

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

# SEDE GUAYAQUIL

# **CARRERA DE ELECTRICIDAD**

## ANÁLISIS DE LOS VOLTAJES DE PASO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN ESTRUCTURAS DE LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y MODELADO.

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Joshué Adrián Gómez Orrala

Marcos Elian Cesme Tenorio

TUTOR: Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo

Guayaquil–Ecuador 2024-2025

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Joshué Adrián Gómez Orrala con documento de identificación N° 0950383638 y Marcos Elian Cesme Tenorio con documento de identificación N° 0925112328 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, 06 de diciembre del año 2024

Atentamente;

Joshué Adrián Gómez Orrala 0950383638

Marcos Elian Cesme Tenorio 0925112328

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

Nosotros, Joshué Adrián Gómez Orrala con número de identificación N° 0950383638 y Marcos Elian Cesme Tenorio con número de identificación N° 0925112328, 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: **ANÁLISIS DE LOS VOLTAJES DE PASO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN ESTRUCTURAS DE LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y MODELADO**", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Electricidad, 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 hacemosla entrega del trabajo final en el formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 06 de diciembre del año 2024

Atentamente;

Joshué Adrián Gómez Orrala 0950383638

Marcos Elian Cesme Tenorio 0925112328

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Otto Washington Astudillo Astudillo con documento de identificación N°0102054871 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "ANÁLISIS DE LOS VOLTAJES DE PASO EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN ESTRUCTURAS DE LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y MODELADO", realizado por Joshué Adrián Gómez Orrala con número de identificación N° 0950383638 y Marcos Elian Cesme Tenorio con número de identificación N° 0925112328, 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, 06 de diciembre del año 2024

Atentamente;

A MA

Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo 0102054871

#### DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este trabajo a Dios, quien me ha acompañado en cada momento de este proceso. A mis padres, William Cesme y Gina Tenorio, por ser mi mayor fuente de apoyo; a mi hermano Abraham y a mis tres hermanas, Lisseth, Mikal y Scarlett, quienes han sido una inspiración constante. También a Erika Guerrero, por ser una guía invaluable para mi padre, y a mi abuela Catalina Gonzales, cuya presencia y apoyo han sido fundamentales a lo largo de este camino. Asimismo, quiero dedicar este logro a mis sobrinos Limny, Daleska, Kendrick y Gael, con la esperanza de ser para ellos una fuente de inspiración en sus vidas, tal como ellos lo han sido para mí.

#### Marcos Elian Cesme Tenorio

Con inmenso amor y gratitud, dedico este trabajo a aquellas personas que han sido la base de mi fortaleza y el motor de mi inspiración durante este desafiante y enriquecedor camino académico. A mis padres, por ser el ejemplo vivo de esfuerzo, dedicación y sacrificio. Por enseñarme con su amor incondicional, que los sueños se alcanzan con arduo trabajo y perseverancia, cada paso que he dado en este proceso ha sido impulsado por el deseo de honrar sus esfuerzos y devolverles, aunque sea en parte, todo lo que han hecho por mí. A mi abuela, mis tres hermanos y a mi sobrino Jader, que han sido mis compañeros de vida y mi fuente inagotable de apoyo, alegría y motivación. Sus palabras de aliento, su compañía y su fe en mí han sido mi refugio en los momentos difíciles y mi inspiración para seguir adelante. Finalmente, a cada persona que me brindó un consejo, un apoyo o una palabra de aliento, les extiendo mi más sincero agradecimiento.

Joshué Adrián Gómez Orrala

#### AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de llegar hasta aquí y brindarme la sabiduría necesaria para culminar mis estudios. Agradezco a mi padre, William Cesme, y a mi madre, Gina Tenorio, por su apoyo y amor incondicional, ya que sin ellos no habría podido alcanzar este logro. También expreso mi gratitud a mi hermana Mikal y a su familia por acogerme durante este trayecto universitario, así como a mis hermanos Lisseth, Scarlett y Abraham, por estar siempre presentes y recordarme en sus oraciones. Mi profundo agradecimiento a Erika Guerrero, quien ha hecho un gran esfuerzo para que pudiera culminar mi formación académica, y a mi abuela Catalina Gonzales, por brindarme su ayuda cada vez que la necesité. Extiendo también mi gratitud al Ing. Otto Astudillo, mi tutor de tesis, por su valiosa orientación y apoyo en este proceso. Asimismo, agradezco a mis compañeros y amigos, quienes con su compañía, aliento y colaboración han sido un pilar fundamental en mi vida universitaria.

Marcos Elian Cesme Tenorio

Primero agradezco a Dios, quien me dio la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para superar los obstáculos y culminar este importante proyecto. A mis padres, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional a lo largo de mi vida académica. Sin su esfuerzo y confianza en mí, este logro no habría sido posible. A mi abuela, a mis tres hermanos y a mi sobrino Jader, quienes con su cariño, consejos y palabras de aliento fueron mi refugio en los momentos de mayor dificultad. A mi director de tesis el Ing. Otto Astudillo quien me brindo su confianza, sus conocimientos y experiencias para poder realizar este trabajo, su guía constante y su fe inquebrantable en mis habilidades me han motivado a alcanzar objetivos que nunca imagine. A mis amigos por el apoyo que me han dado en este largo camino y a mis profesores por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar este importante objetivo.

Joshué Adrián Gómez Orrala

## INDICE

# Contenido

PORTADA	i
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDA	D Y AUTORÍA DEL TRABAJO DETITULACIÓNii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECH UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIA	OS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA NAiii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TR	ABAJO DE TITULACIÓNiv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
INDICE	vii
INDICE DE FIGURAS	xiv
INDICE DE TABLAS	
RESUMEN	ххіі
ABSTRACT	
ACRÓNIMOS	
CAPITULO I	
1.1. TÍTULO	
1.2. INTRODUCCIÓN	
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROB	LEMA2
1.4. JUSTIFICACIÓN	
1.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLE	ИА3
1.6. BENEFICIARIOS DE LA PROP	JESTA3
1.7. OBJETIVOS	
1.7.1. Objetivo General	
1.7.2. Objetivos Específicos	
1.8. METODOLOGÍA Y MEDIOS	5
CAPITULO II	
2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRIC	47
2.1.1. Sistema de puesta a tierro	ı en redes eléctricas7
2.1.1.1. Concepto y objetivos de la p	uesta a tierra8
2.1.1.2. Tipos de sistemas de puesta	a tierra9
2.1.1.3. Parámetros eléctricos asocia	ados a la puesta a tierra10

2.1.2. Voltajes de Paso	11
2.1.2.1. Definición de voltajes de paso	12
2.1.2.2. Relevancia en la seguridad de los sistemas eléctricos	13
2.1.3. Factores que Afectan el Rendimiento de la Puesta a Tierra	13
2.1.3.1. Resistividad del suelo	14
2.1.3.2. Resistencia de puesta a tierra	15
2.1.3.3. Corrientes de falla en el sistema	16
2.1.4. Líneas Aéreas de Distribución	16
2.1.4.1. Componentes principales de una línea aérea	17
2.1.4.2. Configuración típica de estructuras de soporte	19
2.1.4.3. Relación entre el diseño estructural y la puesta a tierra	19
2.1.5. Métodos de Diseño y Dimensionamiento de Puesta a Tierra	20
2.1.5.1. Diseño de puesta a tierra	20
2.1.6. Simulación y Modelado en Sistemas de Puesta a Tierra	21
2.1.6.1. Software utilizado en el análisis de voltajes de paso	21
2.1.6.1.1. PYTHON	22
2.1.6.1.2. ATPDraw	22
2.1.7. Impacto de la Resistividad del Suelo en el Diseño	22
2.1.7.1. Métodos de medición de resistividad	23
2.1.7.2. Efecto de la variabilidad del suelo en voltajes de paso	23
2.1.7.3. Soluciones para suelos con alta resistividad	24
2.1.8. Fenómenos de Sobretensión y Seguridad en Puesta a Tierra	25
2.1.8.1. Sobretensiones causadas por descargas atmosféricas	26
2.1.8.2. Sobretensiones por fallas eléctricas	27
2.1.8.3. Riesgos para el ser humano y los animales	27
2.1.8.4. Normativas de seguridad y límites aceptables	28
2.1.9. Electrodos	29
2.1.9.1. Electrodo empotrado verticalmente sin altura de empotramiento	29
2.1.9.2. Electrodo empotrado verticalmente con altura de empotramiento	30
2.1.9.3. Electrodos empotrados verticalmente en paralelo con altura de empotramiento	31
2.1.9.4. Electrodo empotrado horizontalmente con altura de empotramiento	32
2.1.9.5. Corriente de cortocircuito a 60Hz y del electrodo a frecuencia industrial	32
CAPITULO III	34
3.1. FRECUENCIA DE TIPO INDUSTRIAL	34
3.1.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento con datos obtenidos	

analíticamente
3.1.1.1. Corriente de 1000A, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50, 100, 200, 500 y 1000 $\Omega\cdot m$
3.1.1.2. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 Ω·m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m35
3.1.1.3. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m36
3.1.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento con datos obtenidos
analíticamente
3.1.2.1. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m37
3.1.2.2. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.5m, Resistividad del suelo de 50 Ω·m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m38
3.1.2.3. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50 Ω·m39
3.1.2.4. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.01 a 1m, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50 Ω·m40
3.1.3. Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento con datos
obtenidos analíticamente con datos obtenidos analíticamente41
3.1.3.1. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m, 5 picas y Resistividad del suelo de 50 Ω·m41
3.1.3.2. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4, 3 y 3.6m, Altura de empotramiento de 0.5m, 5 picas y Resistividad del suelo de 50 Ω·m42
3.1.3.3. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m, 2, 3 y 5 picas y Resistividad del suelo de 50 Ω·m43
3.1.3.4. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m, 4 picas y Resistividad del suelo de 50 Ω·m44
3.1.4. Electrodos horizontales con altura de empotramiento con datos obtenidos analíticamente
3.1.4.1. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4m45
3.1.4.2. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4m46
3.1.4.3. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Altura de empotramiento de 0.1 a 1m y Longitud de 2.4m47
3.1.4.4. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo o de 50 Ω·m, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m48
3.1.5. Electrodos verticales sin altura de empotramiento con datos obtenidos en ATPDraw
3.1.5.1. Resistividad de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, corriente de 1000A y Longitudes de 2.4 m
3.1.5.2. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 Ω·m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m52
3.1.5.3. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Longitud de 2.4m y Resistividad del suelo de 50 Ω·m53

3.1.6. Electrodos verticales con altura de empotramient	o con datos obtenidos en
ATPDraw	53
3.1.6.1. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0	.5m, Longitud de 2.4m y Resistividad
del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m	55
3.1.6.2. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0	.5m, Resistividad del suelo de 50
Ω·m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m	56
3.1.6.3. Corriente de 1, 3.5 y 5 kA, Altura de empotramiente	o de 0.5m, Longitud de 2.4m y
Resistividad del suelo de 50 Ω·m.	57
3.1.6.4. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0	.1 a 1m, Longitud de 2.4m y
Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.	
3.1.7. Electrodos verticales en paralelo con altura de en obtenidos en ATPDraw.	npotramiento con datos 59
3.1.7.1 Corriente de 1, 3 y 5 kA, Longitud de 2.4m, Altura de electrodos en paralelo y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m	e empotramiento de 0.5m, 5 61
3.1.7.2. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4, 3 y 3.6m, Altu	ra de empotramiento de 0.5m, 5
electrodos en paralelo y Resistividad del suelo de 50 ohm	62
3.1.7.3. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4m, h de 0.5m, 2	2, 3 y 5 electrodos en paralelo, Altura
de empotramiento y Resistividad del suelo de 50 Ω·m	63
3.1.7.4. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4m, Altura de er electrodos en paralelo y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m	npotramiento de 0.01, 0.5 y 1m, 4 64
3.1.8. Electrodos horizontales con altura de empotramie	ento con datos obtenidos en
ATPDraw	65
3.1.8.1. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Corrier y Altura de empotramiento de 0.5 m	nte de 1000A, y Longitudes de 2.4 m 67
3.1.8.2. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 Ω·	m, Altura de empotramiento de
0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m	68
3.1.8.3. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Resistividad del suelo de 5	0 Ω·m, Longitud de 2.4m y Altura de
empotramiento de 0.5m.	69
3.1.8.4. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ · empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m	m, Longitud de 2.4m y Altura de 70
3.2. FRECUENCIA DE TIPO RAYO	71
3.2.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento co	n datos obtenidos analíticamente.72
3.2.1.1. Corriente de 20, 50 y 100 kA, Resistividad del suelo	de 50 Ω·m y Longitud de 2.4m72
3.2.1.2. Corriente de 70 kA, Resistividad del suelo de 50, 10	0 y 500 Ω·m, Longitud de 2.4m73
3.2.1.3. Corriente de 100 kA, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$	•m y Longitudes de 2.4, 3 y 3.6m…75
3.2.2. Electrodos verticales con altura de empotramient	o con obtenidos analíticamente
	76
3.2.2.1. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Altura de empotr	amiento de 0.5m, Longitud de 2.4m
y Corriente de 20 kA, 50 kA y 100 kA	76
3.2.2.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m, Longit	ud de 2.4 m, Altura de
empotramiento de 0.5m y Corriente de 70 kA	77

3.2.2.3. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 150 kA y Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m7	8
3.2.2.4. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m7	9
3.2.3. Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento con obtenidos analíticamente	0
3.2.3.1. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Corriente de 20 k. y 2, 3 y 5 electrodos en paralelo8	4 0
3.2.3.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m, Corriente de 70 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m y 3 electrodos en paralelo	1
3.2.3.3. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 150 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m, y 5 electrodos en paralelo8	2
3.2.3.4. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4, 3 y 3.6m, y 4 electrodos en paralelo8	3
3 2 4 Electrodos horizontales con altura de empotramiento con obtenidos	
analíticamente	4
3.2.4.1. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y Corriente de 20, 50 y 100 kA8	5
3.2.4.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m. altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y corriente de 70 kA8	6
3.2.4.3. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 150 kA y Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m8	7
3.2.4.4. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m8	8
3.2.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento con obtenidos en ATPDraw8	9
3.2.1.1. Corriente de 20, 50 y 100 kA, Resistividad del suelo de 50 Ω·m y Longitud de 2.4m9	0
3.2.1.2. Corriente de 70 kA, Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m, Longitud de 2.4m9	1
3.2.1.3. Corriente de 100 kA, Resistividad del suelo de 50 Ω·m y Longitudes de 2.4, 3 y 3.6m…9	1
3.2.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento con obtenidos en ATPDraw. 9	2
3.2.2.1. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m	
y Corriente de 20 kA, 50 kA y 100 kA9	3
3.2.2.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m, Longitud de 2.4 m, Altura de empotramiento de 0.5m y Corriente de 70 kA9	4
3.2.2.3. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 150 kA y Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m9	5
3.2.2.4. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m9	5
3.2.3. Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento con obtenidos en	
ATPDraw9	6
3.2.3.1. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Corriente de 20 k	Ą
y 2, 3 y 5 electrodos en paralelo9	7

	3.2.3.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m, Corriente de 70 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m y 3 electrodos en paralelo	98
	3.2.3.3. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 150 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m, y 5 electrodos en paralelo	99
	3.2.3.4. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4, 3 y 3.6m, y 4 electrodos en paralelo	? 100
3	.2.4. Electrodos horizontales con altura de empotramiento con obtenidos en ATPDr	aw.
•		.100
	3.2.4.1. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2. y Corriente de 20, 50 y 100 kA.	.4m 102
	3.2.4.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 Ω·m. altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y corriente de 70 kA	103
	3.2.4.3. Resistividad del suelo de 50 $\Omega \cdot m$ , Corriente de 150 kA y Altura de empotramiento d 0.01, 0.5 y 1m.	e 104
	3.2.4.4. Resistividad del suelo de 50 Ω·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m	؛ 105
С	APITULO IV	. 107
4	1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	. 107
4	1.1.1. Frecuencia industrial	. 107
	4.1.1.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento	107
	4.1.1.1.1. Resultados de simulación de resistividad	107
	4.1.1.1.2. Resultados de simulación de longitud	107
		108
	4.1.1.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento	108.
	4.1.1.2.1. Resultados de simulación de longitud	109
	4.1.1.2.3. Resultados de simulación de corriente	109
	4.1.1.2.4. Resultados de simulación de altura	110
	4.1.1.3. Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento	. 111
	4.1.1.3.1. Resultados de simulación de resistividad	111
	4.1.1.3.2. Resultados de simulación de longitud	112
	4.1.1.3.3. Resultados de simulación de corriente	113
	4.1.1.3.4. Resultados de simulación de altura	114
	4.1.1.4. Electrodos horizontales con altura de empotramiento	. 115
	4.1.1.4.1. Resultados de simulación de resistividad	115
	4.1.1.4.2. Resultados de simulación de longitud	115
	4.1.1.4.3. Resultados de simulación de corriente	116
	4.1.1.4.4. Resultados de simulación de altura	
4	.1.2. Alta frecuencia de tipo rayo	.119
	4.1.2.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento	.119
	4.1.2.1.1. Resultados de simulación de resistividad	119
	4.1.2.1.2. Kesultados de simulación de longitud	119 110
	4.1.2.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento	.119
	4.1.2.2.1. Kesuitados de simulación de resistividad	119

4.1.2.2.1. Resultados de simulación de longitud	120
4.1.2.2.3. Resultados de simulación de corriente	120
4.1.2.2.3. Resultados de simulación de altura	120
4.1.2.3. Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento	120
4.1.2.3.1. Resultados de simulación de resistividad	120
4.1.2.3.2. Resultados de simulación de longitud	121
4.1.2.3.3. Resultados de simulación de corriente	121
4.1.2.3.3. Resultados de simulación de altura	122
4.1.2.4. Electrodos horizontales con altura de empotramiento	122
4.1.2.4.1. Resultados de simulación de resistividad	122
4.1.2.4.2. Resultados de simulación de longitud	123
4.1.2.4.3. Resultados de simulación de corriente	123
4.1.2.4.4. Resultados de simulación de altura	123
4.2 CONCLUSIONES	
4.3 RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS	

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Diagrama de aterrizamiento del Reconectador NOJA Power 20239
Figura 2. Diagrama de puesta a tierra9
Figura 3. Diagrama de voltaje de paso11
Figura 4. Diagrama de componentes de una línea aérea de distribución
Figura 5. Diagrama de sobretensiones por descargas atmosféricas
Figura 6. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D34
Figura 7. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D35
Figura 8. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D
Figura 9. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D
<b>Figura 10.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D
<b>Figura 11.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D
<b>Figura 12.</b> Pertil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
<b>Figure 13</b> Derfil de velteie concrede por corrientes de frequencie industriel en electrodes verticeles
rigura 15. Perm de voltaje generado por comentes de frecuencia industrial en electrodos venticales
Figure 14 Derfil de veltais generado por corrientes de frecuencie industrial en electrodes verticales
con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D
<b>Figure 15</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D
<b>Figura 16.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D
<b>Figura 17.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D
Figura 18. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-2D
Figura 19. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-3D41
Figura 20. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
en paralelo con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D42
Figura 21. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
en paralelo con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D42
Figura 22. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D
Figura 23. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D
Figura 24. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en paralelo en Python-2D
<b>Figura 25.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
riguno 26 Derfil de velteie concrede por corrientes de frequencie industriel en electrodes verticeles
rigura 20. renni de vonaje generado por contentes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralalo con altura de ampotramiento, evaluando altura en Duthon 2D
En paraiero con anura de emporramento, evaluando anura en Python-2D45 Figure 27 Derfil de volteie generado por corrientes de frequencie industrial en electrodes verticales
en paralelo con altura de empotramiento, evaluando altura en Dython 3D 45
<b>Figura 28</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos
horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D 46

Figura 29. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos Figura 30. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos Figura 31. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos Figura 32. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos Figura 33. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-3D......48 Figura 34. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos Figura 35. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos Figura 36. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura de **Figura 37**. Model editor default un de sistema de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura Figura 38. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad en Python con datos de ATPDraw......51 Figura 39. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-2D......52 Figura 40. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-3D......52 Figura 41. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales Figura 42. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales Figura 43. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de Figura 44. Parámetros del model de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial......54 Figura 45. Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial......55 Figura 46. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad en Python con datos de ATPDraw-2D......55 Figura 47. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad en Python con datos de ATPDraw-3D......56 Figura 48. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitud en Python con datos de ATPDraw-2D......56 Figura 49. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitud en Python con datos de ATPDraw-3D......57 Figura 50. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales Figura 51. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales Figura 52. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-2D......59 Figura 53. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-3D......59 Figura 54. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura Figura 55. Parámetros de model de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial......60 Figura 56. Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo

con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial
<b>Figura 58</b> Perfil de voltaie generado nor corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales
en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-
Figura 59. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw- 2D.
<b>Figura 60.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw- 3D
<b>Figura 61.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en Python con datos de ATPDraw- 2D
Figura 62. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en Python con datos de ATPDraw- 3D
<b>Figura 63.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando alturas en Python con datos de ATPDraw-2D.
<b>Figura 64.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando alturas en Python con datos de ATPDraw-3D.
Figura 65. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de
empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial
Figura 66. Parámetros de model de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con
altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial
<b>Figura 67.</b> Model editor de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial
Figura 68. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos
horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python con datos de ATPDraw-2D
<b>Figura 69.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python con datos de ATPDraw-3D
<b>Figura 70.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw- 2D
<b>Figura 71.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw- 3D
<b>Figura 72.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python con datos de ATPDraw-
Figura 73. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python con datos de ATPDraw- 3D
<b>Figura 74.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-2D.
<b>Figura 75.</b> Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-3D.

Figura 76. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 77. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-3D. Figura 78. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo ravo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D......74 Figura 79. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D......74 Figura 80. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D......75 Figura 81. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D......75 Figura 82. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 83. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 84. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D. ......77 Figura 85. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 86. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-2D......78 Figura 87. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 88. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 89. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D......80 Figura 90. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en Python-2D......81 Figura 91. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en Python-3D. .....81 Figura 92. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D. Figura 93. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo ravo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D. Figura 94. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 95. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 96. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 97. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 98. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 99. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 100. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 101. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos  Figura 102. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 103. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 104. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo ravo en electrodos Figura 105. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 106. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura de Figura 107. Parámetros de un modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical sin Figura 108. Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo......90 Figura 109. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en ATPDraw-2D. ......90 Figura 110. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en ATPDraw-2D. ..........91 Figura 111. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en ATPDraw-2D. ......92 Figura 112. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo......92 Figura 113. Parámetros de un modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con Figura 114. Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura Figura 115. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos Figura 116. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en ATPDraw-2D. .........94 Figura 117. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en ATPDraw-2D......95 Figura 118. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en ATPDraw-2D. ......96 Figura 119. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura Figura 120. Parámetros de un modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en Figura 121. Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en Figura 122. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando corrientes en ATPDraw-2D......98 Figura 123. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo ravo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en ATPDraw-Figura 124. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando altura en ATPDraw-2D. .....100 Figura 125. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en ATPDraw-2D......100 Figura 126. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.....101 Figura 127. Parámetros de un modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo......101 Figura 128. Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo......102

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Resistividad de suelos 15
Tabla 2. Resistividad en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia industrial107
Tabla 3. Cálculo con distintos valores de resistividad -Voltajes en electrodo vertical sin altura de
empotramiento a frecuencia industrial107
Tabla 4. Longitud en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia industrial107
Tabla 5. Cálculo con distintos valores de longitud-Voltajes en electrodo vertical sin altura de
empotramiento a frecuencia industrial108
Tabla 6. Corriente y resistividad en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia
industrial108
Tabla 7. Cálculo con distintos valores de corriente-Voltajes en electrodo vertical sin altura de
empotramiento a frecuencia industrial108
Tabla 8. Resistividad en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial. 109
Tabla 9. Cálculo con distintos valores de resistividad-Voltajes en electrodo vertical con altura de
empotramiento a frecuencia industrial109
Tabla 10. Longitud en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial109
Tabla 11. Cálculo con distintos valores de longitud-Voltajes en electrodo vertical con altura de
empotramiento a frecuencia industrial109
Tabla 12. Corriente en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial110
Tabla 13. Cálculo con distintos valores de corriente-Voltajes en electrodo vertical con altura de
empotramiento a frecuencia industrial110
Tabla 14. Altura en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial110
Tabla 15. Cálculo con distintos valores de altura, de 0.01 a 0.4 m-Voltajes en electrodo vertical con
altura de empotramiento a frecuencia industrial111
Tabla 16. Cálculo con distintos valores de altura, de 0.5 a 1 m-Voltajes en electrodo vertical con
altura de empotramiento a frecuencia industrial111
Tabla 17. Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 2 picas a
frecuencia industrial111
Tabla 18. Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 3 picas a
frecuencia industrial112
Tabla 19. Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 4 picas a
frecuencia industrial112
Tabla 20. Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 5 picas a
frecuencia industrial112
Tabla 21. Cálculo con distintos valores de resistividad-Voltajes en electrodo vertical en paralelo
con altura de empotramiento a frecuencia industrial112
Tabla 22. Longitud en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 5 picas a
frecuencia industrial113
Tabla 23. Cálculo con distintos valores de longitud-Voltajes en electrodo vertical en paralelo con
altura de empotramiento a frecuencia industrial113
Tabla 24. Corriente en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 3 picas a
frecuencia industrial113
Tabla 25. Cálculo con distintos valores de corriente-Voltajes en electrodo vertical en paralelo con
altura de empotramiento a frecuencia industrial114
Tabla 26. Altura en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 4 picas a
frecuencia industrial114
Tabla 27. Cálculo con distintos valores de altura, de 0.01 a 0.4 m-Voltajes en electrodo vertical en
paralelo con altura de empotramiento a frecuencia industrial114
Tabla 28. Cálculo con distintos valores de altura, de 0.5 a 1 m-Voltajes en electrodo vertical en
paralelo con altura de empotramiento a frecuencia industrial115
<b>Tabla 29.</b> Resistividad en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

Tabla 30. Cálculo con distintos valores de resistividad-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.    115
Tabla 31. Longitud en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.115      Tabla 32. Cálculo con distintos valores de longitud-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.      Tabla 33. Corriente en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.      116      Tabla 33. Corriente en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.
Tabla 34. Cálculo con distintos valores de corriente-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.    116      Tabla 35. Altura en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.    117      Tabla 36. Cálculo con distintos valores de altura, de 0.01 a 0.4 m-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.    117      Tabla 37. Cálculo con distintos valores de altura, de 0.5 a 0.1 m-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.    117      Tabla 38. Resistividad en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.    119
Tabla 40. Longitud en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo119Tabla 42. Corriente en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo. 119Tabla 44. Resistividad en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.119
Tabla 46. Longitud en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo. 120      Tabla 48. Corriente en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.      120
Tabla 50. Altura en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo120      Tabla 53. Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia      de tipo rayo      121
Tabla 58. Longitud en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.    121      Tabla 60. Corriente en electrodo vertical en paralelo con eltura de empotramiento a frecuencia de 121
tipo rayo
Tabla 65. Resistividad en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia de tipo      rayo
Tabla 71. Altura en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo. 123

#### RESUMEN

Este proyecto de titulación tiene como objetivo el análisis de los voltajes de paso en sistemas de puesta a tierra empleados en líneas aéreas de distribución, utilizando herramientas como ATPDraw y Python para la simulación y el procesamiento de datos. La investigación se enfoca en la modelación de distintos arreglos geométricos de puesta a tierra, evaluando su desempeño frente a descargas de corriente tanto de frecuencia industrial como de tipo rayo.

Para ello, se consideran configuraciones típicamente empleadas en estructuras de distribución eléctrica, con el fin de comprender su efectividad en la disipación de corriente y su influencia en la seguridad del personal y equipos cercanos. A través de simulaciones realizadas en ATPDraw, se obtienen perfiles de voltaje de paso en distintos escenarios, los cuales son posteriormente procesados y analizados con Python.

Además, se implementa una visualización en 3D del comportamiento geométrico de los potenciales, lo que permite una mejor interpretación de los resultados y su relación con la distribución espacial de las corrientes de falla. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con criterios normativos y estudios previos, evaluando la efectividad de las configuraciones analizadas y proponiendo mejoras para la optimización de los sistemas de puesta a tierra en líneas aéreas de distribución.

#### ABSTRACT

This thesis project aims to analyze step voltages in grounding systems used in overhead distribution lines, utilizing computational tools such as ATPDraw and Python for simulation and data processing. The research focuses on modeling different grounding geometric arrangements, evaluating their performance under both industrial frequency and lightning current discharges.

To achieve this, commonly used grounding configurations in electrical distribution structures are considered to understand their effectiveness in current dissipation and their impact on the safety of personnel and nearby equipment. Through simulations conducted in ATPDraw, step voltage profiles are obtained in various scenarios, which are then processed and analyzed using Python.

Additionally, a 3D visualization of the geometric behavior of potentials is implemented, allowing for a better interpretation of the results and their relationship with the spatial distribution of fault currents. Finally, the obtained results are compared with regulatory criteria and previous studies, assessing the effectiveness of the analyzed configurations and proposing improvements to optimize grounding systems in overhead distribution lines.

# ACRÓNIMOS

SDPT: Sistema de Puesta a Tierra.

SSDPT: Sistemas de Puesta a Tierra.

IEC: International Electrotechnical Commission.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia.

kV: Kilovoltios

P: Potencia

I: Corriente

V: Voltaje

kV: Kilovoltios

MV: Megavoltios

kVA: Kilovoltios amperios

kA: Kiloamperios

L: Longitud

kW: Kilovatios

#### **CAPITULO I**

## **1.1. TÍTULO**

Análisis de los voltajes de paso en sistemas de puesta a tierra en estructuras de líneas aéreas de distribución, utilizando software de simulación y modelado.

## 1.2. INTRODUCCIÓN

Cuando hablamos de sistemas eléctricos de distribución, es sabido que uno de los aspectos más importantes es la seguridad de las personas y de los equipos conectados a dicho sistema, es aquí donde empezamos a notar la importancia de un sistema de puesta a tierra, la importancia de su diseño y la importancia de un buen estudio para el mismo, ya que comprende un papel crucial para la protección de los distintos riesgos que pueden ocurrir. Uno de los riesgos que destacan en estos sistemas son los voltajes de paso, ya que presentan una amenaza significativa, donde las condiciones de operación y las características que presente el suelo influyen directamente en el comportamiento del sistema.

Bajo este contexto, el análisis de los voltajes de paso empieza a ser un indispensable en un sistema de distribución, debido a que es un indicativo de escenarios críticos, y también nos permite optimizar diseños y garantizar el cumplimiento de los estándares internacionales de seguridad como los presentados por el IEEE o IEC, pero, al tener detrás condiciones que afectan directamente el análisis como las variaciones en los parámetros del suelo, los materiales y las magnitudes, se vuelve necesario hacer uso de herramientas avanzadas para su comprensión y modelado.

El presente trabajo ofrece un análisis integral de los voltajes de paso en los sistemas de puesta a tierra utilizados en líneas aéreas de distribución, ante descargas de frecuencia industrial y frecuencias de tipo rayo. Para abordar esta problemática se hará uso de las herramientas ATPDraw, para poder simular los fenómenos eléctricos; y Python, para lograr un modelo detallado y de fácil comprensión.

#### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La evaluación y diagnóstico de la confiabilidad y seguridad de los voltajes de pasos generados en sistemas de puesta a tierra ante descargas de frecuencia industrial y descargas de tipo rayo es un tema permanente de investigación y de estudio. Estas investigaciones y estudios buscan desarrollar herramientas que permitan comprender el comportamiento real de los voltajes, que presentan características complejas como: magnitud, valor pico, comportamiento temporal, comportamiento espacial, comportamiento frecuencial, forma geométrica de propagación, entre otros.

La falta de herramientas de análisis adecuadas para evaluar estos voltajes genera un margen de error significativo en la selección y dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra.

Es importante destacar que los voltajes de paso deben cumplir con los márgenes de seguridad recomendados por estándares internacionales. Sin embargo, existe una brecha en la información disponible, especialmente para descargas tipo rayo. Aunque se cuenta con información disponible, especialmente para descargas de frecuencia industrial, sigue siendo un tema de estudio a nivel mundial.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN

El propósito de la malla de puesta a tierra es proteger al personal y a los equipos en una subestación, garantizando la continuidad del sistema eléctrico y minimizando los riesgos de potencial peligroso a tierra, además de facilitar una rápida respuesta ante fallas operativas [1].

Un aspecto para considerar efectivo un sistema de puesta a tierra depende mucho de las condiciones del suelo, tanto la humedad y la temperatura actúan de forma directa en la resistividad, es decir que van a influir en la capacidad del sistema para dispersar la corriente de forma segura. Se ha demostrado que en climas extremos las condiciones del suelo cambian a menudo, esto crea una variación en la resistividad, lo cual, reduce la eficiencia del sistema, por lo que, se vuelve necesario hacer un análisis local y contextualizado. Mejorar el diseño y funcionamiento de estos sistemas ayuda a crear ambientes más seguros, así como

también a reducir costos de infraestructura.

La falta de información de los sistemas de puesta a tierra genera un problema en la confiabilidad de la seguridad de las subestaciones eléctricas para el personal operativo de la misma, los cuales están expuestos a fallas eléctricas debido a los infortunados eventos atmosféricos.

Bajo todas estas condiciones, la presente investigación explora el uso de nuevas herramientas y técnicas para mejorar la disipación de la corriente en puntos que se consideran riesgosos, elevando los niveles de seguridad y fortaleciendo la confiabilidad del sistema eléctrico. Este enfoque permitirá ir de la mano con los estándares de seguridad proporcionados por el IEEE, así como también, desarrollar soluciones en base a condiciones específicas contribuyendo a la realización de sistemas más seguros y eficientes.

## 1.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

A grandes rasgos, el que el análisis se base exclusivamente en sistemas de puesta a tierra utilizados en líneas aéreas de distribución, se limita a otros escenarios en los que también existen sistemas de puesta a tierra como en subestaciones y distintas instalaciones industriales.

El uso de condiciones de terreno específicas, no incluyen variaciones específicas que tienen otras regiones, mismas que pueden ser extremas o muy específicas, ya que poseen terrenos con alta resistividad o climas extremos.

Las herramientas utilizadas para simular y modelar poseen supuestos inherentes y al tener datos procesados de para su modelación puede implicar ciertas simplificaciones en el algoritmo desarrollado.

## 1.6. BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA

• El personal técnico y de mantenimiento en líneas aéreas de distribución, ya que los resultados de este análisis permitirán identificar y mitigar los riesgos asociados a los

voltajes de paso.

- Los usuarios beneficiados por el sistema eléctrico, debido a la mejora en la confiabilidad y seguridad del sistema de distribución, lo que resulta en una cantidad menor de incidencias.
- La Universidad Politécnica Salesiana se ve beneficiada en el ámbito académico debido a que el presente trabajo contribuye al conocimiento técnico, que podría servir para futuras investigaciones relacionadas a los sistemas de puesta a tierra.

## **1.7. OBJETIVOS**

### 1.7.1. Objetivo General

Analizar los voltajes de paso en sistemas de puesta a tierra utilizados en líneas aéreas de distribución, haciendo uso de las herramientas ATPDraw y Python, para modelar y simular el comportamiento de estos voltajes ante descargas de corriente de frecuencia industrial y corriente tipo rayo.

#### 1.7.2. Objetivos Específicos

- Modelar el sistema de puesta a tierra para descargas de corriente de frecuencia industrial y corrientes tipo rayo, seleccionando los arreglos geométricos más comunes utilizados para estructuras de líneas aéreas de distribución de electricidad.
- Graficar el voltaje de paso generado por descargas de corriente de frecuencia industrial en un sistema de puesta a tierra, de acuerdo con el perfil de voltaje dado por la norma de Reglamentos de Líneas de Alta Tensión de España, mediante códigos Python para visualizar el comportamiento geométrico en 3D.
- Simular en ATPDraw, voltajes de paso generados por descargas de corrientes tipo rayo en sistemas de puesta a tierra, para visualizar el comportamiento geométrico en 3D mediante códigos Python.

## 1.8. METODOLOGÍA Y MEDIOS

- Investigación exhaustiva para seleccionar los sistemas de puesta a tierra más comunes:
  - Se realizarán búsquedas bibliográficas para identificar los sistemas de puesta a tierra utilizadas en líneas aéreas de distribución.
  - Se realizará el estudio de normas, estándares y artículos de investigación.
  - Se seleccionarán los sistemas de puesta a tierra más comunes para la modelación y simulación.
- Modelar los sistemas de puesta a tierra seleccionados para descargas de frecuencia industrial:
  - Se determinarán los factores de los sistemas eléctricos para utilizarlos en métodos matemáticos establecidos por normas y estándares internacionales.
  - Se modelarán los sistemas de puesta a tierra para frecuencia industrial en 3D mediante la herramienta Python, utilizando librerías como Numpy, Matplotlib, entre otros.
- Simulación de los sistemas de puesta a tierra en ATPDraw ante descargas de corriente tipo rayo:
  - Se realizará la simulación en ATPDraw, sometiendo los sistemas de puesta a tierra a descargas de corriente tipo rayo, tomando en cuenta los factores del sistema eléctrico.
- Registro y tabulación de valores obtenidos de la modelación y simulación de los sistemas de puesta a tierra.
  - Se hará el registro y la tabulación de los datos obtenidos en la modelación y simulación de los sistemas puestas a tierra.
  - Se tomarán en cuenta los datos de voltajes de paso, las resistencias del sistema y el comportamiento transitorio de las descargas de corriente.
- Análisis de valores obtenidos de la modelación y simulación de los sistemas de puesta a tierra.
  - Se analizarán los valores obtenidos de la modelación y simulación para realizar una evaluación de los voltajes de paso en condiciones de frecuencia industrial y corriente tipo rayo.
  - Se realizará la comparación de desempeño de los sistemas de puesta a tierra para

determinar su seguridad.

- > Determinar las conclusiones de los sistemas de puesta a tierra:
  - Se realizarán las conclusiones en base de los resultados y análisis de la modelación y simulación de los sistemas de puesta a tierra.
  - Se determinará el impacto de la resistividad del suelo y su contribución para la disipación de los voltajes los sistemas de puesta a tierra.

## **CAPITULO II**

## 2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1.1. Sistema de puesta a tierra en redes eléctricas.

Los sistemas de puesta a tierra son esenciales para la seguridad y operación de las instalaciones eléctricas, ya que permiten la disipación segura de corrientes hacia la tierra, protegiendo a las personas y equipos de fallos eléctricos y fenómenos naturales como los rayos. Además, estabilizan la tensión del sistema, facilitando el funcionamiento de dispositivos de protección y control [2].

Un SDPT es el conjunto de medidas tomadas para crear una conexión conductora, a la cual se conecta un equipo o circuito eléctrico a la masa de la tierra, dando como resultado un sistema de protección eléctrica [3]. Un SDPT debe considerar factores como las características del suelo, la magnitud de las corrientes de falla, la resistividad del terreno y las normativas locales, asegurando que la resistencia de la conexión sea lo suficientemente baja para disipar eficazmente cualquier corriente.

Cumplen un papel crucial en la coordinación de la protección y la mitigación de fenómenos transitorios, como cuando durante un cortocircuito, el sistema dirige la corriente de falla hacia el suelo, activando dispositivos de protección como interruptores automáticos y evitando daños graves, así también, durante descargas atmosféricas, un sistema adecuado protege tanto las estructuras como los equipos electrónicos sensibles de picos de tensión que podrían destruirlos.

En redes eléctricas son útiles para garantizar la seguridad, estabilidad y funcionamiento adecuado de las instalaciones eléctricas, tienen como objetivo principal proteger a las personas, los equipos y las instalaciones frente a posibles fallas, como cortocircuitos, sobrevoltajes o descargas atmosféricas, canalizando las corrientes indeseadas hacia la tierra de manera segura. Los SDPT también permiten mantener un potencial eléctrico uniforme en las estructuras metálicas y otros elementos conectados al sistema, reduciendo riesgos de choques eléctricos.

El estudio de los sistemas de puesta a tierra ante las descargas atmosféricas de altas y bajas frecuencias, precisan de conocimientos profundos de la conducta transitoria de los sistemas eléctricos. En [4] realizan múltiples métodos y modelos para el análisis de sistema de puesta a tierra ante las frecuencias, resaltando la influencia que tiene la frecuencia en la impedancia del sistema.

## 2.1.1.1. Concepto y objetivos de la puesta a tierra

La puesta a tierra se define como el conjunto de medidas y dispositivos diseñados para conectar partes específicas de un sistema eléctrico al suelo con el fin de garantizar seguridad y funcionalidad. Su propósito principal es disipar de manera segura corrientes de falla o descargas atmosféricas, estabilizar el sistema eléctrico ante fluctuaciones de voltaje y proteger a las personas, equipos e instalaciones contra choques eléctricos y daños ocasionados por sobrevoltajes.

Los objetivos clave de un sistema de puesta a tierra incluyen la protección de vidas humanas al reducir tensiones de contacto y paso que puedan ser peligrosas, la prevención de daños a equipos eléctricos al limitar los efectos de corrientes de falla, y la mejora de la estabilidad operativa de las redes eléctricas mediante el establecimiento de un potencial de referencia uniforme, también, el diseño adecuado contribuye al correcto funcionamiento de los dispositivos de protección, como interruptores automáticos y fusibles, garantizando que se activen oportunamente en caso de una anomalía.

La red de puesta a tierra busca garantizar una referencia de potencial, permitir la circulación de corrientes no equilibradas y con el diseño adecuado velar por la correcta inversión de los recursos asignados [5]. La norma IEE Std 142-2007 trata prácticas para realizar un diseño de puesta a tierra, enfatizado en las instalaciones industriales y comerciales [6]



Diagrama de aterrizamiento del Reconectador NOJA Power OSM © NOJA Power 2023





2.1.1.2. Tipos de sistemas de puesta a tierra

Figura 2. Diagrama de puesta a tierra[8].

<u>Sistema de puesta a tierra de protección:</u> Está orientado a la seguridad de las personas y equipos, conectando las partes metálicas expuestas de los dispositivos eléctricos a tierra.

<u>Sistema de puesta a tierra funcional:</u> Garantiza la estabilidad del sistema eléctrico y su correcto funcionamiento, estableciendo un potencial de referencia para el neutro y reduciendo perturbaciones como fluctuaciones de tensión, se usa en redes trifásicas con neutro a tierra y en sistemas de comunicación.

<u>Puesta a tierra directa:</u> Este sistema conecta el neutro de la fuente o la instalación directamente al suelo, proporcionando un camino de baja impedancia para las corrientes de falla.

<u>Puesta a tierra con resistencia o impedancia:</u> Se introduce una resistencia o reactancia entre el neutro y la tierra para limitar la corriente de falla a niveles seguros, evitando daños en equipos sensibles y permitiendo continuidad en la operación.

<u>Sistemas aislados de tierra:</u> El neutro del sistema no está conectado directamente al suelo, lo que minimiza las corrientes de falla, pero requiere una supervisión constante para detectar fallas y garantizar la seguridad.

<u>Sistemas de puesta a tierra múltiple:</u> Se utiliza en sistemas de distribución, donde el neutro está conectado a tierra en varios puntos a lo largo de la red, para mejorar la estabilidad y facilitar la disipación de corrientes de falla.

## 2.1.1.3. Parámetros eléctricos asociados a la puesta a tierra

Los parámetros eléctricos asociados a los SDPT son fundamentales para garantizar su correcto diseño, implementación y funcionamiento, estos parámetros permiten evaluar la eficacia del sistema al disipar corrientes de falla, proteger a las personas y equipos, y mantener la estabilidad del sistema eléctrico.

Una resistencia baja es necesaria para asegurar que las corrientes de falla se disipen eficazmente en el terreno, el valor depende de la resistividad del suelo, la geometría y disposición de los electrodos de tierra, así como de las características del terreno, como humedad y temperatura. Normativas como la IEEE 80 y la IEC 60364 establecen valores de referencia para esta resistencia, dependiendo de la aplicación específica.

El voltaje de paso se refiere a la diferencia de potencial que una persona puede experimentar al caminar en un área con corriente de falla, mientras que el voltaje de toque es la diferencia de potencial entre un objeto metálico conectado a tierra y el suelo circundante, ambos deben mantenerse por debajo de niveles peligrosos para evitar riesgos de electrocución.

La corriente de falla a tierra es el flujo eléctrico que ocurre durante un cortocircuito o descarga atmosférica y se dirige hacia el suelo a través del sistema de puesta a tierra, su magnitud depende de la configuración del sistema eléctrico, la impedancia del circuito de falla y las condiciones del suelo, este, es crucial para determinar las dimensiones y materiales de los electrodos y conductores de tierra.





Figura 3. Diagrama de voltaje de paso [9].

Cuando una corriente eléctrica se introduce en el suelo a través de un electrodo de puesta a tierra, se genera un gradiente de potencial en la superficie del terreno, este gradiente provoca que los puntos del suelo tengan diferentes potenciales eléctricos dependiendo de su proximidad al punto de inyección de corriente, si una persona tiene ambos pies en puntos con diferentes potenciales, experimentará un voltaje de paso, que puede provocar una

descarga eléctrica a través del cuerpo si este voltaje supera ciertos umbrales seguros.

Los niveles seguros de voltaje de paso se determinan considerando factores como la resistencia del cuerpo humano, la duración de la exposición y las características del terreno, normativas como la IEEE Std. 80 especifican valores máximos permisibles para tensiones de paso dependiendo del tiempo de falla y del tipo de instalación.

Para disminuir los riesgos asociados a los voltajes de paso, se emplean diversas estrategias de diseño, como el uso de mallas de tierra bien distribuidas, la reducción de la resistividad del terreno mediante la adición de materiales conductores, y la instalación de capas de grava u otros materiales con alta resistencia en la superficie, que limitan la corriente que puede pasar a través del cuerpo humano.

## 2.1.2.1. Definición de voltajes de paso

Es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pie sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado [5].

Los voltajes de paso se definen como la diferencia de potencial eléctrico que existe entre dos puntos del suelo que son alcanzados simultáneamente por los pies de una persona en presencia de una corriente de falla eléctrica, esto ocurre cuando una corriente eléctrica fluye hacia el suelo desde un electrodo de puesta a tierra, generando un gradiente de potencial en la superficie terrestre, los voltajes de paso son especialmente importantes en el diseño de SDPT, ya que pueden representar un riesgo para la seguridad de las personas en caso de niveles de voltajes elevados.

La magnitud del voltaje de paso depende de factores como la resistividad del terreno, la corriente inyectada al suelo, la distancia entre los pies y la cercanía al punto de inyección de la corriente, este parámetro se considera crítico porque, si es suficientemente alto, puede causar una descarga eléctrica peligrosa al fluir corriente a través del cuerpo humano, lo que pone en riesgo la vida de las personas que se encuentren en la zona en la que ocurre.
#### 2.1.2.2. Relevancia en la seguridad de los sistemas eléctricos

Los voltajes de paso tienen mucha importancia en la seguridad de los sistemas eléctricos debido a su potencial para causar lesiones graves o incluso la muerte en situaciones de falla. En instalaciones eléctricas, como subestaciones, sistemas de distribución y plantas industriales, donde las corrientes de falla pueden ser significativas, los voltajes de paso se convierten en un factor determinante para proteger a las personas que operan cerca de dichas instalaciones.

Los sistemas de puesta a tierra son necesarios para mantener la seguridad del personal, el desempeño del equipo porque sin ellos se presentan riesgos de sufrir accidentes o dañar los equipos eléctricos dentro de una instalación, ocasionada por desbalance de fases, descargas atmosféricas, corrientes de fuga, entre otros[5].

De acuerdo con el artículo Grounding system models for electric current impulse [10], las evaluaciones y pruebas en los sistemas de puesta a tierra ayudan a minimizar los riesgos de exposición a los voltajes de paso. La relevancia en la seguridad radica en que los voltajes de paso pueden causar daño dependiendo de su magnitud, la duración de la exposición y la resistencia eléctrica del cuerpo humano, si no se controlan adecuadamente, pueden provocar fibrilación ventricular, quemaduras o contracciones musculares incontrolables.

### 2.1.3. Factores que Afectan el Rendimiento de la Puesta a Tierra

El rendimiento de un SDPT está influenciado por diversos factores que determinan su capacidad para disipar eficazmente las corrientes de falla, mantener la estabilidad operativa del sistema eléctrico y garantizar la seguridad de las personas y equipos, uno de los factores más relevantes es la resistividad del terreno, que varía dependiendo del lugar donde se encuentre ubicado, suelos arcillosos con alto contenido de humedad suelen tener una resistividad baja, lo que mejora el rendimiento del sistema, mientras que terrenos arenosos o rocosos presentan resistividades elevadas que dificultan la disipación de corriente. La geometría y disposición de los electrodos de tierra también desempeñan un papel crucial, para ello usamos configuraciones optimizadas, como mallas, anillos o varillas múltiples interconectadas, ayudan a distribuir uniformemente la corriente de falla en el terreno, reduciendo los gradientes de potencial peligrosos. Lo que también consideramos importante,

es el tipo de corriente inyectada al suelo, ya que las corrientes alternas de alta frecuencia, como las generadas por descargas atmosféricas, interactúan de manera diferente con el terreno en comparación con corrientes de baja frecuencia, este fenómeno, conocido como efecto piel, puede limitar la profundidad efectiva de la corriente en el suelo, aumentando la resistencia del sistema.

#### 2.1.3.1. Resistividad del suelo

Se define como la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, pudiendo también referirse a un estrato específico del suelo. Se obtiene indirectamente a través de mediciones realizadas en un campo determinado. Su magnitud se expresa en  $\Omega \cdot m$  (ohmios por metro) o  $\Omega \cdot cm$  (ohmios por centímetro) y es inversa a la conductividad[11].

Este valor es esencial para determinar la eficacia con la que un SDPT puede disipar corrientes de falla y mantener un gradiente de potencial seguro en la superficie del terreno.

La resistividad del suelo varía considerablemente en función de su composición, contenido de humedad, temperatura y densidad. No es constante, ya que factores ambientales como las precipitaciones o las estaciones del año pueden alterarla significativamente, durante la época seca, la humedad del suelo disminuye, aumentando su resistividad y, en consecuencia, la resistencia de los electrodos de puesta a tierra. La temperatura también influye, ya que suelos congelados presentan resistividades mucho mayores debido a la pérdida de conductividad del agua en estado sólido.

Naturaleza del terreno	Resistividad en
	Ω·m
Terrenos pantanosos	±3 a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	100 a 500
Arcilla plástica	50
Margas y Arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40

Arena arcillosa	200 a 300
Arena sílice	500 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	1500 a 3000
Suelo pedregoso desnudo	1000 a 4000
Calizas blandas	1000 a 5000
Calizas compactas	1000 a 4000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	800
Roca de mica y cuarzo	1500 a 10000
Granitos y gres procedente de alteración	100 a 600
Granito y gres muy alterado	1500 a 3000

*Tabla 1.* Resistividad de suelos [12]

### 2.1.3.2. Resistencia de puesta a tierra

Se define como la oposición que el sistema de puesta a tierra, incluyendo los electrodos y el terreno circundante, ofrece al paso de la corriente eléctrica hacia el suelo. Este parámetro se mide en ohmios y es crucial para garantizar la seguridad de las personas, la protección de los equipos y el correcto funcionamiento del sistema eléctrico.

El diseño del sistema de puesta a tierra incluye estrategias para reducir esta resistencia, entre ellas destacan la utilización de múltiples electrodos conectados en paralelo, el aumento de la profundidad de los electrodos para alcanzar capas de suelo con menor resistividad y la mejora de las propiedades del terreno mediante tratamientos químicos, como la adición de bentonita o sales conductoras.

Una puesta a tierra presenta resistencia, capacitancia e inductancia, cada cual influye en la capacidad de conducción de corriente a tierra. Por lo tanto, no se debe pensar solamente en una resistencia de puesta a tierra, sino más bien en una impedancia de puesta a tierra [11].

Por ejemplo, en instalaciones de alta tensión, se buscan resistencias inferiores a 1 ohmio, mientras que, para redes de baja tensión, valores de hasta 5 ohmios pueden ser aceptables.

### 2.1.3.3. Corrientes de falla en el sistema

Corrientes que pueden producir daños térmicos o mecánicos, por lo que es necesario aislar lo más pronto posible la falla, mediante la apertura de los interruptores correspondientes [13].

Las corrientes de falla en el sistema son flujos eléctricos anormales que ocurren cuando se produce un cortocircuito o una falla en el aislamiento del sistema eléctrico, permitiendo que la corriente tome caminos no previstos, son significativamente mayores que las corrientes de operación normales y representan un riesgo para la seguridad de las personas, la integridad de los equipos y la estabilidad del sistema eléctrico.

En el contexto de la puesta a tierra, las corrientes de falla se canalizan hacia el suelo a través del sistema de puesta a tierra, donde se disipan para reducir los efectos dañinos.

Las corrientes de falla pueden clasificarse según el tipo de falla, las fallas monofásicas a tierra son las más comunes en sistemas eléctricos y, dependiendo de la configuración del sistema, pueden representar la magnitud más alta de corriente de falla.

El nivel de la corriente de falla depende de factores como la configuración del sistema, la impedancia total del circuito de falla, y las características del terreno y del sistema de puesta a tierra, los sistemas con neutro directamente puesto a tierra, las corrientes de falla son altas, pero el tiempo de despeje de la falla es más rápido debido a la respuesta eficiente de los dispositivos de protección, por otro lado, los sistemas con neutro aislado o con impedancia limitan las corrientes de falla, pero necesitan equipos especializados para detectar y manejar las fallas.

El impacto de estas corrientes en el sistema eléctrico y su entorno inmediato puede ser severo, las corrientes de falla pueden causar daños térmicos y mecánicos en los conductores, equipos y estructuras debido a las altas temperaturas y fuerzas electromagnéticas generadas.

## 2.1.4. Líneas Aéreas de Distribución

Las líneas aéreas de distribución son componentes esenciales en los sistemas eléctricos que

permiten transportar y distribuir energía eléctrica desde las subestaciones hasta los usuarios finales, están diseñadas para operar a diferentes niveles de tensión, generalmente clasificados como baja, media o alta tensión, dependiendo de las necesidades del área a la que sirven, se caracterizan por su instalación sobre postes o torres, donde los conductores eléctricos están suspendidos mediante aisladores y otros elementos de soporte.

Algo que podemos destacar en el diseño y operación de las líneas aéreas de distribución es su capacidad para cubrir grandes distancias a un costo relativamente bajo en comparación con sistemas subterráneos, pero su exposición a condiciones ambientales como viento, lluvia, nieve y rayos representa desafíos significativos en términos de confiabilidad y mantenimiento.

Los rayos o descargas atmosféricas son una de las mayores causas de contorneamiento en líneas aéreas de distribución. Una descarga atmosférica puede originar una sobretensión que termine provocando un fallo en la línea aérea afectada o que se propague por la línea y pueda provocar una avería en otro equipo [14].



#### 2.1.4.1. Componentes principales de una línea aérea

Figura 4. Diagrama de componentes de una línea aérea de distribución [15].

<u>Conductores eléctricos</u>: Son los encargados de transportar la corriente eléctrica, están fabricados con materiales de alta conductividad, como aluminio, aleaciones de aluminio, o cobre, pueden ser desnudos o protegidos con revestimientos para entornos específicos y lo seleccionamos dependiendo de la capacidad de carga, la resistencia mecánica y las condiciones ambientales.

<u>Soportes:</u> Los postes se utilizan comúnmente en líneas de baja y media tensión, y pueden estar hechos de madera, acero, hormigón o materiales compuestos.

<u>Aisladores:</u> Separan eléctricamente los conductores de los soportes y evitan que la corriente fluya hacia las estructuras de soporte, están hechos de materiales no conductores como porcelana, vidrio o polímeros, y se diseñan para resistir tensiones mecánicas y eléctricas, además de factores climáticos.

<u>Hilo de guarda o pararrayos:</u> Se instalan en la parte superior de las torres para proteger la línea contra descargas atmosféricas, están conectados al sistema de puesta a tierra y actúan como una barrera que desvía los rayos hacia el suelo, minimizando el daño a los conductores.

<u>Accesorios y herrajes:</u> Incluyen abrazaderas, tensores, grapas y conectores, que aseguran los conductores a los aisladores y facilitan la transferencia de carga mecánica a los soportes.

<u>Sistema de puesta a tierra:</u> Proporciona un camino seguro para las corrientes de falla y las descargas atmosféricas hacia el suelo, protege tanto la infraestructura como a las personas cercanas a la línea.

<u>Cruzamientos y brazos metálicos:</u> Son los elementos horizontales fijados a los postes o torres que sostienen los aisladores y los conductores, debe ser resistente para soportar el peso y las fuerzas externas, como el viento.

<u>Espaciadores y separadores:</u> En alta tensión, se utilizan para mantener las distancias adecuadas entre los conductores, evitando contactos accidentales y reduciendo el riesgo de cortocircuitos.

#### 2.1.4.2. Configuración típica de estructuras de soporte

<u>Poste simple o monofásico</u>: Es la más básica, utilizada en sistemas de baja y media tensión para áreas rurales o urbanas con demandas reducidas, se usa un poste vertical, que puede ser de madera, concreto o metal, con aisladores colocados en la parte superior o lateral para sostener uno o dos conductores.

<u>Poste de doble circuito:</u> Diseñado para transportar dos circuitos independientes en una sola estructura, optimizando espacio y costos, los conductores de cada circuito están dispuestos en configuraciones paralelas o triangulares, dependiendo de las necesidades de la red.

<u>Poste con cruceta en T o H</u>: Se utiliza ampliamente en líneas de media tensión, la cruceta horizontal, que puede ser de madera, metal o fibra compuesta, sostiene los aisladores en configuración horizontal.

<u>Torres metálicas de celosía:</u> Son comunes en líneas de alta tensión y se utilizan para grandes distancias o terrenos complejos, permite soportar grandes cargas mecánicas y eléctricas.

<u>Torres de suspensión y tensión</u>: Dentro de las líneas de alta tensión, las torres de suspensión sostienen los conductores bajo carga normal, mientras que las torres de tensión se colocan en puntos estratégicos para soportar tensiones elevadas, como en curvas, cambios de dirección o extremos de tramos largos.

<u>Configuraciones especiales</u>: En áreas urbanas densamente pobladas, se utilizan postes compactos con conductores apilados verticalmente o diseños que minimizan el espacio ocupado.

## 2.1.4.3. Relación entre el diseño estructural y la puesta a tierra

Estos dos aspectos están muy relacionados, ya que las estructuras de soporte no solo deben sostener los conductores y otros componentes de la línea, sino también actuar como un medio efectivo para disipar las corrientes de falla y descargas atmosféricas hacia el suelo.

El diseño estructural influye directamente en la efectividad del sistema de puesta a tierra. Por ejemplo, en torres metálicas, la estructura misma suele ser parte del sistema de puesta a tierra,

conectándose al suelo mediante conductores específicos o directamente a través de sus bases enterradas, esto requiere que las torres sean diseñadas con materiales y configuraciones capaces de manejar tanto las cargas mecánicas como las corrientes de falla sin sufrir daños significativos, en postes de materiales no conductores, como concreto o madera, se deben incorporar elementos adicionales, como varillas de puesta a tierra o conductores de bajada, para crear una conexión adecuada al sistema de tierra.

#### 2.1.5. Métodos de Diseño y Dimensionamiento de Puesta a Tierra

Es un proceso técnico esencial para garantizar la seguridad, estabilidad y eficiencia de las instalaciones eléctricas, estos métodos aseguran que la puesta a tierra sea capaz de disipar eficazmente corrientes de falla y proteger a las personas y equipos frente a tensiones peligrosas.

El primer paso en el diseño es el análisis del terreno donde se instalará el sistema, incluye la medición de la resistividad del suelo, utilizando técnicas como el método de Wenner o Schlumberger, que permiten identificar las capas del terreno y su conductividad.

El diseño estructural de la puesta a tierra se realiza considerando configuraciones como varillas, mallas o anillos, cada configuración tiene ventajas dependiendo de las condiciones del terreno y la aplicación específica, en áreas con alta resistividad, se puede optar por combinar varillas y materiales conductores adicionales, como bentonita o sales conductoras, para mejorar la conductividad del suelo.

#### 2.1.5.1. Diseño de puesta a tierra

Es un proceso técnico fundamental que garantiza la seguridad y funcionalidad de las instalaciones eléctricas, al permitir la disipación segura de corrientes de falla o descargas atmosféricas hacia el suelo, se realiza teniendo en cuenta diversos factores, como las características del terreno, las magnitudes de las corrientes esperadas, los estándares de seguridad y los requisitos específicos del sistema eléctrico y tiene objetivo principal es minimizar riesgos eléctricos, como tensiones peligrosas de paso y contacto, y proteger tanto a las personas como a los equipos.

Se realiza análisis detallado del terreno para determinar su resistividad, esto es importante, ya que influye directamente en la efectividad del sistema, y también se utilizan métodos como el de Wenner o Schlumberger para medir la resistividad y determinar la disposición y número de electrodos necesarios.

El dimensionamiento de los componentes, como los conductores y los electrodos, se realiza con base en las corrientes de falla esperadas y los tiempos de despeje de las protecciones eléctricas, aquí se deben considerar los efectos térmicos y mecánicos de estas corrientes para garantizar que los materiales seleccionados, como cobre, acero galvanizado o aleaciones especiales, puedan soportar las condiciones de operación sin degradarse.

## 2.1.6. Simulación y Modelado en Sistemas de Puesta a Tierra

Son técnicas que permiten predecir cómo se comportará el sistema bajo diversas condiciones, optimizando su diseño y asegurando el cumplimiento de los estándares de seguridad y funcionalidad, con el avance de las tecnologías, los métodos de simulación han evolucionado, proporcionando soluciones precisas y detalladas para problemas complejos relacionados con la disipación de corriente, gradientes de potencial y tensiones de paso y contacto.

Las simulaciones toman en cuenta factores como la resistividad del terreno, que puede variar significativamente en función de la composición, humedad y temperatura del suelo, asimismo, los softwares modernos permiten analizar el efecto de las descargas atmosféricas, corrientes de falla y otros fenómenos transitorios sobre el sistema.

#### 2.1.6.1. Software utilizado en el análisis de voltajes de paso

El análisis de voltajes de paso en sistemas de puesta a tierra es un aspecto crítico para garantizar la seguridad de las instalaciones eléctricas, por lo que, el análisis requiere herramientas especializadas que puedan modelar y simular con precisión la distribución de potencial eléctrico en el terreno, así como calcular los gradientes de potencial generados por corrientes de falla.

### 2.1.6.1.1. PYTHON

Python es una herramienta versátil que facilita la simulación y análisis de sistemas de puesta a tierra al proporcionar un entorno potente para modelado matemático, resolución numérica y visualización de resultados, su flexibilidad permite implementar métodos avanzados, esenciales para analizar fenómenos eléctricos complejos, como la distribución de potencial en el terreno y las tensiones de paso y contacto.

McKinney [16] nos ofrece una introducción del uso de las bibliotecas tales como Pandas y Numpy, para la ejecución y el análisis de datos, lo cual nos ayuda a procesar resultados de simulaciones de los estudios realizados de puesta a tierra. Por otra parte, Muller y Guido [17] nos presentan métodos de aprendizaje en Python, los cuales nos sirven para poder analizar los datos obtenidos de las simulaciones de pruebas de puesta a tierra.

El desarrollo de simulaciones en Python comienza con la representación matemática del sistema de puesta a tierra, que incluye la geometría de los electrodos, la resistividad del terreno y las corrientes de falla.

### 2.1.6.1.2. ATPDraw

ATPDraw es un preprocesador gráfico diseñado para facilitar la creación y simulación de circuitos eléctricos en el entorno del Alternative Transients Program, una versión del Electromagnetic Transients Program. Operando en plataformas Windows, ATPDraw permite a los usuarios construir circuitos eléctricos de manera intuitiva, utilizando componentes predefinidos seleccionados desde menús desplegables.

En [18] nos facilita la base teórica del EMPT la cual es importante para comprender las simulaciones de transitorios en sistemas eléctricos de potencia. Meyer [19] nos presenta una guía práctica para las aplicaciones del ATP en varios problemas de ingeniería, haciendo posible ejecutar los análisis de sistemas de potencia

### 2.1.7. Impacto de la Resistividad del Suelo en el Diseño

La resistividad del suelo es uno de los aspectos más influyentes en el diseño de sistemas de

puesta a tierra, ya que determina la capacidad del terreno para disipar corrientes eléctricas, cuyo valor afecta directamente la resistencia de puesta a tierra, los gradientes de potencial en la superficie del suelo y, en consecuencia, la seguridad y eficiencia del sistema. El impacto de la resistividad también se refleja en la distribución del potencial en el suelo,

los terrenos con alta resistividad generan gradientes de potencial más pronunciados, lo que incrementa las tensiones de paso y contacto, representando un riesgo para las personas cercanas al sistema.

## 2.1.7.1. Métodos de medición de resistividad

Los métodos más utilizados para medir la resistividad del suelo son técnicas basadas en principios eléctricos que involucran la inyección de corriente en el terreno y la medición del potencial resultante.

Existen varias formas o métodos para la medición de la resistividad del suelo, entre ellos se tiene el método Wenner, método de medición de resistencia de una varilla, el método de medición de resistencia de electrodos ya enterrados y el método Schlumberger-Palmer [5].

El método de Wenner es uno de los más empleados por su simplicidad y precisión, consiste en utilizar cuatro electrodos alineados en el suelo, equidistantes entre sí, por su parte el método de Schlumberger es similar, pero con una disposición diferente, los dos electrodos interiores permanecen fijos mientras que los exteriores se separan progresivamente para cubrir mayores áreas del terreno, es útil para estudiar terrenos con capas de resistividad variable, ya que permite analizar variaciones de resistividad con la profundidad.

Tenemos otros métodos como el método de caída de potencial, aunque más conocido para medir la resistencia a tierra de un electrodo, también se adapta para mediciones de resistividad del terreno, se utiliza un electrodo central como punto de inyección de corriente y otros electrodos auxiliares para medir la caída de potencial en diferentes puntos del terreno.

## 2.1.7.2. Efecto de la variabilidad del suelo en voltajes de paso

La variabilidad del suelo tiene gran impacto en los voltajes de paso, ya que afecta la

distribución del potencial eléctrico en la superficie del terreno durante una corriente de falla.

En suelos homogéneos, la distribución del potencial eléctrico tiende a ser uniforme, lo que facilita el diseño y control de los voltajes de paso y contacto, pero, en terrenos heterogéneos, donde existen capas de distinta resistividad, la corriente eléctrica tiende a fluir preferentemente por las áreas de menor resistencia, concentrando los gradientes de potencial en estas zonas.

Las variaciones de resistividad del suelo pueden ser causadas por factores naturales como cambios en el tipo de terreno, fluctuaciones estacionales en la humedad o la presencia de aguas subterráneas, también pueden surgir por intervenciones humanas, como rellenos artificiales o compactación desigual del terreno.

## 2.1.7.3. Soluciones para suelos con alta resistividad

Los suelos con alta resistividad presentan grandes problemas para el diseño de sistemas de puesta a tierra, ya que dificultan la disipación de corrientes eléctricas hacia el terreno, dicho esto, existen diversas soluciones técnicas que permiten mejorar el desempeño del sistema, reduciendo la resistencia de puesta a tierra y garantizando niveles seguros de voltajes de paso y contacto.

Una solución común es aumentar la profundidad de los electrodos de tierra, debido a que en suelos superficiales con alta resistividad, la instalación de electrodos profundos puede alcanzar capas de terreno con menor resistividad, como estratos húmedos o con mayor contenido de sales minerales.

Podemos también hacer uso de la extensión del sistema de puesta a tierra mediante la adición de más electrodos en paralelo, conectados a una red o malla, lo que aumenta el área efectiva de contacto con el suelo, distribuye mejor las corrientes de falla y reduce el gradiente de potencial, podemos decir que las mallas o anillos alrededor de la instalación son especialmente útiles en áreas grandes, como subestaciones.

En ocasiones también se hace uso del tratamiento químico del suelo, este también se utiliza para mejorar la conductividad en suelos con alta resistividad, la bentonita, el carbón activado o las sales químicas se aplican alrededor de los electrodos para crear una zona de baja resistividad en su entorno inmediato, debido a que ayudan a reducir la resistencia de contacto entre los electrodos y el suelo, aunque requieren monitoreo y mantenimiento, ya que su efectividad puede disminuir con el tiempo debido al lavado por lluvias.

Existen también métodos como la utilización de electrodos especiales, electrodos revestidos de cobre o acero galvanizado ofrecen alta durabilidad y mejor conductividad, y también podemos decir que los sistemas de electrodos horizontales extensos, como cintas conductoras enterradas, son efectivos en suelos donde las condiciones superficiales limitan el uso de electrodos verticales.

#### 2.1.8. Fenómenos de Sobretensión y Seguridad en Puesta a Tierra

Las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas son en gran parte de los casos peligrosas, ya que las corrientes generadas por un rayo pueden alcanzar cientos de kiloamperios en milisegundos, podemos decir que cuando un rayo impacta una estructura, su energía se canaliza hacia el sistema de puesta a tierra, donde se disipa en el suelo.

Las sobretensiones transitorias por maniobras en sistemas eléctricos, como la apertura y cierre de interruptores o cambios repentinos de carga, también generan riesgos, estas pueden inducir picos de voltaje que dañen equipos sensibles o comprometan la seguridad, en el caso de los SDPT, ayuda a estabilizar el potencial del sistema, permitiendo que los dispositivos de protección, como descargadores de sobretensión, funcionen de manera eficaz.

Un aspecto crítico es la protección frente a las corrientes de falla durante cortocircuitos o desequilibrios, estas generan sobretensiones localizadas que, si no son manejadas correctamente, pueden causar daños a los equipos y representar un peligro para las personas. Por eso consideramos que la puesta a tierra contribuye a limitar estas sobretensiones al proporcionar un camino de baja impedancia hacia el suelo, asegurando que los dispositivos de protección, como interruptores diferenciales o relés de falla a tierra, actúen con rapidez.

## 2.1.8.1. Sobretensiones causadas por descargas atmosféricas



Figura 5. Diagrama de sobretensiones por descargas atmosféricas [20].

Las sobretensiones causadas por descargas atmosféricas son fenómenos eléctricos transitorios de alta intensidad que se producen cuando un rayo impacta directamente una instalación o induce corrientes en líneas eléctricas que se encuentran cerca, lo que puede generar picos de voltaje que superan con creces los niveles normales de operación del sistema, poniendo en riesgo la seguridad de las personas, la integridad de los equipos y la continuidad del suministro eléctrico.

Cuando un rayo impacta una línea eléctrica, torre o estructura, genera una corriente transitoria que pasa a través del sistema eléctrico y hacia el suelo a través del sistema de puesta a tierra, pero esta a su vez puede alcanzar valores de hasta cientos de kiloamperios, dependiendo de la intensidad de la descarga, que, si no se maneja adecuadamente, la energía asociada a estas sobretensiones puede causar daños graves.

Las sobretensiones también pueden ser inducidas en líneas eléctricas cercanas al canal del rayo, incluso sin un impacto directo, que ocurre debido al fuerte campo electromagnético generado por la descarga, que induce corrientes y voltajes elevados en conductores cercanos.

Los sistemas de protección suelen incluir elementos como pararrayos, que interceptan las descargas antes de que impacten estructuras críticas, y cables de guarda, instalados en la parte superior de líneas de transmisión para desviar las corrientes hacia el sistema de tierra.

#### 2.1.8.2. Sobretensiones por fallas eléctricas

Son picos de voltaje transitorios que ocurren en los sistemas eléctricos como resultado de cortocircuitos, fallas a tierra o desequilibrios en el sistema, mismas que pueden alcanzar niveles peligrosos que superan la capacidad de aislamiento de los equipos y representan un riesgo para la seguridad de las personas y la integridad de las instalaciones, el impacto y magnitud dependen de factores como el tipo de falla, la configuración del sistema y la velocidad de operación de los dispositivos de protección.

En una falla eléctrica, como un cortocircuito entre fases o una falla- fase-tierra, la corriente fluye de manera anormal a través del sistema, la cual genera transitorios electromagnéticos que pueden inducir sobretensiones en diferentes partes del sistema eléctrico. En sistemas con neutro aislado o con impedancia, las fallas a tierra pueden provocar un aumento significativo del potencial de las fases no involucradas en la falla, lo que pone en riesgo el aislamiento de los equipos.

Durante el proceso de apertura o cierre de estos dispositivos bajo condiciones de falla, se generan arcos eléctricos y transitorios que amplifican las sobretensiones, especialmente si el sistema tiene capacitancias y reactancias inductivas significativas.

## 2.1.8.3. Riesgos para el ser humano y los animales.

Los riesgos para los seres humanos y los animales derivados de los sistemas eléctricos, especialmente en el contexto de las sobretensiones y las fallas eléctricas, se deben principalmente a las tensiones peligrosas de paso y contacto generadas en el terreno, cuyos riesgos son amplificados cuando los sistemas de puesta a tierra no están diseñados o mantenidos adecuadamente, o cuando ocurren fallas eléctricas significativas que generan

corrientes de alta magnitud.

El voltaje de toque ocurre cuando una persona o animal toca un objeto metálico conectado a tierra mientras una corriente de falla fluye a través del sistema, si el potencial eléctrico de este objeto es suficientemente alto en relación con el suelo circundante, una corriente eléctrica puede atravesar el cuerpo, causando daños como quemaduras, parálisis muscular o incluso fibrilación ventricular, dependiendo de la intensidad de la corriente y la duración del contacto.

Por otro lado, el voltaje de paso ocurre cuando una persona o animal tiene sus extremidades en puntos del suelo con diferentes potenciales eléctricos, se puede decir que esto es común en el caso de corrientes de falla que fluyen hacia el terreno desde un sistema de puesta a tierra, la corriente resultante puede atravesar el cuerpo, especialmente en animales de gran tamaño como ganado, que tienen una separación mayor entre sus patas, aumentando la diferencia de potencial experimentada.

Los riesgos asociados a estos voltajes incluyen efectos como contracciones musculares involuntarias, dificultad para liberar un objeto energizado, quemaduras internas y externas, y, en casos extremos, paro cardíaco. En los animales, los efectos son similares, pero el daño puede ser más severo debido a su sensibilidad a pequeñas corrientes eléctricas y a su mayor exposición en entornos rurales, donde la resistividad del suelo y las condiciones del sistema de puesta a tierra pueden ser más variables.

## 2.1.8.4. Normativas de seguridad y límites aceptables

#### IEEE Std. 80, Guía para la Seguridad en Subestaciones de Corriente Alterna

Este estándar proporciona directrices para diseñar sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas, garantizando niveles seguros de tensiones de paso y contacto y a su vez define fórmulas y procedimientos para calcular límites seguros en función de la resistividad del suelo, las corrientes de falla y la duración de estas.

Según el estándar del IEEE Std 80-2013, la resistividad del terreno juega un rol fundamental, si el suelo tiene alta resistividad o si al suelo le resulta más complicado dispersar la corriente, los voltajes de paso resultan más peligrosos [21].

IEC 60479, Efectos de la Corriente sobre el Ser Humano y los Animales

Este documento describe los umbrales de corriente que son peligrosos para los humanos y animales, clasificándolos según los efectos en el cuerpo. También, define cuatro zonas de riesgo, desde efectos imperceptibles hasta daños graves, y establece límites seguros para tensiones de contacto y paso, considerando el tiempo de exposición y las condiciones del terreno.

IEC 62305, Protección contra Rayos

Establece los requisitos para sistemas de protección contra descargas atmosféricas, incluyendo la puesta a tierra de pararrayos y enfatiza la importancia de minimizar gradientes de potencial para garantizar la seguridad de las personas y equipos.

## 2.1.9. Electrodos

Su función principal es disipar corrientes de falla, descargas atmosféricas o transitorios eléctricos hacia el suelo de manera eficiente y segura, minimizando riesgos de tensiones peligrosas de paso y contacto.

Suelen estar fabricados con materiales de alta conductividad y resistencia a la corrosión, como cobre, acero galvanizado, o acero recubierto de cobre, aunque se debe tener en cuenta que la elección del material depende de factores como las condiciones ambientales, la resistividad del terreno y la vida útil esperada del sistema. Por lo general el cobre es preferido por su excelente conductividad y durabilidad, mientras que el acero galvanizado es más económico y adecuado para ciertos entornos menos agresivos.

Los electrodos de puesta a tierra utilizados en el país comúnmente son de tipo varilla, placa, ánodos de sacrificio o electrodos de grafito [22].

#### 2.1.9.1. Electrodo empotrado verticalmente sin altura de empotramiento

Un electrodo empotrado verticalmente sin altura de empotramiento especificada se refiere a una varilla o barra conductora instalada verticalmente en el suelo sin una profundidad definida en el diseño o normativa, lo que puede generar incertidumbre en la capacidad del sistema para disipar corrientes de falla de manera eficiente, ya que la profundidad de instalación influye directamente en la resistencia de puesta a tierra y en la distribución de las corrientes en el terreno.

En general, a mayor profundidad, se encuentran capas con menor resistividad, especialmente en terrenos con alta resistividad superficial, como suelos arenosos o secos, si un electrodo no está empotrado a una profundidad suficiente, la resistencia de puesta a tierra puede ser alta, disminuyendo la capacidad del sistema para disipar corrientes de falla de manera segura y aumentando el riesgo de tensiones peligrosas de paso y contacto.

Sin una altura definida de empotramiento, se pierde la posibilidad de optimizar el sistema, ya que no se aprovechan las propiedades eléctricas del terreno en profundidad. Además, la falta de una especificación clara puede llevar a inconsistencias en la instalación, reduciendo la confiabilidad del sistema.

Ecuación de la Resistencia de electrodo vertical sin altura de empotramiento:

$$Ro = \frac{\rho}{2\pi \times L} \times \ln\left[\frac{a+L}{a}\right] \tag{1}$$

Ecuación del Perfil de Voltaje de electrodo vertical sin altura de empotramiento:

$$Vx = \frac{\rho \times I}{2\pi \times L} \times \ln\left[\frac{x+L}{x}\right]$$
(2)

## 2.1.9.2. Electrodo empotrado verticalmente con altura de empotramiento

Un electrodo empotrado verticalmente con una altura de empotramiento definida es una configuración común en sistemas de puesta a tierra, diseñada para optimizar la disipación de corrientes eléctricas hacia el terreno. Cuando se tiene la profundidad de empotramiento, se asegura que el electrodo interactúe con capas del suelo que tienen mejores características de conductividad eléctrica, sobre todo en terrenos con alta resistividad superficial.

La profundidad a la que se instala un electrodo vertical influye directamente en la resistencia de puesta a tierra, debido a que mayor profundidad, se encuentran capas de suelo más homogéneas, con mayor contenido de humedad y menor resistividad, lo que mejora la capacidad del sistema para disipar corrientes de falla y mitigar gradientes de potencial peligrosos.

Ecuación de la Resistencia de electrodo vertical con altura de empotramiento:

$$Ro = \frac{\rho(suelo)}{2\pi \times L} \times \ln\left[\frac{h(2a+L)}{a(2h+L)}\right] + \frac{\rho(suelo)}{2\pi \times (L+h)} \times \ln\left[\frac{2h+L}{h}\right]$$

Ecuación del Perfil de Voltaje de electrodo vertical con altura de empotramiento:

$$Vx = \frac{\rho(suelo) * I}{2\pi * (L+h)} \cdot ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + h^2} + (L+h)}{\sqrt{x^2 + h^2}}\right)$$
(4)

#### 2.1.9.3. Electrodos empotrados verticalmente en paralelo con altura de empotramiento

Los electrodos empotrados verticalmente en paralelo son una configuración efectiva para mejorar el desempeño de los sistemas de puesta a tierra, especialmente en terrenos con alta resistividad o cuando se requieren bajos valores de resistencia de puesta a tierra, el diseño del mismo consiste en instalar múltiples varillas o barras conductoras verticales, interconectadas por un conductor horizontal, para formar un sistema que amplía el área efectiva de contacto con el suelo y distribuye mejor las corrientes de falla.

Al conectar varios electrodos en paralelo, se aprovecha el principio de que la resistencia equivalente de un sistema en paralelo es menor que la de un solo electrodo, los electrodos en paralelo mejoran la distribución de las corrientes de falla en el terreno, reduciendo los gradientes de potencial y, por ende, las tensiones de paso y contacto peligrosas.

Ecuación de la Resistencia de electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento:

$$Ro = \frac{\rho(suelo)}{2\pi \times L \times n} \times \ln\left[\frac{h(2a+L)}{a(2h+L)}\right] + \frac{\rho(suelo)}{2\pi \times (L+h) \times n} \\ \times \left[\ln\left[\frac{2h+L}{h}\right] + \sum_{i=1}^{n-1}\ln\left[\frac{(S\times i)+h+L}{S\times i}\right]\right]$$

Ecuación del Perfil de Voltaje de electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento:

$$Vx = \frac{\rho(suelo) \times I}{2\pi \times n \times (L+h)} \times \sum_{i=1}^{n} \ln\left[\frac{\sqrt{(x \times i)^2 + h^2} + h + L}{\sqrt{(x \times i)^2 + h^2}}\right]$$
(6)

(3)

(5)

#### 2.1.9.4. Electrodo empotrado horizontalmente con altura de empotramiento

Esta configuración se utiliza cuando las condiciones del terreno o los requisitos de diseño hacen que la instalación de electrodos verticales no sea viable o cuando se busca cubrir un área extensa para distribuir las corrientes de falla de manera uniforme y es común en aplicaciones como subestaciones eléctricas, sistemas de distribución y líneas de transmisión.

El electrodo empotrado horizontalmente suele ser un conductor de cobre desnudo, acero galvanizado o acero recubierto de cobre, enterrado a una profundidad típica de entre 0,5 y 1 metro, la profundidad exacta se elige considerando factores como la resistividad del suelo, la protección contra daños mecánicos y la estabilidad térmica del conductor, además, su disposición puede ser lineal o en configuraciones más complejas, como anillos o mallas, dependiendo de los requerimientos específicos del sistema.

La principal limitación de los electrodos horizontales es que su efectividad depende de la resistividad del suelo cercano a la superficie, ya que, en terrenos con alta resistividad superficial, su desempeño puede ser inferior al de los electrodos verticales profundos.

Ecuación de la Resistencia de electrodo horizontal con altura de empotramiento:

$$Ro = \frac{\rho}{2\pi * L} \times \ln\left[\frac{h(2a+L)}{a(2h+L)}\right] + \frac{\rho}{\pi * (L+2h)} * \ln\left(\frac{4h+L}{2h}\right)$$
(7)

Ecuación del Perfil de Voltaje de electrodo horizontal con altura de empotramiento:

$$Vx = \frac{\rho(suelo) * I}{\pi * (L+h)} \cdot ln\left(\frac{2 * \sqrt{x^2 + h^2} + (L + (2 * h))}{2 * \sqrt{x^2 + h^2}}\right)$$
(8)

#### 2.1.9.5. Corriente de cortocircuito a 60Hz y del electrodo a frecuencia industrial

La corriente de cortocircuito a 60 Hz es el flujo de corriente que se genera cuando ocurre un cortocircuito en un sistema eléctrico operando a la frecuencia industrial estándar de 60 Hz. En este contexto, la capacidad del sistema de puesta a tierra, y particularmente la del electrodo, para manejar esta corriente es crítica para garantizar la seguridad y la integridad

de las instalaciones eléctricas, además, la corriente que fluye hacia el electrodo en estas condiciones debe ser adecuadamente disipada en el terreno para evitar riesgos como tensiones peligrosas de paso y contacto, así como para proteger los equipos y sistemas conectados.

Cuando ocurre un cortocircuito, como una falla fase-tierra o fase-fase, la corriente puede aumentar drásticamente, alcanzando valores muy por encima de los niveles normales de operación, esta corriente es una combinación de la componente AC sinusoidal de 60 Hz y, en los primeros instantes, una componente DC transitoria que decae rápidamente.

A la frecuencia industrial de 60 Hz, el comportamiento del sistema de puesta a tierra es predominantemente resistivo, pero, la resistividad del terreno juega un papel crucial en cómo se disipa la corriente.

El diseño del sistema de puesta a tierra para manejar corrientes de cortocircuito a 60 Hz se necesita un análisis detallado de la resistividad del terreno, la configuración del electrodo y la capacidad térmica de los materiales. Esto asegura que la corriente de falla se disipe de manera segura y eficiente, protegiendo tanto las instalaciones como a las personas

## **CAPITULO III**

## 3.1. FRECUENCIA DE TIPO INDUSTRIAL

3.1.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento con datos obtenidos analíticamente

# 3.1.1.1. Corriente de 1000A, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50, 100, 200, 500 y 1000 $\Omega$ ·m.

Se muestra como el voltaje generado aumenta con la resistividad del terreno, también, a medida que la distancia del electrodo aumenta, el voltaje disminuye de manera rápida, con caídas muy notorias, cuando la resistividad es baja, demostrando el peligro que conllevan los terrenos con resistividades altas.



*Figura 6.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D.



*Figura 7.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D.

# 3.1.1.2. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

La longitud del electrodo afecta al voltaje máximo, como muestra la gráfica, este se ve reducido, a su vez mejorando la dispersión por el terreno.



*Figura 8.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D.



*Figura 9.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D.

## 3.1.1.3. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

El voltaje y la corriente aplicada son directamente proporcionales, incrementando así el voltaje generado cuando existen corrientes más altas, siendo un indicador del riesgo de voltajes de paso cuando existen corrientes de falla.



*Figura 10.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D.



*Figura 11.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D.

3.1.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento con datos obtenidos analíticamente

## 3.1.2.1. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m.

Estamos en presencia de resistividades altas, donde estos influyen en el voltaje generado y viendo como estos terrenos producen picos de voltaje mucho mayores a comparación. de otros terrenos con menor resistividad.



Figura 12. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos



#### verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D.

*Figura 13.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D.

# 3.1.2.2. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.5m, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Estamos en presencia de electrodos de hasta 3.6m, que generan voltajes menores, cuando los comparamos con los electrodos de 2.4m, mostrando el impacto de la longitud del electrodo en el SDPT.



*Figura 14.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D.



*Figura 15.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D

# 3.1.2.3. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Las corrientes altas como las de 5000 kA, tienen efectos sobre el voltaje de forma directa, pero la existencia de una altura de 0.5m, provoca que haya una distancia mayor entre cada voltaje generado.



*Figura 16.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D.



*Figura 17.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D.

# 3.1.2.4. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.01 a 1m, Longitud 2.4m y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Se muestra la distribución del voltaje de paso en función de la distancia para un sistema de puesta a tierra con una corriente de 1000 A, una longitud de electrodo de 2.4 m y una resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m, se evalúan alturas de empotramiento desde 0.01 m hasta 1 m, donde se observa que el voltaje de paso alcanza su valor máximo en la proximidad del punto de inyección de corriente y disminuye progresivamente a medida que se aleja del electrodo.



Figura 18. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos



verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-2D.

*Figura 19.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-3D.

# **3.1.3.** Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento con datos obtenidos analíticamente con datos obtenidos analíticamente

3.1.3.1. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m,
5 picas y Resistividad del suelo de 50 Ω·m.

Al estar frente a electrodos con altura de empotramiento, podemos ver el impacto de este en el voltaje que se genera, viendo, así como se muestra la proporcionalidad inversa de la altura del empotramiento con el voltaje generado.



*Figura 20*. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D.



*Figura 21.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D.

# 3.1.3.2. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4, 3 y 3.6m, Altura de empotramiento de 0.5m, 5 picas y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Cuando los electrodos están en paralelo, su longitud afecta el perfil de voltaje, entre más largos, más se reduce el voltaje máximo, caso totalmente contrario cuando comparamos con los más cortos.



*Figura 22.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D.



*Figura 23.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D.

## 3.1.3.3. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m, 2, 3 y 5 picas y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Al tener una altura de empotramiento de 0.5m, se muestra un patrón un poco más uniforme, pero a su vez, se logra observar cómo existen picos pronunciados indicando el impacto de la corriente sobre el sistema.



*Figura 24.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en paralelo en Python-2D.



*Figura 25.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en paralelo en Python-3D.

# 3.1.3.4. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m, 4 picas y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Nos encontramos con una altura de empotramiento mucho más corta, observando como esta concentra el potencial en la superficie, generando picos de voltaje más altos.



*Figura 26.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-2D.



*Figura 27.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-3D.

## 3.1.4. Electrodos horizontales con altura de empotramiento con datos obtenidos analíticamente

3.1.4.1. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4m.

Se muestra como el electrodo empotrado horizontalmente, cambia el sentido del sistema, a comparación de los mostrados anteriormente, así mismo la altura vuelve a afectar al voltaje

generado.



*Figura 28.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D.



*Figura 29.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D.

# 3.1.4.2. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4m.

Se muestra un electrodo empotrado horizontalmente, con resistividad de hasta 500  $\Omega \cdot m$ , donde podemos observar como el estar frente a resistividades más altas, se generan valores de voltaje más altos, debido al problema de dispersión que ocasionan los terrenos con estos valores de resistividad.



*Figura 30.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D.



*Figura 31.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D.

## 3.1.4.3. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.1 a 1m y Longitud de 2.4m.

Se observa el impacto que tiene la altura de empotramiento del electrodo horizontal en el voltaje generado, cuando tenemos alturas menores como la de 0.1m, se generan voltajes más altos, debido a que entre menor sea la altura, menor será la dispersión de corriente.



*Figura 32.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-2D.



*Figura 33.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-3D.

## 3.1.4.4. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo o de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Se muestra como en el electrodo horizontal con altura de empotramiento, la longitud del electrodo también afecta el perfil del voltaje generado, se puede observar como el voltaje disminuye cuando la longitud del electrodo aumenta de 2.4 a 3.6 m.


*Figura 34*. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D.



*Figura 35.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D.

**3.1.5.** Electrodos verticales sin altura de empotramiento con datos obtenidos en ATPDraw.



*Figura 36*. Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.



*Figura 37*. Model editor default un de sistema de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.

### 3.1.5.1. Resistividad de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, corriente de 1000A y Longitudes de 2.4 m.

Se observa como los valores de resistividad altos como el de 500  $\Omega$ ·m, también afectan al electrodo horizontal sin altura de empotramiento, podemos ver como el voltaje de paso aumenta drásticamente de 50 a 500  $\Omega$ ·m, asimismo se puede observar como la longitud del electrodo reduce ligeramente los voltajes.



*Figura 38.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad en Python con datos de ATPDraw.



## 3.1.5.2. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Se muestra la variación del voltaje de paso en función de la longitud del electrodo, para una corriente de 1000 A, se observa como el aumentar la longitud del electrodo el voltaje máximo disminuye de 16.85kV a 12.12kV.



*Figura 39.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 40.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-3D.

### 3.1.5.3. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Longitud de 2.4m y Resistividad del suelo de 50 Ω·m.

Se muestra la variación del voltaje de paso en función de la corriente de falla, se observa que a medida que la falla aumenta, el voltaje máximo también se incrementa de manera significativa, pasando de 16.85 kV a 84.24kV, mostrando así un riesgo elevado.



*Figura 41.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 42.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python con datos de ATPDraw-3D.

**3.1.6.** Electrodos verticales con altura de empotramiento con datos obtenidos en ATPDraw.



*Figura 43.* Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.

		12			
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
d1	s (Ohm*m)	50	i1	1	××0003
d2	Long (m)	2.4	o1	1	V1
d3	h (m)	1			
🖹 Сору 🕻	🎦 Paste 💌 🗋	Reset Order	. [0]	.abel:	]
omment: Lit	Paste 👻 🗋	Reset Order	: [0] L	.abel:	Hige

*Figura 44.* Parámetros del model de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.



*Figura 45.* Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.

## 3.1.6.1. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m.

Se muestra el efecto de la resistividad del suelo en los electrodos verticales con altura de empotramiento, al estar frente a una corriente de falla de 1000A, se observa como la variación de la resistividad de 50 a  $500\Omega$ ·m, incrementa significativamente el voltaje generado.



*Figura 46.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 47.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad en Python con datos de ATPDraw-3D.

## 3.1.6.2. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.5m, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Se observa como la longitud del electrodo tiene efecto sobre el electrodo vertical con altura de empotramiento, en este caso, de 2.4, 3 y 3.6m, podemos observar cómo al aumentar la longitud del electrodo el voltaje máximo disminuye de 5.26 kV a 4.31kV, indicando una mejor disipación de la corriente en el suelo.



*Figura 48.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitud en Python con datos de



*Figura 49.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitud en Python con datos de ATPDraw-3D.

## 3.1.6.3. Corriente de 1, 3.5 y 5 kA, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Se muestra un electrodo vertical con altura de empotramiento frente a corrientes de falla, mostrando como el incremento de las corrientes de falla, afectan directamente el voltaje generado, se observa como el sistema pasa de 5.26kV a 26.30kV, a medida que la corriente de falla varia de 1000 a 5000kA.



*Figura 50.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 51.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python con datos de ATPDraw-3D.

## 3.1.6.4. Corriente de 1000A, Altura de empotramiento de 0.1 a 1m, Longitud de 2.4m y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Se muestra como la altura de empotramiento en los electrodos verticales, influye en el voltaje de paso, se observa que al variar la altura de empotramiento de 2.4m a 3.6m el voltaje

máximo también varia significativamente.



*Figura 52.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 53.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-3D.

**3.1.7.** Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento con datos obtenidos en ATPDraw.

ATPDraw - [C:\EMTP\atp				
File Edit View ATP	Library Tools	Windows Web	Help	_ & ×
	2 P C 3			14 🖉 🔁 😂 🔪 🔪
🧇 🖾 👟 🚂				
Selection Simulation Project				-
Sattings Te Pasult Di				
			夫	
Obumizer Coupur			$\triangleleft$	
Simulation type				
Frequency scan			_ <b>↓</b> ↓	
O Harmonic (HFS)			MODE	L
delta T: 1E-6			± stp	
Tmax: 1				<b>→</b> ~3
Xopt: 0				
Copt: 0				
Epsilon: 0				-
Frequency: 50				
Auto-detect ATP errors				
Sorting by X-pos				
UM Automatic initialization				
Use internal parser				
VARIABLES #Sim: 1	2			
NAME EXPRESSION				
				-
MODE: EDIT	Modified Modified	w.net ATP finished		₽ ₽ 100 ▼ 100 ▼

*Figura 54.* Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.

AIA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
1	s (Ohm*m)	50	i1	1	₩0003
2	Long (m)	3.6	01	1	V1
3	h (m)	0.5	02	1	V2
			03	1	V3
🖹 Сору 🚺	😤 Paste 💌 🗋	Reset Order	r: 0 L	abel:	∨4
🖹 Copy 🚺	🏝 Paste 💌 🗋	Reset Order	о4 г. О Ц	abel:	V4
Copy ( omment:	Paste 💌 🗋 brary	Reset Order	r: 0 L	abel:	V4

*Figura 55*. Parámetros de model de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.



*Figura 56.* Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.

## 3.1.7.1 Corriente de 1, 3 y 5 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m, 5 electrodos en paralelo y Resistividad del suelo de 50 Ω·m.

Se muestra un sistema de 5 electrodos verticales en paralelo donde observamos que, al aumentar la corriente de falla, el voltaje máximo también incrementa de 8.21kV a 14.04kV, pero a diferencia de los sistemas con un solo electrodo, esta configuración ayuda a reducir los voltajes de paso generados.



*Figura 57.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 58.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-3D.

## 3.1.7.2. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4, 3 y 3.6m, Altura de empotramiento de 0.5m, 5 electrodos en paralelo y Resistividad del suelo de 50 ohm.

Se muestra el efecto de la longitud del electrodo en los voltajes de paso, se logra observar como la combinación de múltiples electrodos de mayor longitud es efectiva la reducir los voltajes de paso.



*Figura 59.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 60.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-3D.

### 3.1.7.3. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4m, h de 0.5m, 2, 3 y 5 electrodos en paralelo, Altura de empotramiento y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Se logra observar la influencia del número de electrodos verticales en paralelo sobre los voltajes de paso, podemos ver que, al aumentar el número de electrodos, el voltaje disminuye significativamente de 3.81 kV a 2.05 kV, indicando más seguridad al momento de aumentar los electrodos.



Figura 61. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos

verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 62.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en Python con datos de ATPDraw-3D.

## 3.1.7.4. Corriente de 1000A, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m, 4 electrodos en paralelo y Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m.

Se muestra la influencia de la altura del empotramiento, aun cuando tenemos electrodos en paralelo, se observa como la variación de la altura de 0.01m a 1m disminuye el voltaje máximo de 5,33kV a 2.54 kV, indicando que la elevación del punto de inyección disipa la corriente de mejor manera.



*Figura 63.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando alturas en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 64.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando alturas en Python con datos de ATPDraw-3D.

**3.1.8.** Electrodos horizontales con altura de empotramiento con datos obtenidos en ATPDraw.



*Figura 65.* Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.

DATA	UNIT	VALUE	-	NODE	PHASE	NAME	
±1	s (Ohm*m)	50	-	it	1	∞0003	
12	Long (m)	2.4		01	1	V1	
43	h (m)	0.1		02	1	V2	
14	h (m)	0.5		03	1	V3	
15	h (m)	1		04	1	√4	
36	h (m)	100		05	1	V5	
17	h (m)	500		o6	1	V6	
48	h (m)	3		07	1	V7	
🚡 Copy 🛛 😭	Paste 💌 🗋	Reset Oi	rder: 0		Label:		
Models Libr	ary	Edit Use	As: DE		Record	Hige     Prote	ect

*Figura 66.* Parámetros de model de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.



*Figura 67.* Model editor de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Frecuencia de tipo industrial.

## 3.1.8.1. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Corriente de 1000A, y Longitudes de 2.4 m y Altura de empotramiento de 0.5 m.

Se muestra como la variación de la resistividad en el suelo, influye en los voltajes de paso, cuando pasamos de 50 a a500  $\Omega$ ·m, el voltaje se incrementa, pero en comparación con los verticales, los electrodos horizontales realizan una distribución de voltajes más extendida, reduciendo la concentración en un punto.



*Figura 68.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 69.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python con datos de ATPDraw-3D

## 3.1.8.2. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Se logra observar la influencia de la longitud en el electrodo horizontal, ya que, al aumentar la longitud del electrodo, el voltaje máximo disminuye.



*Figura 70.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 71.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python con datos de ATPDraw-3D.

## 3.1.8.3. Corriente de 1, 3 y 5 kA, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Longitud de 2.4m y Altura de empotramiento de 0.5m.

Se muestra la influencia de la corriente de falla sobre el electrodo horizontal, ya que cuando la corriente aumenta de 1kA a 5kA, el voltaje máximo se incrementa significativamente, aun así, la forma del grafico muestra como los electrodos en horizontal distribuyen mejor el potencial hacia el suelo



Figura 72. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos



horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python con datos de ATPDraw-2D.

*Figura 73.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python con datos de ATPDraw-3D.

## 3.1.8.4. Corriente de 1000A, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Longitud de 2.4m y Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m.

Podemos observar la influencia de la altura de empotramiento en los voltajes de paso, mostrando, así como a mayores alturas, la disipación de la corriente al suelo se reduce significativamente, generando voltajes más altos.



Figura 74. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos

horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-2D.



*Figura 75.* Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-3D.

### **3.2. FRECUENCIA DE TIPO RAYO**

$$L(electrodo) = \frac{uo \times Long}{2\pi} \times \left( \ln \left[ \frac{2Long}{r(electrodo)} \right] - 1 \right)$$
(9)

Permeabilidad magnética del vacío = uo = 
$$4\pi \times 10^{-7} \frac{T \times m}{A}$$
(20)

$$C(suelo) = \frac{\mathcal{E}(suelo) \times R(suelo)}{Ro}$$
(31)

Permitividad del suelo = 
$$\mathcal{E}(suelo) = \mathcal{E}r \times \mathcal{E}o$$

(42)

Permitividad del vacío = 
$$\varepsilon o = 8.85 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$$
 (53)

Permitividad relativa = 
$$\mathcal{E}r = tabla \ del \ suelo$$

(64)

$$Rtr = \frac{Ro}{\sqrt{1 + \frac{Io}{Ig}}}$$
(75)

(86)

Corriente de ionización del suelo = 
$$Ig = \frac{Eo \times \rho(suelo)}{2\pi \times Ro^2}$$
 (97)

Gradiente de ionización del suelo = 
$$(500\frac{Kv}{m} - 600\frac{Kv}{m})$$
 (108)

$$Eo = (241) \times \rho(suelo)^{0.215}$$
(19)

## **3.2.1.** Electrodos verticales sin altura de empotramiento con datos obtenidos analíticamente

## 3.2.1.1. Corriente de 20, 50 y 100 kA, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m y Longitud de 2.4m.

Se muestra como en altas frecuencias la variación de la corriente influye significativamente en el voltaje máximo, pasando este de 1.53MV cuando está en 20 kA, a 6.57 MV cuando llega a los 100 kA, aun así, se distingue de las bajas frecuencias, debido a que la distribución del voltaje presenta mayor dispersión por el terreno.



*Figura 76.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D.



*Figura* 77. Perfil de voltaje generado por corrientes de frecuencia industrial en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python con datos de ATPDraw-3D.

## 3.2.1.2. Corriente de 70 kA, Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Longitud de 2.4m.

Se observa la respuesta del sistema ante distintos escenarios de resistividad, donde se puede ver como el incremento de la resistividad, aumenta el voltaje máximo significativamente,

mostrando la poca efectividad de los suelos altamente resistivos en sistemas de puesta a tierra.



*Figura 78.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D.



*Figura 79.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D.

## 3.2.1.3. Corriente de 100 kA, Resistividad del suelo de 50 Ω·m y Longitudes de 2.4, 3 y3.6m.

Se logra divisar el efecto que tiene la longitud del electrodo en el sistema de puesta a tierra, al momento de aumentar la longitud del electrodo, el voltaje disminuye significativamente en 2.4 y 3m, pero en 3.6m hay un cambio drástico de hasta 503.72 kV.



*Figura 80.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D.



*Figura 81.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D.

### 3.2.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento con obtenidos analíticamente

$$Ro = \frac{\rho(suelo)}{2\pi \times L} \times \ln\left[\frac{h(2a+L)}{a(2h+L)}\right] + \frac{\rho(suelo)}{2\pi \times (L+h)} \times \ln\left[\frac{2h+L}{h}\right]$$
(118)

## 3.2.2.1. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y Corriente de 20 kA, 50 kA y 100 kA.

Se logra percibir el efecto que tienen las altas corrientes sobre los voltajes de paso, cuando esta aumenta los voltajes se incrementan a valores máximos, de hasta 6.14MV, lo que nos indica un mayor riesgo de descargas impulsivas.



*Figura 82.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D.



*Figura 83.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D.

# 3.2.2.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Longitud de 2.4 m, Altura de empotramiento de 0.5m y Corriente de 70 kA.

Se muestra la variación del voltaje generado, en función de la resistividad, mostrando como a mayor resistividad en el suelo, mayor es el voltaje, donde se alcanzan valores de hasta 692.6 kV.



*Figura 84*. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D.



*Figura 85.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D.

## 3.2.2.3. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 150 kA y Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m.

Se observa un electrodo vertical con diferentes alturas de empotramiento, considerando 150 Ka donde se muestra que una menor altura de empotramiento genera un voltaje ligeramente mayor, que las alturas de 0.5 y 1 metro, las cuales poseen el mismo voltaje.



*Figura 86.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-2D.



*Figura 87.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-3D

# 3.2.2.4. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Se muestra un electrodo con diferentes longitudes, donde se puede observar como la longitud del electrodo influye en los voltajes, debido a que en longitudes menores como 2.4 m, se alcanzan hasta 9.20 MV y en longitudes mayores como 3.6 m, hay valores mucho menos pequeños como 3.6



Figura 88. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en



electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D.

*Figura 89.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D.

**3.2.3.** Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento con obtenidos analíticamente

$$Ro = \frac{\rho(suelo)}{2\pi \times L \times n} \times \ln\left[\frac{h(2a+L)}{a(2h+L)}\right] + \frac{\rho(suelo)}{2\pi \times (L+h) \times n} \\ \times \left[\ln\left[\frac{2h+L}{h}\right] + \sum_{i=1}^{n-1}\ln\left[\frac{(S\times i)+h+L}{S\times i}\right]\right]$$
(129)

3.2.3.1. Resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Corriente de 20 kA y 2, 3 y 5 electrodos en paralelo.



*Figura 90.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en Python-2D.



*Figura 91.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando electrodos en Python-3D.

# 3.2.3.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Corriente de 70 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m y 3 electrodos en paralelo.

Se observa, la variación del voltaje cuando aumenta el valor de la resistividad en el sistema, aun cuando el sistema cuenta con 3 electrodos, demostrando así, el impacto de la resistividad del suelo en el sistema.



*Figura 92.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D.



*Figura 93.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D.

## 3.2.3.3. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 150 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m, y 5 electrodos en paralelo.

Se observa el efecto que tiene sobre el voltaje la altura de empotramiento, siendo el voltaje más bajo cuando el electrodo se encuentra a mayor altura y viceversa.



*Figura 94.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-2D.

#### I = 150.0 kA, $\rho$ = 50 $\Omega$ ·m, L = 2.4 m, 5 picas



*Figura 95.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-3D.

## 3.2.3.4. Resistividad del suelo de 50 $\Omega \cdot m$ , Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4, 3 y 3.6m, y 4 electrodos en paralelo.

Se evalúa la influencia de la longitud de los electrodos en la distribución de voltajes, se observa que, al aumentar la longitud del electrodo, el voltaje máximo disminuye.



*Figura 96*. Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D.

### I=100.0 kA, $\rho=50~\Omega{\cdot}m,$ h=0.5~m, 4 picas



*Figura 97.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D.

**3.2.4.** Electrodos horizontales con altura de empotramiento con obtenidos analíticamente.

$$R = \frac{\rho}{2\pi * L} \times \ln\left[\frac{h(2a+L)}{a(2h+L)}\right] + \frac{\rho}{\pi * (L+2h)} * \ln\left(\frac{4h+L}{2h}\right)$$
(20)
## 3.2.4.1. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y Corriente de 20, 50 y 100 kA.

Se muestra el impacto de distintos niveles de corriente, se observa como el voltaje aumenta proporcionalmente cuando la magnitud de la corriente aumenta, llegando hasta los 6.81MV en el pico máximo de la corriente.



*Figura 98.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-2D.

#### $\rho=50~\Omega{\cdot}m,\,L=2.4~m,\,h=0.5~m$



*Figura 99.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en Python-3D.

## 3.2.4.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m. altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y corriente de 70 kA.

Se observa el impacto de la resistividad del suelo en el sistema, a medida que la que la resistividad aumenta, el voltaje máximo también aumenta, mostrando la poca efectividad de los suelos altamente resistivos, lo que implica menor seguridad en el SDPT.



*Figura 100.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-2D.



*Figura 101.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en Python-3D.

## 3.2.4.3. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 150 kA y Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m.

Se muestra un sistema sometido a una corriente 150kA, considerando distintas alturas de empotramiento, se observa como a medida que la altura de empotramiento aumenta, el voltaje máximo disminuye.



*Figura 102.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-2D.



*Figura 103.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en Python-3D.

## 3.2.4.4. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Se muestra un sistema sometido a una corriente de 100 kA, evaluando diferentes longitudes de electrodos con altura de empotramiento, se observa como a medida que la longitud del electrodo aumenta, el voltaje máximo disminuye.



*Figura 104.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-2D.



*Figura 105.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en Python-3D.

### 3.2.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento con obtenidos en ATPDraw

File   Edit   View   ATP     Pile   Pile   Pile   Pile     Selection   Simulation   Project     Settings   Pile   Pile     Settings   Pile   Pile     Output   File   Output     Simulation   type   Output     Simulation   type   Output     Simulation   type   Output     Settings   Settings   Result E     Harmonic (HFS)   delta T:   E-6     Tmax:   0.01   Xopt: 0     Copt:   0   Epsilon:     Copt:   0   Epsilon:     Auto-detect ATP errors   Sorting by X-pos     VIM Automatic initialization   UM Prediction method     Use internal parser   VARIABLES   #Sim: 1     NAME   EXPRESSION     VAR1   23.4*SQRT(3/2)     VAR2   VAR1*1000	Library	Tools Windows	Web Help		
VAR3 KNT*0.01 D 1.36					•
MODE: EDIT	Modified 🔮	atpdraw.net ATF	? finished	115	▼ 100 ▼

*Figura 106.* Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

ATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere	20000	HEI	1	××0001
T_f	s	8E-6		di.	
au	s	1.2E-5			
n		2.48			
Tstart	s	0			
Tstop	s	1000			
Copy Copy omment: Type of sour Ourrent	Paste - C	Reset Order:	0 1	abel:	Hige
Comment: Comment: Type of sour Current Voltage	Paste +	] Reset Order:		abel:	Hide

*Figura 107.* Parámetros de un modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.



*Figura 108.* Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical sin altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

## 3.2.1.1. Corriente de 20, 50 y 100 kA, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m y Longitud de 2.4m.

Se muestra el voltaje de paso en función del tiempo para un electrodo vertical sin altura de empotramiento, sometido a distintos valores de corriente, donde se observa como la curva disminuye a medida que la corriente disminuye.



*Figura 109.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando corrientes en ATPDraw-2D.

## 3.2.1.2. Corriente de 70 kA, Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Longitud de 2.4m.

Se muestra el voltaje de paso en función del tiempo, sometido a una corriente de 70 kA, donde se evalua el impacto de la resistividad del suelo, se observan 3 curvas que indican cómo se comporta el voltaje a medida que la resistividad del suelo aumenta, siendo la menor resistividad la que muestra un valor de voltaje más bajo.



*Figura 110.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en ATPDraw-2D.

## 3.2.1.3. Corriente de 100 kA, Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m y Longitudes de 2.4, 3 y 3.6m.

Se muestra el voltaje de paso en función del tiempo, sometido a una corriente de 100 kA, se evalúan 3 longitudes de electrodos diferentes, donde se observa como el electrodo de mayor longitud, disminuye el valor del voltaje de paso, evidenciando que en estos arreglos la longitud del electrodo influye de manera directa en los voltajes de paso, en este tipo de arreglos.



*Figura 111.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales sin altura de empotramiento, evaluando longitudes en ATPDraw-2D.

3.2.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento con obtenidos en ATPDraw.



*Figura 112.* Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

arributes					
DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere	20000	HEI	1	××0001
T_f	s	8E-6			
tau	s	1.2E-5			
n		2.48			
Tstart	S	0	5		
Tstop	S	1000			
omment:	Paste 💌 🗋	Reset Order:	0L	abel:	
Comment: Type of sour Current Voltage	Paste +	Reset Order:	0L	abel:	- Hige

*Figura 113.* Parámetros de un modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.



*Figura 114.* Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

# 3.2.2.1. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y Corriente de 20 kA, 50 kA y 100 kA.

Se muestra un SDPT frente a distintas corrientes, donde se observa como estas influyen directamente en el voltaje de paso, ayudándonos a visualizar como intervienen esto factores en la seguridad del SDPT.



*Figura 115.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en ATPDraw-2D.

# 3.2.2.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Longitud de 2.4 m, Altura de empotramiento de 0.5m y Corriente de 70 kA.

Se muestra la evolución del voltaje de paso en función del tiempo para distintos valores de resistividad del suelo, se observa que a medida que la resistividad del suelo aumenta, el voltaje de paso inicial es mayor, lo que indica una menor capacidad de disipación de corriente en terrenos más resistivos.



*Figura 116.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en ATPDraw-2D.

## 3.2.2.3. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 150 kA y Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m.

Se presenta el comportamiento del voltaje de paso en función del tiempo para una resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m y una corriente de 150 kA, evaluando tres alturas de empotramiento del electrodo, se observa que a medida que la altura de empotramiento aumenta, el voltaje de paso inicial se incrementa, lo que indica una mayor impedancia en la disipación de corriente. La curva correspondiente a la menor altura de empotramiento muestra valores significativamente más bajos, evidenciando una mejor disipación de la corriente, una reducción en el voltaje de paso.



*Figura 117.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando altura en ATPDraw-2D.

## 3.2.2.4. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Se presenta el comportamiento del voltaje de paso en función del tiempo para una resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m y una corriente de 150 kA, evaluando tres alturas de empotramiento del electrodo, se observa que a medida que la altura de empotramiento aumenta, el voltaje de paso inicial se incrementa, lo que indica una mayor impedancia en la disipación de corriente.



*Figura 118.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en ATPDraw-2D.

## **3.2.3.** Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento con obtenidos en ATPDraw.



*Figura 119.* Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

ATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere	20000	HEI	1	∞0001
1_F	s	8E-6			
au	s	1.2E-5			
1		2.48			
Estart	s	0			
Estop	S Posto a D	1000		-1-1	
「stop Copy pmment:	S Paste	1000 ] Reset Order:	0L	abel:	

*Figura 120.* Parámetros de un modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

🛓 Mod	del Editor	– 🗆 🗙
File E	dit View Debug 📕 Done 🕜 Help	
File     L       1     2       3     4       5     6       7     8       9     0       11     12       13     14       15     16       17     18	<pre>dit View Debug Done Phip DATA dl INPUT il OUTPUT o2 VAR ol, o2, vp INIT o1:=0 o2:=0 vp:=0 ENDINIT EXEC ol:=(il*(2.7183**(-dl*t*10E2))) IF ABS(ol)&gt;vp THEN vp:= ABS(ol) ENDIF o2:=vp*(2.7183**(-dl*t*10E2)) ENDEXEC ENDMODEL</pre>	
21		
1:1	Modified	, In

*Figura 121*. Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

## 3.2.3.1. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Corriente de 20 kA y 2, 3 y 5 electrodos en paralelo.

Se muestra la variación del voltaje de paso en función del tiempo para una resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m, con una altura de empotramiento de 0.5 m y una corriente de 20 kA. Se analizan configuraciones con 2, 3 y 5 electrodos en paralelo, se observa que a medida que se incrementa el número de electrodos, el voltaje de paso disminuye, lo que indica una mejora

en la disipación de corriente.



*Figura 122.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando corrientes en ATPDraw-2D.

## 3.2.3.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m, Corriente de 70 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.5m y 3 electrodos en paralelo.

Se muestra la evolución del voltaje de paso en función del tiempo para un sistema de puesta a tierra compuesto por tres electrodos en paralelo, considerando una resistividad del suelo de 50, 100 y 500  $\Omega$ ·m, se emplea una corriente de 70 kA, con electrodos de 2.4 m de longitud y una altura de empotramiento de 0.5 m, se observa que a medida que la resistividad del suelo aumenta, el voltaje de paso inicial también se incrementa, evidenciando una menor eficiencia en la disipación de la corriente. Sin embargo, en el transcurso del tiempo, las diferencias entre las curvas disminuyen, lo que indica que el efecto de la resistividad es más notorio en los primeros milisegundos del fenómeno.



*Figura 123.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en ATPDraw-2D.

## 3.2.3.3. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 150 kA, Longitud de 2.4m, Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m, y 5 electrodos en paralelo.

Se muestra la variación del voltaje de paso en función del tiempo para un sistema de puesta a tierra compuesto por cinco electrodos en paralelo, con una resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m y una corriente de 150 kA, se evalúan tres alturas de empotramiento de los electrodos con una longitud de 2.4 m, se observa que la altura de empotramiento influye en la reducción del voltaje de paso, aunque las diferencias entre las curvas son mínimas.



*Figura 124.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando altura en ATPDraw-2D.

## 3.2.3.4. Resistividad del suelo de 50 $\Omega \cdot m$ , Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4, 3 y 3.6m, y 4 electrodos en paralelo.

Se presenta la evolución del voltaje de paso en función del tiempo para un sistema de puesta a tierra compuesto por cuatro electrodos en paralelo, con una resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m y una corriente de 100 kA, se analizan tres longitudes de electrodo, con una altura de empotramiento de 0.5 m y se observa que a medida que aumenta la longitud de los electrodos, el voltaje de paso disminuye, lo que indica una mejor capacidad de disipación de corriente.



*Figura 125.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento, evaluando longitudes en ATPDraw-2D.

**3.2.4.** Electrodos horizontales con altura de empotramiento con obtenidos en ATPDraw.



*Figura 126.* Modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

ATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere	20000	HEI	1	∞0001
T_f	s	8E-6	0		
tau	s	1.2E-5			
n		2.48			
Tstart	s	0			
Tstop	s	1000			
				(2).20 I	
Dopy 😭	Paste 🔹 🗋	] Reset Order:	0 L	abel:	

*Figura 127.* Parámetros de un modelo de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.



*Figura 128*. Model editor default de sistema un de puesta a tierra de un electrodo horizontal con altura de empotramiento en ATPDraw-Alta frecuencia de tipo rayo.

## 3.2.4.1. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y Corriente de 20, 50 y 100 kA.

Se muestra la evolución del voltaje de paso en función del tiempo para un sistema de puesta a tierra con electrodos horizontales, considerando una resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m, una altura de empotramiento de 0.5 m y una longitud de electrodo de 2.4 m, se analizan tres niveles de corriente de falla, 20 kA, 50 kA y 100 kA, donde se observa que el voltaje de paso inicial aumenta con el incremento de la corriente, lo que indica que, a mayores intensidades de descarga, el voltaje generado en la superficie del suelo es más significativa. Sin embargo, en todos los casos, el voltaje tiende a reducirse con el tiempo, reflejando el proceso de disipación de la corriente en el suelo.



*Figura 129.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando corrientes en ATPDraw-2D.

## 3.2.4.2. Resistividad del suelo de 50, 100 y 500 $\Omega$ ·m. altura de empotramiento de 0.5m, Longitud de 2.4m y corriente de 70 kA.

Se muestra la variación del voltaje de paso en función del tiempo para un sistema de puesta a tierra con electrodos horizontales, considerando una resistividad del suelo de 50, 100 y 500  $\Omega \cdot m$ , también se utiliza una corriente de 70 kA, con electrodos de 2.4 m de longitud y una altura de empotramiento de 0.5 m y se observa que a medida que la resistividad del suelo aumenta, el voltaje de paso inicial es mayor, indicando una menor capacidad del suelo para disipar la corriente. Con el tiempo, los valores de voltaje tienden a estabilizarse, pero la influencia de la resistividad sigue siendo notable en los primeros milisegundos del fenómeno.



*Figura 130.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando resistividad del suelo en ATPDraw-2D.

## 3.2.4.3. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 150 kA y Altura de empotramiento de 0.01, 0.5 y 1m.

Se presenta el comportamiento del voltaje de paso en función del tiempo para un sistema de puesta a tierra con electrodos horizontales, considerando una resistividad del suelo de 50  $\Omega \cdot m$  y una corriente de 150 kA, donde se analizan tres alturas de empotramiento del electrodo, 0.01 m, 0.5 m y 1 m, se observa que, a menor altura de empotramiento, el voltaje de paso es significativamente más bajo, lo que indica una mayor eficacia en la disipación de la corriente. A medida que la altura de empotramiento aumenta, el voltaje de paso inicial también aumenta, evidenciando la influencia directa de este parámetro en la capacidad del sistema para manejar corrientes elevadas.



*Figura 131.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando altura en ATPDraw-2D.

## 3.2.4.4. Resistividad del suelo de 50 $\Omega$ ·m, Corriente de 100 kA, Altura de empotramiento de 0.5m y Longitud de 2.4, 3 y 3.6m.

Se muestra la variación del voltaje de paso en función del tiempo para un sistema de puesta a tierra con electrodos horizontales, considerando una resistividad del suelo de 50  $\Omega$ ·m, una corriente de 100 kA y una altura de empotramiento de 0.5 m, también se analizan tres longitudes de electrodo, 2.4 m, 3 m y 3.6 m, donde se observa que, al aumentar la longitud del electrodo, el voltaje de paso disminuye, lo que indica una mayor capacidad del sistema para disipar la corriente en el suelo.



*Figura 132.* Perfil de voltaje generado por corrientes de alta frecuencia tipo rayo en electrodos horizontales con altura de empotramiento, evaluando longitudes en ATPDraw-2D.

## **CAPITULO IV**

## 4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1. Frecuencia industrial

4.1.1.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento

4.1.1.1.1. Resultados de simulación de resistividad

ρ(suelo)Ωm	Ro (Ω)
50	18,9488925
100	37,89778499
200	75,79556999
500	189,488925
1000	378,9778499

*Tabla 2.* Resistividad en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(m)	Vx(ρ=50Ωm)	Vx(ρ=100Ωm)	Vx(ρ=200Ωm)	Vx(ρ=500Ωm)	Vx(ρ=1000Ωm)
0,01	18186,05214	36372,10427	18186,05214	18186,05214	18186,05214
0,1	10672,89168	21345,78336	10672,89168	10672,89168	10672,89168
0,2	8504,654467	17009,30893	8504,654467	8504,654467	8504,654467
0,3	7285,381975	14570,76395	7285,381975	7285,381975	7285,381975
0,4	6452,093642	12904,18728	6452,093642	6452,093642	6452,093642
0,5	5828,565054	11657,13011	5828,565054	5828,565054	5828,565054
0,6	5336,445841	10672,89168	5336,445841	5336,445841	5336,445841
0,7	4934,047193	9868,094385	4934,047193	4934,047193	4934,047193
0,8	4596,564254	9193,128509	4596,564254	4596,564254	4596,564254
0,9	4308,058872	8616,117743	4308,058872	4308,058872	4308,058872
1	4057,696953	8115,393905	4057,696953	4057,696953	4057,696953

*Tabla 3.* Cálculo con distintos valores de resistividad -Voltajes en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.1.2. Resultados de simulación de longitud

Long (m)	Ro (Ω)
2,4	18,9488925
3	15,7492698
3,6	13,52643722

Tabla 4. Longitud en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(m)	Vx(L=2.4m)	Vx(L=3m)	Vx(L=3.6m)
0,01	18186,05214	15138,54476	13017,24784
0,1	10672,89168	10672,89168	7981,862375
0,2	8504,654467	8504,654467	6508,623921

0,3	7285,381975	7285,381975	5669,769645
0,4	6452,093642	6452,093642	5089,818646
0,5	5828,565054	5828,565054	4651,146784
0,6	5336,445841	5336,445841	4301,395761
0,7	4934,047193	4934,047193	4012,662441
0,8	4596,564254	4596,564254	3768,311821
0,9	4308,058872	4308,058872	3557,630561
1	4057,696953	4057,696953	3373,317169

*Tabla 5.* Cálculo con distintos valores de longitud-Voltajes en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.1.3. Resultados de simulación de corriente

I (A)	Ro (Ω)
1000	18,9488925
3000	18,9488925
5000	18,9488925

*Tabla 6.* Corriente y resistividad en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(m)	Vx(1000A)	Vx(3000A)	Vx(5000A)
0,01	18186,05214	54558,15641	90930,26068
0,1	10672,89168	32018,67505	53364,45841
0,2	8504,654467	25513,9634	42523,27234
0,3	7285,381975	21856,14593	36426,90988
0,4	6452,093642	19356,28093	32260,46821
0,5	5828,565054	17485,69516	29142,82527
0,6	5336,445841	16009,33752	26682,22921
0,7	4934,047193	14802,14158	24670,23596
0,8	4596,564254	13789,69276	22982,82127
0,9	4308,058872	12924,17662	21540,29436
1	4057,696953	12173,09086	20288,48476

*Tabla 7.* Cálculo con distintos valores de corriente-Voltajes en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia industrial.

## 4.1.1.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento

## 4.1.1.2.1. Resultados de simulación de resistividad

ρ(suelo)Ωm	Ro (Ω)
50	17,86394665
100	35,7278933
200	71,4557866
500	178,6394665
1000	357,278933

Tabla 8. Resistividad en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia
industrial.

x(Distancia)	Vx(ρ=50Ωm)	Vx(ρ=100Ωm)	Vx(ρ=200Ωm)	Vx(ρ=500Ωm)	Vx(ρ=1000Ωm)
0,01	5259,652617	10519,30523	21038,61047	52596,52617	105193,0523
0,1	5214,288902	10428,5778	20857,15561	52142,88902	104285,778
0,2	5087,395893	10174,79179	20349,58357	50873,95893	101747,9179
0,3	4904,502185	9809,00437	19618,00874	49045,02185	98090,0437
0,4	4692,354319	9384,708638	18769,41728	46923,54319	93847,08638
0,5	4471,364239	8942,728478	17885,45696	44713,64239	89427,28478
0,6	4254,200029	8508,400058	17016,80012	42542,00029	85084,00058
0,7	4047,556879	8095,113758	16190,22752	40475,56879	80951,13758
0,8	3854,349993	7708,699986	15417,39997	38543,49993	77086,99986
0,9	3675,355884	7350,711768	14701,42354	36753,55884	73507,11768
1	3510,238989	7020,477979	14040,95596	35102,38989	70204,77979

*Tabla 9.* Cálculo con distintos valores de resistividad-Voltajes en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.2.2. Resultados de simulación de longitud

6394665
6827833
3306291

*Tabla 10.* Longitud en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(L=2.4m)	Vx(L=3m)	Vx(L=3.6m)
0,01	5259,652617	4727,49686	4306,926991
0,1	5214,288902	4688,92924	4273,384488
0,2	5087,395893	4580,956462	4179,421875
0,3	4904,502185	4425,088573	4043,620944
0,4	4692,354319	4243,90281	3885,510617
0,5	4471,364239	4054,687276	3720,080867
0,6	4254,200029	3868,23052	3556,723064
0,7	4047,556879	3690,289603	3400,483299
0,8	3854,349993	3523,423762	3253,637637
0,9	3675,355884	3368,372385	3116,879272
1	3510,238989	3224,920185	2990,065892

*Tabla 11.* Cálculo con distintos valores de longitud-Voltajes en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.2.3. Resultados de simulación de corriente

-	Ro (Ω)		
1000	17,86394665		
3000	17,86394665		
5000	17,86394665		

*Tabla 12.* Corriente en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(1000A)	Vx(3000A)	Vx(5000A)
0,01	5259,652617	15778,95785	26298,26308
0,1	5214,288902	15642,86671	26071,44451
0,2	5087,395893	15262,18768	25436,97947
0,3	4904,502185	14713,50655	24522,51092
0,4	4692,354319	14077,06296	23461,7716
0,5	4471,364239	13414,09272	22356,8212
0,6	4254,200029	12762,60009	21271,00015
0,7	4047,556879	12142,67064	20237,78439
0,8	3854,349993	11563,04998	19271,74996
0,9	3675,355884	11026,06765	18376,77942
1	3510,238989	10530,71697	17551,19495

*Tabla 13*. Cálculo con distintos valores de corriente-Voltajes en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

## 4.1.1.2.4. Resultados de simulación de altura

h	Ro (Ω)
0,01	18,88428734
0,1	18,52768765
0,2	18,28669928
0,3	18,111502
0,4	17,97482706
0,5	17,86394665
0,6	17,77161049
0,7	17,69322864
0,8	17,62569365
0,9	17,56680017
1	17,51492683

Tabla 14. Altura en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(0.01m)	Vx(0.1m)	Vx(0.2m)	Vx(0.3m)	Vx(0.4m)
0,01	16985,53813	10355,59328	8073,721975	6784,952066	5909,091463
0,1	10626,01558	9317,95476	7761,482423	6647,059746	5834,631866
0,2	8478,234704	7957,165671	7105,765504	6303,42503	5634,40214
0,3	7265,728677	6960,436925	6444,190638	5884,586916	5363,138577
0,4	6436,2085	6222,705611	5873,25222	5471,079818	5068,359095

0,5	5815,199823	5651,401604	5394,995348	5093,510571	4778,50614
0,6	5324,924016	5192,241055	4993,130157	4758,161691	4506,744706
0,7	4923,947248	4812,652173	4651,641132	4462,481795	4257,535945
0,8	4587,600258	4491,974623	4357,842175	4201,508993	4031,150231
0,9	4300,025531	4216,413771	4102,134203	3970,159756	3826,090985
1	4050,440759	3976,355381	3877,279269	3763,928669	3640,263372

*Tabla 15*. Cálculo con distintos valores de altura, de 0.01 a 0.4 m-Voltajes en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(0.5m)	Vx(0.6m)	Vx(0.7m)	Vx(0.8m)	Vx(0.9m)	Vx(1m)
0,01	5259,6526	4752,4715	4342,3342	4002,1790	3714,5629	3467,6174
0,1	5214,2889	4722,5307	4321,4140	3986,9241	3703,0634	3458,7150
0,2	5087,3959	4636,8470	4260,6820	3942,2140	3669,1341	3432,3204
0,3	4904,5022	4508,5016	4167,3837	3872,3256	3615,4357	3390,1630
0,4	4692,3543	4352,8386	4050,6458	3782,9017	3545,5865	3334,6406
0,5	4471,3642	4183,4927	3919,4516	3679,9102	3463,6186	3268,5321
0,6	4254,2000	4010,5435	3781,2750	3568,7541	3373,4186	3194,6463
0,7	4047,5569	3840,5313	3641,6465	3453,8226	3278,3714	3115,5643
0,8	3854,3500	3677,2514	3504,3030	3338,4015	3181,2093	3033,4943
0,9	3675,3559	3522,6297	3371,5677	3224,7890	3084,0079	2950,2211
1	3510,2390	3377,4183	3244,7486	3114,4918	2988,2620	2867,1207

*Tabla 16*. Cálculo con distintos valores de altura, de 0.5 a 1 m-Voltajes en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

## 4.1.1.3. Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento 4.1.1.3.1. Resultados de simulación de resistividad

n = Numero de picas

<u>n = 2</u>

ρ(suelo)Ωm	Ro (Ω)
50	9,742657771
100	19,48531554
200	38,97063108
500	97,42657771
1000	194,8531554

*Tabla 17*. Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 2 picas a frecuencia industrial.

n = 3				
ρ(suelo)Ωm	Ro (Ω)			
50	6,26422684			
100	12,52845368			
200	25,05690736			
500	62,6422684			

1000 125,2845368

*Tabla 18.* Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 3 picas a frecuencia industrial.

<u>n = 4</u>	
ρ(suelo)Ωm	Ro (Ω)
50	4,629154191
100	9,258308383
200	18,51661677
500	46,29154191
1000	92,58308383

*Tabla 19*. Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 4 picas a frecuencia industrial.

<u>n = 5</u>	
ρ(suelo)Ωm	Ro (Ω)
50	3,703323353
100	7,406646706
200	14,81329341
500	37,03323353
1000	74,06646706

*Tabla 20.* Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 5 picas a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(n=2)	Vx(n=3)	Vx(n=4)	Vx(n=5)
0,01	3944,739462	3506,435078	3155,79157	2629,826308
0,1	3910,716676	3476,192601	3128,573341	2607,144451
0,2	3815,54692	3391,597262	3052,437536	2543,697947
0,3	3678,376639	3269,668123	2942,701311	2452,251092
0,4	3519,265739	3128,236213	2815,412592	2346,17716
0,5	3353,523179	2980,909493	2682,818543	2235,68212
0,6	3190,650022	2836,133353	2552,520017	2127,100015
0,7	3035,667659	2698,371253	2428,534127	2023,778439
0,8	2890,762495	2569,566662	2312,609996	1927,174996
0,9	2756,516913	2450,237256	2205,21353	1837,677942
1	2632,679242	2340,159326	2106,143394	1755,119495

*Tabla 21.* Cálculo con distintos valores de resistividad-Voltajes en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.3.2. Resultados de simulación de longitud

n = Numero de picas n = 5

Long	Ro (Ω)
2,4	3,703323353
3	3,121303726
3,6	2,711535365

*Tabla 22*. Longitud en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 5 picas a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(2.4m)	Vx(3m)	Vx(3.6m)
0,01	3155,79157	2836,498116	2584,156194
0,1	3128,573341	2813,357544	2564,030693
0,2	3052,437536	2748,573877	2507,653125
0,3	2942,701311	2655,053144	2426,172566
0,4	2815,412592	2546,341686	2331,30637
0,5	2682,818543	2432,812365	2232,04852
0,6	2552,520017	2320,938312	2134,033838
0,7	2428,534127	2214,173762	2040,289979
0,8	2312,609996	2114,054257	1952,182582
0,9	2205,21353	2021,023431	1870,127563
1	2106,143394	1934,952111	1794,039535

*Tabla 23.* Cálculo con distintos valores de longitud-Voltajes en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

## 4.1.1.3.3. Resultados de simulación de corriente

n = Numero de picas

n = 3	
Ι	Ro (Ω)
1000	6,26422684
3000	6,26422684
5000	6,26422684

*Tabla 24.* Corriente en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 3 picas a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(1000A)	Vx(2000A)	Vx(3000A)
0,01	3506,435078	10519,30523	17532,17539
0,1	3476,192601	10428,5778	17380,96301
0,2	3391,597262	10174,79179	16957,98631
0,3	3269,668123	9809,00437	16348,34062
0,4	3128,236213	9384,708638	15641,18106
0,5	2980,909493	8942,728478	14904,54746
0,6	2836,133353	8508,400058	14180,66676
0,7	2698,371253	8095,113758	13491,85626
0,8	2569,566662	7708,699986	12847,83331
0,9	2450,237256	7350,711768	12251,18628
1	2340,159326	7020,477979	11700,79663

*Tabla 25*. Cálculo con distintos valores de corriente-Voltajes en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

## 4.1.1.3.4. Resultados de simulación de altura

n = Numero de picas

h	Ro (Ω)
0,01	18,88428734
0,1	18,52768765
0,2	18,28669928
0,3	18,111502
0,4	17,97482706
0,5	17,86394665
0,6	17,77161049
0,7	17,69322864
0,8	17,62569365
0,9	17,56680017
1	17,51492683

*Tabla 26.* Altura en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento, 4 picas a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(0.01m)	Vx(0.1m)	Vx(0.2m)	Vx(0.3m)	Vx(0.4m)
0,01	632904,2568	61011,97035	29332,67805	18830,85505	13618,74338
0,1	627445,5525	60485,75126	29079,68811	18668,44175	13501,28376
0,2	612176,2693	59013,79236	28372,01556	18214,13344	13172,72151
0,3	590168,3127	56892,22534	27352,03142	17559,32881	12699,15744
0,4	564640,1463	54431,3101	26168,89909	16799,78707	12149,84601
0,5	538047,979	51867,82517	24936,45441	16008,58802	11577,63955
0,6	511916,1861	49348,72034	23725,34632	15231,08652	11015,33936
0,7	487050,4128	46951,65979	22572,91336	14491,25302	10480,2812
0,8	463801,4514	44710,45992	21495,41342	13799,52467	9980,013374
0,9	442262,7412	42634,12826	20497,17705	13158,68156	9516,546486
1	422393,9033	40718,77228	19576,33282	12567,52231	9089,011669

*Tabla 27.* Cálculo con distintos valores de altura, de 0.01 a 0.4 m-Voltajes en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(0.5m)	Vx(0.6m)	Vx(0.7m)	Vx(0.8m)	Vx(0.9m)	Vx(1m)
0,01	10519,3052	8473,8848	7029,0288	5958,2002	5135,6877	4486,1743
0,1	10428,5778	8400,7988	6968,4045	5906,8116	5091,3932	4447,4817
0,2	10174,7918	8196,3600	6798,8240	5763,0657	4967,4909	4339,2494
0,3	9809,0044	7901,6980	6554,4038	5555,8814	4788,9079	4183,2519
0,4	9384,7086	7559,9042	6270,8883	5315,5576	4581,7601	4002,3022
0,5	8942,7285	7203,8646	5975,5559	5065,2173	4365,9785	3813,8107

0,6	8508,4001	6853,9889	5685,3364	4819,2110	4153,9327	3628,5824
0,7	8095,1138	6521,0639	5409,1774	4585,1230	3952,1599	3452,3279
0,8	7708,7000	6209,7861	5150,9746	4366,2559	3763,5067	3287,5338
0,9	7350,7118	5921,4067	4911,7659	4163,4891	3588,7313	3134,8624
1	7020,4780	5655,3850	4691,1028	3976,4426	3427,5061	2994,0274

*Tabla 28.* Cálculo con distintos valores de altura, de 0.5 a 1 m-Voltajes en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.4. Electrodos horizontales con altura de empotramiento 4.1.1.4.1. Resultados de simulación de resistividad

ρ(suelo)Ωm	Ro (Ω)
50	19,53924177
100	39,07848353
200	78,15696707
500	195,3924177
1000	390,7848353

*Tabla 29.* Resistividad en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(ρ=50Ωm)	Vx(ρ=100Ωm)	Vx(ρ=200Ωm)	Vx(ρ=500Ωm)	Vx(ρ=1000Ωm)
0,01	8130,329098	16260,6582	32521,31639	105193,0523	149366,8797
0,1	8048,199537	16096,39907	32192,79815	104285,778	147786,6836
0,2	7819,157266	15638,31453	31276,62906	101747,9179	143384,6636
0,3	7490,89467	14981,78934	29963,57868	98090,0437	137088,5236
0,4	7113,021119	14226,04224	28452,08448	93847,08638	129860,5366
0,5	6722,90372	13445,80744	26891,61488	89427,28478	122421,8563
0,6	6343,242237	12686,48447	25372,96895	85084,00058	115206,9742
0,7	5985,587354	11971,17471	23942,34942	80951,13758	108433,7354
0,8	5654,554245	11309,10849	22618,21698	77086,99986	102186,1328
0,9	5350,92526	10701,85052	21403,70104	73507,11768	96474,87845
1	5073,560689	10147,12138	20294,24275	70204,77979	91274,4709

*Tabla 30.* Cálculo con distintos valores de resistividad-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.4.2. Resultados de simulación de longitud

Long (m)	Ro (Ω)
2,4	19,53924177
3	16,64411867
3,6	14,58635911

*Tabla 31.* Longitud en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(L=2.4m)	Vx(L=3m)	Vx(L=3.6m)
0,01	8130,329098	7317,826893	6686,830184
0,1	8048,199537	7247,35582	6625,047412
0,2	7819,157266	7050,624912	6452,431912
0,3	7490,89467	6768,130872	6204,19169
0,4	7113,021119	6442,105534	5917,114248
0,5	6722,90372	6104,50565	5619,134589
0,6	6343,242237	5774,890475	5327,448823
0,7	5985,587354	5463,34657	5051,015467
0,8	5654,554245	5174,031626	4793,613355
0,9	5350,92526	4907,799189	4556,116405
1	5073,560689	4663,824147	4337,908263

*Tabla 32.* Cálculo con distintos valores de longitud-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.4.3. Resultados de simulación de corriente

-	Ro (Ω)		
1000	19,53924177		
3000	19,53924177		
5000	19,53924177		

*Tabla 33.* Corriente en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(1000A)	Vx(3000A)	Vx(5000A)
0,01	8130,329098	24390,98729	40651,64549
0,1	8048,199537	24144,59861	40240,99769
0,2	7819,157266	23457,4718	39095,78633
0,3	7490,89467	22472,68401	37454,47335
0,4	7113,021119	21339,06336	35565,10559
0,5	6722,90372	20168,71116	33614,5186
0,6	6343,242237	19029,72671	31716,21119
0,7	5985,587354	17956,76206	29927,93677
0,8	5654,554245	16963,66273	28272,77122
0,9	5350,92526	16052,77578	26754,6263
1	5073,560689	15220,68207	25367,80344

*Tabla 34.* Cálculo con distintos valores de corriente-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

### 4.1.1.4.4. Resultados de simulación de altura

h	Ro (Ω)
0,01	18,88428734
0,1	18,52768765
0,2	18,28669928

0,3	18,111502
0,4	17,97482706
0,5	17,86394665
0,6	17,77161049
0,7	17,69322864
0,8	17,62569365
0,9	17,56680017
1	17,51492683

*Tabla 35.* Altura en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(0.01m)	Vx(0.1m)	Vx(0.2m)	Vx(0.3m)	Vx(0.4m)
0,01	29459,02831	16771,31624	12722,26084	10559,00264	9146,772336
0,1	16958,99414	14779,99225	12135,63538	10304,10454	9010,774858
0,2	12890,57163	12216,36462	10916,46574	9672,97457	8646,632534
0,3	10669,54774	10385,71073	9706,834752	8912,318839	8157,152209
0,4	9194,57837	9064,311724	8682,47742	8171,669786	7630,632062
0,5	8119,518499	8064,740879	7840,567263	7505,374061	7118,838391
0,6	7291,126041	7278,625451	7145,979325	6922,392728	6644,753715
0,7	6628,448108	6641,633964	6565,902674	6415,851339	6215,275368
0,8	6083,74124	6113,375806	6074,916877	5975,024813	5829,780183
0,9	5626,629631	5667,15796	5654,08078	5589,453761	5484,642295
1	5236,681613	5284,569105	5289,294948	5250,101656	5175,360341

*Tabla 36.* Cálculo con distintos valores de altura, de 0.01 a 0.4 m-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

x(Distancia)	Vx(0.5m)	Vx(0.6m)	Vx(0.7m)	Vx(0.8m)	Vx(0.9m)	Vx(1m)
0,01	8130,3291	7353,9503	6736,4063	6230,4398	5806,3909	5444,5676
0,1	8048,1995	7300,0880	6698,9426	6203,2080	5785,9064	5428,7299
0,2	7819,1573	7146,2876	6590,3670	6123,4994	5725,5290	5381,8123
0,3	7490,8947	6916,8793	6424,1074	5999,2180	5630,1655	5306,9986
0,4	7113,0211	6640,2609	6217,0212	5840,7689	5506,4792	5208,7004
0,5	6722,9037	6341,4330	5985,5851	5659,0971	5361,8641	5092,0132
0,6	6343,2422	6038,6220	5743,3708	5464,0365	5203,4038	4962,0618
0,7	5985,5874	5743,4091	5500,2812	5263,4942	5037,2197	4823,5264
0,8	5654,5542	5462,2879	5262,8739	5063,3079	4868,2024	4680,3788
0,9	5350,9253	5198,3411	5035,1017	4867,4840	4700,0171	4535,7974
1	5073,5607	4952,5511	4819,0722	4678,5763	4535,2574	4392,2013

*Tabla 37.* Cálculo con distintos valores de altura, de 0.5 a 0.1 m-Voltajes en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia industrial.

Los resultados de las simulaciones de frecuencia industrial nos muestran la influencia que tienen los parámetros establecidos del suelo, del electrodo y del arreglo geométrico sobre el sistema de puesta a tierra antes descargas de corriente de frecuencia industrial. En las gráficas podemos observar cómo los perfiles de voltajes de los arreglos geométricos se reducen cuando la resistividad del suelo disminuye, es decir, los voltajes de la superficie son bajos ante un suelo de alta resistividad.

En los electrodos verticales, las resistencias de los electrodos de sistemas de puesta a tierra son más altos ante suelos de alta resistividad. Por ejemplo, para un suelo con resistividad de 50  $\Omega$ ·m, la resistencia del electrodo es de 18.95  $\Omega$ , en cambio para un suelo de resistividad de 500  $\Omega$ ·m, la resistencia del electrodo es de 189.49  $\Omega$ . Esto conlleva que los suelos de baja resistividad permiten más la disipación de la corriente que en un suelo de alta resistividad, disminuyendo el riesgo para las personas ante un voltaje de paso.

En los arreglos geométricos de electrodo vertical con altura de empotramiento y electrodos en paralelo con altura de empotramiento, nos permite observar que la altura a la que es colocado el arreglo geométrico también influye en la dispersión de la corriente, haciendo que los perfiles de voltajes disminuyan acorde vaya aumentando la altura de empotramiento que se la coloque con respecto a la superficie del suelo.

Por otro lado, los electrodos horizontales tienen un comportamiento diferente con respecto a los otros arreglos. En un suelo de resistividad de 50  $\Omega$ ·m la resistencia del electrodo es de 19.54  $\Omega$ , lo que significa que el arreglo es efectivo dependiendo de otros factores como por el ejemplo la resistividad del suelo y la longitud del electrodo del sistema de puesta a tierra.

En conclusión, el estudio de sistemas de puesta a tierra nos muestra la importancia de los parámetros para los arreglos geométricos, lo que nos permite tomar mejores decisiones como mejorar la resistividad del suelo, para resguardar la seguridad de las personas cercanas de donde se produce la descarga eléctrica ante un voltaje de paso.

### 4.1.2. Alta frecuencia de tipo rayo

## **4.1.2.1. Electrodos verticales sin altura de empotramiento 4.1.2.1.1. Resultados de simulación de resistividad**

	Resistividad del suelo (ohm*m)			
Electrodo Vertical sin h	50	100	500	
Ro (ohm)	18,9676806	37,93536122	189,6768061	
Rtr (ohm)	2,09591969	4,191839381	20,9591969	
L(electrodo) mh	2,597E-06	2,59699E-06	2,59699E-06	
C(suelo) uf	2,7995E-10	1,39975E-10	2,7995E-11	

*Tabla 38.* Resistividad en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

### 4.1.2.1.2. Resultados de simulación de longitud

	Long (m)			
Electrodo Vertical sin h	2,4	3	3,6	
Ro (ohm)	18,96768061	15,76431018	13,53897637	
Rtr (ohm)	2,09591969	1,74194878	1,496050452	
L(electrodo) mh	2,59699E-06	3,38012E-06	4,18742E-06	
C(suelo) uf	2,7995E-10	3,36837E-10	3,92201E-10	

*Tabla 39.* Longitud en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

### 4.1.2.1.3. Resultados de simulación de corriente

Electrodo Vertical	Corriente (A)		
sin h	20000	50000	100000
Ro (ohm)	18,96768061	18,9676806	18,9676806
Rtr (ohm)	0,471403922	0,29819728	0,21087035
L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,597E-06	2,597E-06
C(suelo) uf	2,7995E-10	2,7995E-10	2,7995E-10

*Tabla 40.* Corriente en electrodo vertical sin altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

## 4.1.2.2. Electrodos verticales con altura de empotramiento 4.1.2.2.1. Resultados de simulación de resistividad

Electrodo vertical con	Resistividad del suelo (ohm*m)			
h	50	100	500	
Ro (ohm)	17,8826732	35,76534641	178,8267321	
Rtr (ohm)	1,97602689	3,952053775	19,76026888	
L(electrodo) mh	2,597E-06	2,59699E-06	2,59699E-06	
C(suelo) uf	2,9694E-10	1,48468E-10	2,96935E-11	

Tabla 41. Resistividad en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia de

tipo rayo.

## 4.1.2.2.1. Resultados de simulación de longitud

Electrodo vertical con	Long (m)		
h	2,4	3	3,6
Ro (ohm)	17,88267321	14,98327923	12,94557461
Rtr (ohm)	1,976026888	1,655645232	1,43047984
L(electrodo) mh	2,59699E-06	3,38012E-06	1,83715E-05
C(suelo) uf	2,96935E-10	3,54395E-10	4,10179E-10

*Tabla 42.* Longitud en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

### 4.1.2.2.3. Resultados de simulación de corriente

Electrodo vertical	Corriente (A)		
con h	20000	50000	100000
Ro (ohm)	17,88267321	17,8826732	17,8826732
Rtr (ohm)	0,444438224	0,28113951	0,19880794
L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,597E-06	2,597E-06
C(suelo) uf	2,96935E-10	2,9694E-10	2,9694E-10

*Tabla 43.* Corriente en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

### 4.1.2.2.3. Resultados de simulación de altura

Electrodo vertical con	Altura h (m)		
h	0,01	0,5	1
Ro (ohm)	18,9030139	17,88267321	17,53365339
Rtr (ohm)	2,088774049	1,976026888	1,937460364
L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,59699E-06	2,59699E-06
C(suelo) uf	2,80908E-10	2,96935E-10	3,02846E-10

*Tabla 44.* Altura en electrodo vertical con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

## **4.1.2.3.** Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento **4.1.2.3.1.** Resultados de simulación de resistividad

Diese	Electrodo en paralelo	Resistividad del suelo (ohm*m)		
FILdS	con h	50	100	500
	Ro (ohm)	9,75202105	19,5040421	97,52021049
n=2	Rtr (ohm)	1,07759369	2,155187379	10,7759369
	L(electrodo) mh	2,597E-06	2,59699E-06	2,59699E-06
	C(suelo) uf	5,445E-10	2,72251E-10	5,44503E-11
------	-----------------	------------	-------------	-------------
	Ro (ohm)	6,27046903	12,54093805	62,70469025
n-2	Rtr (ohm)	0,69288385	1,385767693	6,928838463
n=3	L(electrodo) mh	2,597E-06	2,59699E-06	2,59699E-06
	C(suelo) uf	8,4683E-10	4,23413E-10	8,46827E-11
	Ro (ohm)	4,63383583	9,267671661	46,3383583
n=4	Rtr (ohm)	0,51203666	1,024073313	5,120366563
11-4	L(electrodo) mh	2,597E-06	2,59699E-06	2,59699E-06
	C(suelo) uf	1,1459E-09	5,72959E-10	1,14592E-10
	Ro (ohm)	3,67722916	7,354458312	36,77229156
n=5	Rtr (ohm)	0,40633207	0,812664147	4,063320736
	L(electrodo) mh	2,597E-06	2,59699E-06	2,59699E-06
	C(suelo) uf	1,444E-09	7,22011E-10	1,44402E-10

*Tabla 45*. Resistividad en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

4.1	1.2.3.2.	Resultados	de	simu	lación	de	longitud
-----	----------	------------	----	------	--------	----	----------

Dicas	Electrodo en paralelo			
FICOS	con h	2,4	3	3,6
	Ro (ohm)	9,752021049	8,263722242	7,210610897
n-0	Rtr (ohm)	1,07759369	0,913137379	0,796769076
11-2	L(electrodo) mh	2,59699E-06	3,38012E-06	4,18742E-06
	C(suelo) uf	5,44503E-10	6,42568E-10	7,36415E-10
	Ro (ohm)	6,270469025	5,294669777	4,606794865
n=3	Rtr (ohm)	0,692883846	0,585058493	0,509048643
	L(electrodo) mh	2,59699E-06	3,38012E-06	4,18742E-06
	C(suelo) uf	8,46827E-10	1,0029E-09	1,15265E-09
	Ro (ohm)	4,63383583	3,905379883	3,392547131
n-1	Rtr (ohm)	0,512036656	0,43154262	0,374874845
11-4	L(electrodo) mh	2,59699E-06	3,38012E-06	4,18742E-06
	C(suelo) uf	1,14592E-09	1,35966E-09	1,5652E-09
n=5	Ro (ohm)	3,677229156	3,095592014	2,686370991
	Rtr (ohm)	0,406332074	0,342061446	0,296842717
	L(electrodo) mh	2,59699E-06	3,38012E-06	4,18742E-06
	C(suelo) uf	1,44402E-09	1,71534E-09	1,97664E-09

*Tabla 46.* Longitud en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

# 4.1.2.3.3. Resultados de simulación de corriente

Diege	Electrodo en	Corriente (A)		
Picas	paralelo con h	20000	50000	100000
n=2	Ro (ohm)	9,752021049	9,75202105	9,75202105
	Rtr (ohm)	0,242367059	0,1533148	0,10841663

	L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,597E-06	2,597E-06
	C(suelo) uf	5,44503E-10	5,445E-10	5,445E-10
	Ro (ohm)	6,270469025	6,27046903	6,27046903
n-2	Rtr (ohm)	0,155840018	0,09858015	0,069711
n=3	L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,597E-06	2,597E-06
	C(suelo) uf	8,46827E-10	8,4683E-10	8,4683E-10
	Ro (ohm)	4,63383583	4,63383583	4,63383583
n-4	Rtr (ohm)	0,11516476	0,07285009	0,05151598
11-4	L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,597E-06	2,597E-06
	C(suelo) uf	1,14592E-09	1,1459E-09	1,1459E-09
	Ro (ohm)	3,677229156	3,67722916	3,67722916
n=5	Rtr (ohm)	0,091390207	0,05781096	0,04088104
	L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,597E-06	2,597E-06
	C(suelo) uf	1,44402E-09	1,444E-09	1,444E-09

*Tabla 47.* Corriente en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

## 4.1.2.3.3. Resultados de simulación de altura

Dioac	Electrodo en paralelo	Altura h(m)			
FILdS	con h	0,01	0,5	1	
	Ro (ohm)	10,29761971	9,752021049	9,545018005	
n-2	Rtr (ohm)	1,137882082	1,07759369	1,054719952	
11-2	L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,59699E-06	2,59699E-06	
	C(suelo) uf	5,15653E-10	5,44503E-10	5,56311E-10	
	Ro (ohm)	6,61878898	6,270469025	6,146299595	
n=3	Rtr (ohm)	0,731373036	0,692883846	0,679163183	
	L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,59699E-06	2,59699E-06	
	C(suelo) uf	8,02262E-10	8,46827E-10	8,63934E-10	
	Ro (ohm)	4,892030365	4,63383583	4,543560195	
	Rtr (ohm)	0,54056703	0,512036656	0,502061241	
11-4	L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,59699E-06	2,59699E-06	
	C(suelo) uf	1,08544E-09	1,14592E-09	1,16869E-09	
n=5	Ro (ohm)	3,882795693	3,677229156	3,605954308	
	Rtr (ohm)	0,429047078	0,406332074	0,398456237	
	L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,59699E-06	2,59699E-06	
	C(suelo) uf	1,36757E-09	1,44402E-09	1,47256E-09	

*Tabla 48.* Altura en electrodo vertical en paralelo con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

# 4.1.2.4. Electrodos horizontales con altura de empotramiento

4.1.2.4.1. Resultados de simulación de resistividad

Electrodo horizontal	Resistividad del suelo (ohm*m)			
con h	50	100	500	
Ro (ohm)	12,7321386	25,35505539	126,3357697	
Rtr (ohm)	1,40689526	2,801721567	13,96004249	
L(electrodo) mh	2,597E-06	2,59699E-06	2,59699E-06	
C(suelo) uf	4,1705E-10	2,09426E-10	4,20309E-11	

*Tabla 49*. Resistividad en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

## 4.1.2.4.2. Resultados de simulación de longitud

Electrodo horizontal	Long (m)			
con h	2,4	3	3,6	
Ro (ohm)	19,55796832	16,65911958	14,59887081	
Rtr (ohm)	2,161146202	1,840824794	1,613168284	
L(electrodo) mh	2,59699E-06	3,38012E-06	4,18742E-06	
C(suelo) uf	2,71501E-10	3,18744E-10	3,63727E-10	

*Tabla 50*. Longitud en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

## 4.1.2.4.3. Resultados de simulación de corriente

Electrodo horizontal	Corriente (A)		
con h	20000	50000	100000
Ro (ohm)	12,73213855	12,7321386	12,7321386
Rtr (ohm)	0,316431944	0,20016623	0,14154764
L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,597E-06	2,597E-06
C(suelo) uf	4,17055E-10	4,1705E-10	4,1705E-10

*Tabla 51.* Corriente en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

#### 4.1.2.4.4. Resultados de simulación de altura

Electrodo horizontal	Altura h(m)			
con h	0,01	0,5	1	
Ro (ohm)	32,37304354	19,55796832	18,2732357	
Rtr (ohm)	3,577205921	2,161146202	2,019183858	
L(electrodo) mh	2,59699E-06	2,59699E-06	2,59699E-06	
C(suelo) uf	1,64025E-10	2,71501E-10	2,90589E-10	

*Tabla 52.* Altura en electrodo horizontal con altura de empotramiento a frecuencia de tipo rayo.

Los resultados de las simulaciones en alta frecuencia o frecuencia de tipo rayo, muestran un comportamiento diferente en la resistencia de puesta a tierra en comparación a la condiciones de frecuencia industrial, se observó como a medida que la frecuencia de la corriente aumenta, la distribución de corriente en electrodos de puesta a tierra se ve influenciada por efectos como los de la reactancia inductiva y la distribución de corriente en la superficie del electrodo, que genera variaciones significativas en los voltajes de paso, así como en la capacidad del sistema para disipar la falla.

Los datos reflejan que, a mayor resistividad del suelo, la resistencia de puesta a tierra también se incrementa, siguiendo una tendencia similar a la observada en frecuencias de tipo industrial. Sin embargo, en alta frecuencia la disipación de corriente no es uniforme debido a la reducción del área efectiva de conducción, lo que provoca un aumento adicional en la resistencia del sistema.

En las configuraciones de electrodos verticales, la resistencia de puesta a tierra en alta frecuencia tiende a ser mayor que en frecuencia de tipo industria, debido a la reducción del área efectiva de conducción, este fenómeno se muestra aún más evidente en suelos con alta resistividad, donde la disipación de las corrientes se ve limitada.

En el caso de los electrodos verticales con altura de empotramiento, se observó una ligera reducción de la resistencia de puesta a tierra, en comparación de los electrodos en vertical sin altura de empotramiento, esto se debe a que en alta frecuencia los efectos inductivos dominan el comportamiento de la corriente, limitando la efectividad de la reducción de la resistencia.

En el caso de los electrodos en paralelo, estos presentan un desempeño superior en términos de reducción de la resistencia, con valores significativamente menores en comparación con las configuraciones de electrodos anteriores, esta configuración permite distribuir la corriente en múltiples "caminos", reduciendo la impedancia del sistema y mitigando la reactancia inductiva en alta frecuencia. Sin embargo, este beneficio puede verse por la cercanía entre electrodos, ya que el espacio insuficiente puede generar acoplamiento electromagnético y reducir la efectividad de la disipación de la corriente.

Por su parte los electrodos horizontales muestran un comportamiento similar al observado en baja frecuencia o frecuencia de tipo industrial, pero con una tendencia ligeramente superior a los valores de resistencia del SDPT, debido a una menor profundidad de penetración de la corriente en el suelo.

El análisis demuestra que en alta frecuencia la inductancia y la distribución superficial de la corriente tienen un gran impacto en la resistencia del SDPT, en suelo más resistivos se incrementan los voltajes pasos, así como se incrementan los riesgos de descargas peligrosas. Las configuraciones de electrodos en paralelo siguen siendo la opción más efectiva para reducir la resistencia del sistema, mientras que las conexiones adicionales, pueden ayudar en cierta medida, aunque con mayor impacto que en frecuencias industriales.

#### **4.2 CONCLUSIONES**

El análisis de los voltajes de paso en sistemas de puesta a tierra utilizados en líneas aéreas de distribución, realizado mediante Python y ATPDraw, permitió evaluar el comportamiento de estos voltajes em condiciones de frecuencia industrial y descarga de tipo rayo. A través del modelado se logró observar que aspectos como la resistividad del suelo, la geometría del electrodo y la configuración del SDPT, son factores determinantes al momento de conocer la magnitud de los voltajes de paso, asimismo, se confirmó que, en los suelos con alta resistividad, la resistencia en el SDPT es considerablemente mayor, lo que genera voltajes de paso más elevados y en consecuencia un mayor riesgo para las personas y/o animales.

Los resultados demostraron que la elección del tipo de electrodo y la configuración que se use para este, influyen significativamente en la corriente, se pudo observar, que los electrodos y las configuraciones con múltiples electrodos conectados, demostraron una mayor eficiencia a la hora de reducir, la resistencia de puesta a tierra, especialmente en escenarios de alta frecuencia, donde existen efectos, como el efecto inductivo, los cuales juegan un papel importante en el SDPT. A diferencia de los electrodos de altas frecuencias, los electrodos de baja frecuencia o de tipo industrial, presentaron mayores valores de resistencia, lo que puede resultar en eventos de falla que pueden comprometer la seguridad.

La representación visual mediante el uso de AutoCAD facilitó la interpretación para lograr la comprensión del comportamiento geométrico de los voltajes de paso, permitiendo así, esquematizar de manera precisa la interacción entre los elementos del sistema y su impacto en la superficie del terreno, el uso de una tercera herramienta proporcionó una visión más detalla del cómo pueden los voltajes de paso afectar la seguridad de las personas que trabajan en las cercanías de estructuras de líneas de transmisión.

El análisis, resalta la importancia, de un diseño optimo del SDPT, asegurando así que la disipación de la corriente se realice de manera efectiva para minimizar el riesgo y mejorar la seguridad de las instalaciones en SSDPT. Además, la comparación entre frecuencia industrial y frecuencia de tipo rayo permitió identificar las diferencias que existen en la distribución del voltaje, haciendo énfasis en la necesidad de considerar estos factores en la planificación de SEP.

Por medio de las simulaciones de frecuencia industrial se nos muestra la influencia que tienen los parámetros establecidos del suelo, del electrodo y del arreglo geométrico sobre el sistema de puesta a tierra antes descargas de corriente de frecuencia industrial. En las gráficas podemos observar cómo los perfiles de voltajes de los arreglos geométricos se reducen cuando la resistividad del suelo disminuye, es decir, los voltajes de la superficie son bajos ante un suelo de alta resistividad.

En los electrodos verticales, las resistencias de los electrodos de sistemas de puesta a tierra son más altos ante suelos de alta resistividad. Por ejemplo, para un suelo con resistividad de 50  $\Omega$ ·m, la resistencia del electrodo es de 18.95  $\Omega$ , en cambio para un suelo de resistividad de 500  $\Omega$ ·m, la resistencia del electrodo es de 189.49  $\Omega$ . Esto conlleva que los suelos de baja resistividad permiten más la disipación de la corriente que en un suelo de alta resistividad, disminuyendo el riesgo para las personas ante un voltaje de paso.

En los arreglos geométricos de electrodo vertical con altura de empotramiento y electrodos en paralelo con altura de empotramiento, nos permite observar que la altura a la que es colocado el arreglo geométrico también influye en la dispersión de la corriente, haciendo que los perfiles de voltajes disminuyan acorde vaya aumentando la altura de empotramiento que se la coloque con respecto a la superficie del suelo.

Por otro lado, los electrodos horizontales tienen un comportamiento diferente con respecto a los otros arreglos. En un suelo de resistividad de 50  $\Omega$ ·m la resistencia del electrodo es de

19.54  $\Omega$ , lo que significa que el arreglo es efectivo dependiendo de otros factores como por el ejemplo la resistividad del suelo y la longitud del electrodo del sistema de puesta a tierra.

En conclusión, el estudio de sistemas de puesta a tierra nos muestra la importancia de los parámetros para los arreglos geométricos, lo que nos permite tomar mejores decisiones como mejorar la resistividad del suelo, para resguardar la seguridad de las personas cercanas de donde se produce la descarga eléctrica ante un voltaje de paso.

## **4.3 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar un estudio más profundo al comportamiento del voltaje de paso ante descargas de corriente de frecuencia industrial y alta frecuencia tipo rayo, para obtener más conocimiento de la disipación del voltaje, mejorar las características del suelo y/o del electrodo y prevenir fallas en los sistemas de puesta a tierra.
- Se recomienda utilizar Software de simulación más avanzada para el estudio del perfil de voltaje de paso ante descargas de corriente de alta frecuencia en arreglos geométricos de sistemas de puesta a tierra más avanzados para asegurar un buen funcionamiento y resguardar la seguridad de las personas cercanas.
- Se sugiere realizar investigaciones de los materiales a utilizar en un sistema de puesta a tierra para obtener conocimiento de cómo estos podrían influir en las resistencias del suelo y cómo mejorar los sistemas de puesta a tierra.

#### REFERENCIAS

- [1] Alfredo Rosendo Vera Sanchez, "Diseño de la malla de puesta a tierra en la subestación Terminal Terrestre," Thesis, Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [2] Kevin Alexander Nielsen Medina, "Diseño de un sistema puesta a tierra para subestación Germania (10/24 MVA) evaluando los voltajes de toque y paso," Thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2024.
- [3] G. Rojas, Manual de sistemas de puesta a tierra. 2007.
- [4] J. He and L. D. Grcev, "Grounding system analysis in transient and frequency domains: A review," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 845–850, Oct. 2001.
- [5] C. Sipaque, "Diseño de un sistema puesta a tierra de una subestación de potencia eléctrica comparando las normas ANSI/IEEE STD 80-2000 y CEN EN 50522," 2019.

- [6] IEEE Standards Association, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems (The Green Book)," 2007.
- [7] P. NOJA, "Fundamentals of high voltage equipment earthing," 2023.
- [8] A. Farina, "Sistema de puesta a tierra," *Revista Ingeniería Eléctrica*, no. 375, Feb. 2022.
- [9] J. Briceño, "Manual para la medición de la resistencia a tierra de sistemas de conexión a tierra," 2015.
- [10] M. F. B. R. Gonçalves, E. G. da Costa, A. F. Andrade, V. S. Brito, G. R. S. Lira, and G. V. R. Xavier, "Grounding system models for electric current impulse," *Electric Power Systems Research*, vol. 177, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105981.
- [11] P. Gómez, "Diseño y construcción de puestas a tierra para el Colegio Técnico Industrial Gualaceo, basado en las recomendaciones prácticas para el aterrizaje en sistemas eléctricos comerciales e industriales de la IEE," 2010.
- [12] L. Grcev, "Análisis numérico de las tensiones transitorias cerca de sistemas de puesta a tierra," *Simposio Internacional de Compatibilidad Electromagnética de IEEE*, Sep. 1992.
- [13] R. Aguas and A. Buelvas, "Metodología para el cálculo de las corrientes de cortocircuito," 2011.
- [14] M. Jurado, "Análisis del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente al rayo," 2013.
- [15] Y. Aguilar, E. Conde, and M. Cuenca, "Diseño de línea de transmisión El Oro Loja," Guayaquil, Ecuador, 2013.
- [16] W. McKinney, *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*, 1st Edition. O'Reilly Media, 2012.
- [17] A. Muller and S. Guido, *Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists*, 1st Edition. O'Reilly Media, 2016.
- [18] H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*, 2nd Edition. Bonneville Power Administration, 1986.
- [19] B. R. Meyer, *Application of the EMTP ATP Rule Book*, 1st Edition. University of Canterbury, 1995.
- [20] keyBPS, "¿Qué son las sobretensiones y qué daños producen?"
- [21] IEEE Power Engineering Society, "Guide for Safety in AC Substation Grounding," 2013.
- [22] D. Castillo, "Elaboración de un plan de mantenimiento de las puestas a tierra instaladas en la ESFOT," 2022.

# ANEXOS

# **1.** Perfil de Voltaje Generado por Descargas de Corriente Electrodo Vertical con Profundidad de Enterramiento h 3D

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl\_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Parámetros
rho\_suelo = # Resistividad del suelo en ohm\*m
I = # Corriente en amperios
L = # Distancia en metros
h\_values = np.arange(...,...) # Altura
x\_values = np.linspace(...,...) # Rango de x
theta = np.linspace(0, 2 \* np.pi, 200)

X, Theta = np.meshgrid(x\_values, theta)

# Función Vx def calcular\_Vx(x, h): return (rho\_suelo \* I) / (2 \* np.pi \* (L + h)) \* np.log((np.sqrt(x\*\*2 + h\*\*2) + (L + h)) / np.sqrt(x\*\*2 + h\*\*2))

# Figura 3D
fig = plt.figure(figsize=(12, 8))
ax = fig.add\_subplot(111, projection='3d')

```
# Graficar para h
for h in h_values:
    Z = calcular_Vx(X, h) # Voltaje como función de x y h
    Y = X * np.sin(Theta) # Coordenada Y en 3D
    X_c = X * np.cos(Theta) # Coordenada X en 3D
    ax.plot_surface(X_c, Y, Z, alpha=0.7, label=f"h = {h:.1f} m", cmap="viridis")
```

# Configuración del gráfico ax.set\_title("Perfil de Voltaje Generado\nElectrodo Vertical con Profundidad de Enterramiento h", fontsize=14) ax.set\_xlabel("X (Distancia en metros)", fontsize=12) ax.set\_ylabel("Y (Distancia en metros)", fontsize=12) ax.set\_zlabel("Vx (Voltaje en voltios)", fontsize=12) plt.tight\_layout()

# Mostrar gráfico plt.show()

# 2. Perfil de Voltaje Generado por Descargas de Corriente Electrodo Vertical sin altura de empotramiento. 3D

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt
from mpl\_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Parámetros constantes
I = # Corriente en amperios
L = # Longitud del electrodo en metros
x values = np.linspace(...,..) # Rango de x

# Resistividades del suelo a evaluar rho values = [...,...] # Resistividad en ohm\*m a evaluar

# Función Vx def calcular\_Vx(x, rho): return (rho \* I) / (2 \* np.pi \* L) \* np.log((np.abs(x) + L) / np.abs(x))

# Gráfico 3D fig = plt.figure(figsize=(12, 8)) ax = fig.add\_subplot(111, projection='3d')

# Malla
theta = np.linspace(0, 2\*np.pi, 1000) # Ángulo alrededor del eje Z
X, Theta = np.meshgrid(x\_values, theta)

# Graficar para resistividad
for rho in rho\_values:
 Vx\_values = calcular\_Vx(X, rho)

# Superficie del cono
Z = Vx\_values # Voltaje como altura en el eje Z
Y = X \* np.sin(Theta) # Coordenada Y (circular) de la malla
X\_cart = X \* np.cos(Theta) # Coordenada X (circular) de la malla

# Superficie 3D ax.plot\_surface(X\_cart, Y, Z, rstride=5, cstride=5, alpha=0.7, label=f"ρ = {rho} Ω·m")

# Etiquetas y título
ax.set\_xlabel("Distancia x (metros)", fontsize=12)
ax.set\_ylabel("Distancia (metros)", fontsize=12)
ax.set\_zlabel("Voltaje (voltios)", fontsize=12)
ax.set\_title("Perfil de Voltaje Generado por Descargas de Corriente en Cono de
Revolución\nVariación con Resistividad del Suelo", fontsize=14)

# Leyenda formula = r" $V_x = \frac{\int I}{2 \oplus L} \frac{I}{2 \oplus L} \frac{$ 

ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
plt.tight\_layout()
plt.show()

# 3. Electrodos verticales en paralelo con altura de empotramiento. 2D Python

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros constantes L = # Longitud fija en metros h = # Altura fija en metros n = # Número de picas en paralelo rho = # Resistividad fija en ohm\*m x values = np.linspace(...,...) # Rango de x I values = [...,...] # Valores de corriente # Picas alrededor de x = 0spacing = # Separación entre picas pica\_positions = np.linspace(-spacing \* (n - 1) / 2, spacing \* (n - 1) / 2, n) # Función Vx def calcular\_Vx(x, rho, I, L, n, h, pica\_positions): Vx = 0for x\_pica in pica\_positions: x i = x - x pica term = np.log((np.sqrt( $x_i ** 2 + h ** 2$ ) + h + L) / np.sqrt( $x_i ** 2 + h ** 2$ )) Vx += termreturn (rho \* I) / (2 \* np.pi \* n \* (L + h)) \* Vx def convertir a unidad(V): if  $V \ge 1e6$ : return f"{V / 1e6:.2f} MV" elif V >= 1e3: return f" {V / 1e3:.2f} kV" else: return f" {V:.2f} V" # Gráfico plt.figure(figsize=(12, 8)) # Iterar sobre los valores de corriente for I in I\_values: Vx\_values = calcular\_Vx(x\_values, rho, I, L, n, h, pica\_positions) V\_max = np.max(np.abs(Vx\_values)) V max convertido = convertir a unidad(V max) plt.plot(x\_values, Vx\_values, label=f"I = {I} A, V\_max = {V\_max\_convertido}") # Etiquetas y título plt.xlabel("Distancia x (metros)", fontsize=12) plt.ylabel("Voltaje Vx (voltios)", fontsize=12) plt.title("Perfil de Voltaje Generado por Descargas de Corriente de Frecuencia Industrial\n5 Electrodos en paralelo con altura de enterramiento h", fontsize=14) # Leyenda con la fórmula formula = r" $V = \frac{\ln l}{2 \ln (L+h)} \sum \{i=1}^{n} \ln (c + h)$  $h^{2} + h + L \{ (x i)^{2} + h^{2} \} (x i)^{3} + h^{2} \}$ plt.legend(title=f"Fórmula:\n{formula}\np = {rho}  $\Omega$ ·m, L = {L} m, h = {h} m, n = {n}", fontsize=10, title\_fontsize=12, loc='upper right')

plt.xticks(np.arange(-10, 11, 1)) # Marcas en x desde -10 hasta 10 con paso de 1 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7) plt.tight\_layout()
plt.show()

### 4. Electrodos horizontales con altura de empotramiento. CSV - ATP

import pandas as pd import matplotlib.pyplot as plt import numpy as np

# Datos I = 1000 # Corriente rho\_values = [500, 100, 50] # Resistividades en ohm·m L = 2.4 # Longitud en metros h = 0.5 # Altura de enterramiento en metros

# Archivo CSV
file\_path = r"ruta del archivo csv"

# Leer archivo CSV
data = pd.read\_csv(file\_path)

# Verificar las primeras filas del archivo csv
print(data.head())

# Columnas DISTANCIA, V4, V5, y V6 x = data['DISTANCIA'] \* 10y1 = data['V4'] $y_2 = data['V_5']$ y3 = data['V6']x\_combined = pd.concat([-x[::-1], x]) y1\_combined = pd.concat([y1[::-1], y1]) y2\_combined = pd.concat([y2[::-1], y2])  $y3\_combined = pd.concat([y3[::-1], y3])$ #V\_max V max1 = 14.78 $V_{max2} = max(y2_{combined}) / 1000$ V max3 = 5.43# Graficar los datos plt.figure(figsize=(10, 6)) for i, rho in enumerate(rho\_values): if i == 0: plt.plot(x combined, y1 combined, label=f $\rho$  = {rho}  $\Omega \cdot m$ , V max = {V max1:.2f} kV', color='blue') elif i == 1: plt.plot(x combined, y2 combined, label=f $\rho$  = {rho}  $\Omega \cdot m$ , V max = {V max2:.2f} kV', color='green') elif i == 2: plt.plot(x combined, y3 combined, label=f $\rho$  = {rho}  $\Omega \cdot m$ , V max = {V max3:.2f} kV', color='red')

# Etiquetas y título plt.xlabel('Distancia (m)', fontsize=12) plt.ylabel('Voltaje (V)', fontsize=12) plt.title('Perfil de Voltaje Generado por Descargas de Corriente de Frecuencia Industrial\nElectrodo Horizontal con Altura de Enterramiento', fontsize=14)

# Agregar grid
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)

plt.xticks(np.arange(int(x\_combined.min()), int(x\_combined.max()) + 1, 1))

# Leyenda plt.legend(title=f'L = {L} m, h = {h} m, I = {I} A', loc='best')

plt.gca().invert\_yaxis()

plt.tight\_layout()
plt.show()

# 5. Alta frecuencia 2D

import pandas as pd import matplotlib.pyplot as plt import numpy as np from matplotlib.ticker import MaxNLocator

# Datos adicionales
I\_values = [...,...] # Corrientes en A
rho = # Resistencia en ohm
L = # Longitud del electrodo en metros

# Ruta del archivo CSV
file\_path = r"ruta del archivo csv"

# Archivo CSV
data = pd.read\_csv(file\_path)

# Verificar archivo CSV
print(data.head())

# Columnas DISTANCIA, V1, V2 y V3 x = data['DISTANCIA'] \* 1000 y1 = data['V1'] y2 = data['V2']y3 = data['V3']

x\_combined = pd.concat([-x[::-1], x]) y1\_combined = pd.concat([y1[::-1], y1]) y2\_combined = pd.concat([y2[::-1], y2]) y3\_combined = pd.concat([y3[::-1], y3])

```
def format_voltage(value):
  if value >= 1e6:
     return f" {value / 1e6:.2f} MV"
  elif value >= 1e3:
     return f" {value / 1e3:.2f} kV"
  else:
     return f"{value:.2f} V"
# Calcular los picos de voltaje
peak y_1 = \text{format voltage}(y_1 \text{ combined.max}())
peak_y2 = format_voltage(y2_combined.max())
peak_y3 = format_voltage(y3_combined.max())
# Graficar
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(
  x combined, y1 combined,
  label=f'I = \{I\_values[0]\} kA, V\_max = \{peak\_y1\}',
  color='blue')
plt.plot(
  x_combined, y2_combined,
  label=f'I = \{I_values[1]\} kA, V_max = \{peak_y2\}',
  color='green')
plt.plot(
  x_combined, y3_combined,
  label=f'I = \{I\_values[2]\} kA, V\_max = \{peak\_y3\}',
  color='red')
# Etiquetas y título
plt.xlabel('Distancia (m)', fontsize=12)
plt.ylabel('Voltaje (V)', fontsize=12)
plt.title('Perfil de Voltaje Generado por Descargas de Corriente de Alta Frecuencia\n'
      'Tipo Rayo en Electrodo Vertical sin altura de enterramiento', fontsize=14)
# Grid
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
plt.xlim([-10, 10]) # Limitar el eje X de -10 a 10
plt.gca().xaxis.set_major_locator(MaxNLocator(integer=True)) # Asegurar que el eje X tenga
```

números enteros

plt.legend(title=f' $\rho$  = {rho}  $\Omega \cdot m$ , L = {L} m', loc='best')

plt.tight\_layout()
plt.show()

# 6. alta frecuencia 3D

import pandas as pd import numpy as np import matplotlib.pyplot as plt from mpl\_toolkits.mplot3d import Axes3D from matplotlib.ticker import MaxNLocator

ax.set\_ylabel('Y (m)', fontsize=12)

# Parámetros rho = 50  $\# \Omega \cdot m$ L = 2.4 # m $I_values = [20, 50, 100] \# kA$ # Datos CSV data = pd.read\_csv(r"ruta del archivo csv<") # Procesar datos x = data['DISTANCIA'].values \* 1000 voltajes = [data['V1'], data['V2'], data['V3']]x\_simetrico = np.concatenate([-x[::-1], x]) voltajes\_simetricos = [np.concatenate([v[::-1], v.values]) for v in voltajes] # Malla angular para3D theta = np.linspace(0, 2\*np.pi, 100)Theta, X = np.meshgrid(theta, x\_simetrico) # Coordenadas cartesianas  $X_cart = X * np.cos(Theta) # Eje X en metros$  $Y_cart = X * np.sin(Theta) # Eje Y en metros$ # Figura 3D fig = plt.figure(figsize=(14, 10))ax = fig.add\_subplot(111, projection='3d') # Función def format\_voltage(value): if value >= 1e6: return f"{value / 1e6:.2f} MV" elif value  $\geq 1e3$ : return f" {value / 1e3:.2f} kV" else: return f"{value:.2f} V" # Graficar superficie colores = ['blue', 'green', 'red'] for idx, (voltaje, color, I) in enumerate(zip(voltajes\_simetricos, colores, I\_values)): Z = np.tile(voltaje, (len(theta), 1)).Tpeak = format\_voltage(np.max(voltaje)) ax.plot\_surface(X\_cart, Y\_cart, Z, color=color, alpha=0.6,  $label=f'I = \{I\}kA, V_max = \{peak\}', edgecolor='none'\}$ # Leyenda y etiquetas ax.legend(title=f' $\rho$  = {rho}  $\Omega \cdot m$ , L = {L}m', loc='upper right') ax.set xlabel('X (m)', fontsize=12)

ax.set\_zlabel('Voltaje (V)', fontsize=12) ax.set\_title('Perfil de Voltaje 3D - Electrodo Vertical\nDescargas de Alta Frecuencia', fontsize=14)

# Ajustar vista y límites
ax.view\_init(elev=25, azim=-45)
ax.set\_xlim(-10, 10)
ax.set\_ylim(-10, 10)

plt.tight\_layout()
plt.show()