eléctricos de una instalación o componentes de esta. La norma IEC 479-1 diferencia dos clases de interacciones peligrosas: Contacto directo y Contacto indirecto como se indica en [2].

La importancia de la puesta a tierra se vuelve aún más evidente cuando consideramos el entorno industrial, donde la maquinaria y los equipos eléctricos son indispensables para el funcionamiento diario. En este contexto, el no contar con una malla a tierra adecuada puede resultar en consecuencias devastadoras, no solo en términos de daños materiales, sino también en la salud y bienestar de los trabajadores en [3].

1.4. Justificación

La malla a tierra protege a las personas que utilizan o se encuentran cerca de las instalaciones eléctricas al reducir el riesgo de descargas eléctricas. En caso de fallos en el sistema, la corriente se desviará hacia la tierra, minimizando el peligro para los usuarios según [4]. La conexión a tierra ayuda a proteger los equipos eléctricos y electrónicos contra sobretensiones y picos de voltaje, que pueden ser causados por rayos o fallas en la red eléctrica conforme en [5]. Esto es especialmente importante en entornos industriales o donde se utilizan equipos sensibles de acuerdo en [6]. La instalación es un requisito normativo en muchos países y regiones, conforme a códigos eléctricos y estándares de seguridad acorde en [7]. En [8] al desviar corrientes no deseadas hacia la tierra, se reduce el riesgo de incendios eléctricos que pueden ser provocados por cortocircuitos o fallas en el aislamiento. Un sistema bien conectado a tierra facilita las labores de mantenimiento y diagnóstico, ya que permite identificar problemas eléctricos más fácilmente y asegura que cualquier intervención se realice bajo condiciones seguras.

1.4.1. Justificación del problema:

El desarrollo de esta investigación es relevante porque cuenta con los requisitos establecidos por la norma IEEE-80 para el diseño de mallas de puesta a tierra, además de incluir un análisis detallado que será útil al implementar el sistema en la zona indicada.

1.4.2. Justificación académica

El propósito del proyecto es diseñar una malla a tierra, utilizando de manera correcta las normas IEEE-80 mediante pautas de procedimientos sistemáticos.

1.4.3. Justificación económica

El diseño e implementación de malla la cual estará a cargo, no solamente en lo que se refiere a parte técnica del proyecto, sino que también de parte económica, siempre y cuando se cumpla con el preconcepto de seguridad de las personas y las instalaciones.

1.4.4. Justificación social

Este diseño debe respaldar la seguridad que se encuentren en las instalaciones.

1.5. Delimitación del problema

Este proyecto está dispuesto dentro del período 2024-2025, tomando en consideración diversos aspectos técnicos, operativos y logísticos que contribuirán al desarrollo y éxito de la investigación. Es primordial destacar que para la exacta realización del estudio se debe considerar una serie de factores técnicos relacionados con la toma de datos de las resistividades, parámetros y demás variables necesarias. Para el respectivo cálculo y simulación de una malla, los datos serán tomados de la investigación correspondiente, proporcionará la base necesaria para una correcta evaluación donde se realizará el cálculo conforme a la norma IEEE 80, un Macro en Excel como información adicional y la respectiva simulación del sistema en ETAP.

El uso del software ETAP permitirá simular y al mismo tiempo validar el rendimiento de la malla a tierra bajo las diferentes condiciones operativas, mejorando la precisión del diseño y poder asegurar los parámetros de seguridad como tensiones de paso y toque.

1.6. Beneficiarios del análisis de estudio

Beneficiarios del proyecto planteado:

Comunidad:

Nuestra investigación aporta al conocimiento académico y científico referente al campo de la ingeniería eléctrica, refiriéndonos a un ámbito de protección mediante el diseño de un SPT, el cual garantiza la seguridad a aquellos que se encuentren en el entorno de la subestación.

Universidad Politécnica Salesiana (UPS):

La institución académica se beneficiará con el aporte de una investigación que genera un gran impacto y relevancia práctica. Esto fortalece el ámbito de investigación acerca de los sistemas de puesta a tierra y su compromiso con la innovación constante en la carrera de electricidad.

Autores:

Enriquece el conocimiento de los autores de este proyecto, este estudio espera que contribuya al desarrollo de soluciones prácticas. Exponiendo los siguientes beneficios:

- Garantizar la seguridad y protección tanto para el personal autorizado como para aquellos que no lo estén, así como para los operativos.
- Protección de las instalaciones frente a tensiones eléctricas peligrosas.
- Cumplimiento normativo IEEE 80 garantizando que cumpla con los estándares establecidos.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de puesta a tierra mediante ETAP, que garantice la seguridad frente a descargas eléctricas conforme a los estándares IEEE.

1.7.2. Objetivos específicos

- Identificar las normativas y estándares IEEE aplicables, revisando estudios relevantes para aplicarlos en el diseño de puesta a tierra.
- Realizar los cálculos correspondientes siguiendo los pasos necesarios para cumplir con los estándares de la normativa IEEE 80.
- Simular el sistema de puesta a tierra mediante el software ETAP para conocer la respuesta de disipación de descargas eléctricas.

1.7.3. Objetivos primordiales de un sistema de puesta a tierra

Son varias las metas que se deben cumplir y a su vez estas obedecen a distintas razones y situaciones que se puedan presentar.

Para ello:

Se debe garantizar la seguridad de aquellas personas que se encuentran laborando en la respectiva instalación.

- Se debe asegurar un comportamiento técnico adecuado del sistema.
- El principal objetivo de esta investigación, tiene como fin cumplir con los objetivos previamente mencionados.

Desde una perspectiva técnica, el sistema de conexión hacia tierra cumple con las próximas funciones:

- Disminuir los niveles de sobrevoltaje que podrían surgir en situaciones anormales dentro del sistema eléctrico.
- Ofrecer una ruta de mínima resistencia que permita el funcionamiento adecuado de los elementos de protección, como relés, transformadores, fusibles, entre otros, que forman parte del sistema eléctrico.
- Dirigir de manera eficiente las descargas eléctricas causadas por fenómenos atmosféricos hacia la tierra, minimizando las diferencias de potencial en las instalaciones.

1.8. Metodología y equipos

Para comenzar se realizará una investigación de los elementos que integran el diseño de la malla a tierra, de tal manera que se logre la comprensión de este proyecto.

Las técnicas o enfoques a emplear en este proyecto se relacionan con la normativa IEEE-80 para calcular los respectivos parámetros necesarios para nuestro diseño (SPT).

Para llevar a cabo la simulación del diseño utilizamos el software ETAP. Una vez culminado el diseño, procedemos a verificar que el diseño cumpla con la norma establecida.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentación Teórica

Las variables del proyecto se describen a detalle por separado, ya que es necesario describir todos los elementos relacionados con el proyecto, los tipos de elementos y proponiendo las Normas IEEE 80 relacionadas con los parámetros eléctricos para una precisa operación.

Para realizar este trabajo se utilizaron diversas fuentes bibliográficas para obtener estándares u opiniones de otros autores que analizaron esta problemática, y así extraer los conceptos de los principales términos y elementos relacionados a continuación.

2.1.1. Intención de una puesta a tierra

Las metas de este sistema son variadas y responden a diferentes necesidades y circunstancias. Sin embargo, se pueden resumir en dos metas principales:

- Asegurar la protección de los individuos que trabajan en una infraestructura.
- Garantizar el funcionamiento técnico del sistema.

Se enfoca principalmente al diseño de la malla, para asegurar que las personas sufran riesgos por contactos directos e indirectos. Para ello, se toman los criterios máximos de tensión de paso y contacto permitidos, conforme a las normativas internacionales [4].

2.2. Tipos más comunes de puesta a tierra

Entre los tipos más comunes se encuentra, la puesta a tierra de protección. El SPT, es fundamental en las diferentes instalaciones eléctricas, donde tienen como función dirigir la corriente de falla y sobrecarga hacia tierra con la finalidad de resguardar la integridad de los individuos al estar presentes en las instalaciones, además de proteger los equipos, elementos eléctricos de la subestación u otra instalación.

2.2.1. Puesta a tierra de operación

Cuenta con partes activas, entre las cuales se puede considerar un punto de unión en común de conexión a tierra, tales como el neutro de los transformadores, generadores [16].

2.2.2. Puesta a tierra de protección

Se utiliza para unir las partes que son metálicas de los equipos eléctricos hacia tierra. Este sistema previene la acumulación de cargas eléctricas peligrosas en equipos como cuadros eléctricos, carcasas metálicas de motores y generadores, lo que podría comprometer la protección de los individuos. Esta malla en caso de una falla, permite que la corriente fluya hacia la tierra, evitando choques eléctricos [16].

2.3. Beneficios sobre diseño de mallas a tierra en subestaciones eléctricas

Un diseño realizado correctamente es aquel que previene tensiones de las estructuras, durante las fallas a la malla, también debe ser capaz de ofrecer una vía segura a tierra para las corrientes inducidas. Para el personal laboral da protección aquello que estén autorizados o no, como aquellas personas ajenas al establecimiento [17].

2.4. Tipos de mallas de tierra

Escoger el tipo de malla es de suma relevancia considerando que se debe asegurar tanto la seguridad como el buen funcionamiento en la operación de dichos sistemas, una malla de tierra adecuada no solo se encarga de proporcionar un camino seguro para realizar la disipación de la corriente eléctrica, sino que además reduce el riesgo de peligros [17].

2.4.1. Malla de tierra convencional

La malla de tierra convencional está compuesta por una red de conductores enterrados en el suelo, generalmente con un diseño rectangular o cuadrado. Este tipo de malla es ampliamente utilizado en subestaciones de distribución y transmisión de energía. Su principal ventaja es que ofrece una disipación uniforme de las corrientes de falla, además de ser fácil de instalar y mantener. Es la opción más popular y comercial debido a su excelente equilibrio entre calidad y costo [17].

2.4.2. Malla de tierra en anillo

Este tipo de malla forma un modelo que forma un anillo de conductores alrededor de la subestación, el cual puede estar conectado a una malla de tierra convencional. Es usual que sea empleada en subestaciones de menor tamaño y en aquellas que se encuentran en áreas urbanas. Su principal ventaja es que mejora la distribución de la corriente de falla alrededor de la subestación, lo cual otorga una protección adicional [17].

2.4.3. Malla de tierra en estrella

Este tipo de malla de tierra está formada por conductores que se extienden desde un punto central hacia el exterior, como si fueran los radios de una rueda. Es especialmente útil en subestaciones con configuraciones específicas o en espacios reducidos. Entre sus ventajas destaca su alta resistencia a la corrosión y su efectividad en suelos de baja resistividad. Además, es una excelente opción cuando se necesita una capacidad superior para disipar corrientes de falla y las condiciones del terreno dificultan la instalación de otros tipos de mallas de tierra [17].

2.4.4. Malla de tierra en parrilla

Este tipo de malla de tierra se compone de un conjunto de conductores paralelos interconectados, creando una estructura parecida a una parrilla. Es comúnmente utilizada en subestaciones eléctricas grandes y en instalaciones industriales. Su diseño no solo permite disipar eficientemente la corriente de falla, sino que también facilita su expansión cuando sea

necesario. Aunque este modelo destaca por sus beneficios, la elección final dependerá de las necesidades específicas que quieras cubrir y las características del proyecto [17].

2.5. Utilidades de un diseño adecuado de la malla

Una malla bien diseñada reduce de manera significativa el riesgo de choques eléctricos hacia el personal que se encuentre en las instalaciones de la subestación. Garantizando de forma segura a las corrientes de fallas al disiparse, al mismo tiempo que también protege los equipos eléctricos de la subestación frente a sobretensiones y a las corrientes de falla respectivamente de manera que prolonga la vida útil de estos elementos y así reducir los costos de mantenimiento.

Un buen diseño nos ayuda a mejorar el equilibrio del sistema eléctrico al brindarnos una ruta de baja resistencia que permita que la corriente de falla se disipe de manera segura.

2.6. Resistividad del terreno

La resistividad del terreno es una propiedad de los suelos o materiales geológicos que muestra cuán difícil es para la electricidad pasar a través de ellos. Este se mide como la resistencia entre dos caras del bloque de 1 m al costado lleno con el suelo a evaluar. Este valor dependerá del tipo de suelo, temperatura y presencia de minerales o sales.

La resistividad del terreno (ρ) se expresado en $\Omega\cdot m$.

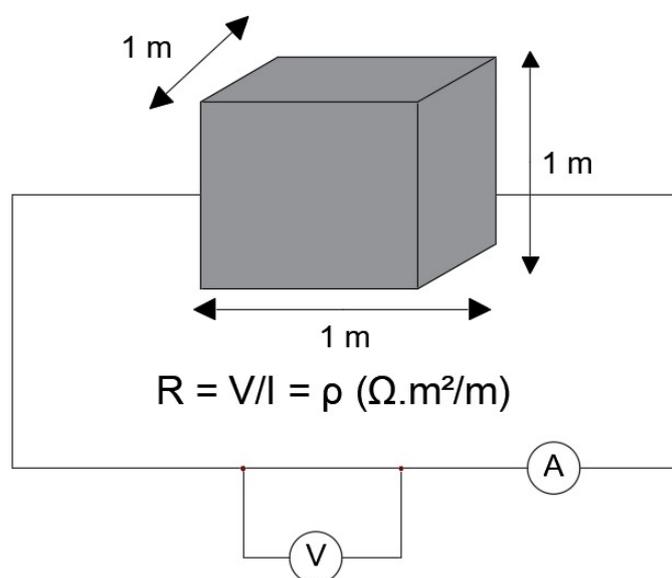


Figura 1: Relación de resistividad

Fuente: Autores

Expresión general de la resistencia es:

$$R = \rho \frac{1}{S} \quad (1)$$

Caso de la figura 1 mediante la ecuación (1):

$$R(\Omega) = \rho \frac{1(m)}{1(m^2)}$$

Donde:

$$\rho = R \left(\frac{\Omega \cdot m^2}{m} \right) = R(\Omega \cdot m) \quad (2)$$

2.7. Características eléctricas del terreno

El primer paso para diseñar una puesta a tierra es analizar las características del suelo en el que se va a trabajar. Para calcular la resistencia de un punto de tierra, basta con conocer el perfil de resistividad aparente del terreno, en cambio en una subestación de una malla de mayor extensión no sucede lo mismo.

Para diseñar adecuadamente una red de malla a tierra que cubra un área extensa, es importante conocer la resistividad del terreno a las diferentes profundidades que se realicen. Aunque los filones profundos que son muy resistentes o conductores puedan tener un impacto mínimo en la resistividad aparente del suelo, sus características podrían alterar considerablemente la resistencia de la red de tierra cerca de la superficie, debido a la distorsión que generan en los flujos de corriente. Sin embargo, es poco frecuente contar con información precisa sobre la resistividad del terreno en la superficie o a distintas profundidades antes de iniciar las obras. Con frecuencia, la construcción de estas redes de tierra proporciona las primeras señales sobre la condición del terreno, cuando lo ideal sería que esta información estuviera disponible desde el principio [16].

2.8. Componentes que influyen en la resistividad de la superficie

Aunque los aspectos más importantes del terreno son aquellos que están secos y funcionan como aislantes, su resistividad disminuye rápidamente cuando están en contacto con sales solubles y humedad. Además, que la composición del suelo, incluso en un área específica es bastante variable, con capas y depósitos que puedan estar distribuidos de dos formas, en el eje X y en el eje Y. Las áreas superficiales donde se montan las tomas, estas están muy influenciadas de factores como el clima, las lluvias y las precipitaciones. Todo esto puede causar que la resistividad cambie considerablemente de un lugar a otro, o que fluctúe. En resumen, hay varios elementos del terreno que pueden alterarla de manera significativa [16].

- La composición
- Sales solubles
- Condición de humedad
- Temperatura
- Densidad o compactación
- Estructura estratigráfica

2.9. Mejorador de resistividad del suelo – FAVIGEL

Este tipo de suelo artificial está diseñado para reducir de manera efectiva y permanente la resistencia en sistemas de puesta a tierra. Funciona mediante un tratamiento fisicoquímico del suelo alrededor del electrodo, mejorando así significativamente su conductividad. Además de contar con la propiedad de ser ecológico, ya que esto significa que sus componentes no presentan peligro para las personas ni los animales [20].



Figura 2: Mejorador de resistividad - FAVIGEL

Fuente: SEGELECTRICA, s.f.

2.9.1. Principales características del mejorador de resistividad-FAVIGEL

- **Economía:** Debido a su gran eficiencia, la relación costo/beneficio aventaja ampliamente a otra solución.
- **Baja resistividad:** Contiene su resistividad inferior a $0,5 \Omega.m$ en mejoras que logran una resistencia de puesta a tierra superior al 90%.
- **Mayor Temperatura de Fusión:** En caso de fallas de altas temperaturas, algunos suelos naturales pueden llegar a cristalizarse a 200 o 300°C mientras que FAVIGEL tiene una temperatura de fusión superior a los 1200 °C lo que ayuda a soportar las fallas severas que puedan llegar a presentarse.
- **Anticorrosivo:** PH de 7 y 7,5 asegurando una mínima corrosión de los electrodos.

2.10. Comprensión de las medidas de resistividad del terreno

Las mediciones que se realizan, tienen como fin que se acerque lo más posible a las condiciones reales del terreno. La resistividad varía tanto de manera lateral como en función de la profundidad, y esto está relacionado con la estratificación del suelo. Además, las condiciones climáticas tienen un impacto en los valores de resistividad, por lo que se recomienda hacer las mediciones durante el verano prolongado para obtener los valores más altos y desfavorables [16].

Los modelos que se emplean generalmente son:

- ✓ Modelo de suelo uniforme:

Este modelo suele ser bastante preciso solo cuando la resistividad aparente varía de manera moderada. Sin embargo, esto solo ocurre en suelos homogéneos, una situación que rara vez se da en la realidad. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, el modelo puede no ser tan exacto.

- ✓ Modelo de suelo con dos capas:

Este modelo refleja de manera válida las condiciones reales del suelo, ya que está compuesta por la planta superior de profundidad limitada, cuya resistividad es distinta a la planta más profunda, que se considera de espesor infinito.

- ✓ Modelo de suelo multicapas:

Este modelo es empleado cuando las condiciones del suelo son más complejos en comparación a los otros modelos.

2.10.1. Modelo de suelo uniforme

Cuando se presenta una desigualdad entre las resistividades de las distintas capas del suelo no es tan marcada, es posible utilizar un valor promedio de la resistividad como una primera estimación o para obtener una idea general de las magnitudes involucradas [14]. Para calcular una resistividad aproximada en suelos uniformes, se puede calcular un valor promedio de las resistividades aparentes, tomando mediciones en distintas ubicaciones y direcciones dentro del área de estudio, de la siguiente forma:

$$\rho_{a \text{ promedio}} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad (3)$$

Resistividades aparentes mediadas a diferentes espaciamientos.

$$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an} \quad (4)$$

2.10.2. Modelo de suelo de dos capas

Este tipo de modelo describe una capa superior de profundidad finita, que se encuentra situada encima de una capa inferior de profundidad ilimitada [14]. Este cambio en la resistividad en las fronteras de cada capa del terreno tiene que representar usando el factor de reflexión K, que se define de la siguiente forma:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (5)$$

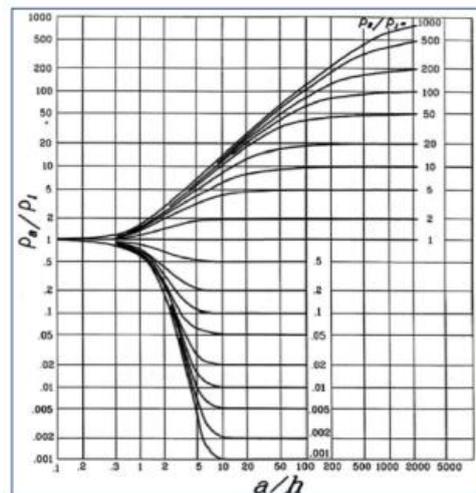


Figura 3: Gráfico de Sunde

Fuente: <https://pdfslide.tips/documents/metodo-de-sunde-para-modelar-suelos-2-estratos.html>

En varios casos, emplear un modelo de dos capas para representar un electrodo de tierra es adecuado para un SPT confiable. Este modelo puede ser aproximado mediante el método gráfico de Sunde [12].

Los valores de ρ_1 y ρ_2 se determinan con el monitoreo de las medidas de resistividad. Por otro lado, la profundidad H se calcula utilizando el método gráfico de Sunde, siguiendo estos pasos:

- ✓ Graficar la relación ρ_a vs. a .
- ✓ Estimar los valores de ρ_1 y ρ_2 a partir de la gráfica, extendiéndola en ambos extremos si los datos disponibles no son suficientes.
- ✓ Localizar el valor de ρ_a/ρ_1 en el eje Y al interior de la zona de pendiente de la curva ρ_2/ρ_1 adecuada.
- ✓ Consultar el valor adecuado a la relación a/h en el eje X.
- ✓ Obtener ρ_a multiplicando el valor de ρ_a/ρ_1 elegido por ρ_1 .
- ✓ Consultar la gráfica de ρ_a vs. a para leer el espaciamiento de prueba correspondiente.
- ✓ Finalmente, calcular la profundidad de la capa superior H utilizando la separación de prueba adecuada.

2.11. Impactos de la corriente, tensiones de toque y paso en el cuerpo humano

Las altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas, ya sea que se haya producido por un rayo o por fallas durante operaciones, nos obligan a tomar medidas de seguridad tanto para el personal que se encuentren en las instalaciones como para aquellas personas que estén cerca.

Corrientes en el orden de mili amperios (mA), pueden generar diferencias de potencial significativas en las cercanías o en los puntos de contacto a tierra. Si el caso de una persona se encuentre entre dos puntos con tensión distinta, podría recibir una descarga que pueda sobrepasar su límite de contracción muscular. En ese caso, la corriente que circula por el cuerpo

humano se incrementa, y si pasa por un órgano vital, puede ser fatal e incluso causar la muerte. El umbral de percepción de la corriente se establece a partir de 1 mA [16].

Ecuación que liga los parámetros del tiempo que pueda tolerar un organismo y de la intensidad de corriente tolerable:

$$\text{Personas de 50Kg} : \quad I_c = \frac{0.116}{\sqrt{ts}} \quad (6)$$

$$\text{Personas de 70Kg} : \quad I_c = \frac{0.157}{\sqrt{ts}} \quad (7)$$

I_c (A)	Valor afectivo de la corriente que circula por el cuerpo
t (s)	Tiempo de duración del choque eléctrico

2.12. Voltaje de paso

La desigualdad de voltaje entre un punto y otro del terreno del suelo, esto es muy importante para la seguridad en las instalaciones eléctricas, ya que estos tipos de descargas pueden ser peligrosas.

Cuando una parte del cuerpo humano, generalmente las manos, toca un objeto bajo tensión, se crea una diferencia de potencial entre esa parte y la que está en contacto con el suelo, lo que permite que la corriente eléctrica fluya por el cuerpo [16].

$$E_{p50} = (1000 + 6Cs * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{ts}} \quad (8)$$

$$E_{p70} = (1000 + 6Cs * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{ts}} \quad (9)$$

2.13. Voltaje de Contacto

Se refiere a la cantidad de tensión que una persona llega a sentir al estar conectada entre la mano y el pie, considerando una distancia de 1 metro. Según la norma IEEE 80, la tensión de toque se define la desigualdad de la potencia entre el punto de la superficie y la estructura, un distanciamiento horizontal equivalente [14].

$$E_{t50} = (1000 + 1.5Cs * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{ts}} \quad (10)$$

$$E_{t70} = (1000 + 1.5Cs * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{ts}} \quad (11)$$

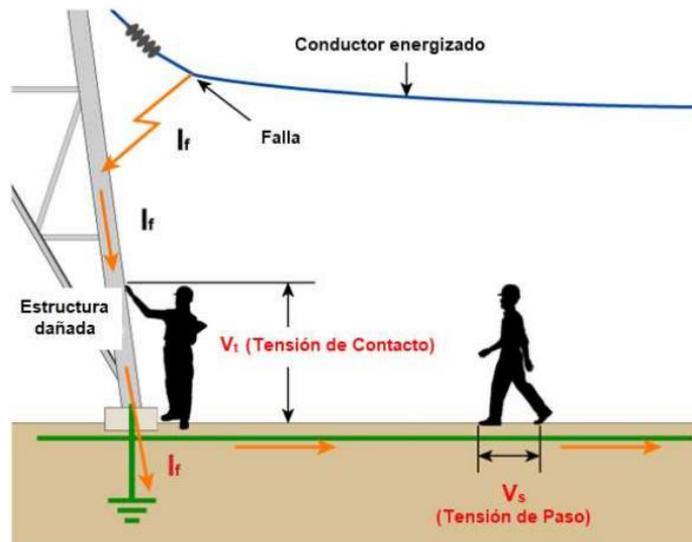


Figura 4: Tensión de Toque o Contacto

Fuente: https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/applications/ground/APP-TouchStepPotential_SP.pdf

2.14. Valores aceptables de las tensiones de paso

Cuando hace falta una buena conexión a tierra, algunos elementos en la estructura pueden presentar tensión. Si una persona o animal los toca, podría pasar una corriente de alto riesgo. Los valores permitidos de la V_{ca} que una persona pueda soportar entre la mano y los pies, dependen del tiempo que dure la corriente de falla. Estos valores se muestran en la siguiente figura:

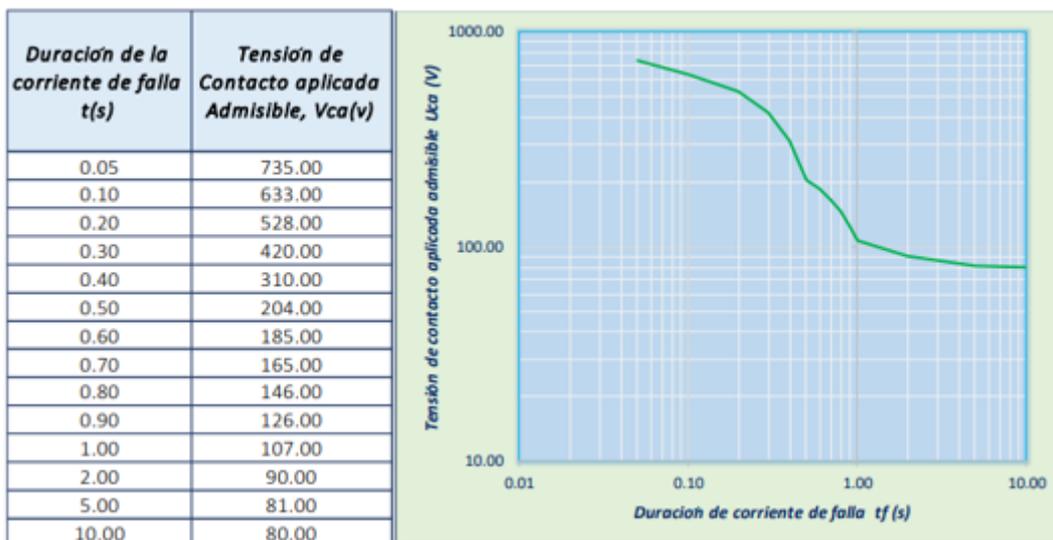


Figura 5: Gráficas V_{ca} vs (t_s) admisible

Fuente: MIE.RAT-13 (2014)

2.15. Criterios de diseño de mallas utilizando la norma IEEE-80

Es esencial instalar un SPT para reducir los gradientes de potencial en el suelo, asegurando que los niveles de tensión no representen un peligro para las personas ni para los equipos, tanto en condiciones normales como durante fallas [12].

2.16. Parámetros críticos

Los parámetros que se presentan a continuación van a depender del sitio de donde se encuentre la subestación; es decir, la locación de la subestación con sus respectivas características de suelo, etc. Esto va a tener un impacto sustancial en nuestro diseño [12].

2.16.1. Corriente máxima para disipar por la malla

La estimación de la corriente máxima de fallo en el diseño, es la que circula desde la malla de la subestación hasta el suelo, se determina mediante la siguiente fórmula según [12].

$$I_g = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (12)$$

2.17. Tipos de Contactos

- a) Contactos directos
- b) Contactos indirectos

2.17.1. Contacto directo

Se produce cuando se produce un contacto con un conductor o cualquier parte activa que esté en mínima tensión. En este caso, la tensión de contacto (VC) se aproxima bastante al valor de la tensión de fase (230 voltios). La corriente que atraviesa por el cuerpo de la persona se encontrará limitada por la resistencia corporal de unos 2500 ohmios [14].

La intensidad que pasará por el cuerpo será:

$$I_{corporal} = \frac{V_c}{R_{corporal}} \quad (13)$$

$$= \frac{230}{2500} = 92 \text{ mA}$$

Una de las formas de protección contra contactos directos será mediante tres formas diferentes:

1. Distanciamiento de las partes que estén activas de la instalación.
2. Interrupción de obstáculos.
3. Cobertura de las partes activas.

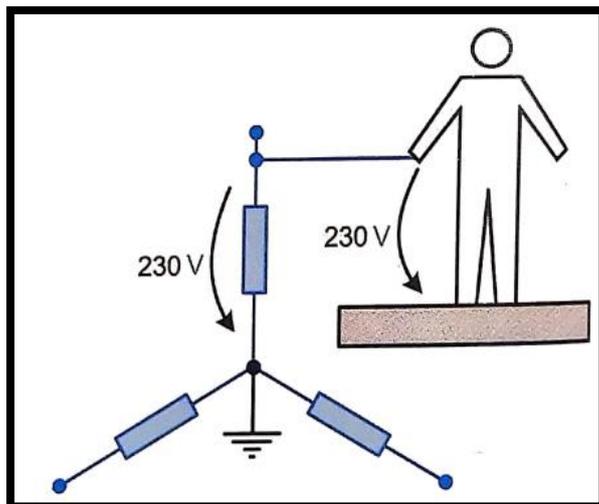


Figura 6: Tensión de contacto en un contacto directo

Fuente: Gallardo Vázquez (2016) España

2.17.2. Contacto indirecto

Cuando un individuo está en contacto con una parte metálica o envolvente de un equipo que, debido a un fallo de aislamiento, está accidentalmente bajo tensión [14].

Como resultado del fallo, una de las fases puede entrar en contacto con la carcasa del equipo, lo que genera una resistencia (R_i) debido a la carcasa, pintura, entre otros factores. Este fallo en el aislamiento da lugar a una corriente de defecto (I_d) y una tensión de contacto (V_C), que se calculan de la siguiente manera:

$$I_d = \frac{V}{R_i + R_T} \quad (14)$$

$$V_C = R_T * I_d \quad (15)$$

$$V_C = R_T * \frac{V}{R_i + R_T} \quad (16)$$

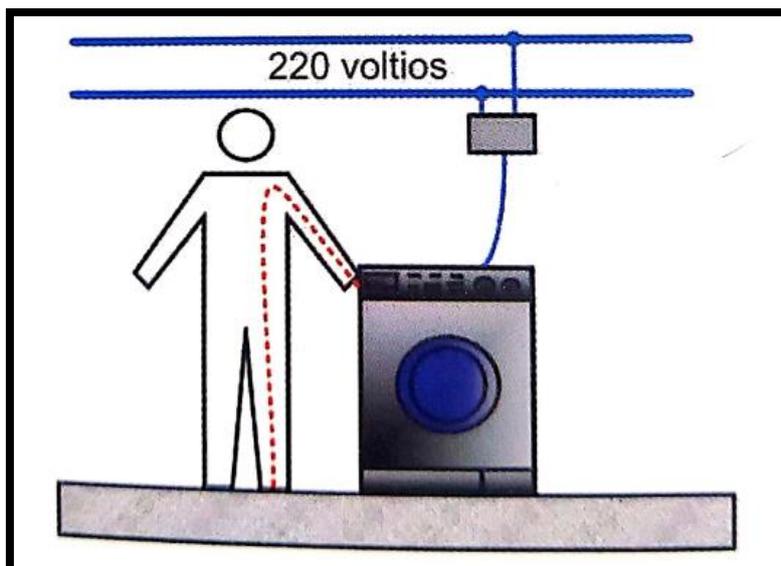


Figura 7: Tensión de contacto indirecto

Fuente: Gallardo, S. (2016)

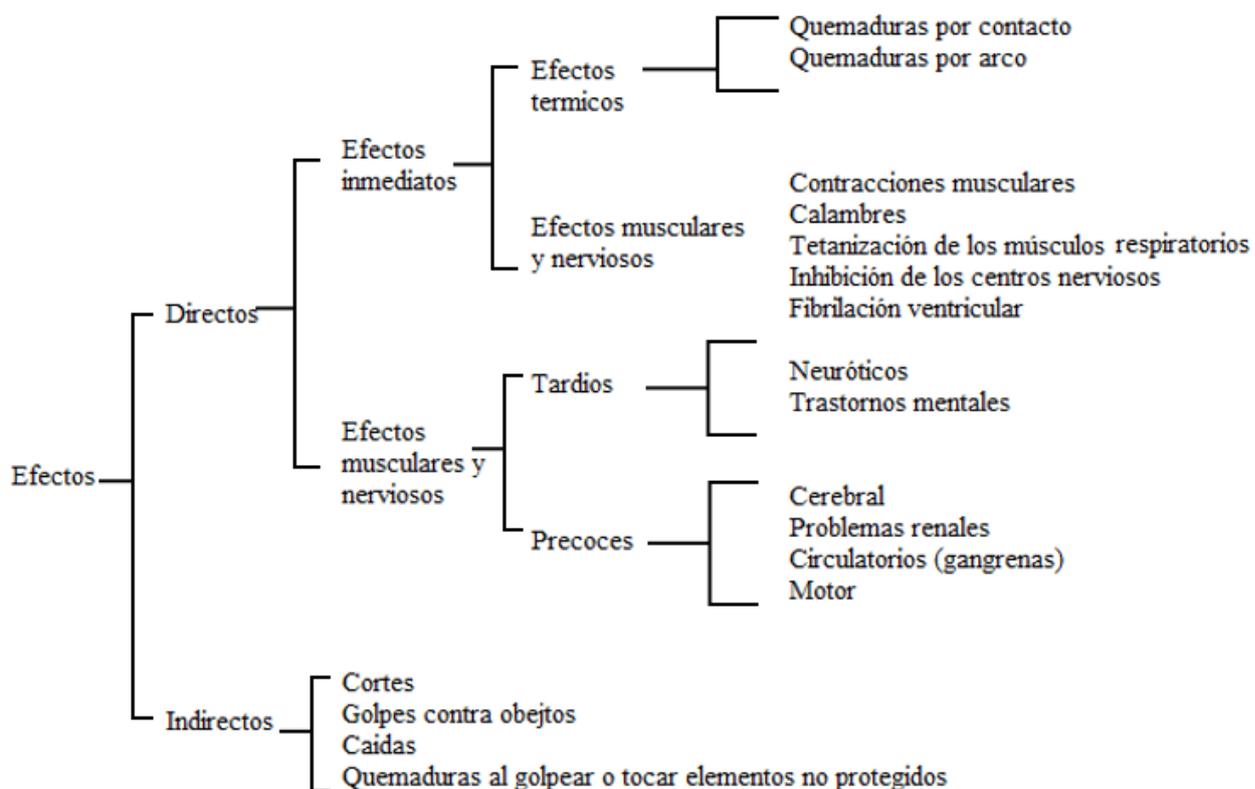


Figura 8: Principales efectos directos e indirectos de la corriente eléctrica

Fuente: Gallardo, S. (2016)

2.18. Sistemas de protección considerados en la ITC-BT-24 del REBT

Protección contra contactos eléctricos directos	Por recubrimiento elementos operativos
	Por medio de barreras o envolventes
	Por alejamiento
	Mediante interruptores diferenciales
Protección contra contactos eléctricos indirectos	Por corte automático de la instalación
	Por empleo de equipos de clase II
	Por separación eléctrica de circuitos
	Por conexión equipotencial local.

Tabla 1: Resumen de los sistemas de protección

2.19. Efectos que produce la corriente eléctrica

De acuerdo con [14], se producen los siguientes efectos por consecuencias de la corriente eléctrica en el cuerpo:

- ✓ Umbral de percepción

Se sitúa entre 1 y 3 miliamperios (mA), no hay peligro alguno y él se puede mantener el contacto sin problema.

- ✓ Electrización

Se sitúa entre 3 y 10 mA, el individuo es un componente del circuito eléctrico, identificando dos puntos de contacto: uno por donde entra la corriente y otro por donde sale. Provocando sensación de hormigueo.

- ✓ Tetanización

Se sitúa a partir de 10 mA, produciendo movimiento involuntario de los componentes musculares debido al paso de la corriente de los músculos en las manos y los brazos.

- ✓ Paro respiratorio

Se sitúa a partir de 25 mA, si la corriente atraviesa la cabeza podría afectar al centro respiratorio.

- ✓ Asfixia

Se sitúa entre 25 y 30 mA, sucede cuando la corriente afecta el centro nervioso que regula la respiración, lo que puede llevar a un paro respiratorio.

- ✓ Paro respiratorio

Se sitúa a partir de 35 mA, si la corriente atraviesa la cabeza podría afectar al centro respiratorio.

2.20. Efectos que produce la corriente eléctrica

INTESIDAD EFICAZ A 50-60 Hz(mA)	DURACION DEL CHOQUE ELECTRICO	EFFECTOS FISIOLOGICOS EN EL CUERPO HUMANO
0 a 1	Independiente	Umbral de percepción. No se siente el paso de corriente
1 a 15	Independiente	Desde cosquilleos hasta tetanización muscular. Imposibilidad de soltarse
15 a 25	Minutos	Irregularidades cardíacas. Aumento presión arterial. Fuerte efecto de tetanización inconsciencia. Aparece fibrilación ventricular
25 a 50	Segundos a minutos	Irregularidades cardíacas. Aumento presión arterial. Fuerte efecto de tetanización inconsciencia. Aparece fibrilación ventricular
50 a 200	Menos de un ciclo cardiaco	No existe fibrilación ventricular. Fuerte contracción muscular
	Mas de un ciclo cardiaco	Fibrilación ventricular. Inconsciencia. Marcas visibles.
Por encima de 200	Menos de un ciclo cardiaco	Fibrilación ventricular, inconsciencia, marcas visibles. El inicio de la electrocución depende de la fase del ciclo cardiaco. Iniciación de la fibrilación sol
	Mas de un ciclo cardiaco	Paro cardiaco reversible, Inconsciencia, marcas visibles y quemaduras

Tabla 2: Efecto de la corriente eléctrica

2.20.1. Valores tolerables por el cuerpo humano

Efectos de la corriente eléctrica en humanos MIL-STD-454		
Valor de la corriente en Ma		Efectos
60 Hz AC	DC	
0 a 1	0 a 4	Percepción
1 a 4	4 a 15	Sorpresa
4 a 21	15 a 80	Acción refleja
21 a 40	80 a 160	Inhibición muscular
40 a 100	160 a 300	Bloqueo respiratorio, quemaduras
Mas de 100	Mas de 300	Muerte

Tabla 3: Efectos de la corriente eléctrica en humanos

✓ Umbral de percepción

Representa la intensidad mínima de corriente que genera una percepción en el cuerpo del individuo.

✓ Umbral de reacción

Representa el valor mínimo de corriente que causa contracciones musculares en el individuo.

✓ Umbral de no soltar

Es la cantidad máxima de corriente que puede permitir a una persona soltar unos electrodos, dependiendo del tiempo que esté expuesta.

✓ Umbral de fibrilación ventricular

Menor valor de la intensidad que produce una fibrilación ventricular que esto ocasiona principalmente la muerte por choque eléctrico.

2.21. Impedancia del cuerpo humano

- El organismo de la persona presenta una oposición al encontrarse con al paso de la corriente, este parámetro no tiene valor constante ya que puede variar en función del valor de la tensión de contacto, la frecuencia, la temperatura, si la piel está húmeda, la presión [14].

La sangre, la piel como los músculos ofrecen una impedancia al paso de la corriente, que está compuesta por elementos resistivos y capacitivos.

2.21.1. Impedancia interna

Está conformada entre el tronco y las extremidades envueltas en el contacto, excluyendo la impedancia de la piel. Trayectos mano-mano o mano-pie se presenta por una resistencia de 500 ohmios en el 95% de la población.

2.21.2. Tabla del valor de la resistencia del cuerpo humano en función de los puntos de la trayectoria de la corriente

Trayectoria	Piel mojada	Piel húmeda
Mano-mano	1000 Ω	650 Ω
Mano-pie	1000 Ω	650 Ω
Mano-2pies	750 Ω	487 Ω
2 manos-2pies	500 Ω	325 Ω
Pie-pie	1000 Ω	650 Ω
2 manos-pecho	250 Ω	162 Ω

Tabla 4: Tabla del valor de la resistencia del cuerpo humano en función de los puntos de la trayectoria de la corriente.

2.21.3. Impedancia en la piel

El circuito se representa como una resistencia con un condensador en paralelo, que se corresponde con el efecto resistivo de la epidermis. El valor de esta impedancia es sumamente variable ya que depende de agentes externos como la humedad de la piel o su temperatura [14].

La piel húmeda y seca tienen diferentes resistencias en el cuerpo ya que si hablamos de la piel seca que contiene una gran resistencia desde los 4000 Ohmios. Por otro lado, en el caso de la piel húmeda podría llegar a reducirse sus niveles de resistencia hasta los 1500 Ohmios [19].

2.21.4. Tabla de la impedancia total del cuerpo para trayecto mano a mano, a 50 hertzios y superficie de contacto considerable

Tensión de contacto (voltios)	Impedancia total del cuerpo humano		
	5% de la población	50 % de la población	95% de la población
25 v	6100 Ω	3250 Ω	1750 Ω
50 v	4375 Ω	2625 Ω	1450 Ω
75 v	3500 Ω	2200 Ω	1250 Ω
125 v	2875 Ω	1625 Ω	1125 Ω
220 v	2125 Ω	1350 Ω	1100 Ω
700 v	1500 Ω	1100 Ω	750 Ω
1000 v	1500 Ω	1050 Ω	700 Ω
Valor asintótico	850 Ω	750 Ω	650 Ω

Tabla 5: Tabla de la impedancia total del cuerpo para trayecto mano a mano.

2.22. Influencia de la superficie de contacto

Cuando se aumenta la superficie de contacto se reduce la oposición al paso de la corriente la que presenta la piel, la impedancia total del cuerpo humano disminuye. Este fenómeno se hace menos perceptible conforme aumenta la tensión de contacto, debido a elevadas tensiones de impedancia de los pies es muy pequeña [14].

2.23. Resistividad superficial p_s

Hace referencia a una cobertura que posee una gran resistividad en la superficie, ayuda a reducir una gran parte de corriente que podría pasar a través del cuerpo humano, ya que añade oposición a la robustez natural del cuerpo. Una p_s que cuenta con un grosor desde 0.1 m hasta 0.15 m, la cual se encuentra formada por materiales que cuentan con mayor resistividad [12].

2.24. Factor de reducción de la capa externa

El factor de reducción actúa como un ajuste al calcular la resistencia en el pie cuando está sobre un elemento con un espesor infinito. La norma proporciona un método matemático, que incluye gráficos, para determinar el valor de C_s [12].

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (17)$$

2.25. Concepto de corrientes simétricas y asimétricas

2.25.1. Corrientes simétricas

Las corrientes simétricas son aquellas que se distribuyen de manera uniforme en las tres fases de un sistema trifásico. En un sistema balanceado, las magnitudes y los ángulos de fase de las corrientes son iguales, lo cual indica que no hay componentes desbalanceadas.

Las corrientes simétricas son ideales para el funcionamiento de máquinas eléctricas y otros equipos, ya que esto minimiza las pérdidas y el calentamiento [15].

2.25.2. Corrientes asimétricas

Las corrientes asimétricas, se refiere a una situación en la que la corriente eléctrica en un circuito no es uniforme o no posee la misma magnitud en todas las fases del sistema trifásico, usualmente sucede por cargas desbalanceadas, fallos en el sistema, etc [15].

2.25.3. Corriente simétrica de la falla hacia tierra I_F

A razón de los casos que se presentarán en este proyecto, debemos encontrar las siguientes categorías de falla:

- ✓ Falla – Línea – Línea – Tierra: Se considera una resistencia de falla con valor nulo y la resistencia de conexión a tierra de la subestación, utilizando la siguiente fórmula.

$$(I_F)L - L - T = 3 \cdot I_0 = \frac{3E \cdot Z_2}{Z_1 \cdot (Z_0 + Z_2) Z_2 + Z_0} \quad (18)$$

Según la localización, un fallo sencillo de línea – tierra sucede lo peor si sucede lo siguiente $Z_1 \cdot Z_0 > (Z_2)^2$ en el punto en el que se encuentre la falla, en cuanto a una falla Línea – Línea – Tierra será la peor si se acontece lo siguiente $Z_1 \cdot Z_0 < (Z_2)^2$, es común que en un sistema las impedancias tanto positivas como negativas sean iguales $Z_1 = Z_2$ [12].

- ✓ Falla – Línea – Tierra: Al igual que la falla anterior, procedemos a no tomar en cuenta la resistencia de aquella falla y la resistencia de puesta a tierra en la subestación, dada por la fórmula de a continuación:

$$(I_F)L - T = 3 \cdot I_0 = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (19)$$

2.26. Factor de reducción D_f

Al diseñar una malla, es clave considerar la corriente asimétrica de falla. Esta se obtiene multiplicando la corriente simétrica de falla por un factor de reducción, que se obtiene usando la fórmula correspondiente a [16]:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot t_f}{T_a}}\right)} \quad (20)$$

Mientras que X y R representan en la falla de impedancia subtransitoria de los elementos, los cuales se emplean para calcular la relación X/R, como se muestra en la fórmula siguiente:

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} \quad (21)$$

2.27. Factor de crecimiento C_p

Si se realiza la malla considerando en la subestación el total de su capacidad y no se considera realizar incrementos de carga a futuro, de líneas ni de alimentadores: El C_p tiene un valor de 1, el cual está definido como 100%, el cual será utilizado en el Software de manera porcentual.

2.28. Determinación del factor de división de corriente S_f

Este desarrollo debe basarse en el cálculo de una representación de los cables de guarda, así como los neutros y otros componentes. Deben estar conectados en la subestación y después se tiene que calcular el equivalente para determinar que parte de la corriente de falla fluye entre la malla y el suelo. Que parte pasa a través de los cables de guarda o los neutros hacia las tierras de las torres que entran y salen. El valor de S_f depende de los siguientes factores según [16]:

El factor de división de corriente está dado por:

$$(S_f)_{X/Y} = \left| \frac{(Z_{eq})_X}{R_g + (Z_{eq})_X} \right| \quad (22)$$

Como se muestra en la tabla número 6, el equivalente de las impedancias de uno de los cables de guarda de las líneas de transferencia y los neutros de los alimentadores, considerando una aportación remota del 100% con líneas de transmisión y alimentadores de distribución [16].

Número de líneas de transmisión	Número de neutros de distribución	Zeq (ohms) Rtg=15, Rdg = 25	Zeq (ohms) Rtg = 100, Rdg = 200
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 + 0,165	1,09 + J0,208
2	8	0,15 + J0,10	0,685 + J0,122
2	12	0,10 + J0,07	0,47 + J0,087
2	16	0,08 + J0,055	0,366 + J0,067
4	1	0,45 + J0,16	1,30 + J0,067
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 + J0,053

Tabla 6: Impedancias equivalentes de cables de guarda de líneas de trasmisión y neutro de distribución.

2.29. Duración de la falla t_f y la duración del choque eléctrico t_s

La persistencia de la falla y el tiempo de choque suelen ser iguales, salvo en casos de choques sucesivos, como es el caso de los recierres automáticos. El tiempo de falla (t_f) varía dependiendo de la rapidez de desconexión, siendo más rápido en subestaciones de transmisión y más lento en subestaciones de distribución o industriales. La selección de los tiempos t_f y t_s puede influir en la reducción de las corrientes de falla y las corrientes tolerables para el organismo del individuo. Las estimaciones típicas de t_f y t_s suelen estar entre 0.25 y 1 segundo [12].

2.30. Geometría sobre la malla

Los límites en la red de puesta a tierra dependen de las limitaciones físicas y financieras del sistema. Por estas razones, no es práctico utilizar una placa de cobre en el sistema [16].

- ✓ Las distancias comunes entre conductores (D) se encuentran en el rango de:

$$15 \text{ m} > D > 3 \text{ m}$$

- ✓ La profundidad (h) se encuentra en el nivel de:

$$1.5 \text{ m} > h \geq 3 \text{ m}$$

- ✓ La sección de conductores (ACM) están en el nivel de:

$$500 \text{ MCM} > ACM \geq 2/0 \text{ AWG}$$

- ✓ El ancho del conductor contiene un impacto insignificante acerca del voltaje de la malla.
- ✓ La zona de la malla (A) es el factor clave para determinar la resistencia de la malla (Rg). Cuanto sea superior A, inferior será Rg, lo que a su vez reduce la elevación del potencial de tierra (GPR) [12].

2.31. Elección de la sección del conductor

El aumento de temperatura temporal en un conductor, debido a la corriente de falla que circula a través de él, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$AMCM = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r} * \ln\left(\frac{K_a + T_m}{K_a + T_a}\right)}} \quad (23)$$

Fórmula que se simplifica:

$$AMCM = I_F \cdot K_f \cdot \sqrt{tc} \quad (24)$$

Usualmente, el tamaño del conductor que se seleccione debe ser seleccionado a causa de los factores:

- ✓ Un conductor debe poseer una alta conductancia para evitar caídas de tensión.
- ✓ Debe soportar las tensiones mecánicas y la corrosión a lo largo de una larga vida a la instalación.
- ✓ Requerimiento de acortar la temperatura del conductor.

2.32. Tabla de conductores de la Norma IEEE-80

Descripción	Conductividad Del material %IACS	Factor en 20°C. (1/°C.)	K en =°C (0°C.)	Temperatura de fusión Tm (°C.)	Pr Resistividad a 20°C.	Capacidad térmica TCAP
Cobre, recorrido estirado en caliente	100	0,0039	234	1083	1,72	3,4
Cobre, trefilado comercial	97	0,00381	242	1084	1,78	3,4
Alambre de acero revestido de cobre	40	0,00378	245	1084	4,4	3,8
Alambre de acero revestido de cobre	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Varilla de acero revestido de cobre	17	0,00378	245	1084	10,1	3,85
Alambre de acero revestido de aluminio	20,3	0,0036	258	657	8,48	3,561
Acero, 1020	10,8	0,00377	245	1510	15,9	3,8
Varilla de acero revestida	9,8	0,00377	245	1400	17,5	4,4
Barra de acero recubierto de zinc	8,6	0,0032	293	419	20,1	3,9
Acero inoxidable, 304	2,4	0,013	749	1400	72	4

Tabla 7: Constantes de los materiales conductores

2.33. Elevación del potencial de tierra - (GPR)

El GPR es igual a la corriente máxima de la malla, la cual es multiplicada por la resistencia de la malla [4].

$$GPR = I_g \cdot R_g \quad (25)$$

Un sistema eficiente debe ofrecer una disminución de resistencia al enlazarse con una tierra remota. Con el fin de reducir la elevación del potencial de tierra [12].

2.34. Cálculos simplificados

Sverak formuló la resistencia de una malla a tierra de la siguiente manera:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (26)$$

2.35. Ecuaciones de Schwarz para suelo homogéneo

Schwarz desarrolló un grupo de fórmulas para calcular la resistencia de una malla en los suelos uniformes, que deben incluir una malla horizontal con electrodos verticales, con el fin de calcular la resistencia [12]:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 + 2R_m} \quad (27)$$

Resistencia de tierra de la malla:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left\{ \frac{2L_C}{d_c h} \right\} - \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (28)$$

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2 \quad (29)$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68 \quad (30)$$

Resistencia de las varillas de tierra:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left\{ \frac{8L_C}{d_r} \right\} - 1 \frac{2K_1 L_C}{\sqrt{A}} - \{\sqrt{n_r} - 1\}^2 \right] \quad (31)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left\{ \frac{2L_C}{L_r} \right\} - 1 \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (32)$$

La resistencia total de R1 y R2 será inferior a la resistencia terrestre.

Examinando los dos elementos de manera individual; sin embargo, su valor será superior al de la combinación simultáneamente ($R_m = R1, R_m = R2, R_g = R_m$).

2.36. Determinación de la tensión máxima de la malla

La estimación real del E_m se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m K_i}{L_M} \quad (33)$$

El valor de K_m se calcula con la siguiente expresión:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left[\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d_c} + \frac{(D+2h)^2}{8 \cdot D \cdot d_c} - \frac{h}{4 \cdot d_c} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} * \text{Ln} \left[\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right] \right] \quad (34)$$

En el caso de mallas que tienen varillas de tierra prolongado en el perímetro o varios en las esquinas, el factor de corrección $K_{ii} =$ se establece en 1. Este factor adapta los efectos sobre conductores en las esquinas de la malla. Por otro lado, para mallas que no cuenten con varillas o solo tienen algunas, sin ninguna en las esquinas o en el perímetro, el comportamiento se maneja de manera diferente [12].

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}} \quad (35)$$

K_h es un coeficiente de ajuste sobre la profundidad de la malla:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \text{ con } h_0 = 1m \quad (36)$$

Donde n representa la cantidad de conductores conectados en paralelos para una malla rectangular equivalente.

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (37)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p}; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{a}}}; n_c = \left[\frac{L_x L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x L_y}}; n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 L_y^2}} \quad (38)$$

Para mallas cuadradas: $n = n_a$ ya que $n_b = n_c = n_d = 1$

Mallas rectangulares: $n = n_a \cdot n_b$ dado que $n_c = n_d = 1$

Mallas en forma de L: $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c$ puesto que $n_d = 1$

K_i es un factor que se lo define de la siguiente manera:

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (39)$$

Según [12] para mallas que no cuenten con electrodos, o aquellas que solo tienen unos pocos distribuidos por la malla sin estar en las esquinas del contorno, la longitud efectiva enterrada se determina de esta manera L_M es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (40)$$

En el caso de mallas que cuentan con varias varillas de tierra ubicadas en las esquinas y a lo largo del contorno, se calcula de manera específica. L_M es:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left[\frac{L_r}{L_x^2 L_y^2} \right] \right] L_R \quad (41)$$

La tensión real de paso se describe de la siguiente formula:

$$E_p = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_S \cdot k_i}{L_S} \quad (42)$$

La longitud efectiva del conductor enterrado L_S para las mallas con o sin varillas de tierra se calcula mediante:

$$L_S = 0.75 L_C + 0.85 L_R \quad (43)$$

Profundidades de enterramiento de 0,25 metros $< h < 2,5$ metros. El valor de K_S se calcula:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (44)$$

2.37. Medición de resistividad del suelo

Comprender la resistividad específica del terreno es clave para diseñar y analizar un sistema, ya que afecta directamente los valores de resistencia y las tensiones en la instalación. Por eso, es crucial conocer la resistividad exacta del terreno en cada caso específico para evitar subdimensiones en el sistema, lo que representaría un riesgo para las personas y los equipos, o sobredimensionarlo, lo que generaría costos innecesarios [16].

Generalmente, los terrenos están formados por diferentes capas de minerales dispuestas de manera casi paralela a la superficie. El propósito de medir la resistividad en el área donde se instalará la puesta a tierra es conocer esta propiedad para cada capa presente y su espesor promedio, hasta la profundidad relevante. Para obtener estos parámetros, se utiliza una técnica de medición en profundidad llamada sondeo eléctrico.

2.38. Medición de Wenner o de los 4 puntos

El método más confiable para obtener una medición precisa en grandes áreas de los suelos naturales [16].

Este método implica enterrar cuatro electrodos del tipo varilla a una profundidad (b) y alineados en una fila, con una separación de (a) entre ellos, como se muestra en la siguiente figura 9.

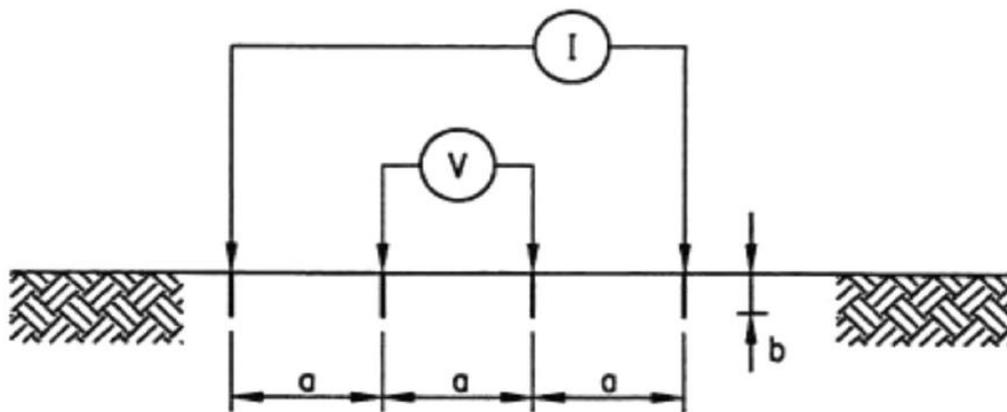


Figura 9: Método de Medición - Wenner (4 puntos)

Fuente: <https://www.epm.com.co/content/dam/epm/proveedores-y-contratistas/RA6-014.pdf>

Según [16], este método se basa en inyectar una corriente (I) entre dos electrodos exteriores y medir la diferencia de potencial (V) entre dos electrodos internos. Esta medición la realiza un instrumento conocido como telurómetro, que permite calcular la resistencia del suelo mediante la fórmula $R = (V/I)$. A partir de esta resistencia medida, se puede aplicar una fórmula para determinar la resistividad aparente del suelo, que se expresa en $\Omega\cdot m$.

$$\rho_a = \frac{4\pi Ra}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)} \quad (45)$$

Si sucede que $b \ll a$ lo cual es el caso más común, se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho_a = 2\pi Ra \quad (46)$$

2.39. Algoritmo de diseño según IEEE80

Paso 1

Para obtener una estimación del área de la malla, el plano de la subestación deberá proveer la información suficiente. La medición de la resistividad del terreno dará información sobre el modelo del suelo y valores de resistividad.

Paso 2

Con base en las ecuaciones son determinadas las dimensiones del conductor. La corriente de falla $3I_0$ debe representar la I pico esperada, la cual será transportada por algún conductor dentro del sistema de puesta a tierra. La duración t_s , por su parte, debe corresponder al tiempo máximo permitido para resolver la falla.

Paso 3

Determinar las (Et_{50}, Ep_{50}) . Se deberá elegir el tiempo t_s con un adecuado análisis del sistema.

Paso 4

El diseño inicial debe contemplar un anillo conductor que rodee completamente la zona de la estructura, junto con los conductores necesarios para garantizar un acceso adecuado a las conexiones aterrizadas de los equipos. Las primeras estimaciones sobre la separación entre los conductores y la posición de las varillas de tierra deben basarse en la corriente I_G y el área que se está conectando a tierra D, D, L_c, L_l, n .

Paso 5

Se determina la resistencia de puesta a tierra en un terreno homogéneo. Para el diseño definitivo es necesario realizar cálculos precisos, teniendo en cuenta las varillas de tierra si es el caso R_g, R_c, L_R .

Paso 6

Se determina I_G que debe fluir a través de la malla para evitar sobredimensionamiento de la misma en el sistema. Para este cálculo, se considera únicamente la porción de la corriente total de falla $3I_0$ que circula por la malla hacia una zona distante. La corriente I_G debe reflejar el tipo de falla más severa y su ubicación, así como el factor de reducción y cualquier posible expansión futura de la subestación I_G, t_f .

Paso 7

Dado que el GPR del diseño inicial es menor que la tensión de referencia tolerable para el contacto, no es necesario realizar más cálculos. Solo se requerirá un conductor adicional para facilitar el acceso a las bajantes del equipo. $I_G R_g < Et_{50}$.

Paso 8

Si la condición previa no cumple, se debe calcular el voltaje de la malla y el voltaje de paso para una malla en un terreno uniforme, $E_M, E_S, K_m, K_S, K_i, K_{ii}, K_h$.

Paso 9

Si el voltaje de la malla estimada es inferior a la tensión de toque tolerable, se necesita la aplicación de la tensión de malla estimada supera la tensión de toque tolerable, el diseño tiene que ser modificado. $E_m < Et_{50}$.

Paso 10

Si las tensiones de toque y paso obtenidas son inferiores a los niveles tolerables, el diseño solo requerirá ajustes a fin de asegurar un acceso adecuado a las conexiones de los equipos. En caso contrario, será necesario realizar modificaciones en el diseño original. $E_s < E_{p50}$.

Paso 11

Si las tensiones de toque y paso exceden los niveles tolerables, será imprescindible evaluar el sistema. Esta evaluación puede implicar reducir la distancia entre los conductores, incorporar varillas adicionales, entre otras medidas.

Paso 12

Al terminar de cumplir con los requisitos referentes a tensiones de paso y de toque, el diseño podría precisar ser refinado si no incluye conductores próximos al equipo que se quiere conectar a tierra. Puede ser necesario incorporar varillas adicionales en los neutros de transformadores, entre otros aspectos.

2.40. Excel

El uso de Excel para cálculos de una malla a tierra representa una herramienta fundamental en la ingeniería eléctrica, especialmente cuando se trata de garantizar la seguridad y eficiencia en las instalaciones de sistemas de puesta a tierra.

Excel se presenta como una herramienta accesible para realizar estos cálculos de manera eficiente y precisa. A lo largo del proceso de diseño de una malla a tierra, se deben considerar múltiples variables, como la resistividad del suelo, la profundidad, la longitud de los cables, la disposición de los electrodos y la corriente máxima de falla que puede circular por el sistema.



Figura 10: Programa Excel

Fuente: <https://concepto.de/excel/>

2.41. ETAP

El software ETAP es una herramienta avanzada y flexible, empleada globalmente para el análisis y el estudio de sistemas eléctricos [11].



Figura 11: Pantalla del Software ETAP

Fuente: Mendieta Yepes, S. B. Universidad de La Salle, Bogotá (2015).

3. CAPÍTULO III

3.1. Cálculo de corrientes simétricas y asimétricas

Para poder hallar los valores de las corrientes y cortocircuito simétricas al realizar la simulación en estado estacionario, de manera que se pueden obtener los valores de la corriente asimétrica al realizar la simulación en estado transitorio. En esta simulación se debe tener en cuenta los valores de corriente que dependen del instante de inserción de la falla.

A partir de soluciones estacionarias del sistema, se podrá aproximar al comportamiento dinámico desde curvas que involucran la relación X/R (reactancia / resistencia) y el instante de conexión. Moreno. G. O. (2007). “Análisis de fallas y corriente [13].

3.2. Determinación de las corrientes de falla

Para el siguiente cálculo se utiliza los manifiestos de Ramírez y Cano [12] con los datos que están indicados en la figura 12, donde se calcula las impedancias de secuencia positiva y la secuencia cero, a su vez las corrientes simétricas de falla localizadas en la barra de 115 kV y en la barra 13.2 kV.

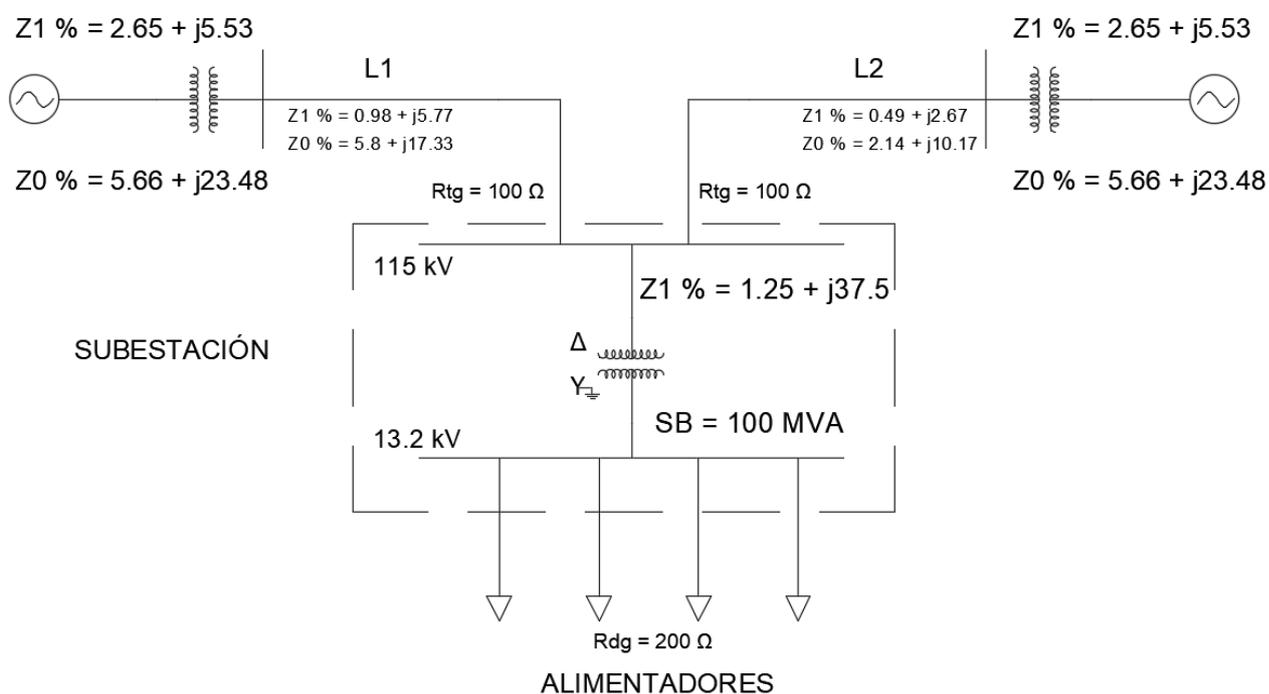


Figura 12: Diagrama unifilar del sistema en estudio

Fuente: Autores

3.2.1. Determinación de la impedancia equivalente de secuencia positiva (Z_1) en AT respecto a la barra de 115 kV

$$\text{Para } L1 : (Z1)_{L1}\% = (2.65 + j5.53) + (0.98 + j 5.77) = 3.63 + j 11.3$$

$$\text{Para } L2 : (Z1)_{L2}\% = (2.65 + j5.53) + (0.49 + j 2.67) = 3.14 + j 8.2$$

$$(Z_1\%)_{AT} = \frac{(Z1)_{L1} * (Z2)_{L2}}{(Z1)_{L1} + (Z2)_{L2}} = \frac{-81.2618 + j 65.248}{6.77 + j 19.5} = 1.695 + j4.756$$

$$Z_B = \frac{\left(\frac{V_B}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{S_B}{3}} = \frac{\left(\frac{115}{\sqrt{3}}\right)^2}{\left(\frac{100 * 10^6}{3}\right)} = 132.25 \Omega$$

$$(Z_1)_{AT} = \frac{(Z_1\%)_{AT}}{100} * Z_B = \frac{1.696 + j 4.756}{100} * 132.25 = 2.242 + j 6.29 \Omega$$

3.2.2. Determinación de la impedancia equivalente de secuencia cero (Z_0) en AT respecto a la barra de 115 kV

$$\text{Para } L1 : (Z1)_{L1}\% = (5.66 + j 23.48) + (5.8 + j 17.33) = 11.46 + j 40.81$$

$$\text{Para } L2 : (Z1)_{L2}\% = (5.66 + j 23.48) + (2.14 + j 10.17) = 7.8 + j 33.65$$

$$(Z_0\%)_{AT} = \frac{(Z_0)_{L1} * (Z_0)_{L2}}{(Z_0)_{L1} + (Z_0)_{L2}} = \frac{-1283.8625 + j703.947}{19.26 + j74.46} = 4.681 + j18.453$$

$$(Z_0)_{AT} = \frac{(Z_0\%)_{AT}}{100} * Z_B = \frac{4.681 + j18.453}{100} * 132.25 = 6.191 + j 24.404 \Omega$$

3.2.3. Determinación de la impedancia equivalente de secuencia positiva (Z_1) en BT respecto a la barra de 13.2 kV

$$(Z_1\%)_{BT} = (Z_1\%)_{AT} + (Z_1\%)_T = (1.695 + j 4.756) + (1.25 + j 37.5)$$

$$(Z_1\%)_{BT} = 2.945 + j 42.256$$

$$Z_B = \frac{\left(\frac{V_B}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{S_B}{3}} = \frac{\left(\frac{13.2}{\sqrt{3}}\right)^2}{100 * \left(\frac{10^6}{3}\right)} = 1.742 \Omega$$

$$(Z_1)_{BT} = \frac{(Z_1\%)_{BT}}{100} * Z_B = \frac{2.945 + j 42.256}{100} * 1.742 = 0.051 + j 0.736 \Omega$$

3.2.4. Determinación de la impedancia equivalente de secuencia cero (Z_0) en BT respecto a la barra de 13.2 kV

$$(Z_0\%)_{BT} = (Z_0\%)_T = 1.25 + j 37.5$$

$$(Z_0)_{BT} = \frac{(Z_0\%)_{BT}}{100} * Z_B = \frac{1.25 + j 37.5}{100} * 1.742 = 0.022 + j 0.653 \Omega$$

3.2.5. Determinación de la corriente simétrica en el lado de AT

$$I_F = (3I_0) = \frac{3V_1}{2(Z_1)_{AT} + (Z_0)_{AT}} = \frac{3 * \left(\frac{115000}{\sqrt{3}}\right)}{2(2.242 + j 6.29) + (6.191 + j 24.404)}$$

$$I_F = \frac{\left(3 * \frac{115000}{\sqrt{3}}\right)}{10.675 + j 36.98} A = 1434.977 - j 4971.541$$

$$|I_F| = 5174.5 A_{sim} \quad y \quad \frac{X}{R} = \frac{36.984}{10.675} = 3.47$$

3.2.6. Determinación de la corriente simétrica en el lado de BT

Es necesario trasladar las impedancias obtenidas de falla desde la barra de AT (115 kV) hacia el lado de 13.2 kV del transformador.

$$(Z_1)_T = \frac{(Z_1\%)_T}{100} * Z_B = \frac{1.25 + j 37.5}{100} * 1.742 = 0.022 + j 0.653 \Omega$$

$$(Z_1)_{BT} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 * (Z_1)_{AT} + (Z_1)_T = \left(\frac{13.2}{115}\right)^2 (2.242 + j6.29) + (0.022 + j0.653)$$

$$(Z_1)_{BT} = 0.052 + j0.736 \Omega$$

$$(Z_0)_T = \frac{(Z_0\%)_T}{100} * Z_B = \frac{1.25 + j 37.5}{100} * 132.25 = 0.052 + j 0.736 \Omega$$

$$(Z_0)_{BT} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 * (Z_0)_{AT} + (Z_0)_T = \left(\frac{13.2}{115}\right)^2 (4.681 + j 18.453) + (0.052 + j 0.736)$$

$$(Z_0)_{BT} = 0.022 + j0.653 \Omega$$

$$I_F = (3I_0) = \frac{3V_1}{2(Z_1)_{AT} + (Z_0)_{AT}} = \frac{3 * \frac{115000}{\sqrt{3}}}{2(0.052 + j 0.736) + (0.022 + j 0.653)}$$

$$I_F = \frac{\left(3 * \frac{115000}{\sqrt{3}}\right)}{0.126 + j 2.125} A = 635.716 - j 10721.398 A$$

$$|I_F| = 10740.2 A_{sim} \quad y \quad \frac{X}{R} = \frac{2.125}{0.126} = 16.87$$

3.3. Modelado considerando un terreno uniforme:

Si se opta por utilizar un modelo de suelo uniforme, lo que resulta bastante debatible en este contexto, debido a la discrepancia que hay entre el valor más alto de ρ_a y el valor más bajo de ρ_a y el valor más bajo de ρ_a . El resultado, implementando la fórmula 20 consistiría en:

$$\begin{aligned}\rho_{aprom} &= \frac{\sum_{i=1}^{15} \rho_{ai}}{n} & (47) \\ &= \frac{3171.88}{15} \\ &= 211.46\Omega - m\end{aligned}$$

3.4. Método estadístico para determinar la resistividad que se debe utilizar en el diseño de la malla de suelos definidos como terreno uniforme:

Se debe usar un modelo de terreno uniforme por la simplicidad de la subestación, es importante tener en cuenta que los valores de ρa medidos a la misma profundidad pueden variar dependiendo de la ubicación. Al realizar las lecturas, se debe aplicar un criterio probabilístico para determinar la resistividad de la malla de la subestación.

El procedimiento que se explica a continuación se basa en la premisa de que los logaritmos naturales de los valores de resistividad en un lugar específico siguiendo una distribución normal:

- 1) Se realizarán las mediciones indicadas en la Tabla 8 a una profundidad específica asumiendo un ejemplo utilizando 8 m en un terreno disponible para una subestación con una disponibilidad de 63m x 84m. Las áreas donde se tomarán las mediciones están señaladas en la Figura 13. Se planificará realizar las mediciones de ρ en 12 ubicaciones diferentes, todas a la misma profundidad.

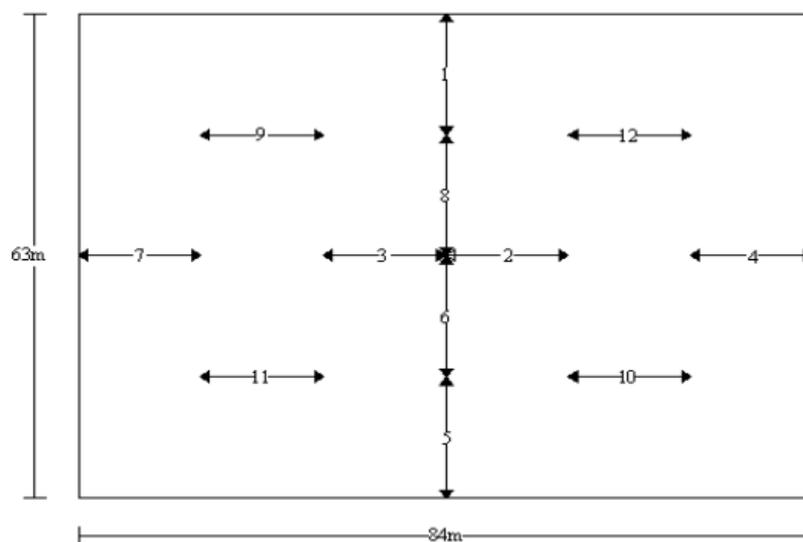


Figura 13: Diseño preliminar de la malla

Fuente: Ramírez, J. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF (2010)

- 2) Se ordenarán de manera descendente las medidas tomadas de ρ para una determinada profundidad y se obtendrán los logaritmos naturales.

$$X_L = \ln \rho_i \quad (48)$$

- 3) Promedio X_{prom} y la desviación estándar (S):

$$X_{prom} = \frac{\sum X}{n} = \frac{68.9407}{12} = 5.7451$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X)^2 - (\sum x)^2/n}{n-1}} \quad (49)$$

$$\sqrt{\frac{396.4373 - \frac{(68.9407)^2}{12}}{12 - 1}} = 0.1831$$

Sitio de medida	P Ω -m	$\chi = \ln \rho$	χ^2	$\chi - \chi_{prom}$	$Z = \frac{\chi - \chi_{prom}}{S}$	P=F(z) *100%
1	392	5,9713	35,6564	0,2262	1,2354	89,25
2	375	5,9269	35,1281	0,1818	0,9929	83,89
3	368	5,9081	34,9056	0,163	0,8902	81,33
4	353	5,8665	34,4158	0,1214	0,663	74,54
5	341	5,8319	34,0111	0,0868	0,4741	68,08
6	328	5,793	33,5588	0,0479	0,2616	60,26
7	317	5,7589	33,1649	0,0138	0,0754	52,79
8	308	5,7301	32,834	-0,015	-0,0819	46,81
9	295	5,687	32,342	-0,0581	-0,3173	37,45
10	270	5,5984	31,3421	-0,1467	-0,8012	21,19
11	250	5,5215	30,487	-0,2236	-1,2212	11,12
12	210	5,3471	28,5915	-0,398	-2,1737	1,5
n = 12		$\sum \chi = 68.9407$ $\sum \chi^2 = 396.4373$				

Tabla 8: Aplicación de la distribución normal para el cálculo

El resultado obtenido de S representa una medición de la variación en la resistividad del terreno, un valor reducido, S representa un indicador de uniformidad.

- 4) La validez de la distribución log-normal para los valores de ρ permite predecir con un grado de precisión razonable, la posibilidad de hallar un terreno con ρ equivalente a un valor específico. Esta probabilidad se establece mediante:

$$\rho = F \left[\frac{\ln X - X_{prom}}{S} \right] \quad \text{ó} \quad \rho = F(z) \quad \text{y} \quad F(-z) = 1 - F(z) \quad (50)$$

Donde:

$$Z = \frac{X - prom}{S} \quad \text{y} \quad \text{asi} \quad P = F(z) * 100\% \quad (51)$$

Los valores de Z se encuentran en la Tabla 8, mientras que los valores de P están en la Tabla 9. Así para cada valor ρ o $\ln \rho$, se puede determinar un porcentaje de probabilidad P; lo que indica que existe una probabilidad P de hallar una resistividad ρ o menor.

- 5) Se emplea un valor de probabilidad de al menos un 70%, lo cual representa de manera significativa la ρ del terreno. Con esta probabilidad, se puede calcular el valor interpolado de Z es de 0.5245. A partir de este valor, junto con el promedio y la desviación estándar correspondiente, se obtiene el valor de Z asociado a ρ mediante:

$$\ln \rho = SZ + X_{prom} \quad (52)$$

$$\rho = \ln^{-1} (SZ + X_{prom}) \quad (53)$$

$$\ln \rho = 0.1831 * 0.5245 + 5.841136 \quad \rho = \ln^{-1} (5.841136) = 344\Omega - m$$

Considerar en cuenta que para $Z \geq 3.5$, $p \approx 1$ o $P = 100\%$

3.5. Distribución normal estándar acumulada

Z	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0,5	0,504	0,508	0,512	0,516	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5436	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5714	0,5714	5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,591	0,5948	0,5957	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,648	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,67	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,695	0,6985	0,7019	0,7054	0,7068	0,7123	0,7157	0,719	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,758	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7851	0,791	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,834	0,8365	0,8389
1	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8656	0,8706	0,8729	0,8749	0,877	0,879	0,881	0,883
1,2	0,8849	0,8869	0,8858	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,898	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9056	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,937	0,9382	0,9394	0,9405	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9465	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9435	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,975	0,9756	0,9761	0,9767
2	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,983	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,985	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,989
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,992	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,994	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,996	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,997	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,998	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9985	0,9986
3	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,999	0,999	0,999
3,1	0,999	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,99992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998

Tabla 9: Distribución normal acumulada

Ejemplos de la utilización de la Tabla 9

Z	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576	3,09	3,291	3,891	4,417
F(z)	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999	0,9995	0,99995	0,999995

Tabla 10: Ejemplo de utilización

- El cálculo visto anteriormente se puede complementar determinando los límites para un nivel particular de confianza mediante:

$$F \left[Z - a \sqrt{\frac{2 + z^2}{2n}} \right] \leq P \leq F \left[Z + a \sqrt{\frac{2 + z^2}{2n}} \right] \quad (50)$$

a	Coeficiente para un nivel particular de confianza.
a	Valor de 1.65 para un 90 % de confianza.
a	Valor de 1.96 para un 95 % de confianza.
n	Numero de lecturas.

Tabla 11: Definiciones de a

Los valores de la función se extraen de la Tabla 9. Así, el rango de probabilidad en el que se puede tener un 90% de confianza de encontrar las resistividades inferiores a 344 Ω -m o superiores a 344 Ω -m usando la ecuación (50) es el siguiente:

$$F \left[0.5245 - 1.65 \sqrt{\frac{2 + (0.5245)^2}{2 * 12}} \right] \leq P \leq F \left[0.5245 + 1.65 \sqrt{\frac{2 + (0.5245)^2}{2 * 12}} \right]$$

$$F(0.0165) \leq P \leq F(1.0325)$$

$$50.8\% \leq P \leq 84.85\%$$

Se consigue:

$$\rho_{min} = \ln^{-1} (SZ_{min} + X_{prom}) = \ln^{-1} (0.1831 * 0.0165 + 5.7451)$$

$$\rho_{min} = \ln^{-1}(5.7481) = 314 \Omega - m$$

$$\rho_{m\acute{a}x} = \ln^{-1} (SZ_{min} + X_{prom}) = \ln^{-1} (0.1831 * 1.0325 + 5.7451)$$

$$\rho_{m\acute{a}x} = \ln^{-1}(5.9342) = 377 \Omega - m$$

Para calcular la malla a tierra, debemos considerar que $\rho = 377 \Omega$ -m, conforme a un modelo de tierra homogénea.

3.6. Caso de estudio N° 1: Malla cuadrada sin electrodos

Datos relativos de la subestación:

Duración de la falla = Duración del choque eléctrico:	$t_f = t_c = 0.5 \text{ seg}$
Resistividad de la roca triturada (mojada):	$\rho_s = 2000 \Omega - m$
Espesor de la capa de roca triturada:	$h_s = 0.102m$
Profundidad de enterramiento:	$h = 0.5m$
Área disponible:	$A = 63m * 84m$
Material del conductor:	Cobre estirado en frío de 97.5% de conductividad
Temperatura ambiente:	$t_a = 40^\circ C$

Tabla 12: Información de campo

Paso 1: Información de campo (A, ρ)

A pesar de que la malla de la subestación abarca un área rectangular de 63 m x 84 m que se define como (5292 m²) en total, en el diseño inicial se opta por una malla cuadrada de 70 m x 70 m, sin incluir varillas.

$$A = 70 * 70 = 4900 \text{ m}^2$$

$$\rho = 377 \Omega - m$$

Paso 2: Tamaño del conductor

Pese a que el fallo en la barra de 13.2 kV no favorece el aumento del potencial de tierra; es decir, el (GPR). Los conectores flexibles y el conductor de la malla deben ser capaces de transportar esta corriente sin sufrir daños.

Falla en la barra de AT: $I_0 = 5174.5 \text{ A}$; $\frac{X}{R} = 3.47$

Falla en la barra de BT: $I_0 = 10740.2 \text{ A}$; $\frac{X}{R} = 16.87$

Factor de decremento empleando la ecuación (20) y (21):

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.04475}{0.5} \left(1 - e^{-\frac{2x0.5}{0.04475}}\right)} = 1.0438$$

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} = 16.87 * \frac{1}{120\pi} = 0.04475$$

If = 1.0438 (10740.2) = 11210.6 A = 11210.6 kA.

El tamaño del conductor, utiliza la ecuación (23):

$$A_{MCM} = 11.2106 \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{3.42}{0.5 * 0.00381 * 1.78}\right) * \ln\left(\frac{242 + 1084}{242 + 40}\right)}} = 56 \text{ MCM}$$

Se emplearon los siguientes datos de la Tabla 7:

$$TCAP = 3.43 \text{ J} / (\text{cm}^3 * ^\circ\text{C}).$$

$$\alpha_r = 0.00381 / ^\circ\text{C a } 20^\circ\text{C}.$$

$$\rho_r = 1.78 \mu\Omega - \text{cm a } 20^\circ\text{C}.$$

$$K_0 = 242^\circ\text{C a } 20^\circ\text{C}.$$

$$T_m = 1084^\circ\text{C}.$$

$$K_f = 7.06.$$

La estimación aproximada se efectúa empleando la ecuación (24):

$$A_{MCM} = 11.2106 * 7.06 * \sqrt{0.5} = 56 \text{ MCM}$$

El conductor más cercano es el N° 2 AWG de cobre, que presenta una conductividad del 97.5%, y tiene un área de 64 MCM. No obstante, debido a requerimientos de resistencia mecánica, se ha determinado que el calibre mínimo es el N° 2/0 AWG, que cuenta con un diámetro de 0.01m y un área de 133.1 MCM.

Paso 3: Criterio de tensiones permisibles para un peso de 50 Kg (Et_{50} , Ep_{50})

Con un espesor de $hs = 0.102 \text{ m}$ de una capa superficial de roca triturada mojada y una resistividad de 2000 Ω -m (Mojada), junto con un suelo cuya resistividad es de 377 Ω -m, el elemento que disminuye la resistividad utilizando la ecuación (17), la resistividad de la capa superficial es:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{377}{2000}\right)}{(2 * 0.102) + 0.09} = 0.75$$

Se toma en cuenta la tensión de paso tolerable Ep_{50} . Esto se calcula utilizando la ecuación (8)

$$Ep_{50} = (1000 + (6 * 0.75) * 2000) * \left(\frac{0.116}{\sqrt{0.5}}\right) = 1640.5 \text{ V}$$

Tensión tolerable de toque Et_{50} . Mediante la ecuación (10):

$$Et_{50} = (1000 + (1.5 * 0.75) * 2000) * \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 533.2 V$$

Paso 4: Diseño inicial de la malla

D	7 m
L_X	70 m
L_Y	70 m
A	70 m * 70 m = 4900 m ²
h	0.5 m

Tabla 13: Dimensión de la malla

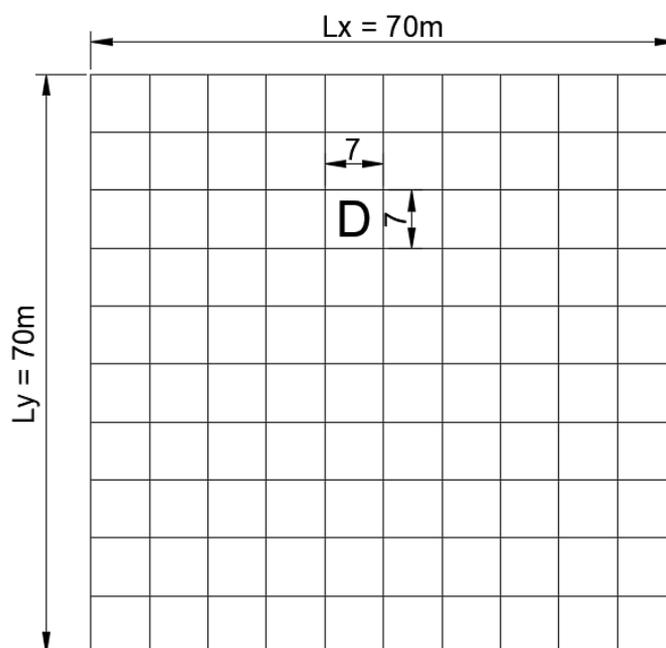


Figura 14: Diseño inicial de la malla – Caso número 1

Fuente: Autores

N° de conductores en el eje X:	$N = 11$
N° de conductores en el eje Y:	$M = 11$
Longitud completa de conductores:	$L_T = L_C = NL_X + ML_Y = 11 * 70 + 11 * 70 = 1540m$
Longitud completa del perímetro:	$L_p = 4L_x = 4 * 70 = 280m$
L_R	0 = no hay varillas de tierra
L_M	$=L_c + L_R = L_C = L_T$

Tabla 14: Medidas de los conductores

Paso 5: Cálculo de la R_g mediante la ecuación (26):

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{1540} + \frac{1}{\sqrt{20 * 4900}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{4900}}} \right) \right] = 2.61609 \Omega$$

Paso 6: Corriente máxima para disipar por la malla (I_G, t_f).

Mediante la ecuación (21):

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} = 3.465 * \frac{1}{120\pi} = 9.19 \times 10^{-3}$$

Factor de decremento empleando la ecuación (20):

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{9.19 E - 3}{0.5} \left(1 - e^{-\frac{2x0.5}{9.19 E - 3}} \right)} = 1.0091$$

Empleando la Tabla 6, utilizando 2 líneas y 4 alimentadores:

$$Z_{eq} \frac{2}{4} = 1.09 + j0.208$$

Factor de división de la corriente empleando la ecuación (22):

$$(S_f)_{\frac{2}{4}} = \left| \frac{1.09 + j 0.208}{1.09 + j 0.208 + 2.616} \right| =$$

$$0.278 + j 0.0531 = 0.284$$

Por medio de la ecuación (12):

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p$$

$$I_G = 1.0091 * 0.284 * 5174.5 * 1 = 1482.93 A$$

Paso 7: Cálculo de (GPR) mediante la ecuación (25):

$$GPR = 1482.93 * 2.616 = 3879.34 V$$

En este caso, el valor de GPR excede el Et_{50} que es de 533.2 V ($GPR > Et_{50}$) por lo que implica que se deben llevar a cabo cálculos adicionales.

Paso 8: Tensión E_m y tensión E_{real} , usando las ecuaciones (37) y (38):

$$n_a = \frac{2Lc}{L_p} = \frac{2 * 1540}{280} = 11$$

$$n = 11$$

Dónde:

L_C	Longitud total de los conductores de la malla horizontal en m
L_P	Longitud del perímetro de la malla en m
L_X	Longitud máxima de la malla en la dirección X, en m
L_Y	Longitud máxima de la malla en la dirección Y, en m
D_m	Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla, en m

Tabla 15: Glosario del paso 8

Por medio de la ecuación (34) se obtiene K_m :

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \ln \left[\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7 + 2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.01} - \frac{0.5}{4 * 0.01} \right] + \frac{0.57}{1.225} \right. \\ \left. * \ln \left[\frac{8}{\pi((2 * 11) - 1)} \right] \right\} = 0.89$$

Por medio de la ecuación (35) se obtiene K_{ii} :

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * 11)^{\frac{2}{11}}} = 0.57$$

Por medio de la ecuación (36) se obtiene K_h :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.225$$

Para hallar el factor de irregularidad, por medio de la ecuación (39):

$$K_i = 0.644 + 0.148(11) = 2.27$$

Por medio de la ecuación (33) encontramos el voltaje de la malla.

$$E_m = \frac{377 * 1482.93 * 0.89 * 2.272}{1540} = 734.07 V$$

Por medio de la ecuación (44) se obtiene K_s :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{-2}) \right] = 0.406$$

Por medio de la ecuación (42) encontramos el voltaje de paso real.

$$E_p = \frac{377 * 1482.93 * 0.406 * 2.272}{0.75(1540) + 0.85(0)} = 446.5 V$$

Paso 9: Comparación E_m VS E_{t50} :

Resultado: El voltaje de la malla supera el voltaje permitido de toque $E_m > E_{t50}$, es decir ($734.07 V < 533.2 V$), por lo cual la malla necesita ser modificada.

El diseño no cumple con las normas por lo tanto debe ser modificado.

3.7. Caso de estudio N° 2: Malla rectangular sin electrodos

Paso 4:

D	7 m
L_X	84 m
L_Y	63 m
A	63m * 84m = 5292 m ²
h	0.5 m

Tabla 16: Dimensión de la malla

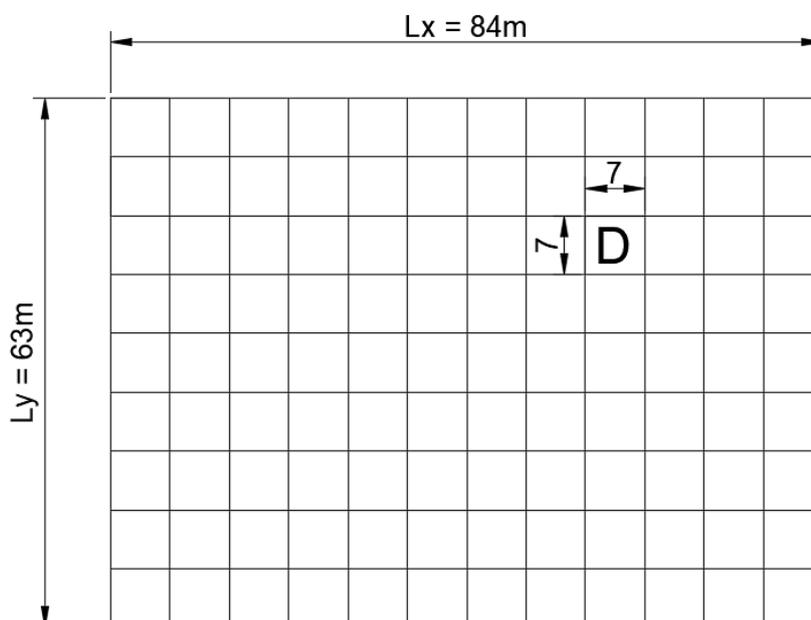


Figura 15: Malla rectangular sin electrodos - Caso número 2

Fuente: Autores

N° de conductores en el eje X:	$N = 10$
N° de conductores en el eje Y:	$M = 13$
Longitud completa de conductores:	$L_T = L_C = NL_X + ML_Y = 10 * 84 + 13 * 63 = 1659m$
Longitud completa del perímetro:	$L_p = 2 * 63 + 2 * 84 = 294 m$
L_R	0 = no hay varillas de tierra
L_M	$=L_C + L_R = L_C = L_T$

Tabla 17: Medidas de los conductores

Los pasos desde el 1 al 3 son iguales del Caso anterior, considerando que cambia la disposición de la malla.

Paso 5: Cálculo de R_g usando la ecuación (26):

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{1659} + \frac{1}{\sqrt{20 * 5292}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{5292}}} \right) \right] = 2.5103 \Omega$$

Paso 6: Cálculo de I_G , mediante la ecuación (21):

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} = 3.465 * \frac{1}{120\pi} = 9.19 \times 10^{-3}$$

Factor de decremento empleando la ecuación (20):

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{9.19 E - 3}{0.5} \left(1 - e^{-\frac{2x0.5}{9.19 E - 3}} \right)} = 1.0091$$

Empleando el factor del caso 1:

$$Z_{eq} \frac{2}{4} = 1.09 + j0.208$$

Factor de división de la corriente empleando la ecuación (22):

$$(S_f)_{\frac{2}{4}} = \left| \frac{1.09 + j 0.208}{1.09 + j 0.208 + 2.5103} \right| =$$

$$0.3051 + j 0.0401 = 0.3077$$

Por medio de la ecuación (12) se obtiene el siguiente resultado:

$$I_G = 1.0091 * 0.3077 * 5174.5 * 1 = 1606.7 A$$

Paso 7: Cálculo de (GPR), usando la ecuación (25):

$$GPR = I_G * R_g = 1606.7 * 2.5103 = 4033.25 V$$

En esta situación, el valor del GPR excede el Et_{50} , que se establece en 533.2 V ($GPR > Et_{50}$), lo que requiere la realización de cálculos adicionales.

Paso 8: Tensión E_m y tensión E_{real} , usando las ecuaciones (37) y (38):

$$n_a = \frac{2Lc}{L_p} = \frac{2 * 1659}{294} = 11.29$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{294}{4\sqrt{5292}}} = 1.005$$

$$n = 11.29 * 1.005 = 11.35$$

Por medio de la ecuación (34) se obtiene K_m :

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \ln \left[\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7 + 2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.01} - \frac{0.5}{4 * 0.01} \right] + \frac{0.5767}{1.225} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi((2 * 11.35) - 1)} \right] \right\} = 0.8872$$

Por medio de la ecuación (35) se obtiene K_{ii} :

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * 11.35)^{\frac{2}{11.35}}} = 0.5768$$

Por medio de la ecuación (36) se obtiene K_h :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.225$$

Por medio de la ecuación (39) se obtiene K_i :

$$K_i = 0.644 + 0.148(11.35) = 2.324$$

Por medio de la ecuación (33) se obtiene E_m :

$$E_m = \frac{377 * 1606.7 * 0.8872 * 2.324}{1659} = 752.81 V$$

Mediante la ecuación (44) se obtiene K_s :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{11.35-2}) \right] = 0.406$$

Por medio de la ecuación (42) encontramos el voltaje de paso real.

$$E_p = \frac{377 * 1606.7 * 0.406 * 2.324}{0.75(1659) + 0.85(0)} = 459.34 V$$

Paso 9: Comparación E_m VS. E_{t50} :

Resultado obtenido: El voltaje de la malla supera el voltaje permitido de toque $E_m > E_{t50}$, es decir ($752.81 V > 533.2 V$), por lo cual la malla necesita ser modificada.

El diseño no cumple con las normas por lo tanto debe ser modificado.

3.8. Caso de estudio N° 3: Malla cuadrada con electrodos en las esquinas

El paso 10 no se ha finalizado correctamente porque no se pudo cumplir con el paso 9. Se utilizan dos modelos para poder ajustar el diseño y cumplir con los valores establecidos E_{t50} , que determine que $E_m < E_{t50}$.

- Disminuir el GPR a un valor menor del ET_{50}
- Disminuir la corriente de falla a tierra y ajustar cualquiera de los valores D, L_c, h mediante la adición de varillas.

En el caso de estudio 3, se modificará el Caso 1 incorporando 20 varillas en las esquinas.

Cada una de 7.5 m, ubicadas alrededor del perímetro de la malla, como se representa en la figura (16).

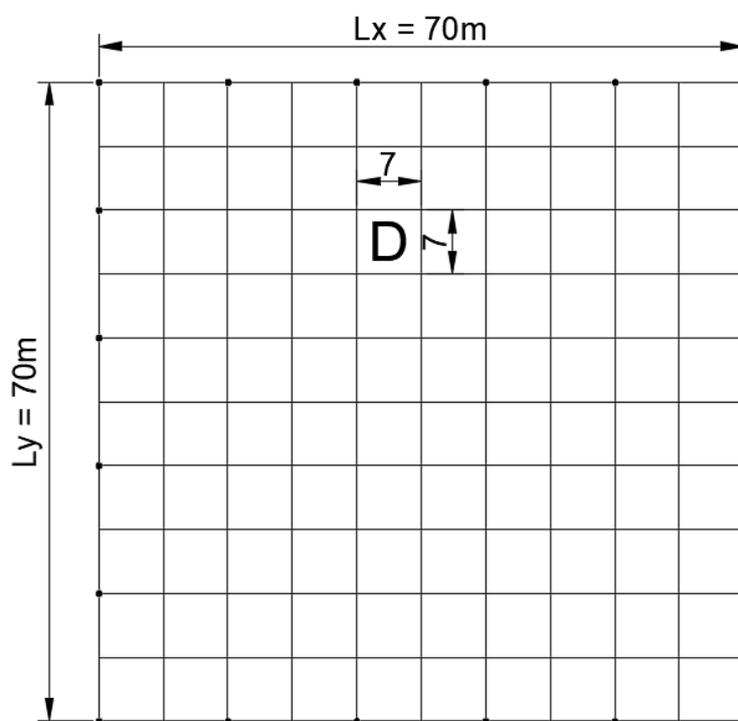


Figura 16: Malla cuadrada con electrodos en las esquinas - Caso número 3

Fuente: Autores

D	7 m	d	0.01
A	4900	N	11
h	0,5m	M	11

Tabla 18: Dimensión de la malla

$$\begin{aligned}
 l_T &= L_C + L_R = NL_X + ML_X + L_R \\
 &= 11 * 70 * + 11 * 70 + 7.5 * 20 \\
 &= 1690 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\text{Con } L_r = 7.5$$

$$\begin{aligned}
 L_R &= n_r * L_r = 7.5 * 20 \\
 &= 150 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$L_C = 1540$$

$$L_p = 4 * 70 = 280 \text{ m}$$

Paso 5: Cálculo de R_g para el caso 3

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{1690} + \frac{1}{\sqrt{20 * 4900}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{4900}}} \right) \right] = 2.594 \Omega$$

Paso 6: Cálculo de I_g para el caso 3

Empleando la Tabla 6, usando el valor de $Z_{eq_{2/4}}$.

Para el factor de división de corrientes se emplea la siguiente ecuación (22):

$$\begin{aligned}
 (S_f)_{\frac{2}{4}} &= \left| \frac{1.09 + j0.208}{1.09 + j0.208 + 2.594} \right| = \\
 &|0.2981 + j0.0396| = 0.307
 \end{aligned}$$

Por medio de la ecuación (12) nos da como resultado:

$$\begin{aligned}
 I_G &= 1.0091 * 0.307 * 5174.5 * 1 \\
 I_G &= 1603.03 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Paso 7: Cálculo del GPR para el caso 3

Mediante la ecuación (25) se obtiene el GPR:

$$GPR = I_G * R_g = 1603.03 * 2.594 = 4158.26 V$$

Resultado:

Excede el valor de la Et_{50} ($4158.26 V > 533.2 V$).

Paso 8: Tensión E_m y tensión E_{real}

$$n_b = n_c = n_d = 1$$

Por medio de la ecuación (37) se obtiene n:

$$n = 11 * 1 * 1 * 1 = 11$$

Por medio de la ecuación (34) se obtiene K_m :

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \ln \left[\frac{7^2}{16 * 0.5 - 0.01} + \frac{(7 + 2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.01} - \frac{0.5}{4 * 0.01} \right] + \frac{1}{1.225} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi((2 * 11) - 1)} \right] \right\} = 0.772$$

$$K_{ii} = 1 \text{ para mallas con varillas perimetrales}$$

$$K_h = 1.225 \text{ calculada mediante la ecuación (39)}$$

Por medio de la ecuación (39) se obtiene K_i :

$$K_i = 0.644 + 0.148 (11) = 2.272$$

Por medio de la ecuación (41) se obtiene L_M :

$$\begin{aligned} L_M &= 1540 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}} \right) \right] * 150 \\ &= 1786.36 \end{aligned}$$

Por medio de la ecuación (33) se obtiene E_m :

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{377 * 1603.03 * 0.772 * 2.272}{1786.36} \\ E_m &= 593.4 \text{ V} \end{aligned}$$

Por medio de la ecuación (44) se obtiene K_s :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{11-2}) \right] = 0.406$$

Por medio de la ecuación (42) encontramos el voltaje de paso real.

$$E_p = \frac{377 * 1603.03 * 0.406 * 2.272}{0.75(1540) + 0.85(150)} = 434.7 \text{ V}$$

Paso 9: El valor de E_m sigue siendo mayor que Et_{50} ($593.4 \text{ V} > 533.2\text{V}$).

De manera que la malla debe ser modificada nuevamente.

3.9. Caso de estudio N° 4: Malla rectangular con electrodos

El diseño del Caso 2 se modificará incorporando 38 varillas de 10 cm a lo largo del perímetro.

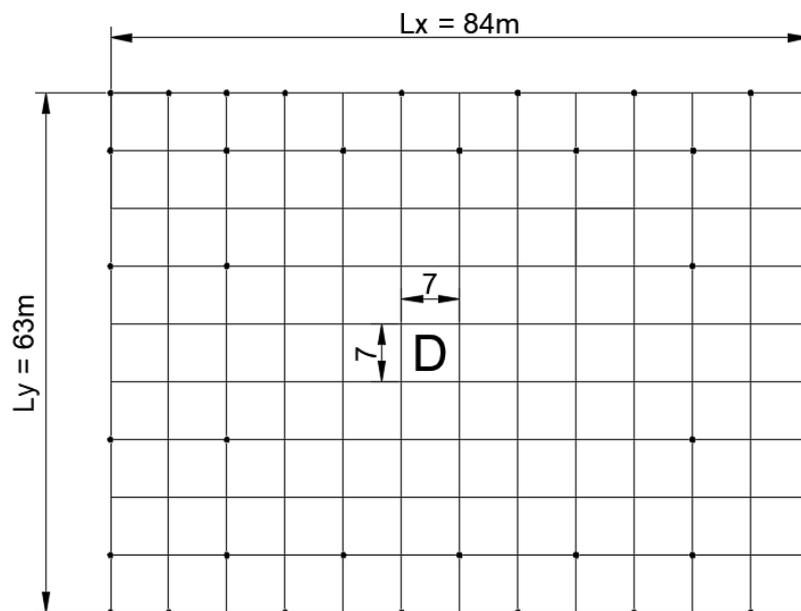


Figura 17: Malla rectangular con electrodos – Caso número 4

Fuente: Autores

D	7 m	d	0.01
A	5292 m ²	N	10
h	0.5 m	M	13

Tabla 19: Dimensión de la malla

$$\begin{aligned}
 l_T &= L_C + L_R = NL_X + ML_Y + L_R \\
 &= 1659 + 380 \\
 &= 2039 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\text{Con } L_r = 10$$

$$\begin{aligned}
 L_R &= n_r * L_r = 38 * 10 \\
 &= 380 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$L_C = NL_X + ML_Y = 10 * 84 + 13 * 63 = 1659 \text{ m}$$

$$L_p = 2 * 84 + 2 * 63 = 294 \text{ m}$$

Paso 5: Cálculo de R_g para el caso 4

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{2039} + \frac{1}{\sqrt{20 * 5292}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{5292}}} \right) \right] = 2.468 \Omega$$

Paso 6: Cálculo de I_g para el caso 4

Empleando la Tabla 6, usando el valor de $Z_{eq_{2/4}}$ al igual que el caso anterior.

Factor de división según la ecuación (22) es:

$$(S_f)_{\frac{2}{4}} = \left| \frac{1.09 + j 0.208}{1.09 + j 0.208 + 2.468} \right| = |0.3087 + j0.0404| = 0.311$$

Mediante la ecuación (12):

$$I_G = 1.0091 * 0.311 * 5174.5 = 1623.91 A$$

Paso 7: Cálculo del (GPR) para el caso 4:

Mediante la ecuación (25):

$$GPR = I_G * R_g = 1623.91 * 2.468 = 4007.80 V$$

Resultado: Excede la Et_{50} ($4007.80V > 533.2 V$)

Paso 8: Tensión E_m y tensión E_{real}

Por medio de la ecuación (38) se obtiene n_a y n_b :

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} = \frac{2 * 1659}{294} = 11.29$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{294}{4\sqrt{5292}}} = 1.005$$

Por medio de la ecuación (37) se obtiene n:

$$n = 11.29 * 1.005 * 1 * 1 = 11.35$$

$$K_{ii} = 1 \text{ y } K_r = 1.225$$

Por medio de la ecuación (34) se obtiene K_m :

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \ln \left[\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7 + 2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.01} - \frac{0,5}{4 * 0,01} \right] + \frac{1}{1.225} \cdot \ln \left[\frac{8}{\pi((2 * 11.35) - 1)} \right] \right\} = 0.767$$

Por medio de la ecuación (34) se obtiene K_i :

$$K_i = 0.644 + 0.148 (11.35) = 2.324$$

Por medio de la ecuación (34) se obtiene E_m :

$$E_m = \frac{377 * 1623.91 * 0.767 * 2.324}{1659 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{10}{\sqrt{63^2 + 84^2}} \right) \right] * 380} = 476.1 V$$

Dado que ($476.1 < 533.2V$), $E_m < E_{t50}$ es menor, se procede a calcular la tensión de paso real empleando las ecuaciones (42) y (44):

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{11.35-2}) \right] = 0.406$$

$$E_p = \frac{377 * 1623.91 * 0.406 * 2.324}{0.75(1659) + 0.85(380)} = 368.6 V$$

Paso 9: Ahora observamos que $E_m < E_{t50}$, con el valor de E_m obtenido concluimos que ($476.1 V < 533.2 V$).

Paso 10: Se observa que $E_p < E_{p50}$ considerando que ($368.6 V < 1640.5 V$).

Paso 11: Las alteraciones al diseño no son imprescindibles. Se halló la respuesta.

Paso 12: Se ha conseguido un diseño exitoso. En esta etapa, es necesario finalizar todos los conectores flexibles, las varillas adicionales, así como las conexiones entre los postes y la puerta de acceso, para asegurar que se aborden todos los aspectos del diseño.

3.10. Cálculos de Excel – Caso 1

Datos del Suelo: Roca triturada (Mojada)

ρ	377	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	2000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,5	m	(Profundidad de la capa superficial)

Figura 18: Datos del suelo

Fuente: Autores

Geometría de la malla

Ver Diagrama

Largo (X):	70	m	Cantidad de varillas:	0	
Ancho (Y):	70	m	Largo:	1	m
Área:	4900	m^2	Sin varillas en las esquinas		
Espacio Vertical (Ey)	7	m	LR:	0	m
Espacio Horizontal (Ex)	7	m	↓		
Conductores verticales:	11				
Conductores Horizontales:	11		Lm:	1540,00	m
Lc:	1540	m (Longitud total de la malla)	Lt:	1540,00	m
h:	0,50	m (Profundidad de la malla)			

Figura 19: Geometría de la malla

Fuente: Autores

Parámetros eléctricos

Ts: s (Tiempo de duración de la falla)
 3I0: 5174,50 A (3X I0 Corriente de falla)

[Calcular](#)

Figura 20: Parámetros eléctricos

Fuente: Autores

Conductor de la malla

Tipo:	Cobre Comercial	
Conductividad:	97 % respecto al cobre puro	} IEEE 80-2013 Sec 11.3 Tabla 1 Con temperatura de referencia 20°C
Factor ar:	0,00381 @20°C [1/°C]	
K0 a 0°C:	242	
Tm:	1084 [°C] (Temperatura de fusion)	
pr a 20°C:	1,78 [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	
TCAP:	3,42 [J/cm ³ ·°C] Capacidad termica	
Tipo de Union:	Soldada	
Temp Max de la Union:	450 °C	
Ta:	40 °C (temperatura ambiente)	
Akcmil:	25,85 kcmil	} Características mínimas del conductor de tierra
Area minima:	13,10 mm ²	
Diámetro mínimo:	0,0041 mm	
Conductor de diseño:	2/0 AWG	
área:	67,42 mm ²	
diámetro:	0,0093 mm	

Figura 21: Conductor de la malla

Fuente: Autores

Factores de paso y toque

K:	-0,68 (factor de reflexión)
Cs:	0,75 (factor de reducción)
Peso de la persona:	50 kg
Es:	1640,49 V (Voltaje de paso Max, para el peso indicado)
Et:	533,16 V (Voltaje de toque Max)

Figura 22: Datos de voltajes permisibles

Fuente: Autores

Resistencia de la malla

Rg: 2,62 Ω (Resistencia de la malla)

Corriente de Malla

IG: 1,48 kA

[Calcular](#)

Incremento de potencial

GPR: 3879,34 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 734,07 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 446,49 V

El Diseño NO cumple con la norma

Figura 23: Resultados obtenidos de la malla (Macro)

Fuente: Autores

3.10.1. Cálculos de Excel – Caso 1 añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL

Datos del Suelo: Roca triturada (Mojada)

ρ	37,7	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	2000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,5	m	(Profundidad de la capa superficial)

Figura 24: Datos del suelo con mejorador FAVIGEL

Fuente: Autores

Resistencia de la malla

Rg: 0,26 Ω (Resistencia de la malla)

Corriente de Malla

IG: 148,29 A

[Calcular](#)

Incremento de potencial

GPR: 387,93 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 73,41 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 44,65 V

El Diseño cumple con la norma

Figura 25: Resultados obtenidos de la malla (Macro)

Fuente: Autores

3.11. Cálculos de Excel – Caso 2

Datos del Suelo: Roca triturada (Mojada)

ρ	377	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	2000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,5	m	(Profundidad de la capa superficial)

Figura 26: Datos del suelo

Fuente: Autores

Geometría de la malla

Ver Diagrama

Largo (X):	84	m	Cantidad de varillas:	0	m
Ancho (Y):	63	m	Largo:	1	m
Área:	5292	m^2	Sin varillas en las esquinas		
Espacio Vertical (Ey)	7	m	LR:	0	m
Espacio Horizontal (Ex)	7	m	↓		
Conductores verticales:	13	} D	Lm:	1659,00	m
Conductores Horizontales:	10		Lt:	1659,00	m
Lc:	1659	m (Longitud total de la malla)	→		
h:	0,50	m (Profundidad de la malla)			

Figura 27: Geometría de la malla

Fuente: Autores

Parámetros eléctricos

Ts: s (Tiempo de duración de la falla)
 3I0: 5174,50 A (3X I0 Corriente de falla)

[Calcular](#)

Figura 28: Parámetros eléctricos

Fuente: Autores

Conductor de la malla

Tipo:	Cobre Comercial	
Conductividad:	97 % respecto al cobre puro	} IEEE 80-2013 Sec 11.3 Tabla 1 Con temperatura de referencia 20°C
Factor ar:	0,00381 @20°C [1/°C]	
K0 a 0°C:	242	
Tm:	1084 [°C] (Temperatura de fusion)	
pr a 20°C:	1,78 [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	
TCAP:	3,42 [J/cm ³ ·°C] Capacidad termica	
Tipo de Union:	Soldada	
Temp Max de la Union:	450 °C	
Ta:	40 °C (temperatura ambiente)	
Akcmil:	25,85 kcmil	} Características mínimas del conductor de tierra
Area minima:	13,10 mm ²	
Diámetro mínimo:	0,0041 mm	
Conductor de diseño:	2/0 AWG	
área:	67,42 mm ²	
diámetro:	0,0093 mm	

Figura 29: Conductor de la malla

Fuente: Autores

Factores de paso y toque

K:	-0,68 (factor de reflexión)
Cs:	0,75 (factor de reducción)
Peso de la persona:	50 kg
Es:	1640,49 V (Voltaje de paso Max, para el peso indicado)
Et:	533,16 V (Voltaje de toque Max)

Figura 30: Datos de voltajes permisibles

Fuente: Autores

Resistencia de la malla

Rg: 2,51 Ω (Resistencia de la malla)

Corriente de Malla

IG: 1,61 kA

[Calcular](#)

Incremento de potencial

GPR: 4033,25 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 752,81 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 459,34 V

El Diseño NO cumple con la norma

Figura 31: Resultados obtenidos de la malla (Macro)

Fuente: Autores

3.11.1. Cálculos de Excel – Caso 2 añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL

Datos del Suelo: Roca triturada (Mojada)

ρ	37,7	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	2000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,5	m	(Profundidad de la capa superficial)

Figura 32: Datos del suelo con mejorador FAVIGEL

Fuente: Autores

Resistencia de la mallaRg: 0,25 Ω (Resistencia de la malla)**Corriente de Malla**

IG: 160,67 A

[Calcular](#)**Incremento de potencial**

GPR: 403,32 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 75,28 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 45,93 V

El Diseño cumple con la norma*Figura 33: Resultados obtenidos de la malla (Macro)**Fuente: Autores*

3.12. Cálculos de Excel – Caso 3

Datos del Suelo: Roca triturada (Mojada)

ρ	377	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	2000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,5	m	(Profundidad de la capa superficial)

Figura 34: Datos del suelo

Fuente: Autores

Geometría de la malla

Ver Diagrama

Largo (X):	70	m	Cantidad de varillas:	20	m
Ancho (Y):	70	m	Largo:	8	m
Área:	4900	m^2	Con varillas en las esquinas		
Espacio Vertical (Ey)	7	m	LR:	150	m
Espacio Horizontal (Ex)	7	m	↓		
Conductores verticales:	11		Lm:	1786,36	m
Conductores Horizontales:	11		Lt:	1690,00	m
Lc:	1540	m (Longitud total de la malla)	→		
h:	0,50	m (Profundidad de la malla)			

Figura 35: Geometría de la malla

Fuente: Autores

Parámetros eléctricos

Ts:	0,5	s (Tiempo de duración de la falla)
3I0:	5174,50	A (3XI0 Corriente de falla)

Figura 36: Parámetros eléctricos

Fuente: Autores

Conductor de la malla

Tipo:	Cobre Comercial	
Conductividad:	97 % respecto al cobre puro	} IEEE 80-2013 Sec 11.3 Tabla 1 Con temperatura de referencia 20°C
Factor α :	0,00381 @20°C [1/°C]	
K0 a 0°C:	242	
Tm:	1084 [°C] (Temperatura de fusion)	
ρ a 20°C:	1,78 [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	
TCAP:	3,42 [J/cm ³ ·°C] Capacidad termica	
Tipo de Union:	Soldada	
Temp Max de la Union:	450 °C	
Ta:	40 °C (temperatura ambiente)	
Akcmil:	25,85 kcmil	} Características mínimas del conductor de tierra
Area minima:	13,10 mm ²	
Diámetro mínimo:	0,0041 mm	
Conductor de diseño:	2/0 AWG	
área:	67,42 mm ²	
diámetro:	0,0093 mm	

Figura 37: Conductor de la malla

Fuente: Autores

Factores de paso y toque

K:	-0,68 (factor de reflexión)
Cs:	0,75 (factor de reducción)
Peso de la persona:	50 kg
Es:	1640,49 V (Voltaje de paso Max, para el peso indicado)
Et:	533,16 V (Voltaje de toque Max)

Figura 38: Datos de voltajes permisibles

Fuente: Autores

Resistencia de la malla

Rg: 2,59 Ω (Resistencia de la malla)

Corriente de Malla

IG: 1,60 kA

[Calcular](#)

Incremento de potencial

GPR: 4158,26 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 593,39 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 434,67 V

El Diseño NO cumple con la norma

Figura 39: Resultados obtenidos de la malla (Macro)

Fuente: Autores

3.12.1. Cálculos de Excel – Caso 3 añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL

Datos del Suelo: Roca triturada (Mojada)

ρ	37,7	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	2000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,5	m	(Profundidad de la capa superficial)

Figura 40: Datos del suelo con mejorador FAVIGEL

Fuente: Autores

Resistencia de la malla

Rg: 0,26 Ω (Resistencia de la malla)

Corriente de Malla

IG: 160,30 A

[Calcular](#)

Incremento de potencial

GPR: 415,83 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 59,34 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 43,47 V

El Diseño cumple con la norma

Figura 41: Resultados obtenidos de la malla (Macro)

Fuente: Autores

3.13. Cálculos de Excel – Caso 4

Datos del Suelo: Roca triturada (Mojada)

ρ	377	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	2000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,5	m	(Profundidad de la capa superficial)

Figura 42: Datos del suelo

Fuente: Autores

Geometría de la malla

Ver Diagrama

Largo (X):	84	m	Cantidad de varillas:	38	
Ancho (Y):	63	m	Largo:	10	m
Área:	5292	m ²	Con varillas en las esquinas		
Espacio Vertical (Ey)	7	m	LR:	380	m
Espacio Horizontal (Ex)	7	m	↓		
Conductores verticales:	13		Lm:	2292,15	m
Conductores Horizontales:	10		Lt:	2039,00	m
Lc:	1659	m (Longitud total de la malla)	→		
h:	0,50	m (Profundidad de la malla)			

Figura 43: Geometría de la malla

Fuente: Autores

Parámetros eléctricos

Ts:	0,5	s (Tiempo de duración de la falla)
3I0:	5174,50	A (3X I0 Corriente de falla)

Figura 44: Parámetros eléctricos

Fuente: Autores

Conductor de la malla

Tipo:	Cobre Comercial	
Conductividad:	97 % respecto al cobre puro	} IEEE 80-2013 Sec 11.3 Tabla 1 Con temperatura de referencia 20°C
Factor α :	0,00381 @20°C [1/°C]	
K0 a 0°C:	242	
Tm:	1084 [°C] (Temperatura de fusión)	
ρ a 20°C:	1,78 [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	
TCAP:	3,42 [J/cm ³ ·°C] Capacidad termica	
Tipo de Union:	Soldada	
Temp Max de la Union:	450 °C	
Ta:	40 °C (temperatura ambiente)	
Akcmil:	25,85 kcmil	} Características mínimas del conductor de tierra
Area minima:	13,10 mm ²	
Diámetro mínimo:	0,0041 mm	
Conductor de diseño:	2/0 AWG	
área:	67,42 mm ²	
diámetro:	0,0093 mm	

Figura 45: Conductor de la malla

Fuente: Autores

Factores de paso y toque

K:	-0,68 (factor de reflexión)
Cs:	0,75 (factor de reducción)
Peso de la persona:	50 kg
Es:	1640,49 V (Voltaje de paso Max, para el peso indicado)
Et:	533,16 V (Voltaje de toque Max)

Figura 46: Datos de voltajes permisibles

Fuente: Autores

Resistencia de la malla

Rg: 2,47 Ω (Resistencia de la malla)

Corriente de Malla

IG: 1,62 kA

[Calcular](#)

Incremento de potencial

GPR: 4007,78 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 476,09 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 368,58 V

El Diseño cumple con la norma

Figura 47: Resultados obtenidos de la malla (Macro)

Fuente: Autores

3.13.1. Cálculos de Excel – Caso 4 añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL

Datos del Suelo: Roca triturada (Mojada)

ρ	37,7	Ohm/m	(resistividad del suelo)
ρ_s	2000	Ohm/m	(resistividad superficial)
h_s	0,5	m	(Profundidad de la capa superficial)

Figura 48: Datos del suelo con mejorador FAVIGEL

Fuente: Autores

Resistencia de la malla

Rg: 0,25 Ω (Resistencia de la malla)

Corriente de Malla

IG: 162,39 A

[Calcular](#)

Incremento de potencial

GPR: 400,78 V (Incremento de potencial en la malla)

Voltaje de malla

Em: 47,61 V (Voltaje de la malla en falla)

Voltaje de paso

Es: 36,86 V

El Diseño cumple con la norma

Figura 49: Resultados obtenidos de la malla (Macro)

Fuente: Autores

3.14. Elaboración de la malla a tierra en ETAP

3.14.1. Entrada de datos de conductores del Caso 1

Figura 50: Editor del grupo IEEE - Conductores

Fuente: Autores

Tamaño de la malla	Número de conductores:
Lx= 70 metros (m) = 229,7 pies (ft)	Número de conductores en el eje X: 11
Ly= 70 metros (m) = 229,7 pies (ft)	Número de conductores en el eje Y: 11
Conductores	
Profundidad	Tamaño
0,5 metros (m) = 1,64 pies (ft)	2/0 AWG/kCmil
Tipo	
Cobre, estirado duro comercial - 97%	

Tabla 20: Datos para conductores - Caso 1

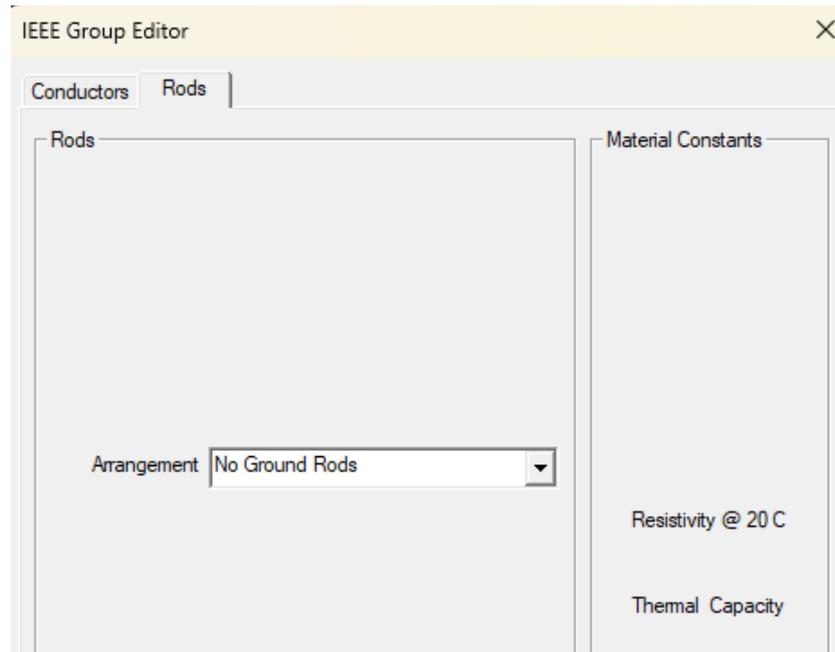


Figura 51: Editor del grupo IEEE - Varillas

Fuente: Autores

En la figura 51 del caso 1, al seleccionar la ventana de varillas nos dirigimos al apartado acuerdo y seleccionamos: sin varillas de tierra.

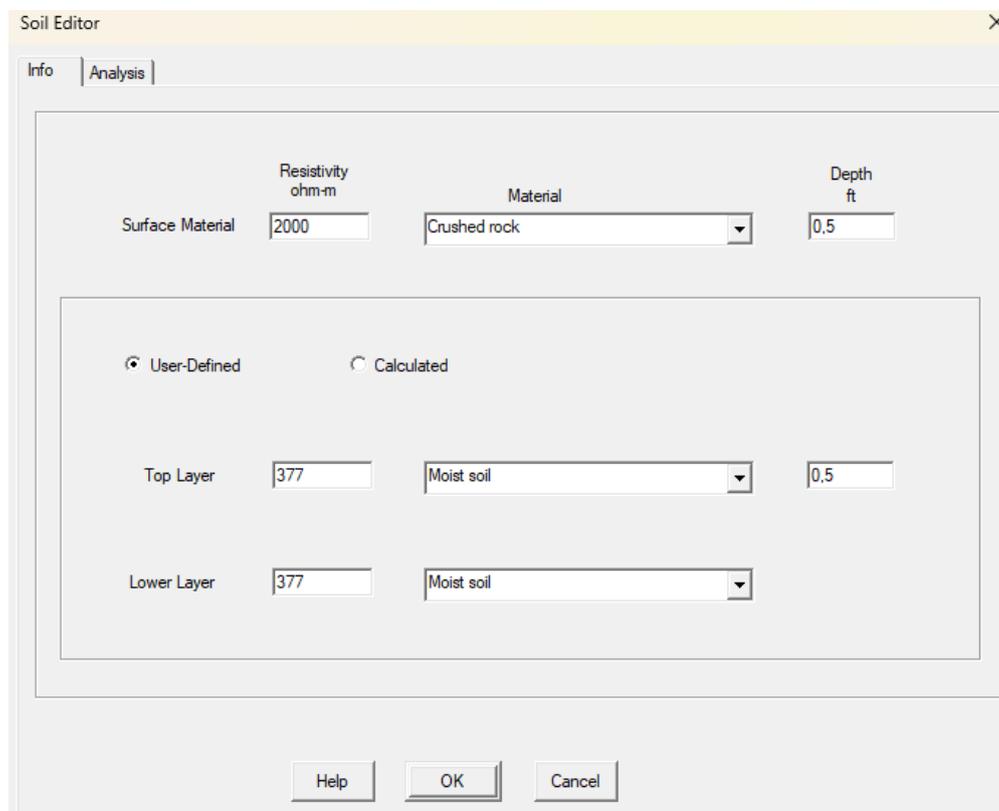


Figura 52: Editor de suelos - Información

Fuente: Autores

Material de la superficie		Material	Profundidad	
2000 resistividad Ω -m		Roca triturada	0,5m	
Definición por el usuario				
Capa superior	377 Ω -m	Tipo de suelo	suelo húmedo	Profundidad
Capa inferior	377 Ω -m	Tipo de suelo	suelo húmedo	0,5m

Tabla 21: Datos del suelo - Caso 1

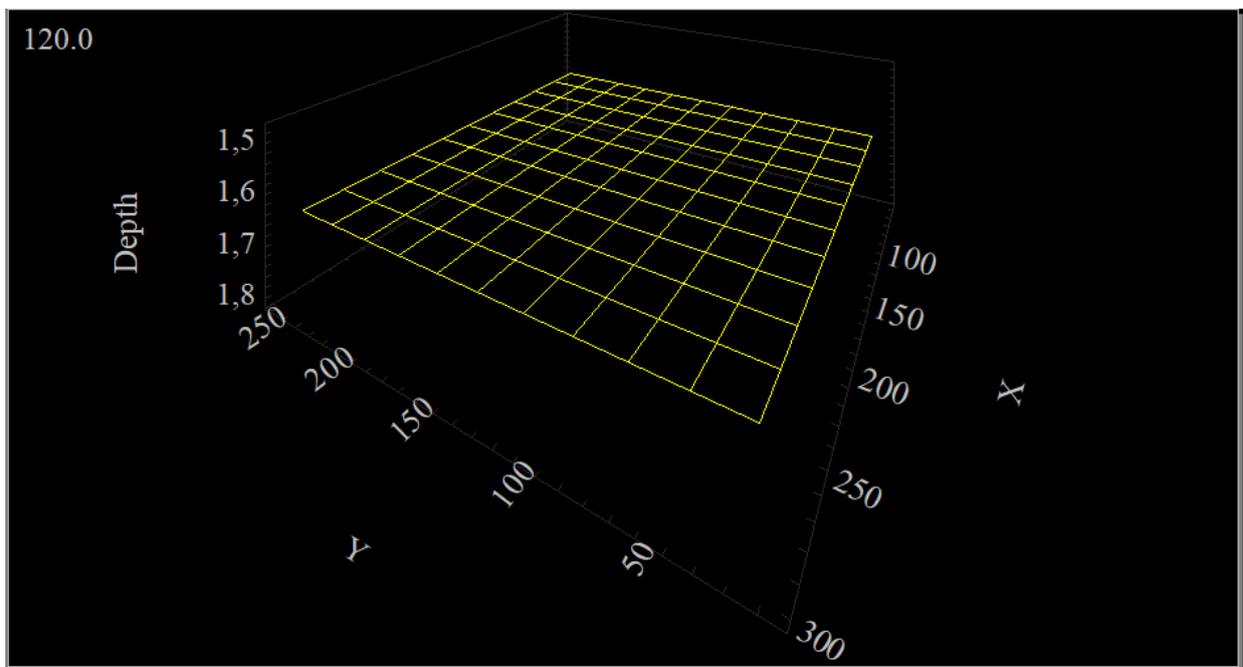


Figura 53: Ubicación de los conductores

Fuente: Autores

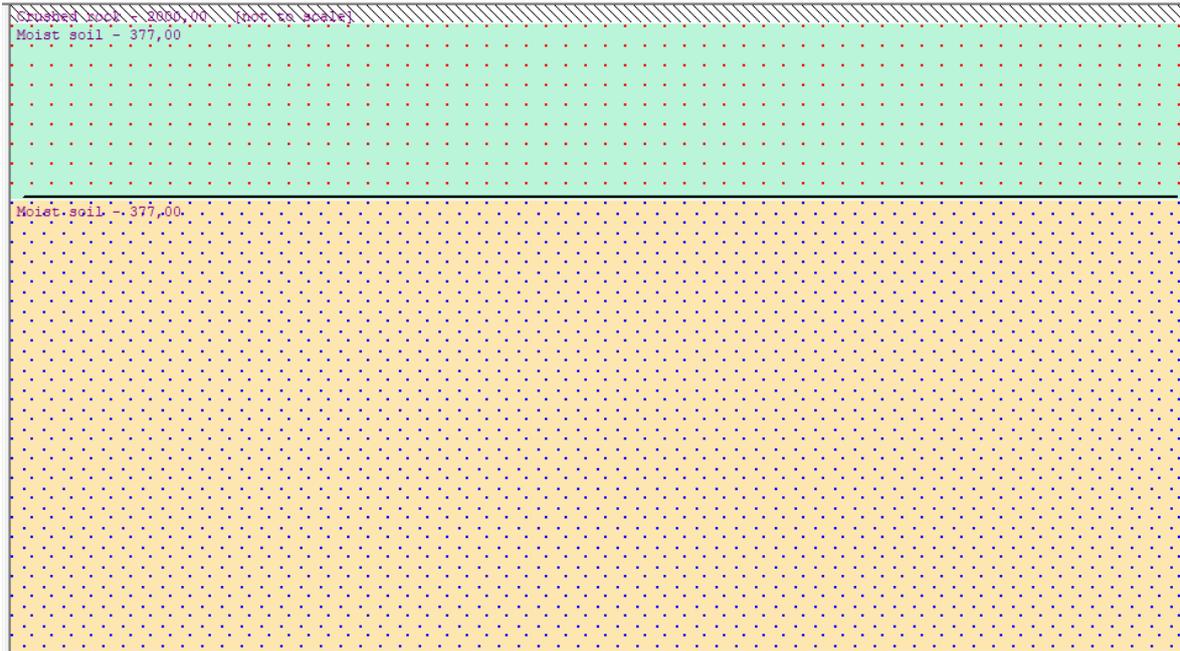


Figura 54: Capas del terreno

Fuente: Autores

GRD Study Case Editor

Study Case

Study Case ID: GRD1

Options: Weight 50 kg 70 kg; Ambient Temperature: 40 °C

Method: Finite Element IEEE 80 - 2000/2013 IEEE 80 - 1986 IEEE 665 - 1995

Update: # of Conductors and Rods (Optimization)

Reports & Plots: Auto Display Summary & Alert Report Details

Fault Durations: tf 0.5 Sec tc 0.5 Sec ts 0.5 Sec

Ground Short-Circuit Current: User Specified Ifg 5.175 kA X/R 3.47 Short-Circuit Study

Grid Current Factors: Sf 28.4 % Cp 100 %

Remarks 2nd line

< GRD1 > Help OK Cancel

Figura 55: Editor de casos de estudio de GRD 1

Fuente: Autores

En la figura 55 del caso 1, podemos observar los parámetros que definimos e ingresamos en el editor de caso de estudio GRD.

Se ingresan los valores de las duraciones de la falla, el valor de la falla simétrica en un valor de Kiloamperios, la relación entre la resistencia y la reactancia $= \frac{X}{R}$, el valor del factor de división de corriente en porcentaje al igual que el valor del factor de crecimiento.

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	743,8	565,2
Step	446,7	1768,5

GPR 3879,4 Volts Rg 2,616 Ohm

Alarm & Warnings
 The maximum Touch Voltage exceeds the tolerable limits

Figura 56: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 1

Fuente: Autores

3.14.2. Caso 1 – Añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL

Top Layer	37,7	Moist soil	0,5
Lower Layer	37,7	Moist soil	

Figura 57: Editor de suelo añadiendo mejorador - FAVIGEL

Fuente: Autores

GRD Analysis Alert View for GRD1

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	74,4	546,1
Step	44,7	1692,3

GPR 387,9 Volts Rg 0,262 Ohm

Alarm & Warnings

Figura 58: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 1 usando mejorador

Fuente: Autores

3.14.3. Entrada de datos de conductores del Caso 2

IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Grid Size

Lx 275,6 ft

Ly 206,7 ft

of Conductors

X Direction 10

Y Direction 13

Material Constants

Conductivity 97,0

Alpha Factor 0,00381

Ko Factor 242

Fusing Temperature 1084

Resistivity @ 20 C 1,78

Thermal Capacity 3,42

Conductors

Depth 1,64 ft

Size 2/0 AWG/kcmil

Type Copper, commercial hard-drawn

Cost 6,3 \$/ft

Help OK Cancel

Figura 59: Editor del grupo IEEE - Conductores

Fuente: Autores

Tamaño de la cuadrícula	Número de conductores:
Lx= 84 metros (m) = 275.6 pies (ft)	Número de conductores en el eje X: 10
Ly= 63 metros (m) = 206.7 pies (ft)	Número de conductores en el eje Y: 13
Conductores	
Profundidad	Tamaño
0,5 metros (m) = 1,64 pies (ft)	2/0 AWG/kCmil
Tipo	
Cobre, estirado duro comercial – 97%	

Tabla 22: Datos para conductores - Caso 2

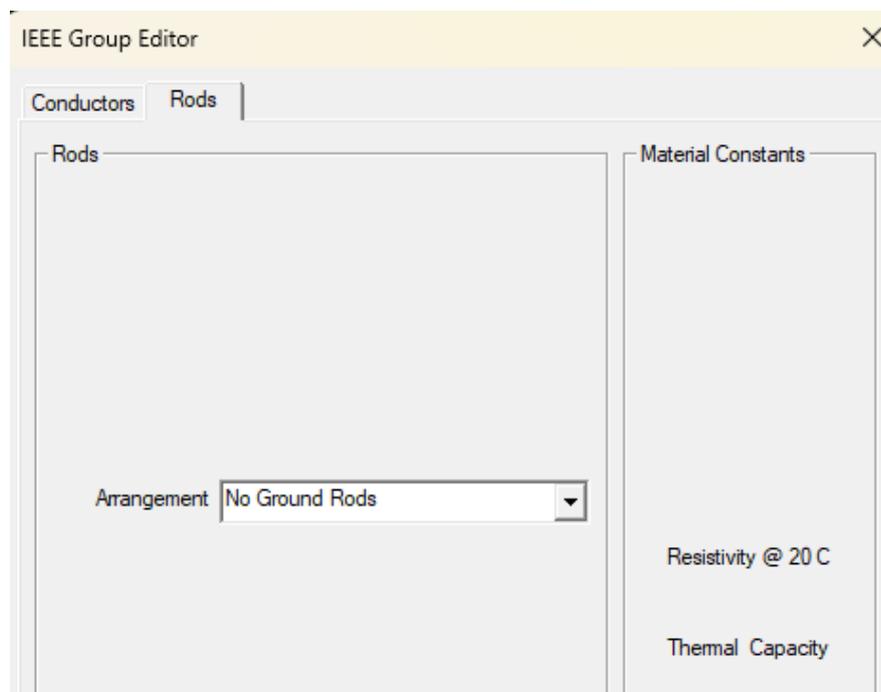


Figura 60: Editor del grupo IEEE - Varillas

Fuente: Autores

En la figura 60 del caso 2, al seleccionar la ventana de varillas nos dirigimos al apartado acuerdo y seleccionamos: sin varillas de tierra.

Figura 61: Editor de suelos – Información

Fuente: Autores

Material de la superficie		Material	Profundidad	
2000 resistividad Ω -m		Roca triturada	0,5m	
Definición por el usuario				
Capa superior	377 Ω -m	Tipo de suelo	suelo húmedo	Profundidad
Capa inferior	377 Ω -m	Tipo de suelo	suelo húmedo	0,5m

Tabla 23: Datos del suelo – Caso 2

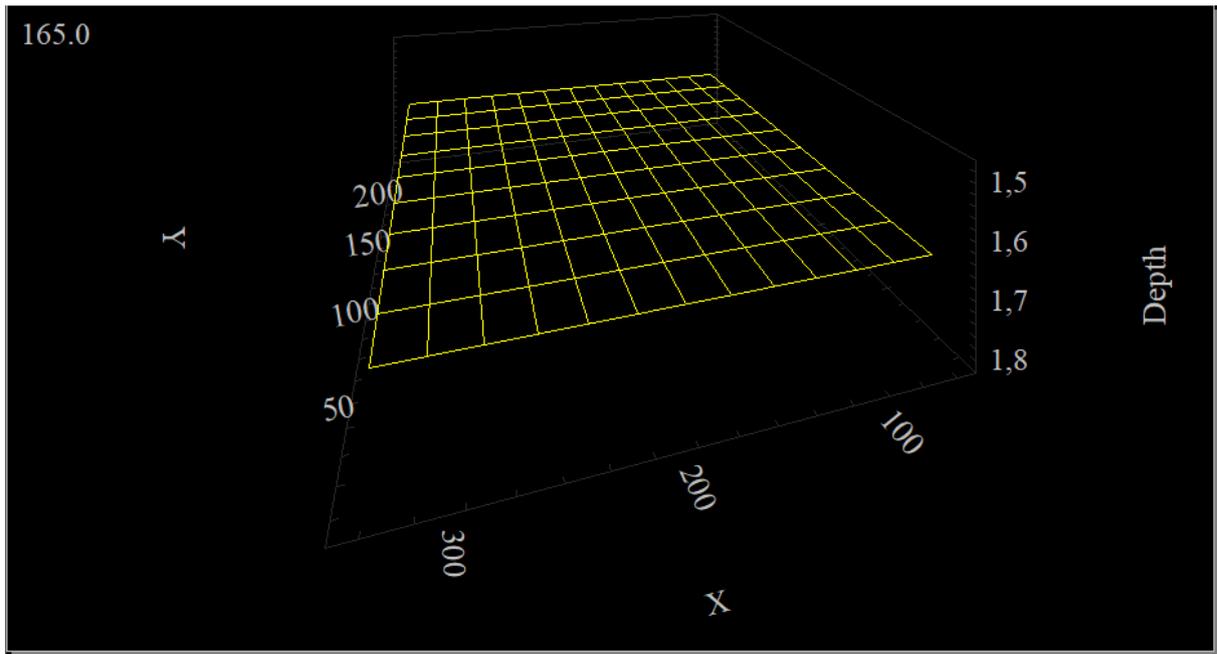


Figura 62: Ubicación de los conductores

Fuente: Autores

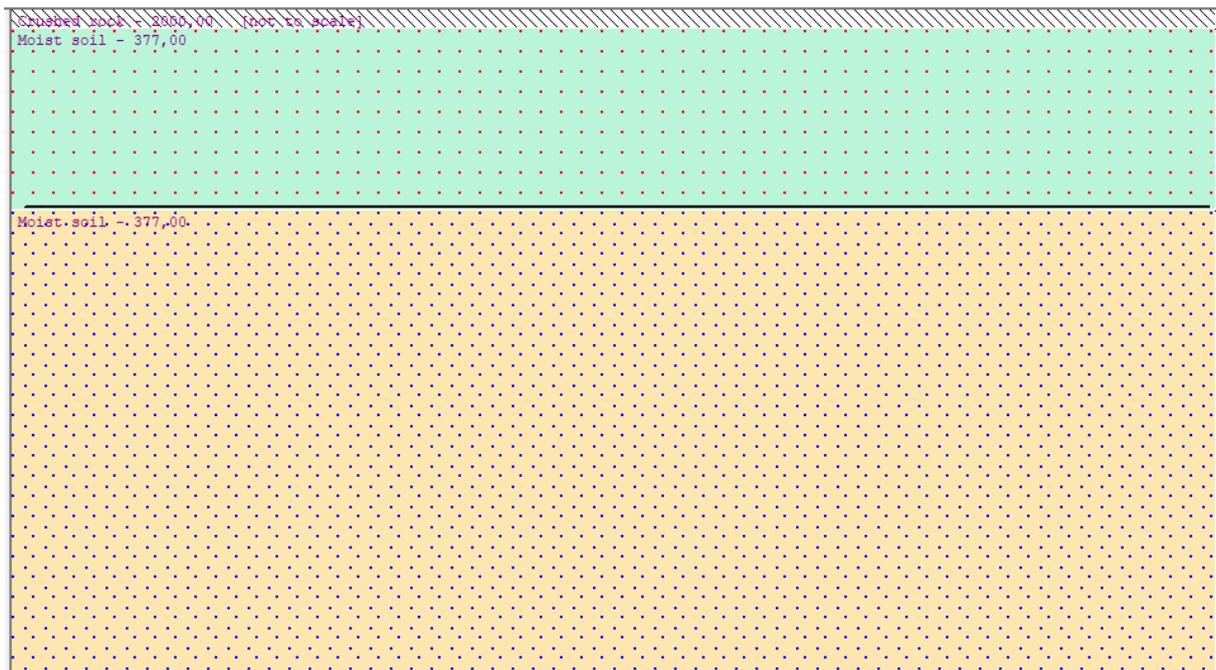


Figura 63: Capas del terreno

Fuente: Autores

Figura 64: Editor de casos de estudio de GRD 2

Fuente: Autores

En la figura 64 del caso 2. Se mantienen los valores previos con respecto a la falla y la relación $\frac{X}{R}$; sin embargo, el valor del factor de división de corriente cambia de acuerdo al S_f calculado en el caso 2.

GRD Analysis Alert View for GRD2

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	759,5	565,2
Step	458,4	1768,5

GPR Volts Rg Ohm

Alarm & Warnings

The maximum Touch Voltage exceeds the tolerable limits

Figura 65: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 2

Fuente: Autores

3.14.4. Caso 2 – Añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL

Top Layer

Lower Layer

Figura 66: Editor de suelo añadiendo mejorador - FAVIGEL

Fuente: Autores

GRD Analysis Alert View for GRD2

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	76	546,1
Step	45,8	1692,3

GPR 402,5 Volts Rg 0,251 Ohm

Alarm & Warnings

Figura 67: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 2 usando mejorador

Fuente: Autores

3.14.5. Entrada de datos de conductores del Caso 3

IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Grid Size

Lx 229,7 ft

Ly 229,7 ft

of Conductors

X Direction 11

Y Direction 11

Material Constants

Conductivity 97,0

Alpha Factor 0,00381

Ko Factor 242

Fusing Temperature 1084

Resistivity @ 20 C 1,78

Thermal Capacity 3,42

Conductors

Depth 1,64 ft

Size 2/0 AWG/kcmil

Type Copper, commercial hard-drawn

Cost 6,3 \$/ft

Help OK Cancel

Figura 68: Editor del grupo IEEE - Conductores

Fuente: Autores

Tamaño de la cuadrícula	Número de conductores:
Lx= 70 metros (m) = 229.7 pies (ft)	Número de conductores en el eje X: 11
Ly= 70 metros (m) = 229.7 pies (ft)	Número de conductores en el eje Y: 11
Conductores	
Profundidad	Tamaño
0,5 metros (m) = 1,64 pies (ft)	2/0 AWG/kCmil
Tipo	
Cobre, estirado duro comercial – 97%	

Tabla 24: Datos para conductores - Caso 3

IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Rods

of Rods

Diameter inch

Length ft

Arrangement

Type

Cost \$/Rod

Material Constants

Conductivity

Alpha Factor

Ko Factor

Fusing Temperature

Resistivity @ 20 C

Thermal Capacity

Help OK Cancel

Figura 69: Editor del grupo IEEE - Varillas

Fuente: Autores

Varillas	20	Longitud	24,61 pies (ft)
Diámetro	0,394 pulgadas	Acuerdo	Varillas en las esquinas de la rejilla
Tipo	Cobre, estirado duro comercial		

Tabla 25: Datos de las varillas - Caso 3

Figura 70: Editor de suelos – Información

Fuente: Autores

Material de la superficie	Material	Profundidad		
2000 resistividad Ω -m	Roca triturada	0,5m		
Definición por el usuario				
Capa superior	377 Ω -m	Tipo de suelo	suelo húmedo	Profundidad
Capa inferior	377 Ω -m	Tipo de suelo	suelo húmedo	0,5m

Tabla 26: Datos del suelo - Caso 3

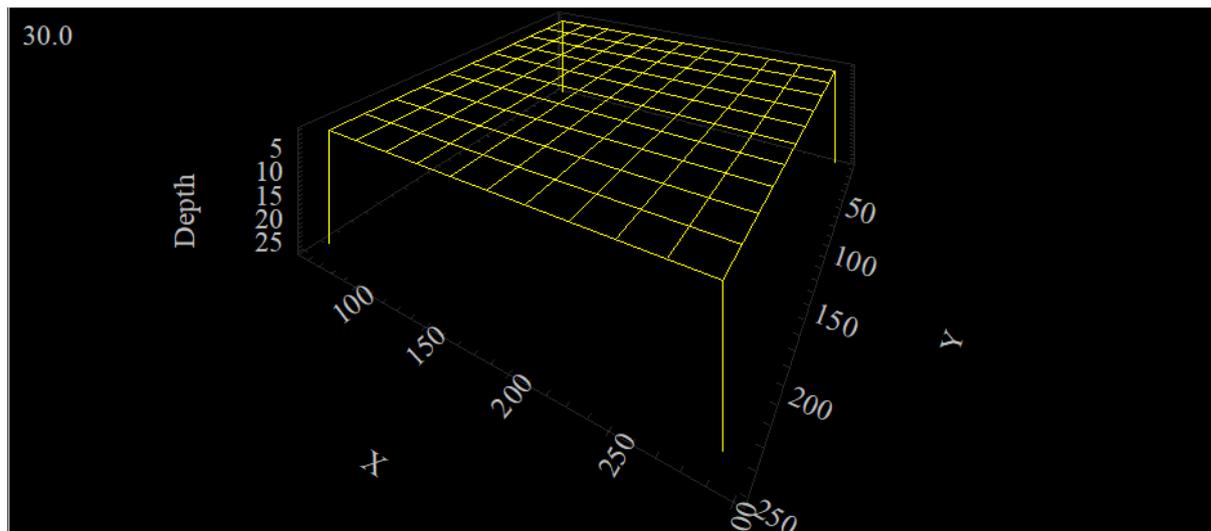


Figura 71: Ubicación de los conductores y las varillas

Fuente: Autores

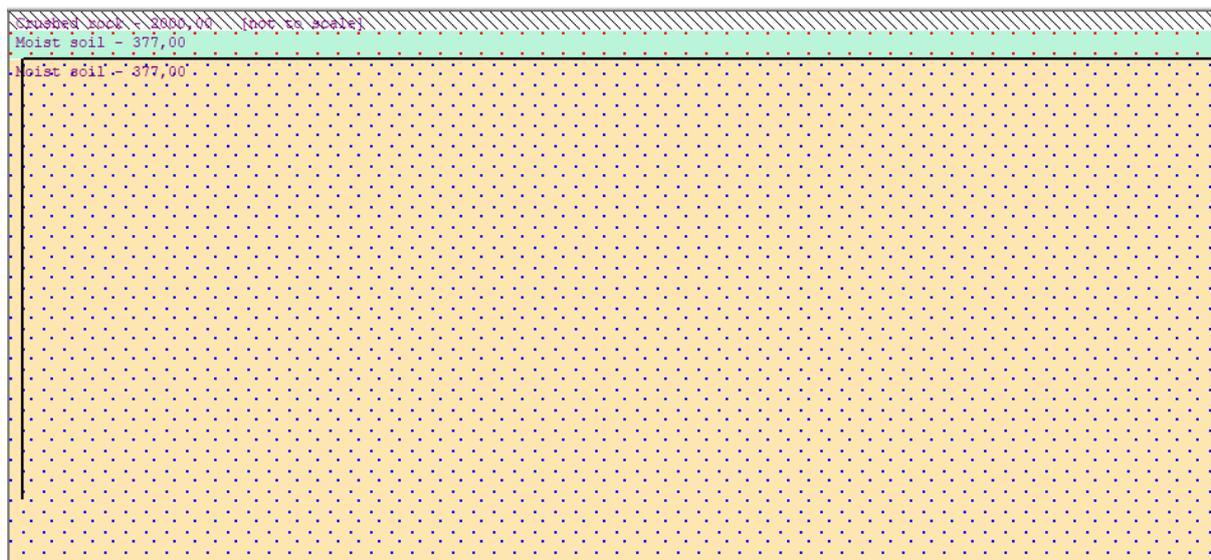


Figura 72: Capas del terreno

Fuente: Autores

Figura 73: Editor de casos de estudio de GRD 3

Fuente: Autores

En la figura 73, se observa que se mantienen los valores previos, los valores del caso 2. Sin embargo, debido al cambio en la disposición del área correspondiente de la malla y la implementación de varillas, obtendremos nuevos valores como resultado.

GRD Analysis Alert View for GRD3

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	602,5	565,2
Step	434,9	1768,5

GPR Volts Rg Ohm

Alarm & Warnings

The maximum Touch Voltage exceeds the tolerable limits

Figura 74: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 3

Fuente: Autores

3.14.6. Caso 3 – Añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL

Top Layer

Lower Layer

Figura 75: Editor de suelo añadiendo mejorador - FAVIGEL

Fuente: Autores

GRD Analysis Alert View for GRD3

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	60,3	546,1
Step	43,5	1692,3

GPR 415,9 Volts Rg 0,259 Ohm

Alarm & Warnings

Figura 76: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD3 usando mejorador

Fuente: Autores

3.14.7. Entrada de datos de conductores del Caso 4

IEEE Group Editor

Conductors | Rods

Grid Size

Lx 275,6 ft

Ly 206,7 ft

of Conductors

X Direction 10

Y Direction 13

Material Constants

Conductivity 97,0

Alpha Factor 0,00381

Ko Factor 242

Fusing Temperature 1084

Resistivity @ 20 C 1,78

Thermal Capacity 3,42

Conductors

Depth 1,64 ft

Size 2/0 AWG/kcmil

Type Copper, commercial hard-drawn

Cost 6,3 \$/ft

Figura 77: Editor del grupo IEEE - Conductores

Fuente: Autores

Tamaño de la cuadrícula	Número de conductores:
Lx= 84 metros (m) = 275.6 pies (ft)	Número de conductores en el eje X: 10
Ly= 63 metros (m) = 206,7 pies (ft)	Número de conductores en el eje Y: 13
Conductores	
Profundidad	Tamaño
0,5 metros (m) = 1,64 pies (ft)	2/0 AWG/kCmil
Tipo	
Cobre, estirado duro comercial – 97%	

Tabla 27: Datos para conductores - Caso 4

The image shows a software dialog box titled "IEEE Group Editor" with a close button (X) in the top right corner. It has two tabs: "Conductors" and "Rods", with "Rods" selected. The "Rods" section contains the following fields:

- # of Rods: 38
- Diameter: 0.394 inch
- Length: 32 ft
- Arrangement: Rods along Grid Perimeter (dropdown menu)
- Type: Copper, commercial hard-drawn (dropdown menu)
- Cost: 1000 \$/Rod

The "Material Constants" section on the right contains the following fields:

- Conductivity: 97.0
- Alpha Factor: 0.00381
- Ko Factor: 242
- Fusing Temperature: 1084
- Resistivity @ 20 C: 1.78
- Thermal Capacity: 3.42

At the bottom of the dialog are three buttons: "Help", "OK", and "Cancel".

Figura 78: Editor del grupo IEEE - Varillas

Fuente: Autores

Varillas	38	Longitud	32 (ft)
Diámetro	0,394 pulgadas	Acuerdo	Varillas a lo largo del perímetro
Tipo	Cobre, estirado duro comercial		

Tabla 28: Datos de las varillas - Caso 4

Soil Editor

Info | Analysis

Resistivity ohm-m Material Depth ft

Surface Material 2000 Crushed rock 0.5

User-Defined Calculated

Top Layer 377 Moist soil 0.5

Lower Layer 377 Moist soil

Help OK Cancel

Figura 79: Editor de suelos – Información

Fuente: Autores

Material de la superficie		Material	Profundidad	
2000 resistividad Ω -m		Roca triturada	0,5m	
Definición por el usuario				
Capa superior	377 Ω -m	Tipo de suelo	suelo húmedo	Profundidad
Capa inferior	377 Ω -m	Tipo de suelo	suelo húmedo	0,5m

Tabla 29: Datos del suelo - Caso 4

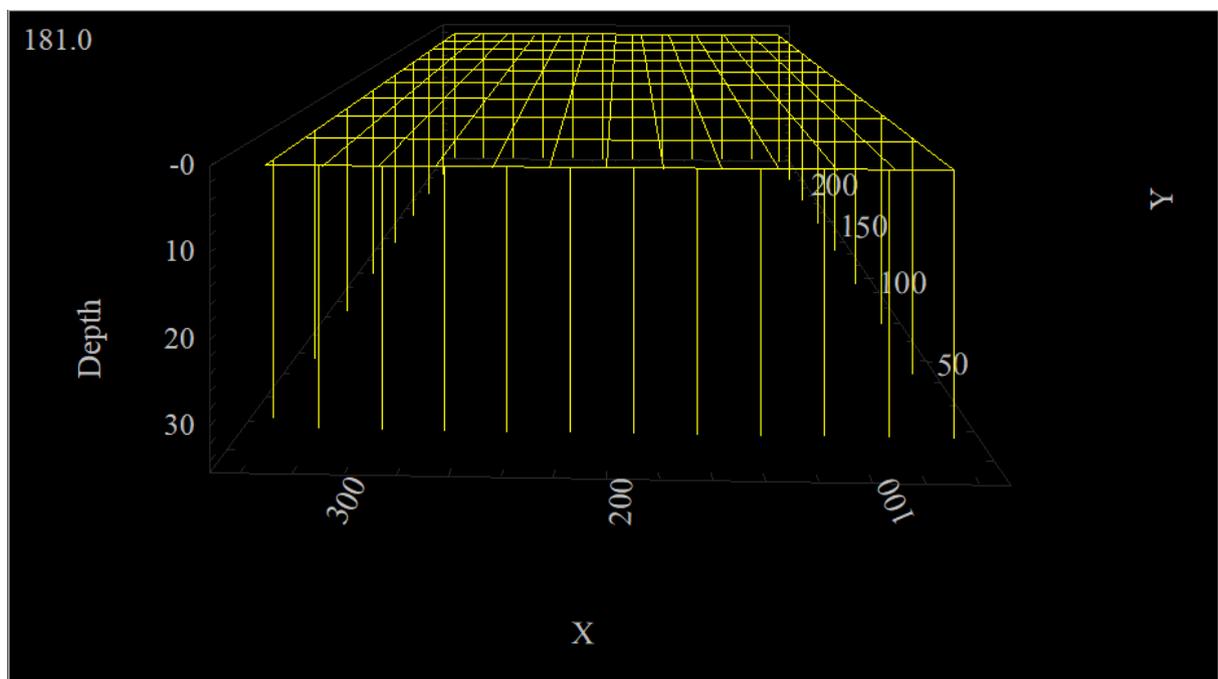


Figura 80: Ubicación de los conductores y las varillas

Fuente: Autores

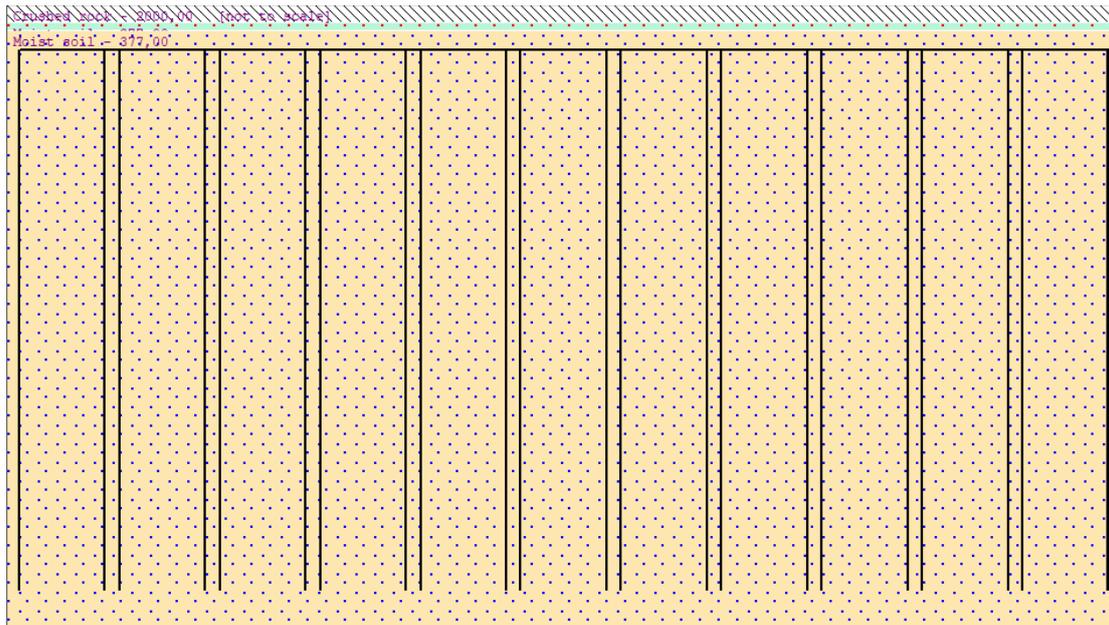


Figura 81: Capas del terreno

Fuente: Autores

Figura 82: Editor de casos de estudio de GRD para GRD 4

Fuente: Autores

Como se observa en la figura 82. En el caso 4, el valor del factor de división de corriente cambia de acuerdo al S_f calculado en el caso 4 manteniendo los valores de falla y el valor del factor de crecimiento y el peso de 50 Kg.

Con respecto al caso anterior que era una malla cuadrada, en este caso 4 se visualiza una malla rectangular con 38 varillas a lo largo del perímetro.

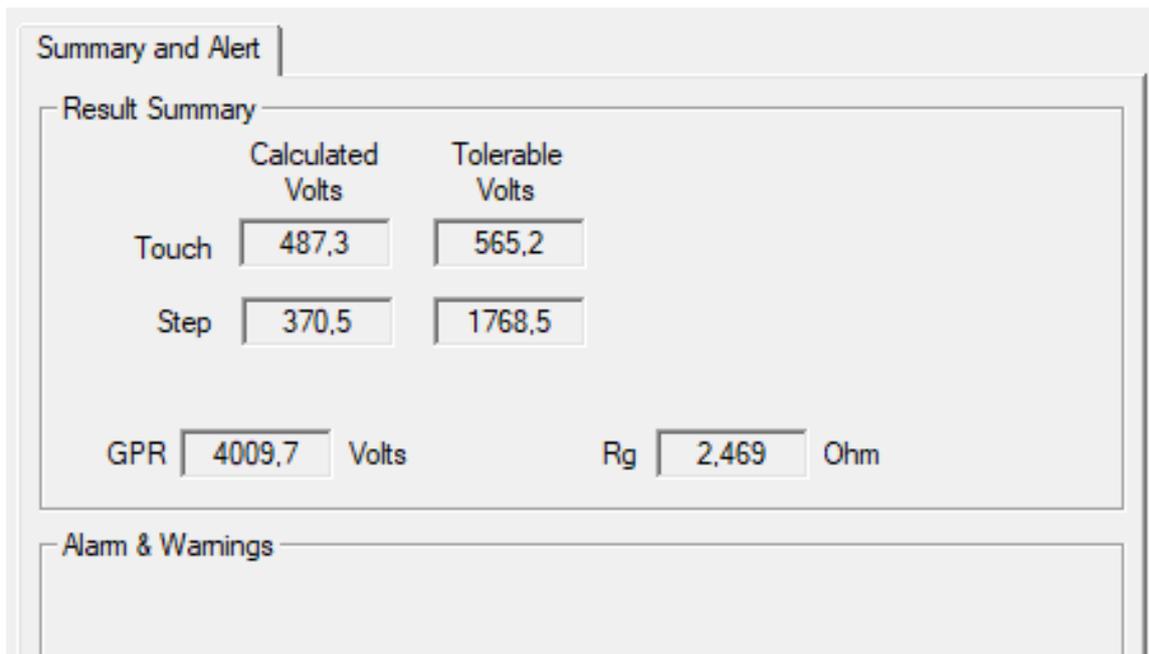


Figura 83: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 4

Fuente: Autores

En la figura 83 se muestra los resultados del caso 4, en el cual ya no presenta el mensaje de alerta como en los casos anteriores.

3.14.8. Caso 4 – Añadiendo mejorador de resistividad FAVIGEL

Top Layer	<input type="text" value="37,7"/>	<input type="text" value="Moist soil"/>	<input type="text" value="0,5"/>
Lower Layer	<input type="text" value="37,7"/>	<input type="text" value="Moist soil"/>	

Figura 84: Editor de suelo añadiendo mejorador - FAVIGEL

Fuente: Autores

Summary and Alert

Result Summary

	Calculated Volts	Tolerable Volts
Touch	<input type="text" value="48,7"/>	<input type="text" value="546,1"/>
Step	<input type="text" value="37,1"/>	<input type="text" value="1692,3"/>

GPR Volts Rg Ohm

Alarm & Warnings

Figura 85: Vista de alerta de análisis de GRD para GRD 4 usando mejorador

Fuente: Autores

3.15. Efectos que se producen por un mal diseño de malla

De acuerdo con la figura [8] se puede producir dos tipos de efectos ocasionados por la corriente eléctrica, los cuales son los siguientes: Por contacto directo o contacto indirecto.

Por lo cual se requiere de un diseño adecuado que abarque toda el área para asegurar la protección de las personas presentes, al mismo tiempo, resguardar los equipos eléctricos involucrados. de la subestación u otra instalación.

Como podemos observar en los casos de estudio planteados, en tres de los cuatro casos no se pudo satisfacer los parámetros requeridos. Por lo cual se toma en consideración las consecuencias que esto podría ocasionar ante posibles descargas.

En el caso uno, como se puede observar en la figura [23], se denota que el diseño no satisface al no cumplir con el voltaje permitido de la malla en comparación con los voltajes permisibles. En la figura [56] en el programa Etap se contempla los resultados del diseño de la malla simulado, concluyendo que no cumple con lo solicitado.

En el caso dos, no se logra cumplir con lo solicitado como se logra observar en la figura [31], el diseño no cumple al igual que el caso anterior; es decir, no cumple con el voltaje permitido de la malla en comparación con los voltajes permisibles. En la figura [65] se contempla los resultados del diseño de la malla simulado del caso 2, concluyendo que no cumple con lo solicitado.

A su vez el caso tres tampoco cumple con los requisitos como se observa en la figura [39], el diseño aún necesita modificarse para lograr el objetivo propuesto. En la figura [74] se contempla los resultados del diseño de la malla simulada del caso 3, concluyendo que no concluye con lo solicitado al igual que los casos anteriores.

Sin embargo, en la figura [47] se cumple con la norma; por lo tanto, en el caso cuatro. Se logra observar en la figura [83] mediante los resultados de simulación, que se ha alcanzado el objetivo propuesto.

A diferencia de los otros tres casos, el cuarto caso no sufriría los perjuicios como se presentan en la figura [8].

4. Capítulo IV

4.1. Análisis y resultados

En este capítulo vamos a comparar los casos de estudio con el fin de evaluar cuales son los escenarios en los que no se satisface con el diseño adecuado que cumpla con la norma IEEE 80 y a su vez realizar ejemplos con los resultados obtenidos con la finalidad de comprobar que se garantiza la seguridad. Se va a realizar la comparación mediante tablas con los resultados obtenidos del cálculo que establece la norma, cálculo realizado en un macro en Excel y finalmente los datos que nos brinda el Software ETAP.

4.1.1. Comparación entre los resultados de los voltajes de paso

Cálculo del voltaje de paso real de los casos de estudio – Ep.

	IEEE	EXCEL	ETAP
Caso 1	446,5 V	446,49 V	446,7 V
Caso 2	459,34 V	459,34 V	458,4 V
Caso 3	434,7 V	434,67 V	434,9 V
Caso 4	368,6 V	368,58 V	370,5 V

Tabla 30: Comparación de resultados – Ep

4.1.2. Comparación entre los resultados de los voltajes de paso usando mejorador de resistividad - FAVIGEL

	EXCEL	ETAP
Caso 1	44,65 V	44,7 V
Caso 2	45,93 V	45,8 V
Caso 3	43,47 V	43,5 V
Caso 4	36,86 V	37,1 V

Tabla 31: Comparación de resultados – Ep – FAVIGEL

4.1.3. Comparación entre los resultados de los voltajes de la malla

Cálculo del voltaje de la malla real de los casos de estudio – Em.

	IEEE	EXCEL	ETAP
Caso 1	734,07 V	734,07 V	743,8 V
Caso 2	752,81 V	752,81 V	759,5 V
Caso 3	593,4 V	593,39 V	602,5 V
Caso 4	476,1 V	476,09 V	487,3 V

Tabla 32: Comparación de resultados – Em

4.1.4. Comparación entre los resultados de los voltajes de paso usando mejorador de resistividad - FAVIGEL

	EXCEL	ETAP
Caso 1	73,41 V	74,4 V
Caso 2	75,28 V	76 V
Caso 3	59,34 V	60,3 V
Caso 4	47,61 V	48,7 V

Tabla 33: Comparación de resultados – Em – FAVIGEL

4.1.5. Análisis de los resultados obtenidos

Podemos observar tanto en la tabla 30 como en la tabla 32, los voltajes obtenidos de los casos de estudio. Concluyendo que tres casos de estudio no cumplen con el voltaje de la malla y por lo tanto requieren que sean modificados con la finalidad de cumplir con la norma y garantizar la seguridad con un diseño adecuado. Se realizó la modificación de la resistividad añadiendo el FAVIGEL, cumpliendo la norma como se muestra en las tablas 31 y 33.

Como se observa en las tablas previas, hay un margen pequeño de diferencia con el software; sin embargo, se mantiene un valor cercano a lo calculado mediante los pasos de IEEE y usando un Macro en Excel.

4.2. Análisis de los resultados referente a la seguridad de la malla

En este punto vamos a realizar un análisis acerca de los voltajes de la malla reales obtenidos. Utilizando la tabla [2] como referencia de aquellos efectos que se van a producir a raíz de la corriente que se va a calcular.

4.2.1. Análisis de resultados caso 1 – Piel húmeda y piel seca

Cálculo usando la ecuación (13), con un valor de 1000Ω en la resistencia corporal en condición de piel húmeda:

Piel húmeda

$$I_{corporal} = \frac{743.8 V}{1000 \Omega} = 0.7438 A * 1000 = 743.8 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 743.8 mA; es decir, un valor por encima de los 200 mA para más de un ciclo cardiaco. Se produce un paro cardiaco reversible, también se puede producir inconsciencia, marcas visibles en el cuerpo y quemaduras. Por lo cual este diseño no garantiza seguridad alguna.

Mientras que usando la ecuación (13), con un valor de 4000Ω en condición de piel seca se obtiene la siguiente corriente:

Piel seca

$$I_{corporal} = \frac{743.8 V}{4000 \Omega} = 0.18595 A * 1000 = 185.95 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 185.95 mA que se encuentra entre 50 a 200 mA. Se produce fibrilación ventricular, inconsciencia y marcas visibles en el cuerpo.

Considerando la figura [8], podemos observar los principales efectos fisiológicos que se pueden producir por contactos directos e indirectos de la corriente eléctrica.

Por lo tanto, se concluye que el diseño del caso uno requiere ser modificado con la finalidad de asegurar la protección de las personas como los componentes que conforman parte de la instalación.

4.2.2. Análisis de resultados caso 1 con mejorador – Piel húmeda y piel seca

Piel húmeda

$$I_{corporal} = \frac{74.4 V}{1000 \Omega} = 0.0744 A * 1000 = 74.4 mA$$

Los efectos que pueden producir son: daños muy serios como fibrilación cardíaca y paro respiratorio.

Piel seca

$$I_{corporal} = \frac{74.4 V}{4000 \Omega} = 0.018595 A * 1000 = 18.6 mA$$

Los efectos que pueden producir son: dolor y contracción muscular.

4.2.3. Análisis de resultados caso 2 – Piel húmeda y piel seca

Cálculo usando la ecuación (13), con un valor de 1000 Ω en la resistencia corporal en condición de piel húmeda:

Piel húmeda

$$I_{corporal} = \frac{759.5 V}{1000 \Omega} = 0.7595 A * 1000 = 759.5 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 759.5 mA que está por encima de los 200 mA al igual que el caso anterior. Esto indica que este diseño tampoco garantiza seguridad alguna.

Mientras que usando la ecuación (13), con un valor de 4000 Ω en una condición de piel seca se obtiene la siguiente corriente:

Piel seca

$$I_{corporal} = \frac{759.5 V}{4000 \Omega} = 0.1898 A * 1000 = 189.875 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 189.88 mA, situado entre 50 a 200 mA, se pueden producir diversos efectos fisiológicos al igual que el caso uno.

Teniendo en cuenta la figura [8], se concluye que el diseño del caso dos aún requiere ser modificado para garantizar la seguridad.

En conclusión, este diseño tampoco cumple con los requisitos de seguridad. De manera que cuando la piel se encuentre húmeda, la corriente que se calcula es de 759.5 mA, la cual se encuentra muy por encima del límite seguro de 200 mA que representa un riesgo considerable.

Aunque con la piel seca la corriente disminuye a 189,88 mA de manera que se encuentra en el rango en el que puedan ocurrir efectos fisiológicos no deseados, similares al primer paso. Por lo tanto, se requiere realizar ajustes en el diseño.

4.2.4. Análisis de resultados caso 2 con mejorador – Piel húmeda y piel seca

Piel húmeda

$$I_{corporal} = \frac{76 V}{1000 \Omega} = 0.076 A * 1000 = 76 mA$$

Los efectos que pueden producir son: daños muy serios como fibrilación cardíaca y paro respiratorio.

Piel seca

$$I_{corporal} = \frac{76 V}{4000 \Omega} = 0.019 A * 1000 = 19 mA$$

Los efectos que pueden producir son: dolor y contracción muscular.

4.2.5. Análisis de resultados caso 3 – Piel húmeda y piel seca

Cálculo usando la ecuación (13), con un valor de 1000 Ω en la resistencia corporal en condición de piel húmeda:

Piel húmeda

$$I_{corporal} = \frac{602.5 V}{1000 \Omega} = 0.6025 A * 1000 = 602.5 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 602.5 mA. El cual sigue por encima de los 200 mA. Por lo cual el diseño de caso tres no satisface con lo propuesto.

Mientras que usando la ecuación (13), con un valor de 4000Ω en una condición de piel seca se obtiene la siguiente corriente:

Piel seca

$$I_{corporal} = \frac{602.5 V}{4000 \Omega} = 0.1506 A * 1000 = 150.6 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 150.6 mA localizado entre 50 a 200 mA. Se pueden producir diversos efectos fisiológicos al igual que en los casos anteriores.

Teniendo en cuenta la figura [8], se concluye que el diseño no cumple y necesita ser modificado.

En resumen, el diseño del caso tres no cumple con los estándares de seguridad necesarios.

Cuando la piel está húmeda, la corriente alcanza los 602.5 mA, mucho más allá del límite de 200 mA, lo que representa un riesgo significativo. Aunque con la piel seca, la corriente es más baja con un valor de 150.6 mA. Aún se encuentra en un rango donde podrían producirse efectos fisiológicos no deseados. Esto demuestra que el diseño debe ser modificado para asegurar que la corriente se mantenga en niveles seguros y evitar posibles peligros.

4.2.6. Análisis de resultados caso 3 con mejorador – Piel húmeda y piel seca

Piel húmeda

$$I_{corporal} = \frac{60.3 V}{1000 \Omega} = 0.0603 A * 1000 = 60,3 mA$$

Los efectos que pueden producir son: daños muy serios como fibrilación cardíaca y paro respiratorio.

Piel seca

$$I_{corporal} = \frac{60.3 V}{4000 \Omega} = 0.015 A * 1000 = 15 mA$$

Los efectos que pueden producir son: dolor y contracción muscular.

4.2.7. Análisis de resultados caso 4 – Piel húmeda y piel seca

Cálculo usando la ecuación (13), con un valor de 1000Ω en la resistencia corporal en condición de piel húmeda:

Piel húmeda

$$I_{corporal} = \frac{487.3 V}{1000 \Omega} = 0,4873 A * 1000 = 487.3 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 487.3 mA que se encuentra por encima de los 200 mA. Sin embargo, el valor del voltaje de la malla real E_m en comparación con los casos anteriores si cumple con los valores de voltaje permisibles: Et50 ($487.3V < 533.2V$).

El diseño cumple con un diseño adecuado; no obstante, podría se mejorado en la resistividad inicial.

Mientras que usando la ecuación (13), con un valor de 4000Ω en una condición de piel seca se obtiene la siguiente corriente:

Piel seca

$$I_{corporal} = \frac{487.3 V}{4000 \Omega} = 0,121825 A * 1000 = 121.825 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 121.83 mA posicionado entre 50 a 200 mA. Se podrían producir diversos efectos fisiológicos.

Con la piel húmeda, los valores exceden el límite de 200 mA lo que genera un riesgo, pero el voltaje de la malla se ubica dentro de las normas IEEE. Mientras que la piel seca da un resultado en un rango donde pueden ocurrir efectos fisiológicos, aunque no son críticos como el caso anterior.

El diseño cumple con lo establecido, pero utilizando un mejorador de resistividad se puede mejorar estos resultados.

4.2.8. Análisis de resultados caso 4 con mejorador – Piel húmeda y piel seca

Cálculo usando la ecuación (13), con un valor de 1000Ω en la resistencia corporal en condición de piel húmeda asumiendo que la resistividad pasa a ser de $37.7 \Omega.m$ se obtiene el siguiente resultado:

Piel húmeda

$$I_{corporal} = \frac{48.7 V}{1000 \Omega} = 0.0487 A * 1000 = 48.7 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], con un valor de 48.7 mA que se encuentra en el rango de 25 a 50 mA. En una duración de segundos a minutos, se produce irregularidades cardiacas, fibrilación ventricular.

Mientras que usando la ecuación (13), con un valor de 4000 Ω en condición de piel seca se obtiene la siguiente corriente:

Piel seca

$$I_{corpotal} = \frac{48.7 V}{4000 \Omega} = 0,012175 A * 1000 = 12.175 mA$$

De acuerdo a la tabla [2], teniendo un valor de 12.18 mA. El cual se rige al rango entre 1 a 15 mA, el cual podría producir desde cosquilleos hasta tetanización muscular; por lo tanto, no produce ningún efecto letal como lo es un paro que causaría la muerte del individuo.

El diseño cumple con lo establecido y garantiza la seguridad de las personas pertenecientes a la instalación.

4.3. PRESUPUESTO:

ITEM	DESCRIPCIÓN	Total
1	Transporte	\$200
2	Alimentación	\$110
3	Insumos de oficina	\$55
4	Internet	\$295
5	Capacitación	\$130
6	Libros-Artículos	\$140
7	Varios	\$50
TOTAL A PAGAR		\$980

Tabla 34: Valores del presupuesto

CONCLUSIONES

- Este proyecto de tesis tiene como objetivo presentar un conjunto de procedimientos claros y fáciles de seguir para el análisis, diseño y simulación de puestas a tierra. Esta propuesta se basa tanto en los conocimientos adquiridos durante la formación académica como en las normas IEEE 80, con el fin de establecer los criterios, la metodología, los procesos y las especificaciones necesarias para llevar a cabo estas tareas de manera efectiva.
- Se realizaron estudios de ingeniería de forma técnica, utilizando herramientas modernas como programas especializados, nos brinda una visión precisa del estado del sistema eléctrico, lo que facilita la identificación de posibles problemas. Además, nos permite establecer un orden de prioridades para abordar esas dificultades. En términos generales, estos estudios nos proporcionan una perspectiva para prevenir fallas y accidentes, lo que resulta en un costo mucho más bajo en comparación con los gastos necesarios para reparar los daños una vez que han ocurrido.
- Los cálculos que se realizaron después de la estratificación no son particularmente complejos; no obstante, es importante llevarlos a cabo con cuidado y precisión, ya que intervienen diversas variables y fórmulas que deben entenderse de manera clara para evitar errores. También es fundamental tener en cuenta el área donde se va a instalar el sistema para asegurarse de que el diseño sea adecuado y luego proceder con el desarrollo que corresponda al tipo de puesta a tierra seleccionado.
- La malla a tierra de protección debe garantizar que los niveles de tensión en la malla y en su periferia sean siempre más bajos que los valores máximos permitidos de tensión de paso y contacto para el ser humano. Esto es fundamental para evitar que se supere el umbral de fibrilación cardíaca para salvaguardar la vida de los individuos que estén trabajando en el área o que se encuentren cerca de la zona.
- Los casos 1, 2 y 3 no cumplieron las normas IEEE 80 y se realizaron las modificaciones para que el $E_m < E_{t50}$ añadiendo el mejorador de resistividad FAVIGEL y a su vez cumpla con lo requerido, mientras que el caso 4 ya cumplió con las normas, pero aún no garantiza la seguridad del todo, por ello también se le añadió el mejorador de resistividad - FAVIGEL para obtener un menor valor del E_m para que la $I_{corpotal}$ represente un menor riesgo y peligro para las personas en caso de fallas eléctricas.

RECOMENDACIONES

- Antes de proceder a la instalación de una malla, es importante medir la resistividad del terreno. Este paso es esencial para conocer la profundidad y el grosor de las capas rocosas, lo cual se determina a través de estudios geofísicos. Así como la medición ayuda a identificar los puntos más adecuados para colocar la red referente a la tierra, ya sea en una subestación, un sistema electrónico o en instalaciones de generaciones o transmisión de frecuencia. Además, esta medición también puede servir para evaluar el grado de corrosión de las tuberías subterráneas. Se sugiere que los cables de la malla se ubiquen a una profundidad mínima de 0.5 metros para prevenir posibles interferencias con otros sistemas y garantizar un buen contacto con el suelo.
- Es importante señalar si resulta útil cuando se trata de diseñar un sistema de tierras grande. En estos casos, buscar el área con la resistividad más baja puede ser clave para lograr una instalación más económica.
- Si la resistividad del terreno es muy alta, se recomienda tomar medidas para reducirla. Existen varias formas de hacerlo, aunque todas tienen un límite de efectividad que es importante conocer para evitar diseños ineficientes o costosos. Algunas de las técnicas para disminuir la resistividad incluyen aumentar el número de electrodos en paralelo, incrementar la longitud y el diámetro de los electrodos, aumentar la distancia entre ellos, sustituir el terreno por otro de menor resistividad o aplicar tratamientos químicos electrolíticos al suelo.

REFERENCIAS

- [1]. M. A. E. Williams. (2019). Grounding and Shielding: Circuits and Radios. Chapter 9. New York: Wiley.
- [2]. IEEE Std 1100-2005, "IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment."
- [3] M. E. Djordjevic. (2014). "Electrical Grounding and Bonding. IEEE Electrical Insulation Magazine", 30(6), 24-30.
- [4]. IEEE Std 80-2013, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding."
- [5]. Oza, A. (2017). "Grounding System Design and Its Implementation in Electrical Substation." IEEE Transactions on Industry Applications.
- [6]. IEEE Std 1050-1996, "IEEE Guide for Instrumentation and Control Equipment Grounding in Generating Stations."
- [7]. IEEE Std 142-2007, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems."
- [8]. Kumar, N. et al. (2019). "Simulation of Grounding Systems using ETAP." International Journal of Electrical Power & Energy Systems, ScienceDirect.
- [9]. Engineers, T. I. (2015). IEEE STD 80-2013 Guide for Safety in AC Substation. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
- [10]. IEEE Standards Association. (2000). IEEE Standard 80: Guide for Safety in AC Substation Grounding. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- [11]. ETAP (2023). "ETAP User Guide".
- [12]. Castaño, J. (2010). "SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF". UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- [13]. Moreno, G. (2007). "Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Respuestas ante fallas eléctricas y rayos". Editorial Universidad de Antioquia.
- [14]. Gallardo, S. (2016). "Prevención de riesgos electricos". Paraninfo.
- [15]. Díaz, P. (2001). "SOLUCIONES PRÁCTICAS para la puesta a tierra de sistemas electricos de distribución". McGraw-Hill.
- [16]. Farroñay, J. (2021) "DISEÑO DE MALLA DE PUESTA A TIERRA MEDIANTE LA NORMA IEEE-80, UTILIZANDO ETAP, ASPIX Y EXCEL, PARA LA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DEL ESTADIO DE LA UNA-PUNO". UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.

[17]. Diseño de mallas de tierra en subestaciones eléctricas: Tipos y beneficios (s.f).
<https://geselec-sac.com/disen-de-mallas-de-tierra-en-subestaciones-electricas-tipos-y-beneficios/#:~:text=Malla%20de%20tierra%20en%20anillo,y%20seguridad%20para%20los%20propietarios.>

[18]. López, B. (2013) “CÁLCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA EN UNA ESTACIÓN TRANSFORMADORA.” UNIVERIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD REGIONAL ROSARIO

[19]. Lesiones producidas por la electricidad. (s.f.). Saludalia.
<https://www.saludalia.com/urgencias/lesiones-producidas-por-la-electricidad>

[20]. SUELO ARTIFICIAL PARA MEJORAMIENTO DE PUESTAS A TIERRA. (s.f). SEGELECTRICA. <https://www.segelectrica.com.co/wp-content/uploads/2020/03/FICHA-TECNICA-FAVIGEL.pdf>