



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**EVALUACIÓN DE VOLTAJES DE SEGURIDAD
GENERADOS EN LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE
UNA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE 69/13.8 KV
ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS MEDIANTE
ATPDRAW**

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

Autor: JESUS JAVIER ARELLANO ESPINOZA

Tutor: ING. OTTO WASHINTONG ASTUDILLO ASTUDILLO, MSC

Guayaquil - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jesus Javier Arellano Espinoza con documento de identificación N°0950941161 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo 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, 30 de enero del año 2024.

Atentamente,



Jesus Javier Arellano Espinoza
0950941161

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

Yo, Jesus Javier Arellano Espinoza con documento de identificación N°0950941161, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Evaluación de voltajes de seguridad generados en la malla de puesta a tierra de una subestación de distribución de 69/13.8 KV ante descargas atmosféricas mediante ATPDRAW”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 30 de enero del año 2024.

Atentamente,



Jesus Javier Arellano Espinoza
0950941161

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Otto Washington Astudillo Astudillo con documento de identificación N°0102054871, docente de la Universidad Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “Evaluación de voltajes de seguridad generados en la malla de puesta a tierra de una subestación de distribución de 69/13.8 KV ante descargas atmosféricas mediante ATPDRAW”, realizado por Jesus Javier Arellano Espinoza con documento de identificación N° 0950941161, 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, 30 de enero del año 2024.

Atentamente,



Ing. Otto Washintong Astudillo Astudillo, MSC

0102054871

*Dedicado a
mis padres, hermanos, abuelos y sobrinos.*

AGRADECIMIENTOS

Esta obra se ha realizado gracias a la bendición de Dios, que me ha dado discernimiento, sabiduría, fortaleza y salud. A mis padres que son un pilar fundamental en mi vida para poder avanzar y cumplir mis objetivos. Al Ing. Otto Astudillo por su compromiso y tiempo dedicados en la realización de este proyecto. Al Ing. Ervin Solano por su valiosa asesoría y aportes consultivos, que enriquecieron significativamente mi tesis. Finalmente a mis familiares y amigos que han confiado en mí y me han regalado palabras de ánimo.

RESUMEN

El trabajo se centra en el modelado y análisis de la respuesta de una malla de puesta a tierra ante descargas atmosféricas tipo rayo. La metodología aplicada, desde la investigación teórica hasta la simulación y análisis de resultados, se sustenta en enfoques y herramientas específicas diseñadas para abordar los desafíos electromagnéticos asociados. La investigación teórica abarcó la recopilación de información sobre descargas atmosféricas y sus consecuencias en sistemas eléctricos, además de la obtención de modelos matemáticos para la malla y el cuerpo humano.

La fase inicial comprendió la preparación del software ATPDRAW y la detallada modelización en este entorno, considerando parámetros críticos y una fuente de corriente tipo rayo. Las simulaciones en ATPDRAW arrojaron resultados preliminares, ofreciendo comprensión sobre la eficacia de la malla y su impacto en la seguridad de la subestación. Posteriormente, tras la finalización de las simulaciones, se diseñó un código en MATLAB para extraer, organizar y depurar datos provenientes de ATPDRAW. Este código facilitó la presentación detallada de los resultados, proporcionando una visión clara de la distribución de tensiones en la malla y de los voltajes de paso y toque experimentados por los modelos del cuerpo humano.

En la etapa final, se compararon los voltajes obtenidos con los límites sugeridos en el artículo de la VDE, estableciendo un marco de referencia para evaluar la seguridad del sistema. La conclusión de este proceso representa una valiosa contribución al diseño y optimización de sistemas de puesta a tierra, impulsando el desarrollo de infraestructuras eléctricas más seguras y confiables.

Palabras claves: Protección contra descargas atmosféricas, Puesta a tierra, Descargas atmosféricas, Subestaciones eléctricas, Voltajes de seguridad.

ABSTRACT

This work focuses on the modeling and analysis of the response of a grounding grid to lightning-type atmospheric discharges. The methodology applied, from theoretical research to simulation and results analysis, is based on specific approaches and tools designed to address associated electromagnetic challenges. The theoretical research encompassed the gathering of information on atmospheric discharges and their consequences in electrical systems, as well as the derivation of mathematical models for both the grid and the human body.

The initial phase involved the preparation of the ATPDRAW software and the detailed modeling within this environment, considering critical parameters and a lightning-type current source. Simulations in ATPDRAW yielded preliminary results, providing insights into the effectiveness of the grid and its impact on substation safety. Subsequently, upon completion of the simulations, a MATLAB code was developed to extract, organize, and debug data from ATPDRAW. This code facilitated the detailed presentation of results, offering a clear view of voltage distribution in the grid and the step and touch voltages experienced by human body models.

In the final stage, the obtained voltages were compared to the suggested limits in the VDE article, establishing a reference framework for evaluating system safety. The conclusion of this process represents a valuable contribution to the design and optimization of grounding systems, driving the development of safer and more reliable electrical infrastructures.

Keywords: Lightning protection, Grounding, Atmospheric discharges, Electrical substations, Safety voltages.

ÍNDICE

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1 IEEE80-2000	4
2.1.1 Criterios de diseño	5
2.1.2 Factores determinantes	6
2.2 Parámetros eléctricos de los rayos	8
2.2.1 Representación matemática de la onda de corriente del rayo	11
2.2.2 Características determinantes para la representación matemática de la onda de rayo	13
2.3 Modelado matemático de la puesta a tierra	16
2.3.1 Modelado mediante la teoría electromagnética	17
2.3.2 Modelado mediante la teoría de circuitos	19
3. MARCO METODOLÓGICO	24

3.1	Caso de estudio	24
3.1.1	Características Específicas del Diseño de la Malla de Puesta a Tierra	25
3.2	Modelado de una Rejilla con Electrodo Verticales en los Extremos	28
3.2.1	Modelado de la Rejilla	29
3.2.2	Modelado de los electrodos verticales	30
3.3	Modelado de la malla de puesta a tierra	32
3.4	Modelado del cuerpo humano para voltajes de paso y toque	34
4.	RESULTADOS	36
4.1	Simulaciones	36
4.2	Resultados Obtenidos	38
	CONCLUSIONES	45
	RECOMENDACIONES	46
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
	ANEXOS	50
	Anexo A: Código Modelo Desarrollado en MATLAB	50
	Código MATLAB	50
	ANEXO B: Resultados Detallados de Simulaciones	54
	Caso 1: Bajante de Pórticos	54
	Caso 2: DPS del transformador	63
	Caso 3: Bajante de sala de control	69
	Caso 4: DPS del alimentador de 13.8 kV	76

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 3.1	Tabla de Valores I_m vs. V_T	32
Tabla N° 4.1	Caso 1: Bajante de Pórticos	40
Tabla N° 4.2	Caso 2: DPS del Transformador	41
Tabla N° 4.3	Caso 3: Bajante de Sala de Control	42
Tabla N° 4.4	Caso 4: DPS de Alimentador 13.8 kV	43

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1:	Descargas de rayos	9
Figura N° 2.2:	Definiciones de parámetros de golpe de larga duración.	10
Figura N° 2.3:	La definición de los parámetros de corriente de impulso.	10
Figura N° 2.4:	Conductor de tierra impulsado	17
Figura N° 2.5:	Malla de puesta a tierra.	20
Figura N° 2.6:	Representación de un segmento elemental de la malla a tierra.	21
Figura N° 2.7:	Circuito equivalente para la pica, bajo condiciones de impulso.	22
Figura N° 3.1:	Esquema simple de la malla de puesta a tierra.	25
Figura N° 3.2:	Dimensión de cuadrícula.	25
Figura N° 3.3:	Identificación de nodos.	26
Figura N° 3.4:	Distribución de picas en la malla.	26
Figura N° 3.5:	Representación de una rejilla con picas.	28
Figura N° 3.6:	Modelado gráfico (a) y eléctrico (b) de una rejilla de malla.	29
Figura N° 3.7:	Modelado gráfico (a) y eléctrico (b) de una pica.	30
Figura N° 3.8:	Curva característica de la resistencia transitoria R_i	32
Figura N° 3.9:	Modelado de la malla de puesta a tierra.	33
Figura N° 3.10:	Circuito equivalente del cuerpo humano para voltaje de paso V_p	34
Figura N° 3.11:	Circuito equivalente del cuerpo humano para voltaje de toque V_t	35
Figura N° 4.1:	Forma de onda 10/350 μ s, para $I_m = 37$ kA.	36
Figura N° 4.2:	Fuente Heilder en ATPDRAW.	36
Figura N° 4.3:	Malla de puesta a tierra en ATPDRAW.	37
Figura N° 4.4:	Punto de análisis n° 3 (DPS del transformador).	38
Figura N° 4.5:	Voltajes en los nodos de la malla para $I_m = 37$ kA.	39
Figura N° 4.6:	Voltaje de paso en el nodo 74 para $I_m = 200$ kA.	40
Figura N° 4.7:	Voltaje de toque en el nodo 74 para $I_m = 200$ kA.	40
Figura N° 4.8:	Voltaje de paso en el nodo 62 para $I_m = 37$ kA.	41
Figura N° 4.9:	Voltaje de toque en el nodo 62 para $I_m = 37$ kA.	41
Figura N° 4.10:	Voltaje de paso en el nodo 115 para $I_m = 200$ kA.	42
Figura N° 4.11:	Voltaje de toque en el nodo 115 para $I_m = 200$ kA.	42
Figura N° 4.12:	Voltaje de toque en el nodo 54 para $I_m = 100$ kA.	43
Figura N° 4.13:	Voltaje de toque en el nodo 54 para $I_m = 100$ kA.	43
Figura N° 4.14:	Modelado del caso n° 1 (Bajante de Pórticos).	44
Figura N° B.1:	Distribución de tensiones para el Caso 1, $I_m = 37$ kA	54
Figura N° B.2:	Voltaje en el nodo 45 para el Caso 1, $I_m = 37$ kA	55
Figura N° B.3:	Voltaje en el nodo 74 para el Caso 1, $I_m = 37$ kA	55

Figura N° B.4:	Voltajes de toque y paso para el Caso 1, $I_m = 37\text{kA}$	56
Figura N° B.5:	Distribución de tensiones para el Caso 1, $I_m = 100\text{kA}$	57
Figura N° B.6:	Voltaje en el nodo 45 para el Caso 1, $I_m = 100\text{kA}$	58
Figura N° B.7:	Voltaje en el nodo 74 para el Caso 1, $I_m = 100\text{kA}$	58
Figura N° B.8:	Voltajes de toque y paso para el Caso 1, $I_m = 100\text{kA}$	59
Figura N° B.9:	Distribución de tensiones para el Caso 1, $I_m = 200\text{kA}$	60
Figura N° B.10:	Voltaje en el nodo 45 para el Caso 1, $I_m = 200\text{kA}$	61
Figura N° B.11:	Voltaje en el nodo 74 para el Caso 1, $I_m = 200\text{kA}$	61
Figura N° B.12:	Voltajes de toque y paso para el Caso 1, $I_m = 200\text{kA}$	62
Figura N° B.13:	Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 37\text{kA}$	63
Figura N° B.14:	Voltaje en el nodo 62 para el Caso 2, $I_m = 37\text{kA}$	64
Figura N° B.15:	Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 37\text{kA}$	65
Figura N° B.16:	Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 100\text{kA}$	66
Figura N° B.17:	Voltaje en el nodo 62 para el Caso 2, $I_m = 100\text{kA}$	66
Figura N° B.18:	Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 100\text{kA}$	67
Figura N° B.19:	Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 200\text{kA}$	68
Figura N° B.20:	Voltaje en el nodo 62 para el Caso 2, $I_m = 200\text{kA}$	68
Figura N° B.21:	Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 200\text{kA}$	69
Figura N° B.22:	Distribución de tensiones para el Caso 3, $I_m = 37\text{kA}$	70
Figura N° B.23:	Voltaje en el nodo 115 para el Caso 3, $I_m = 37\text{kA}$	71
Figura N° B.24:	Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 37\text{kA}$	71
Figura N° B.25:	Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 100\text{kA}$	72
Figura N° B.26:	Voltaje en el nodo 115 para el Caso 3, $I_m = 100\text{kA}$	73
Figura N° B.27:	Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 100\text{kA}$	73
Figura N° B.28:	Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 200\text{kA}$	74
Figura N° B.29:	Voltaje en el nodo 115 para el Caso 3, $I_m = 200\text{kA}$	75
Figura N° B.30:	Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 200\text{kA}$	75
Figura N° B.31:	Distribución de tensiones para el Caso 4, $I_m = 37\text{kA}$	76
Figura N° B.32:	Voltaje en el nodo 54 para el Caso 4, $I_m = 37\text{kA}$	77
Figura N° B.33:	Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 37\text{kA}$	78
Figura N° B.34:	Distribución de tensiones para el Caso 4, $I_m = 100\text{kA}$	79
Figura N° B.35:	Voltaje en el nodo 54 para el Caso 4, $I_m = 100\text{kA}$	79
Figura N° B.36:	Voltajes de toque y paso para el Caso 4, $I_m = 100\text{kA}$	80
Figura N° B.37:	Distribución de tensiones para el Caso 4, $I_m = 200\text{kA}$	81
Figura N° B.38:	Voltaje en el nodo 54 para el Caso 4, $I_m = 200\text{kA}$	81
Figura N° B.39:	Voltajes de toque y paso para el Caso 4, $I_m = 200\text{kA}$	82

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

- α : coeficiente de impulso
 ρ_0 : resistividad del terreno
 ε_r : permitividad relativa del terreno
 μ_0 : permeabilidad magnética del vacío

SIGLAS

- IEC : Comisión Electrotécnica Internacional
VDE : Asociación de Tecnología Eléctrica, Electrónica e Informática de Alemania
CIGRE : Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos
IEEE : Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
NFPA : Asociación Nacional de Protección contra el Fuego
SPT : Sistema de Puesta a Tierra
MPIE : Ecuación Integral de Potencial Mixto
HED : Dipolo Eléctrico Horizontal

1. INTRODUCCIÓN

Las subestaciones eléctricas son vitales en el sistema eléctrico de potencia, facilitando la transmisión y distribución de energía en una región determinada. No obstante, enfrentan desafíos importantes, siendo las descargas atmosféricas, o rayos, una amenaza destacada[1].

Los rayos pueden causar daños severos a los equipos eléctricos de las subestaciones, como transformadores e interruptores, además de representar un riesgo significativo para la seguridad del personal debido a la posibilidad de electrocución[2]. Por ende, es esencial implementar sistemas de protección eficientes.

Un componente crítico de este sistema es la terminación a tierra, que busca proporcionar un camino seguro y efectivo de baja impedancia para disipar las corrientes del rayo hacia la tierra[3]. Garantizar la eficiencia de esta terminación es clave para prevenir la propagación de voltajes peligrosos y proteger tanto a los trabajadores como a los equipos eléctricos[4].

En este contexto, la evaluación de los sistemas de puesta a tierra se vuelve crucial para mejorar la seguridad y confiabilidad de las subestaciones eléctricas en la región [4]. A través de estudios específicos, se busca identificar áreas de mejora en el diseño de estos sistemas, con el objetivo de minimizar los riesgos asociados a las descargas atmosféricas [5].

1.1 PROBLEMA

En el marco de la situación ecuatoriana, se evidencia una notable ausencia de informes técnicos y evaluaciones que aborden de manera exhaustiva la efectividad de las mallas de puesta a tierra en la disipación segura de las corrientes generadas por las descargas atmosféricas. Este vacío de información plantea una preocupación significativa en cuanto a la capacidad de estas mallas para prevenir la generación de voltajes de paso y toque peligrosos, lo que a su vez afecta la seguridad tanto de los equipos eléctricos como del personal que opera en las subestaciones.

Esta carencia de datos técnicos específicos en el contexto ecuatoriano plantea interrogantes cruciales sobre la seguridad y confiabilidad de las subestaciones eléctricas en el país frente a eventos atmosféricos adversos. La necesidad de llenar este vacío de conocimiento se vuelve imperativa para desarrollar estrategias y protocolos adecuados que fortalezcan la resiliencia de las infraestructuras eléctricas ante descargas atmosféricas. Un enfoque integral en la investigación y evaluación de la efectividad de las mallas de puesta a tierra podría contribuir significativamente a mejorar la protección de los equipos eléctricos y garantizar la seguridad del personal involucrado en las operaciones de las subestaciones en Ecuador.

La investigación en protección contra descargas atmosféricas se desarrolla en un entorno dinámico, con antecedentes que, aunque menos extensos que en otros campos de la ingeniería eléctrica, proporcionan una base sólida a través de la bibliografía existente. La complejidad de

representar con precisión electrodos de tierra, ya sea una pica o un cable horizontal, es un desafío fundamental. La variabilidad de frecuencias asociadas con descargas atmosféricas hace insuficiente la representación de una malla de puesta a tierra como una simple resistencia, obligando a considerar la interacción inductiva y capacitiva para evaluar con precisión los efectos de las descargas en las instalaciones eléctricas[6].

Asimismo, al estudiar los voltajes de toque y paso, es esencial abordar la representación eléctrica del cuerpo humano en su interacción con la infraestructura eléctrica [5]. La respuesta del cuerpo humano a las corrientes generadas durante una descarga atmosférica agrega complejidad al análisis [7]. La falta de límites cuantitativos precisos en las normativas actuales sobre voltajes de toque y paso aumenta la complejidad del abordaje de la seguridad eléctrica en sistemas de protección contra descargas atmosféricas [5].

En la actualidad, diversos artículos científicos han recopilado límites propuestos por diferentes autores en relación con los voltajes de toque y paso. Estas propuestas, aunque diversas, no se contradicen entre sí. Reflejan distintos enfoques y consideraciones, como la resistividad del suelo y dimensiones de la malla de puesta a tierra. Estas variaciones evidencian la complejidad del tema y la diversidad de factores que influyen en la seguridad eléctrica. La investigación actual se sitúa en un terreno dinámico y en constante evolución, donde la consideración de diversas perspectivas y enfoques es esencial para desarrollar futuras normativas más precisas y adaptadas a las complejidades específicas de cada situación[5].

La importancia primordial de este proyecto reside en abordar la falta de información sobre la eficacia de las mallas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas de la región costa del Ecuador frente a descargas atmosféricas. Esta carencia de conocimiento representa una amenaza directa tanto para la seguridad del personal como para la integridad de los equipos eléctricos en estas instalaciones. Evaluar los voltajes de seguridad en estas mallas, con un enfoque especial en los voltajes de paso y toque, es crucial para asegurar que se mantengan dentro de los límites seguros establecidos por la literatura vigente.

El alcance específico de la investigación se limitará a la realización de simulaciones computacionales destinadas a analizar los efectos de las descargas atmosféricas en la malla de puesta a tierra. En este sentido, se empleará MATLAB para llevar a cabo un análisis detallado y profundo de los resultados obtenidos, lo que fortalecerá la robustez y la precisión del estudio. La selección cuidadosa de subestaciones como puntos de estudio garantizará la obtención de resultados aplicables al contexto local, permitiendo abordar desafíos específicos relacionados con los voltajes de seguridad.

Aunque esta investigación no es la primera de su tipo y reconoce la existencia de contribuciones previas, busca realizar un aporte significativo, especialmente en la región. La combinación estratégica de herramientas de simulación en MATLAB, junto con la revisión exhaustiva de la literatura vigente, permitirá llenar los vacíos existentes en el conocimiento y establecer pautas

para prácticas que fortalezcan la resiliencia del sistema eléctrico en un entorno propenso a eventos atmosféricos adversos. La falta de consenso en los límites de voltajes de paso y toque crea una oportunidad única para contribuir de manera significativa a la literatura actual y mejorar la comprensión general de la seguridad eléctrica en subestaciones.

Esta investigación se centra en el análisis de la eficiencia de las mallas de puesta a tierra en el contexto de descargas atmosféricas. La delimitación precisa de este estudio se establece mediante un caso de estudio específico: la tesis titulada "Diseño de una subestación eléctrica AIS de 69/13,8 kV a 16/24 MVA mediante el Software SAP 2000", realizada por el Ing. Fernando Naranjo como estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana. Este trabajo servirá como punto focal para explorar las prácticas actuales e identificar posibles deficiencias en el diseño de las mallas de puesta a tierra. En el caso específico de la malla de puesta a tierra analizada en este estudio, se ha dimensionado con un ancho de 36 m y una longitud de 27 m. La resistividad del suelo en el área de instalación se establece en 100 ohm*m, mientras que la malla se encuentra enterrada a una profundidad de 0.5 metros. Para garantizar una eficiente dispersión de corrientes, se han seleccionado electrodos de cobre, complementados con cables horizontales de calibre 2 AWG. Además, las picas utilizadas en la malla tienen una longitud de 2.44 metros y un diámetro de 5/8". Estos detalles forman la base del diseño de la malla de puesta a tierra que será objeto de análisis en el marco de esta investigación.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la seguridad que presenta una malla de puesta a tierra de una subestación de distribución, ante descargas de corrientes tipo rayo, utilizando ATPDRAW.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Modelar en ATPDRAW una malla de puesta a tierra de una subestación de distribución (69 kV/13.8 kV), diseñada bajo estándar IEEE 80-2000.
- Determinar los voltajes de toque y paso generados en la malla por descargas de corriente tipo rayo, utilizando ATPDRAW.
- Evaluar los niveles de seguridad que presenta la malla ante voltajes de toque y paso de alta frecuencia, de acuerdo con la referencia dada por la Asociación técnica-científica (VDE-Alemania).

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las subestaciones son parte crítica en la red eléctrica y debe operar de forma continua y segura. Por ello, se debe instalar un sistema de puesta a tierra el cual garantice la seguridad de las personas y equipos en condiciones de falla, de la misma manera ayuda a los equipos de protección detectando fallas a tierra[8].

El sistema de puesta a tierra (SPT) en una subestación eléctrica cumple un papel de vital importancia dentro de los estudios de protección y confiabilidad desde el inicio de las instalaciones de sistemas de energía eléctrica[9]. El diseño del sistema de puesta a tierra depende de llevar la resistencia a tierra, el voltaje de la malla, el voltaje de paso y de contacto por debajo de los límites tolerables cuando se presenta una falla[10].

Un SPT debe diseñarse de tal manera que asegure una baja impedancia y una capacidad para transportar corrientes elevadas para prevenir el aumento del potencial de puesta a tierra (GPR)[9]. Varias investigaciones diseñan el sistema de puesta a tierra tomando en cuenta únicamente las fallas internas, es decir, las fallas a tierra. Sin embargo, no se da la debida atención al rendimiento del sistema bajo condiciones de impulso, como el golpe de un rayo[8].

Por lo tanto, luego de finalizar el diseño del sistema, es necesario analizar el rendimiento del sistema cuando se somete a descargas de corriente de tipo rayo; debido a que la respuesta transitoria del sistema de puesta a tierra bajo sobretensiones provocadas por rayos es no lineal y difiere por mucho con la respuesta del mismo sistema bajo fallas a frecuencias industriales [8][9][10].

2.1 IEEE80-2000

La normativa IEEE 80-2000, titulada IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, cumple un papel fundamental en el diseño y la evaluación de los sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas de corriente alterna (AC). Esta guía se enfoca principalmente en subestaciones de corriente alterna al aire libre, ya sean convencionales o aisladas con gas, incluyendo subestaciones de distribución, transmisión y generación de energía. Además, su aplicación se extiende a las porciones interiores de tales subestaciones o a subestaciones que se encuentran completamente en interiores[11].

El objetivo principal de la norma IEEE 80-2000 es proporcionar directrices detalladas sobre las prácticas seguras en el diseño de los sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas. Los objetivos específicos de la norma, detallados en la referencia [11], son los siguientes:

1. Establecer, como base para el diseño, los límites seguros de las diferencias de potencial que pueden existir en una subestación bajo condiciones de falla entre puntos que pueden ser contactados por el cuerpo humano.

2. Revisar las prácticas de puesta a tierra en subestaciones con especial énfasis en la seguridad, y desarrollar criterios para un diseño seguro.
3. Proporcionar un procedimiento para el diseño de sistemas de puesta a tierra prácticos, basado en estos criterios.
4. Desarrollar métodos analíticos como ayuda en la comprensión y solución de problemas típicos de gradiente.

2.1.1 Criterios de diseño

El análisis conceptual de un sistema de malla comienza examinando el diseño general de la subestación, representando todos los componentes y estructuras principales. Para establecer ideas básicas, se siguen pautas que guían la formulación de un diseño típico de malla de puesta a tierra. Se identifican elementos críticos, como transformadores e interruptores, delineando el trazado preliminar de la malla[11].

Dentro de este marco, en [11] se consideran puntos específicos para optimizar la eficacia de la malla de puesta a tierra:

1. La necesidad de un bucle de conductor continuo que rodee el perímetro, cerrando la mayor área posible para evitar la concentración de corriente alta y reducir la resistencia de la malla.
2. La disposición de conductores paralelos dentro del bucle, preferiblemente a lo largo de estructuras o filas de equipos, para proporcionar conexiones a tierra cortas.
3. Detalles sobre el sistema de malla típico, incluyendo conductores de cobre desnudo enterrados a una profundidad específica y espaciados en un patrón de malla.
4. La extensión del sistema de malla por todo el patio de maniobras de la subestación y más allá de la línea de cercado, con consideraciones especiales en áreas de alta concentración de corriente.
5. La relación recomendada entre los lados de las mallas y la importancia de interconexiones para el control de potenciales superficiales y la redundancia del sistema en caso de fallo de un conductor.

Este análisis conceptual proporciona directrices esenciales para el diseño y la implementación de una malla de puesta a tierra eficiente en subestaciones eléctricas AC.

2.1.2 Factores determinantes

El propósito de los procedimientos previamente descritos es garantizar la seguridad contra voltajes peligrosos de paso y contacto en el entorno de la subestación. Dado que el voltaje de malla generalmente representa el voltaje de contacto más riesgoso en el interior de la subestación (sin considerar potenciales transferidos), se toma como referencia fundamental en el proceso de diseño[11].

Los voltajes de paso, aunque generalmente menos riesgosos que los voltajes de malla, pueden volverse peligrosos si la seguridad en el área conectada a tierra se logra mediante una capa superficial de alta resistividad que no se extiende más allá de la cerca. En cualquier caso, es esencial comparar los voltajes de paso calculados con los permisibles después de diseñar una malla que cumpla con el criterio de voltaje de contacto. En mallas de tierra con espaciado uniforme, el voltaje de malla aumentará desde el centro hasta la esquina, y la tasa de este incremento dependerá de factores como el tamaño de la malla, número y ubicación de electrodos de tierra, espaciado de conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores, y el perfil de resistividad del suelo[11]. los limites para los voltajes de paso y de contacto se calculan de la siguiente manera:

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (1)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2)$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

Diversos algoritmos informáticos han sido desarrollados para calcular la resistencia de la malla y los voltajes de malla y de paso. Aunque en el pasado estos algoritmos solían demandar considerable capacidad de almacenamiento y resultaban costosos, mejoras en su eficiencia y la proliferación de potentes computadoras de escritorio han atenuado estas preocupaciones. En situaciones donde su utilización no es económicamente justificable o el diseñador carece de acceso a una computadora con las capacidades requeridas, la normativa IEEE 80-2000 ofrece ecuaciones aproximadas para determinar parámetros de diseño y establecer valores de E_m y E_s sin depender de recursos computacionales avanzados[11].

$$E_{mesh} = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (5)$$

$$E_{step} = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (6)$$

Existen parámetros que varían según el sitio donde se construirá la malla a tierra, y estos tienen un impacto sustancial en el diseño de la malla, la IEEE80-2000 los define de la siguiente manera:

1. **Corriente máxima de la malla (I_G):** Al determinar el valor máximo de la corriente de falla a tierra que fluye a través de la malla de puesta a tierra de la subestación (I_G), es esencial considerar factores como la resistencia de la malla, la distribución de la corriente entre las diversas rutas de retorno y la propia malla, junto con el factor de decremento. La expresión matemática para calcular la I_G se presenta a continuación:

$$I_G = D_f \times I_g \quad (7)$$

Donde:

D_f es el factor de decremento para toda la duración de la falla t_f , expresada en segundos (s).

I_g es la corriente de malla simétrica eficaz en amperios (A).

2. **Duración de la falla (t_f) y duración del choque (t_s):** Se suele asumir que la duración de la falla es igual a la duración del choque, a menos que la duración de la falla implique múltiples choques sucesivos, como en el caso de recierres. La selección de t_f debería reflejar un tiempo de desconexión rápido para subestaciones de transmisión y tiempos de desconexión más lentos para subestaciones de distribución e industriales, de acuerdo con las tablas proporcionadas por la normativa IEEE80-2000. Las elecciones de t_f y t_s deben garantizar la combinación más pesimista de factor de decremento de corriente de falla y corriente corporal permitida. Valores típicos oscilan entre 0.25 (s) y 1.0 (s).
3. **Resistividad del suelo (ρ):** La resistencia de la malla y los gradientes de voltaje en una subestación están directamente ligados a la resistividad del suelo. Es crucial recopilar datos suficientes para el patio de maniobras, ya que la resistividad del suelo varía horizontal y verticalmente. El método de Wenner, ampliamente aceptado, se utiliza para esta recopilación de datos. Dado que las ecuaciones para E_m y E_s asumen una resistividad uniforme, solo se puede emplear un valor único. La normativa IEEE 80-2000 proporciona orientación sobre cómo determinar una resistividad del suelo uniforme aproximada en estas circunstancias.
4. **Resistividad del material de superficie (ρ_s):** La incorporación de una capa de material superficial desempeña un papel esencial en la limitación de la corriente corporal al aumentar la resistencia a la resistencia corporal equivalente. Para más detalles sobre la aplicación

de este parámetro, se puede consultar la normativa IEEE 80-2000 en las secciones 7.4 y 12.5.

5. **Geometría de la malla:** En términos generales, las restricciones en los parámetros físicos de una malla de tierra se basan en consideraciones económicas y limitaciones prácticas de instalación. La Cláusula 18 de la normativa IEEE 80-2000 aborda estas limitaciones, como el espaciado limitado de los conductores a aproximadamente 2 m o más debido a la excavación de zanjas. Los espaciados comunes varían entre 3 m y 15 m, y las profundidades de la malla oscilan entre 0.5 m y 1.5 m. Aunque el diámetro del conductor tiene un impacto mínimo en el voltaje de malla para diversos tamaños, el área total del sistema de puesta a tierra es el factor crucial que determina la resistencia de la malla, influyendo directamente en el aumento del potencial de puesta a tierra (GPR).

La normativa IEEE 80-2000 juega un papel fundamental en el diseño seguro de los sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas de corriente alterna, proporcionando ecuaciones y parámetros cruciales para calcular la resistencia de la malla, así como los voltajes de malla y de paso. Aunque constituye un recurso valioso, es esencial reconocer sus limitaciones, especialmente en contextos de descargas atmosféricas, donde las corrientes de rayo pueden tener características específicas. En tales situaciones, la normativa puede presentar restricciones y no abordar completamente estos casos particulares. Estas limitaciones resaltan la importancia de profundizar en la comprensión de los fenómenos de rayos y la influencia de las altas frecuencias en el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra.

2.2 Parámetros eléctricos de los rayos

Las descargas de rayos se clasifican principalmente en dos categorías: destellos a tierra y destellos a nube. Los destellos a tierra son aquellos que entran en contacto con la tierra, mientras que los destellos a nube comprenden destellos intra nube, descargas de aire y descargas entre nubes. Estas categorías se visualizan en la Figura 2.1a. Además, los destellos a tierra se dividen en cuatro categorías según la polaridad de la carga que se dirige a la tierra y su punto de origen, como se muestra en la Figura 2.1b: destellos a tierra negativos descendentes (i), destellos a tierra positivos descendentes (ii), destellos a tierra positivos ascendentes (iii) y destellos a tierra negativos ascendentes (iv) [12].

En términos de destellos descendentes y ascendentes, los primeros tienden a ocurrir en terreno plano y hacia estructuras más bajas, mientras que los segundos son dominantes en estructuras expuestas y/o más altas. La altura efectiva juega un papel crucial, ya que afecta la probabilidad de un impacto directo en la estructura (consulte IEC 62305-2:2010, Anexo A), cambiando las condiciones físicas.

Los destellos a tierra pueden impactar las estructuras de dos maneras fundamentales. En ausen-

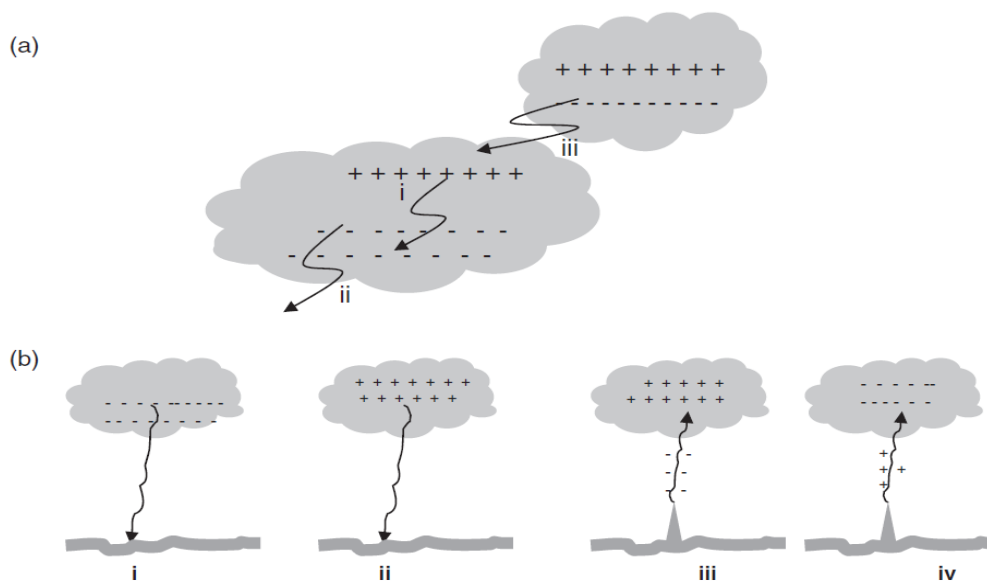


FIGURA N° 2.1: Descargas de rayos

Fuente: Iet power and energy series 58 lightning protection [12].

cia de un sistema de protección contra rayos, la corriente directamente inyectada en el punto de impacto puede resultar en daños estructurales, incluyendo la posibilidad de iniciar incendios. Además, esta corriente puede penetrar en los sistemas eléctricos y otros conductores de la estructura, ocasionando daños y destrucción en los sistemas eléctricos. Por otro lado, el campo electromagnético generado por el destello de rayo induce voltajes significativos en los sistemas eléctricos de la estructura, independientemente de la presencia de un sistema externo de protección contra rayos, lo que provoca perturbaciones y daños en la electrónica sensible. El análisis de la interacción entre los destellos a tierra y las estructuras se desglosa en dos partes cruciales: la primera se enfoca en evaluar los procesos que llevan a la conexión del destello de rayo con la estructura, determinando así el punto de impacto, mientras que la segunda aborda la interacción de la estructura y su contenido con la corriente inyectada y el campo electromagnético radiado. Una comprensión detallada de diversos parámetros de rayos es esencial para analizar estos efectos y mitigar las consecuencias de los impactos de rayos [12].

Los parámetros de las corrientes generadas por los retornos de rayo en el punto de impacto son esenciales en los análisis de protección contra rayos. La corriente pico del retorno desempeña un papel crucial al influir en la caída de voltaje a través de una carga resistiva durante el impacto de un rayo. Estos parámetros son determinantes al provocar destellos laterales desde (o a lo largo de) los objetos impactados. Por ejemplo, si la resistencia de un objeto impactado es de $10\ \Omega$, una corriente pico de retorno de $30\ \text{kA}$ generará un voltaje pico de $3\ \text{MV}$ a través del objeto.

Una corriente de rayo consta de uno o más golpes diferentes:

- Golpes largos con una duración superior a 2 ms (Figura 2.2)
- Impulsos con una duración inferior a 2 ms (Figura 2.3)

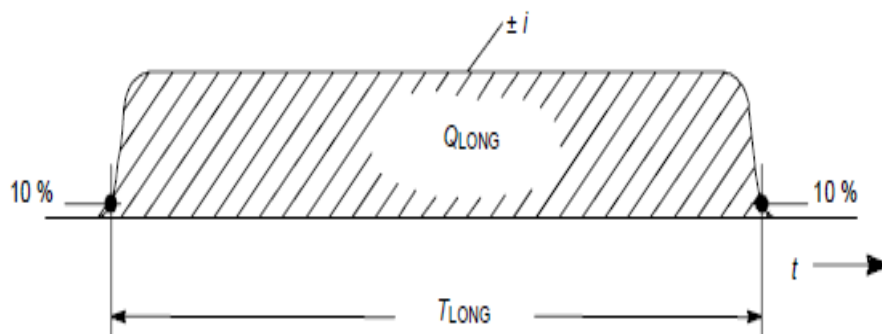


FIGURA N° 2.2: Definiciones de parámetros de golpe de larga duración.
(típicamente $2ms < T_{LONG} < 1s$)
Fuente: IEC 62305-1 [13].

T_{Long} : Tiempo de duración.

Q_{Long} : carga de golpe de larga duración

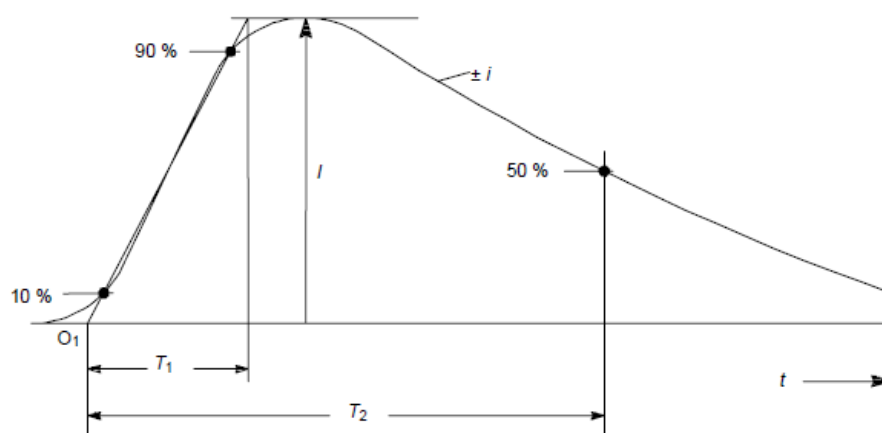


FIGURA N° 2.3: La definición de los parámetros de corriente de impulso.
(típicamente $T_2 < 2ms$)
Fuente: IEC 62305-1 [13].

O_1 : Origen virtual.

I : Corriente pico.

T_1 : Tiempo de frente.

T_2 : Tiempo de cola.

2.2.1 Representación matemática de la onda de corriente del rayo

En el análisis teórico, ya sea en relación con los efectos mecánicos y térmicos de las corrientes de rayo o al evaluar los campos electromagnéticos generados por destellos de rayo, es crucial representar la forma de onda de la corriente mediante expresiones analíticas. Estas expresiones no solo son esenciales para comprender los impactos mecánicos y térmicos, sino que también desempeñan un papel fundamental en la evaluación precisa de los campos electromagnéticos generados por los destellos de rayo en sistemas eléctricos. Hay varias expresiones analíticas disponibles en la literatura que representan las corrientes de los primeros y subsiguientes golpes de retorno, proporcionando herramientas valiosas para modelar y comprender las complejidades de las corrientes de rayo en contextos diversos y, específicamente, en sistemas eléctricos[12].

- **Forma de onda de corriente recomendada por el grupo de estudio de CIGRE.**

Según CIGRE [14], la parte inicial ascendente de la forma de onda de corriente del primer golpe de retorno, incluido el pico, puede representarse mediante:

$$I(t) = At + B^x \quad (8)$$

Donde A y B representan constantes, y t denota el tiempo. La fase ascendente de la corriente durante el siguiente retorno, abarcando el pico, se describe mediante:

$$I(t) = S_m t \quad (9)$$

Donde S_m corresponde a la máxima pendiente. De acuerdo con la ecuación (2.6), la forma de la corriente alcanza su máxima pendiente, equivalente al 90 por ciento de la amplitud, en un tiempo t_n que está condicionado por el exponente X [12]. Ambas variables (S_m y t_n) requieren una evaluación a través de una solución iterativa de la ecuación general[12].

$$\left(\frac{1-3x}{2S_N}\right)(1-x)^x = \frac{x(X-1)}{2S_N} + \left(\frac{1-3xX}{2S_N}\right)(1-x) \quad (10)$$

Dado:

$$S_N = s_m \frac{t_f}{I}; X_N = 0.6 \frac{t_f}{t_n} \quad (11)$$

Donde t_f es la duración del frente. Soluciones lo suficientemente precisas pueden obtenerse utilizando las ecuaciones (2.10) y (2.11), las cuales se encuentran detalladas en la referencia [12]:

$$X = 1 + 2(S_N - 1) \left(2 + \frac{1}{S_N}\right) \quad (12)$$

$$t_n = 0.6t_f \left[\frac{3S_N^2}{1 + S_N^2} \right] \quad (13)$$

La cola de la forma de onda de la corriente se expresa de la siguiente manera:

$$I = I_1 e^{-(t-t_n)/t_1} - I_2 e^{-(t-t_n)/t_2} \quad (14)$$

Donde I_1 e I_2 son valores constantes, mientras que t_1 y t_2 son parámetros de tiempo constantes. Las constantes de tiempo se determinan a través de las siguientes expresiones:

$$t_1 = \frac{(t_h - t_n)}{\ln 2} \quad (15)$$

$$t_n = 0.1 \frac{I}{s_m} \quad (16)$$

Donde t_h representa el tiempo hasta alcanzar la mitad del valor. Las constantes I_1 e I_2 se definen mediante las siguientes expresiones:

$$I_1 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \left[s_m + 0.9 \frac{I}{t_2} \right] \quad (17)$$

$$I_2 = \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1 - t_2} \left[s_m + 0.9 \frac{I}{t_1} \right] \quad (18)$$

- **Forma analítica de la corriente utilizada en la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).**

Dentro de la normativa de protección contra rayos de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), se emplea la función de Heidler [15] para describir la forma de onda de la corriente durante el golpe de retorno. Según esta norma, la representación de la forma de onda de la corriente en la base del canal se puede expresar mediante:

$$i(t) = \frac{I_P}{\eta} \frac{k_s^n}{1 + k_s^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (19)$$

$$k_s^n = \frac{t}{\tau_1} \quad (20)$$

En las ecuaciones mencionadas, donde I_P representa la corriente pico, η es el factor de correlación de la corriente pico, n se asume como el factor de pendiente de la corriente (se

suele asumir con valor 10), y τ_1 y τ_2 son constantes de tiempo que definen el tiempo de subida y el tiempo de decaimiento de la corriente. Es crucial destacar que los parámetros específicos de las formas de onda de corriente a utilizar varían según el nivel de protección, y esta información detallada está especificada en la serie IEC 62305, siendo la corriente pico el único parámetro que varía entre estos niveles.

- **Expresión analítica de Nucci.**

Nucci y su equipo, en la referencia [16] presentaron la corriente en la base del canal de los sucesivos golpes de retorno a través de la expresión:

$$i(t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^2}{(t/\tau_1)^2 + 1} e^{-t/\tau_2} + I_{02}(e^{-t/\tau_3} + e^{-t/\tau_4}) \quad (21)$$

Empleando la fórmula propuesta, es posible ajustar de forma independiente tanto el pico de corriente como la derivada del pico de corriente al variar I_{01} y τ_1 . Los valores específicos utilizados para modelar una corriente de retorno subsiguiente son $I_{01} = 9.9 \text{ kA}$, $\eta = 0.845$, $\tau_1 = 0.072 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 5 \mu\text{s}$, $I_{02} = 7.5 \text{ kA}$, $\tau_3 = 100 \mu\text{s}$ y $\tau_4 = 6 \mu\text{s}$, según los parámetros establecidos por Nucci y su equipo [16].

- **Expresión analítica de Cooray.**

La formulación analítica (2.20), desarrollada por Cooray y su equipo [17], se emplea para representar las corrientes de retorno inicial caracterizadas por un frente lento seguido de una transición rápida.

$$i(t) = I_{01} \frac{(t/\tau_1)^n}{(t/\tau_1)^n + 1} + I_{02} [1 - e^{-(t/\tau_1)^3}] (ae^{-t/\tau_2} + be^{-t/\tau_3}) \quad (22)$$

Para una corriente de retorno inicial típica, estos investigadores propusieron los siguientes parámetros: $I_{01} = 7.8 \text{ kA}$, $\tau_1 = 5 \mu\text{s}$, $n = 100$, $I_{02} = 32.5 \text{ kA}$, $\tau_2 = 4 \mu\text{s}$, $\tau_3 = 100 \mu\text{s}$, $a = 0.2$ y $b = 0.8$. La forma de onda resultante presenta una duración de frente lento de aproximadamente $5 \mu\text{s}$, un tiempo de subida del 10 al 90 por ciento de $4.5 \mu\text{s}$, una carga total de 3 C , una integral de acción de $4.5 \times 10^4 \text{ A}^2 \text{ s}^{-1}$ y una derivada máxima de corriente de $37 \text{ kA } \mu\text{s}^{-1}$.

2.2.2 Características determinantes para la representación matemática de la onda de rayo

Los destellos a tierra pueden causar daño a un objeto terrestre, ya sea por impacto directo o por inducción al golpear en un punto cercano. Incluso si los rayos impactan a cierta distancia del objeto, la sobretensión resultante se transmite al objeto a través de líneas eléctricas u otros sistemas conductores, provocando daños. La magnitud y la naturaleza de estos daños dependen tanto de las características del rayo como de las propiedades específicas del objeto. Aspectos

físicos cruciales del rayo que pueden causar daño incluyen la corriente y los campos electromagnéticos. Dentro de las características esenciales de la corriente de un rayo que generan daño se encuentran la corriente máxima, la tasa máxima de cambio de la corriente, la integral de la corriente a lo largo del tiempo (carga) y la integral del cuadrado de la corriente a lo largo del tiempo (integral de acción)[12].

- **Corriente Pico**

En el contexto de los destellos a tierra, las corrientes más notables provienen de los retornos de corriente, siendo de especial importancia las corrientes pico de retorno cuando el objeto afectado presenta una carga resistiva. Por ejemplo, una corriente de retorno con una corriente pico de 30 kA impactando una línea de transmisión con una impedancia de sobretensión de 400Ω puede inducir una sobretensión prospectiva de 600 kV, dando lugar a fenómenos como el flashover y fuerzas magnéticas que afectan a cables y objetos cercanos. Una corriente de 30 kA que ingresa a la tierra a través de una impedancia de puesta a tierra de 10Ω provoca un aumento potencial de 300 kV y también puede causar arqueo en la superficie[12].

La evidencia disponible indica que, en cuanto al valor promedio de la corriente pico de un rayo, no parece verse afectado por la conductividad del suelo; sin embargo, este valor puede tener efectos más adversos en suelos de baja conductividad. La variabilidad en la conductividad del suelo, comúnmente observada en diversas regiones, puede conducir a un mayor arqueo en la superficie[12]. Además, en objetos con impedancia inductiva, como cables en sistemas electrónicos, conexiones a tierra, etc., la máxima sobretensión producida es proporcional a la máxima tasa de cambio de corriente. La tasa máxima de cambio de corriente (di/dt) alcanza su punto máximo en el frente de onda de la corriente de retorno. Suponiendo que el 10 por ciento de la corriente pico de 30 kA, equivalente a 3 kA, con un tiempo frontal de $0.3 \mu s$, impacta el cableado de un dispositivo electrónico, se genera un voltaje inductivo de 1 kV en un cable de 10 cm de longitud. Este fenómeno tiene el potencial de causar daños significativos a la mayoría de los dispositivos electrónicos, a menos que cuenten con una protección adecuada. En los retornos de corriente negativos, la tasa de cambio de corriente es significativa, mientras que en los retornos de corriente positivos, estos valores son considerablemente más bajos[18].

- **Carga Transferida**

En una primera evaluación, el calentamiento y la perforación de láminas metálicas, como techos de metal o alas de aviones, muestran una relación directa con la cantidad de carga transferida, dependiendo de la corriente asociada a dicha transferencia. La carga, que se define como la integral de la corriente en función del tiempo, determina la potencia

suministrada al punto de conexión del rayo, siendo el producto de la corriente y la caída de voltaje (5 a 10 V) en la interfaz arco-metal. Aunque la mayor parte de la carga en un rayo proviene de la corriente continua larga que sigue a algunos retornos de corriente, es importante destacar que incluso un retorno de corriente considerable que persiste durante algunas decenas de microsegundos puede no transferir tanta carga como una corriente continua de bajo nivel (100–1000 A) que se mantiene durante unos pocos cientos de milisegundos[12].

La relación entre la perforación y la carga de retorno parece más plausible en rayos negativos, donde es poco probable que los diferentes retornos se conecten al mismo lugar. Experimentos de laboratorio sugieren que tan solo se necesitan 10 C de carga, proporcionados por una corriente de 500 A, para perforar un agujero en una placa de aluminio de 2 mm de grosor. Esta menor cantidad de carga requerida para la perforación podría atribuirse a la fijación del arco en un lugar específico en la placa, concentrando el calor y reduciendo los requisitos de carga [18].

- **Energía prospectiva**

La integral de acción, como medida de la capacidad de la corriente de un rayo para generar calor en la impedancia resistiva del objeto golpeado, representa la energía potencial que se disiparía en una resistencia de 1 Ω debido al calentamiento por efecto Joule si toda la corriente del golpe de retorno fluyera a través de ella. Se expresa como la integral de tiempo del cuadrado de la corriente. El calentamiento rápido de los materiales y la consiguiente explosión de materiales no conductores se atribuyen, en una primera aproximación, al valor de la integral de acción. Duplicar la corriente del golpe de retorno tiende a cuadruplicar la integral de acción, considerando una forma de onda y duración similares del retorno de corriente[12]. Por ejemplo, una integral de acción de $2.0 \times 10^6 A^2s$ podría generar un aumento de temperatura superior a 200 °C en una correa de cobre de 10 mm^2 de área transversal[19], planteando un riesgo de explosión en presencia de materiales o vapores inflamables. Hilos o correas más delgados pueden fundirse y vaporizarse al estar sujetos al valor mencionado de la integral de acción. En el dimensionamiento de conductores directamente expuestos a impactos de rayos, la integral de acción se revela como un parámetro esencial, con valores típicos de 5.5×10^4 y $6.5 \times 10^5 A^2s$ para el primer retorno negativo y el retorno positivo, respectivamente.

- **Forma de onda**

La forma de onda de la corriente del retorno de un rayo exhibe una considerable variabilidad incluso dentro de un mismo destello. El tiempo de subida puede oscilar desde 0.1 μs hasta varios microsegundos, mientras que el ancho a la mitad del pico puede variar desde

unos pocos microsegundos hasta algunos cientos de microsegundos[18][20].

Estas formas de onda, como $1.2/50 \mu s$, $8/20 \mu s$ o $10/350 \mu s$, describen la variación temporal de la corriente durante un evento de rayo. La notación indica el tiempo de subida en microsegundos seguido por el tiempo de bajada en milisegundos. Por ejemplo, $1.2/50 \mu s$ implica un tiempo de subida de 1.2 microsegundos hasta alcanzar su valor pico y un tiempo de bajada de 50 microsegundos hasta alcanzar el 50% de su valor pico[13].

Las formas de onda de la corriente raramente coinciden exactamente con patrones específicos como $1.2/50 \mu s$, $8/20 \mu s$ o $10/350 \mu s$, que representan formas de onda de prueba adoptadas por varios estándares en pruebas de laboratorio para simular los efectos de los rayos en diversos equipos y sistemas. Cada forma de onda representa una variación temporal específica en la corriente de un rayo, permitiendo evaluar cómo diferentes dispositivos responden a las distintas características temporales presentes en los eventos de rayos. [18]. Se recurre a formas de onda de mayor duración, como $10/350 \mu s$, para simular los efectos de una entrada de energía significativa con la misma corriente máxima.

En resumen, la utilización de estas notaciones proporciona una descripción estandarizada de la duración y variación temporal de la corriente en eventos de rayos, facilitando la comprensión y evaluación de la respuesta de equipos y sistemas ante dichos fenómenos.

2.3 Modelado matemático de la puesta a tierra

Cuando los electrodos de puesta a tierra se enfrentan a corrientes de rayos, presentan un comportamiento significativamente diferente en comparación con su respuesta ante corrientes de baja frecuencia, como las asociadas a cortocircuitos, según se discute en [21]. Este comportamiento implica varios aspectos, destacándose la respuesta a corrientes impulsivas y el proceso de ionización. En entornos industriales y sistemas de energía eléctrica, los diversos sistemas de puesta a tierra, como electrodos horizontales, varillas verticales y rejillas de tierra, desempeñan un papel fundamental. En situaciones de descargas atmosféricas, las sobrecorrientes que atraviesan estos sistemas generan sobretensiones en el punto de inyección y sus alrededores, además de inducir tensiones e interferencias electromagnéticas en equipos conectados o cercanos a la puesta a tierra [22]. La modelación precisa del comportamiento de estos sistemas a altas frecuencias, típicas de las descargas atmosféricas, es crucial.

Las extensas investigaciones teóricas y experimentales sobre el comportamiento dinámico y a altas frecuencias de los sistemas de puesta a tierra han dado lugar a diversos modelos matemáticos,

basados en la teoría de circuitos, la teoría de líneas de transmisión, la teoría electromagnética y enfoques híbridos, según indican [6] y [12]. Se considera que los modelos que emplean la teoría electromagnética, fundamentada en las ecuaciones de Maxwell, son los más precisos debido a su menor nivel de simplificación. No obstante, la aplicación de estos modelos es más compleja en comparación con otros enfoques [6]. A pesar de la amplitud de investigaciones en este tema, aún no se ha alcanzado un consenso sobre cómo aplicar estos nuevos conocimientos en el diseño de sistemas de puesta a tierra [12].

2.3.1 Modelado mediante la teoría electromagnética

Tradicionalmente, los sistemas de puesta a tierra se han modelado con un enfoque de teoría de circuitos, utilizando la aproximación cuasiestática, que tiene limitaciones a frecuencias más bajas, alrededor de 1 MHz. Sin embargo, con la necesidad de analizar frecuencias más altas, hasta varios MHz, y tecnologías emergentes como las comunicaciones por línea eléctrica que operan en decenas de MHz, se requiere una modelización más precisa. La aproximación de alambre delgado y el método de momentos han permitido una modelización más precisa, especialmente a altas frecuencias[23].

Este modelo se basa en formulaciones rigurosas derivadas del conjunto completo de ecuaciones de Maxwell, relacionándose con el análisis de antenas. La solución se fundamenta en la solución exacta de campos generados por un dipolo eléctrico en o cerca de un semiespacio disipativo. Para extender este análisis a un modelo terrestre de dos capas, se sigue una idea similar y se aplica el modelo exacto para medios estratificados desarrollado en la teoría de antenas[23].

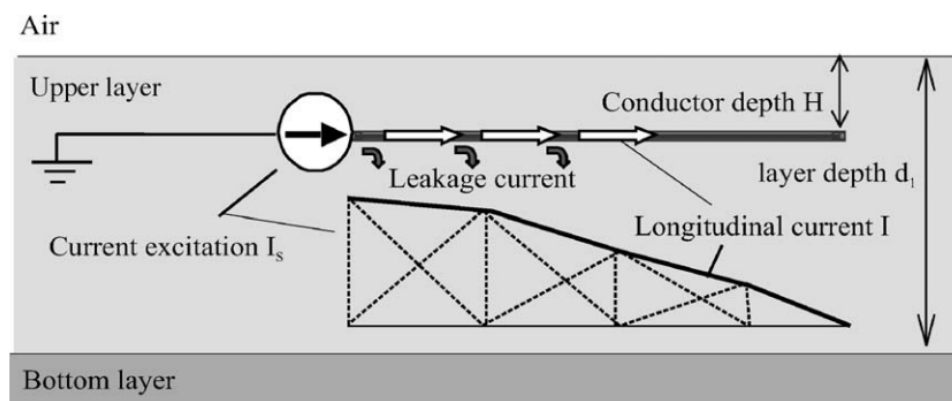


FIGURA N° 2.4: Conductor de tierra impulsado

Fuente: Electromagnetic analysis of horizontal wire in two-layered soil [23].

el modelo electromagnético del electrodo de puesta a tierra, se fundamenta en la ecuación integral de potencial mixto (MPIE), que se resuelve mediante el método de momentos. La aproximación de la corriente mediante funciones de expansión triangular superpuestas, conocidas

como "dipolos triangulares", mientras que la excitación se modela como una fuente de corriente paralela, también conocida como monopolo y denotada como I_0 [24].

El modelo se fundamenta en varias suposiciones clave: (1) La tierra y el aire se consideran semiespacios con un límite horizontal común, donde la tierra consta de dos capas, una con profundidad finita y la otra con profundidad infinita, separadas por un límite paralelo a la interfaz tierra-aire. (2) Tanto la tierra como los electrodos de puesta a tierra exhiben características lineales e isotrópicas en términos de conductividad, permitividad y permeabilidad. (3) El sistema de puesta a tierra se modela como una red de conductores metálicos cilíndricos horizontales, asumiendo la aproximación de hilo delgado, es decir, la relación entre la longitud del segmento del conductor y su radio es menor o igual a 1. (4) La excitación del sistema de puesta a tierra se logra mediante la inyección de corriente en un punto final de uno de los conductores. Estas suposiciones proporcionan la base para el desarrollo y análisis del modelo electromagnético del sistema de puesta a tierra[23].

La siguiente ecuación matricial proporciona la distribución de corriente.

$$[Z][I] = [-Z_0 I_0] \quad (23)$$

la ecuación indica que la matriz de columna $[I]$ representa las corrientes desconocidas que deben ser determinadas. La matriz $[Z]$ representa las impedancias mutuas entre cada uno de los elementos de corriente, y la notación $[-Z_0 I_0]$ representa la columna de energización. Resolver este sistema proporcionaría las corrientes desconocidas en el modelo electromagnético del sistema de puesta a tierra.

Una vez calculadas las corrientes en los segmentos de los conductores de puesta a tierra, es posible determinar el campo eléctrico sumando sus contribuciones. La tensión entre el punto de alimentación y una tierra remota se puede calcular integrando el vector del campo eléctrico a lo largo de una trayectoria hacia el infinito, perpendicular al electrodo. Este proceso es equivalente al potencial escalar V_0 en el punto de alimentación, como se describe en las referencias [25] y [23]. En esencia, la evaluación del campo eléctrico y el potencial en el sistema proporciona información esencial sobre la distribución y comportamiento electromagnético del sistema de puesta a tierra en cuestión.

$$Z_g = \frac{V_0}{I_0} = \frac{[I] \cdot [Z_0] + I_0 z_0}{I_0} \quad (24)$$

Los componentes de la columna de la matriz $[Z_0]$ y z_0 representan las impedancias mutuas que

se determinan entre el dipolo de observación y el monopolo de origen, de manera análoga a cómo se calculan los elementos z_{nm} de la matriz de impedancia $[Z]$.

$$z_{nm} = \frac{-1}{I_n} \int_{l_m} E_{nx} dl_m = \frac{1}{I_n} \int_{l_m} \left(j\omega \int_{l_n} G_A^{xx} I_n dl_n + \right) \quad (25)$$

En este escenario, la expresión E_{nx} indica la componente x del campo eléctrico producido por el dipolo de corriente fuente n , que es tangencial a la superficie del conductor a lo largo del dipolo de observación l_m . Se utiliza la formulación de la Ecuación Integral de Potencial Mixto (MPIE), donde los potenciales vectoriales y escalares se derivan de las corrientes I_n y las cargas q_n a lo largo del eje del segmento fuente l_n . En la ecuación (25), G_A^{xx} representa la componente x de la función diádica de Green para el potencial vectorial magnético generado por el dipolo eléctrico horizontal (HED) en un semiespacio conductor, y G_V denota la correspondiente función de Green de potencial escalar. Este enfoque posibilita la modelación y el cálculo del campo eléctrico resultante en un sistema de puesta a tierra, tomando en cuenta la contribución específica de cada dipolo de corriente fuente en el análisis.

2.3.2 Modelado mediante la teoría de circuitos

La modelación de SPT es un tema ampliamente debatido en la comunidad científica, donde tanto los enfoques basados en la teoría del campo electromagnético (EMF) como los modelos de circuitos, con parámetros concentrados o distribuidos, son ampliamente empleados. Aunque los modelos EMF ofrecen resultados más precisos, su implementación puede volverse compleja, especialmente en sistemas con geometrías realistas. En contraste, los modelos de circuitos facilitan la implementación, siendo particularmente útiles en situaciones complejas que involucran interacciones entre diversos componentes del sistema de energía. A pesar de posibles objeciones teóricas, estudios recientes respaldan el enfoque circuital como un compromiso equilibrado entre facilidad de implementación, consumo de recursos computacionales y precisión de los resultados[26].

El modelo para mallas de puesta a tierra, basado en la teoría de circuitos, se fundamenta en una representación de parámetros concentrados. Este modelo discretiza la malla en celdas elementales, como se muestra en la figura 2.5, cada una modelada con un circuito equivalente que incorpora resistencias, inductancias y capacitancias dispuestas y dimensionadas de manera adecuada, como se observa en la figura 2.6. Los parámetros clave del modelo incluyen la resistencia longitudinal (R), la autoinductancia longitudinal (L), la mutua inductancia (M) que refleja el acoplamiento magnético con otros segmentos de electrodo, la capacitancia transversal a tierra (C), la resistencia a tierra (R_t), y el potencial de la tierra en el nodo i -ésimo (V_i), generado por las corrientes filtradas a la tierra en otros nodos del sistema de puesta a tierra[26].

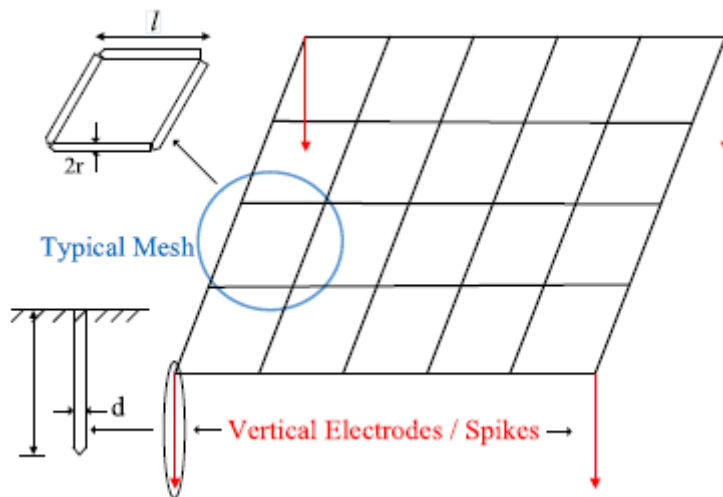


FIGURA N° 2.5: Malla de puesta a tierra.

Fuente: Reducing the effect of lightning on step and touch voltages [27].

Los valores de RLC se calculan utilizando las aproximaciones cuasiestáticas de baja frecuencia adoptadas por Sunde[28]. La determinación de la resistencia longitudinal R para cada celda elemental se realiza mediante la expresión tradicional.

$$R = \frac{l}{\pi \cdot r^2} \cdot \rho_{cu} \quad (26)$$

Donde l es la longitud de la celda elemental, r es el radio del electrodo y ρ_{cu} es la resistividad del material. Los demás parámetros concentrados, R_t , L y M , pueden calcularse utilizando las fórmulas de Sunde[28], las cuales son válidas bajo las siguientes condiciones:

- Suelo homogéneo e isotrópico.
- Distribución uniforme de corriente a lo largo del conductor.
- Desprecio del efecto piel.
- Profundidad enterrada (h) y radio del electrodo (r) considerablemente menores que la longitud del electrodo (l).

La resistencia a tierra (R_t) del electrodo horizontal se determina mediante la conocida fórmula:

$$R_t = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot r \cdot h}} \right) - 1 \right] \quad [\Omega] \quad (27)$$

Donde ρ representa la resistividad del suelo, y los demás parámetros han sido previamente definidos. La autoinductancia se determina mediante la siguiente expresión:

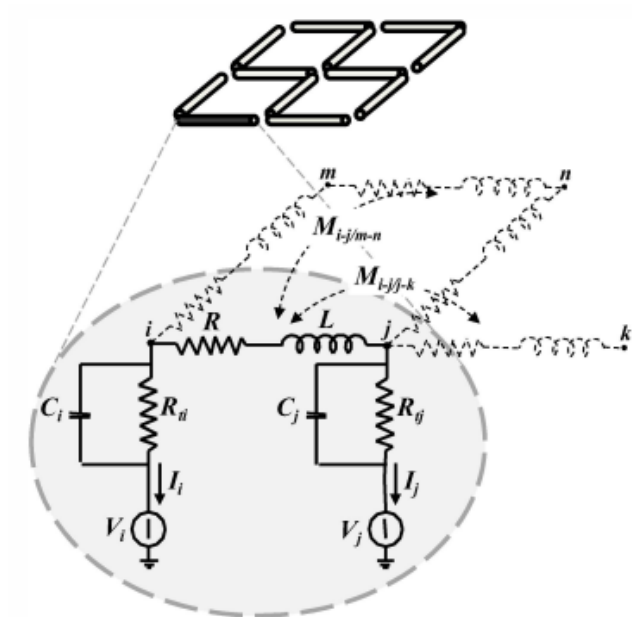


FIGURA N° 2.6: Representación de un segmento elemental de la malla a tierra.
Fuente: Behaviour of grounding systems: a quasi-static emtp model and its validation [26].

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot r \cdot h}} \right) - 1 \right] \quad [H] \quad (28)$$

Se asume que la permeabilidad magnética del material es equivalente a la permeabilidad del vacío, denotada como $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$. La inductancia mutua considera las influencias del acoplamiento mutuo entre dos celdas. Cuando los elementos son perpendiculares, la inductancia mutua es cero, pero en configuraciones distintas se puede calcular utilizando la siguiente fórmula general [26]:

$$M = \int_{c_1} \int_{c_2} \frac{ds_1 \cdot ds_2}{r_{12}} \quad (29)$$

El último parámetro, es decir, la capacitancia a tierra de cada celda elemental, puede determinarse utilizando la siguiente expresión:

$$C = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot r \cdot h}} - 1\right)} \quad [F] \quad (30)$$

Es importante destacar que los parámetros del modelo propuesto en [26] representan exclusivamente una malla de puesta a tierra con electrodos horizontales. Según la información proporcionada en [29], el modelo y los parámetros correspondientes a los electrodos verticales, o picas, en condiciones de un rayo, se abordan de acuerdo con la figura 2.7.

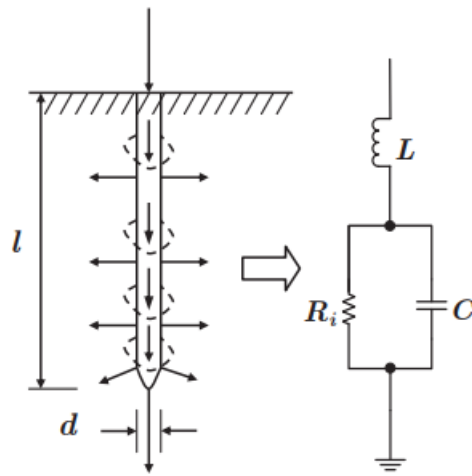


FIGURA N° 2.7: Circuito equivalente para la pica, bajo condiciones de impulso.

Fuente: External grounding design to reduce effects of lightning damage in distribution system [29].

Las expresiones necesarias para calcular los parámetros de las picas, según [29], son las siguientes:

$$R_i = \alpha R_0 \quad (31)$$

$$R_0 = \frac{\rho_0}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (32)$$

$$L = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} \times 10^{-7} \right) \quad (33)$$

$$C = \frac{\varepsilon_r l}{18 \ln \left(\frac{4l}{d} \right)} \times 10^{-9} \quad (34)$$

Donde:

R_i es la resistencia de impulso, o transitoria, de la pica (Ω).

α es el coeficiente de impulso.

R_0 es la resistencia de la pica a frecuencia industrial (Ω).

ρ_0 es la resistividad del terreno ($\Omega - m$).

l es la longitud total de la pica (m).

d es el diámetro de la pica (m).

L es la inductancia de la pica (H).

C es la capacitancia de la pica (F).

ε_r es la permitividad relativa del terreno

La resistencia transitoria de la pica (R_i) presenta un comportamiento no lineal que está condicionado por la corriente pico del rayo (I_m). La formulación propuesta en [30] permite expresar R_i de la siguiente manera:

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (I_m/I_g)}} \quad (35)$$

En este contexto, I_g denota la corriente límite de ionización del suelo (expresada en kA), la cual se define como:

$$I_g = \frac{E_0}{\rho_0 2\pi R_0^2} \quad (36)$$

En esta ecuación, la variable E_0 denota la intensidad crítica del campo eléctrico de la Tierra y ρ_0 corresponde a la resistividad eléctrica del suelo.

Estas fórmulas ofrecen una representación cuantitativa de la resistencia transitoria en función de la corriente pico del rayo y otros parámetros significativos.

En resumen, este capítulo ha analizado a fondo los parámetros eléctricos asociados con los rayos, destacando aspectos clave como la corriente y los elementos temporales de las formas de onda. La variabilidad inherente en estas formas de onda subraya la necesidad de estándares de prueba que aborden esta diversidad, permitiendo evaluaciones precisas en entornos de laboratorio. Esta comprensión profunda de los parámetros eléctricos sienta las bases para el diseño de medidas de protección efectivas contra los impactos de los rayos, contribuyendo significativamente a la seguridad y la integridad de sistemas eléctricos y estructuras expuestas a estos fenómenos naturales.

3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo, se exponen los enfoques, procedimientos y herramientas específicamente seleccionados para el modelado de una malla de puesta a tierra en el contexto de descargas tipo rayo. La elección de estas estrategias metodológicas está respaldada por su capacidad para enfrentar los desafíos particulares vinculados a fenómenos electromagnéticos de esta naturaleza. Cada etapa se planifica cuidadosamente con el objetivo de proporcionar respuestas significativas a los interrogantes planteados en la investigación, poniendo un énfasis especial en la simulación y análisis subsiguiente de la respuesta de la malla frente a descargas de rayo.

3.1 Caso de estudio

Como se detalla en la sección 1.1, este trabajo se enfoca en el análisis de la malla de puesta a tierra diseñada por el ingeniero Fernando Naranjo, según lo descrito en [31]. La malla en cuestión está destinada a una subestación de distribución de 69 kV / 13.8 kV, siguiendo las pautas establecidas por la normativa IEEE80-2000. Se destaca la importancia de esta malla en el contexto de la seguridad y la eficiencia del sistema. A lo largo de esta tesis, se exploran las características fundamentales de la malla y su impacto en la seguridad de la subestación.

En continuidad con el análisis expuesto en la sección 1.1, se detallan a continuación las características generales del caso de estudio:

- Resistividad eléctrica del suelo: $100 \Omega \cdot m$
- Resistividad eléctrica de la superficie: $3000 \Omega \cdot m$
- Tiempo de despeje de la falla (t_s): $0.5 s$
- Frecuencia: 60 Hz
- Área física del terreno: $36 \times 27 = 972 m^2$
- Profundidad de la malla: $0.5 m$
- Conductor: cobre (cu)

Estos parámetros ofrecen el contexto necesario para comprender la implementación y funcionamiento de la malla de puesta a tierra en este entorno específico. Sin embargo, para el desarrollo de este trabajo, es necesario un desglose de características específicas del diseño de la malla de puesta a tierra, tales como el espaciado de las cuadrículas, la distancia entre las picas, el calibre de los conductores utilizados, entre otros.

3.1.1 Características Específicas del Diseño de la Malla de Puesta a Tierra

- **Detalles geométricos**

La malla se encuentra en un terreno rectangular de 36 m de ancho (eje x) y 27 m de largo (eje y). Para facilitar la comprensión de la distribución espacial de la malla de puesta a tierra, se presenta la numeración de las cuadrículas en la figuras 3.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108

FIGURA N° 3.1: Esquema simple de la malla de puesta a tierra.

Fuente: Autor.

La malla en cuestión se compone de 142 nodos, como se ilustra en la figura 3.3, junto con 26 picas, dividiéndose en 108 celdas de $3\text{ m} \times 3\text{ m}$.

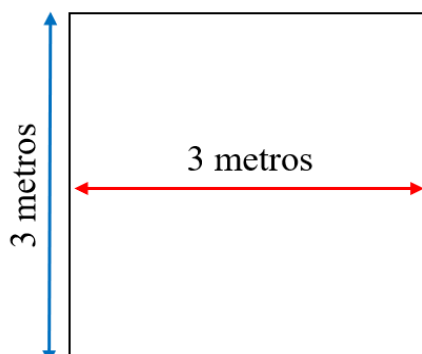


FIGURA N° 3.2: Dimensión de cuadrícula.

Fuente: Autor.

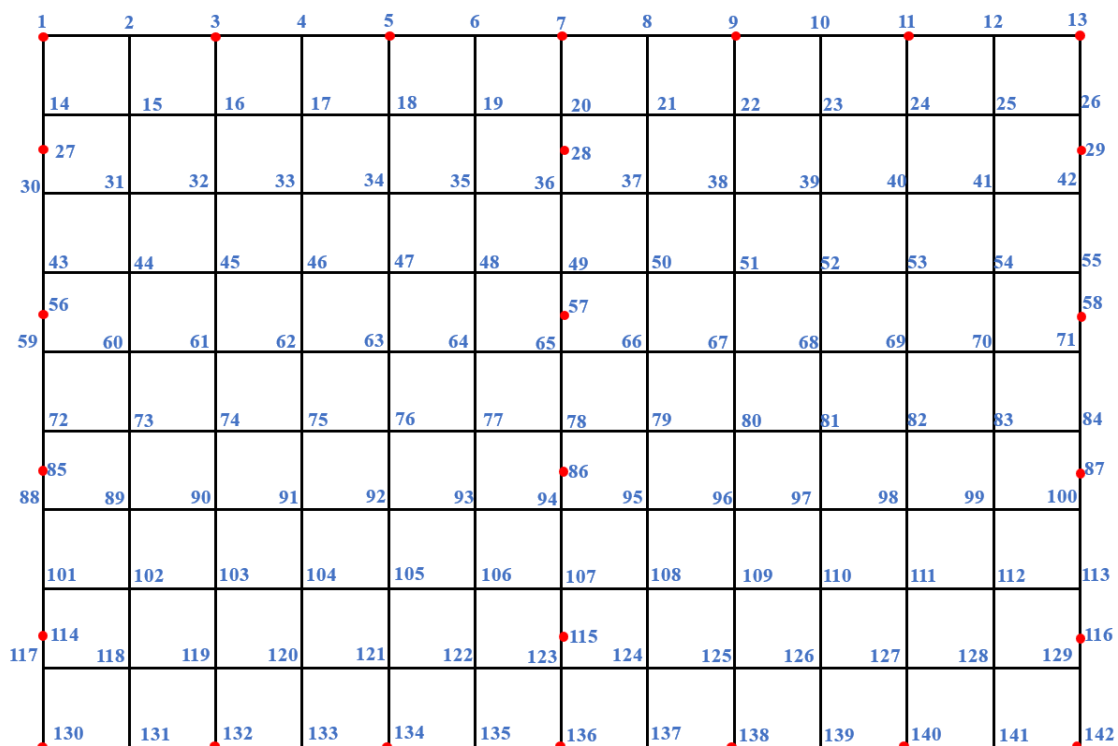


FIGURA N° 3.3: Identificación de nodos.

Fuente: Autor.

Las picas se colocan a lo largo del perímetro y el eje central de la malla. La distancia entre las picas se especifica en la Figura 3.4.

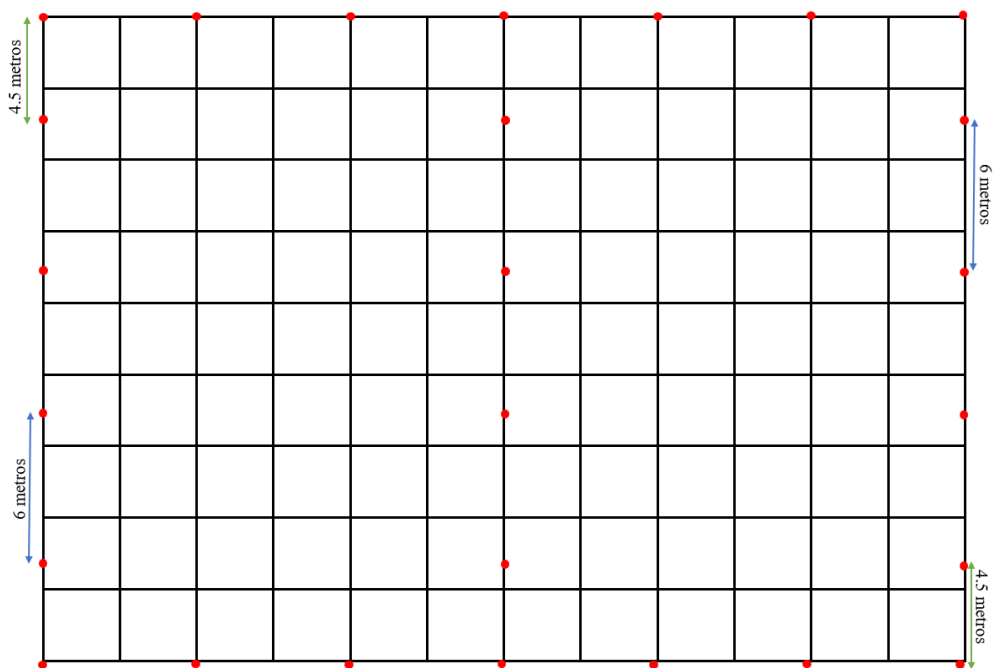


FIGURA N° 3.4: Distribución de picas en la malla.

Fuente: Autor.

- **Material y Calibre de los Conductores**

La eficiencia de una malla de puesta a tierra se determina en gran medida mediante la selección meticulosa de materiales y calibres para los conductores, así como la implementación estratégica de picas de tierra. En este apartado, se exploran los elementos vinculados con el material y calibre de los conductores empleados en el caso de estudio, resaltando las decisiones fundamentales que inciden en la seguridad y eficiencia de la malla de puesta a tierra.

En la instalación seleccionada, se ha optado por utilizar exclusivamente conductores de cobre, destacando sus propiedades eléctricas superiores y su resistencia intrínseca a la corrosión. Esta elección garantiza una conductividad eléctrica confiable a lo largo del tiempo, factor crucial para la efectividad de la puesta a tierra en el contexto específico de la investigación.

La selección del calibre de los conductores para la totalidad de la malla se fundamentó en la evaluación de diversos factores, tales como la corriente máxima proyectada y la longitud de los conductores. Considerando las recomendaciones de la normativa de la IEEE y la empresa eléctrica de Quito (NEC-250-81), en el caso de estudio se ha optado por emplear cable 2 AWG de 7 hilos. Aunque la IEEE sugiere el uso de cable 2/0 AWG y la NEC recomienda cable 2 AWG de 7 hilos, se eligió el cable 2 AWG de 7 hilos con el propósito de uniformizar la malla.

La cuidadosa selección de conductores y su calibre, junto con la implementación estratégica de picas de tierra, resulta fundamental para garantizar la integridad y eficiencia de la malla de puesta a tierra. La elección de conductores de cobre, en conjunto con picas de tierra del mismo material, asegura una conductividad eléctrica confiable y resistencia a la corrosión. La longitud de las picas se determina cuidadosamente considerando la resistividad del suelo, lo que asegura una conexión efectiva con la tierra y minimiza la resistencia de dispersión.

En particular, se opta por la utilización de picas Copperweld con una longitud de 2.40 metros y un diámetro de 5/8 de pulgada. Esta combinación de elementos crea un sistema resistente y confiable que cumple con las normativas vigentes y supera los desafíos ambientales específicos de la instalación en cuestión. La atención meticulosa a estos detalles contribuye significativamente a la capacidad de la malla para proporcionar una conexión segura a la tierra, ofreciendo así protección efectiva contra eventos como descargas atmosféricas.

- **Aspectos Adicionales**

Además de los elementos previamente discutidos, existen factores adicionales que contribuyen a la eficiencia y rendimiento de la malla de puesta a tierra. En este contexto,

es crucial considerar la permitividad relativa y la permeabilidad magnética, parámetros fundamentales en el análisis de las propiedades eléctricas y magnéticas del entorno circundante.

La permitividad relativa de los materiales utilizados en la malla se establece en 17, un valor que impacta directamente en la capacidad del sistema para gestionar campos eléctricos. Este aspecto es esencial para comprender cómo la malla interactúa con su entorno y garantizar una respuesta adecuada ante fluctuaciones eléctricas.

En cuanto a la permeabilidad magnética, se ha optado por mantenerla en línea con las condiciones del vacío, asegurando así una consistencia en el comportamiento magnético de la malla. Este enfoque se respalda en la premisa de mantener un nivel constante de permeabilidad para evitar distorsiones no deseadas en la respuesta magnética del sistema.

La consideración de estos aspectos adicionales fortalece la comprensión integral de la malla de puesta a tierra, proporcionando datos relevantes sobre su interacción con campos eléctricos y magnéticos, y respaldando las decisiones tomadas en la selección de materiales y diseño de la instalación.

3.2 Modelado de una Rejilla con Electrodo Verticales en los Extremos

La modelización de la malla de puesta a tierra en el caso de estudio se llevó a cabo mediante un enfoque basado en la teoría de circuitos. La relevancia de este modelo reside en la comprensión del comportamiento tanto de la rejilla como de los electrodos. El objetivo central de esta metodología es desentrañar los detalles del comportamiento anticipado en diversas condiciones, proporcionando así una perspectiva más clara de los aspectos fundamentales en el ámbito de la investigación.

En este procedimiento, se busca simplificar la malla a su expresión más elemental, la cual se representa mediante una rejilla con picas en sus extremos, como se ilustra en la Figura 3.5.

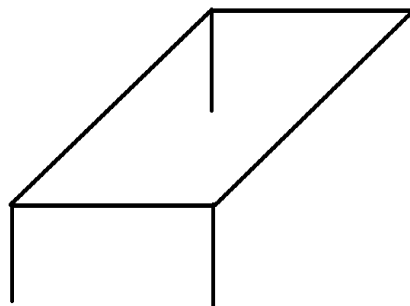


FIGURA N° 3.5: Representación de una rejilla con picas.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Modelado de la Rejilla

La malla de puesta a tierra está compuesta por cables de cobre desnudo calibre 2 AWG, dispuestos en las direcciones X e Y del suelo a una profundidad de 0.5 m debajo de la superficie, abarcando toda el área de la subestación. Los conductores de la malla orientados en las direcciones X e Y están conectados en los puntos de intersección y mantienen un espaciado uniforme de $3\text{ m} \times 3\text{ m}$.

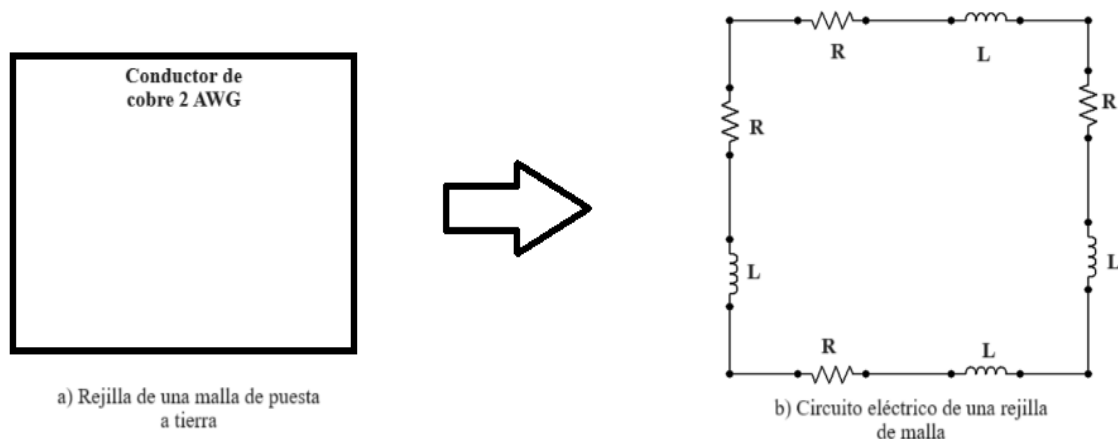


FIGURA N° 3.6: Modelado gráfico (a) y eléctrico (b) de una rejilla de malla.

Fuente: Autor.

Los conductores de la rejilla se pueden representar como una resistencia en serie con una inductancia, formando un circuito RL, como se muestra en la Figura 3.6. Las magnitudes de la resistencia R y la autoinductancia L para cada tramo de la rejilla se determinan mediante las ecuaciones (26) y (28), respectivamente. Realizando la sustitución en la ecuación (26), se obtienen los siguientes valores para $l = 3\text{ m}$:

$$R = \frac{3}{\pi \cdot (0.003705)^2} \cdot (1.71 \times 10^{-8}) \approx 0.00118957 \Omega$$

Y para $l = 1.5\text{ m}$:

$$R = \frac{1.5}{\pi \cdot (0.003705)^2} \cdot (1.71 \times 10^{-8}) \approx 0.000594786 \Omega$$

Para obtener los valores de autoinductancia, se sustituye la ecuación (28), resultando en:

$$L = \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \cdot 3}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{\sqrt{2} \cdot 0.003705 \cdot 0.5} \right) - 1 \right] \approx 0.00215448 \text{ mH}$$

Para $l = 3\text{ m}$, y para $l = 1.5\text{ m}$:

$$L = \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \cdot 1.5}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 1.5}{\sqrt{2 \cdot 0.003705 \cdot 0.5}} \right) - 1 \right] \approx 0.00081687 \text{ mH}$$

3.2.2 Modelado de los electrodos verticales

Los electrodos verticales, también conocidos como picas, equivalen eléctricamente a un circuito RLC, como se muestra en la figura 3.7. Los valores del circuito de la pica se calculan mediante las ecuaciones (33), (34) y (35).

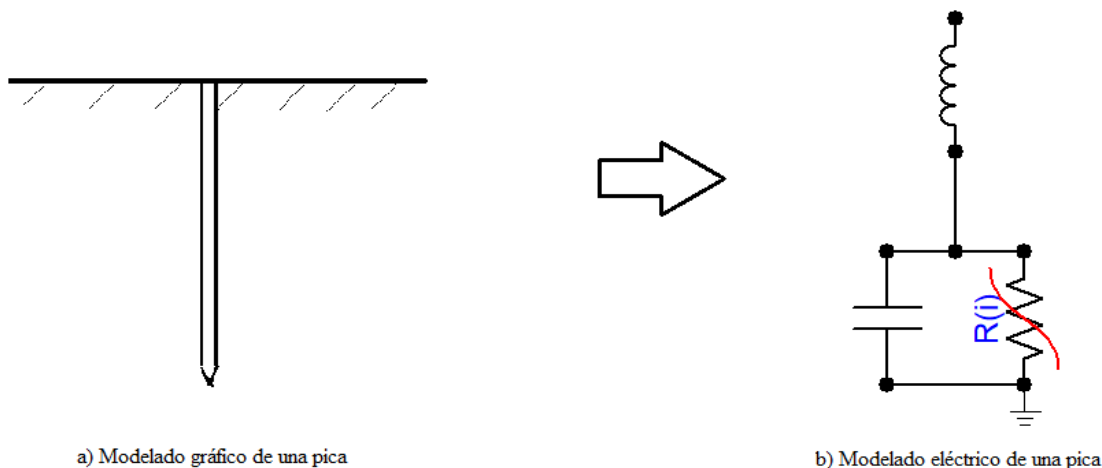


FIGURA N° 3.7: Modelado gráfico (a) y eléctrico (b) de una pica.

Fuente: Autor.

Al aplicar las ecuaciones (33) y (34), se obtienen los siguientes valores para la inductancia y capacitancia:

$$L = 2(2.4) \left(\ln \frac{4(2.4)}{0.01585} \times 10^{-7} \right) \approx 0.0030743 \text{ mH}$$

$$C = \frac{17 \cdot (2.4)}{18 \ln \left(\frac{4(2.4)}{0.01585} \right)} \times 10^{-9} \approx 0.000353815 \mu F$$

Para representar el comportamiento no lineal de la resistencia transitoria, se sigue el procedimiento descrito a continuación:

1. Evaluar la resistencia de tierra a frecuencia industrial R_0 mediante la ecuación (32):

$$R_0 = \frac{100}{2\pi l} \left(\ln \frac{8 \cdot (2.4)}{0.01585} - 1 \right) \approx 40.4485 \Omega$$

2. Determinar la corriente límite de ionización del suelo I_g utilizando la ecuación (36):

$$I_g = \frac{E_0 \cdot 100}{2\pi \cdot 40.4485^2}$$

Donde E_0 se evalúa con la expresión $E_0 = 241 \cdot \rho_0^{0.215}$, resultando en:

$$I_g = \frac{(241 \cdot 100^{0.215}) \cdot 100}{2\pi \cdot 40.4485^2} \approx 6.31 \text{ kA}$$

3. Calcular la resistencia transitoria R_i aplicando la ecuación (35):

$$R_i = \frac{40.4485}{\sqrt{1 + (I_m/6310)}}$$

Donde I_m es la corriente pico del rayo; para esta solución se toma $I_m = 37 \text{ kA}$, obteniendo:

$$R_i = \frac{40.4485}{\sqrt{1 + (37/6.31)}} \approx 15.44 \Omega$$

4. Evaluar el voltaje transitorio V_T usando la ley de Ohm, obteniendo la expresión:

$$V_T = I_m \cdot R_i$$

Este paso se realiza para obtener la curva característica de R_i en términos de la corriente pico del rayo y el voltaje resultante cuando la corriente I_m circula a través de R_i . Para este caso específico:

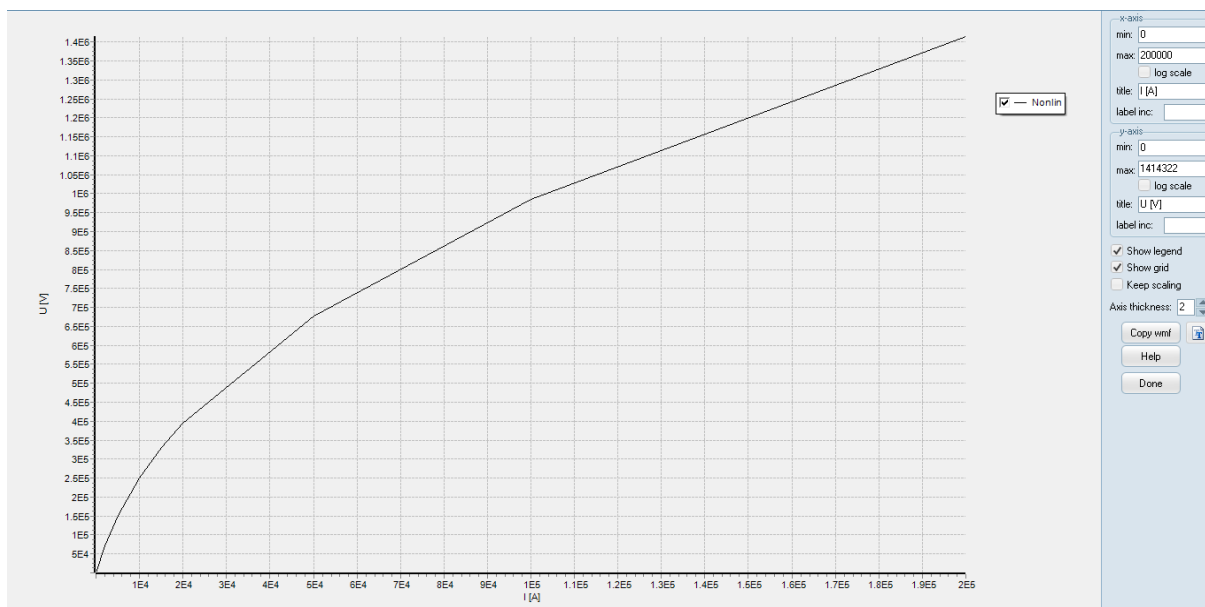
$$V_T = (37000) \cdot (15.44) = 571.28 \text{ kV}$$

5. Repetir el proceso descrito anteriormente para diferentes valores de la corriente pico del rayo (I_m), generando una serie de puntos que representen la relación entre la corriente pico y el voltaje transitorio (V_T). Estos puntos se utilizarán para construir la curva característica completa de la resistencia transitoria R_i , proporcionando una representación integral de su comportamiento no lineal.

Los resultados obtenidos de este procedimiento se detallan en la tabla 3.1, ofreciendo una visión cuantitativa de las variaciones en R_i en función de la corriente pico del rayo (I_m). Además, la visualización gráfica de estos resultados se presenta en la Figura 3.8, donde se aprecia claramente la relación entre la corriente pico del rayo y el voltaje transitorio (V_T). Estas representaciones combinadas proporcionan una herramienta valiosa para el análisis, destacando la importancia de considerar el comportamiento no lineal de R_i en la evaluación de la seguridad del sistema frente a eventos de descarga atmosférica.

TABLA N° 3.1: Tabla de Valores I_m vs. V_T

Corriente pico (I_m)	Resistencia transitoria (R_i)	Voltaje transitorio (V_T)
2000 [A]	35.25 [Ω]	70.5 [kV]
5000 [A]	30.21 [Ω]	151.1 [kV]
10000 [A]	25.16 [Ω]	251.6 [kV]
15000 [A]	22.01 [Ω]	330.2 [kV]
20000 [A]	19.81 [Ω]	396.2 [kV]
30000 [A]	16.86 [Ω]	505.9 [kV]
37000 [A]	15.44 [Ω]	571.2 [kV]
45000 [A]	14.18 [Ω]	638.3 [kV]
50000 [A]	13.54 [Ω]	677.0 [kV]
100000 [A]	9.85 [Ω]	985.4 [kV]
200000 [A]	7.07 [Ω]	1414.8 [kV]

FIGURA N° 3.8: Curva característica de la resistencia transitoria R_i .

Fuente: Autor.

3.3 Modelado de la malla de puesta a tierra

La malla de puesta a tierra es un componente crítico en sistemas eléctricos, destinado a proporcionar un camino de baja resistencia para la corriente de falla y garantizar la seguridad de las instalaciones. En esta sección, se explora el modelado de la malla de puesta a tierra siguiendo la teoría de circuitos, haciendo uso de los modelados de rejilla y pica previamente presentados en las subsecciones 3.2.1 y 3.2.2.

La teoría de circuitos se convierte en una herramienta esencial para el modelado de la malla de

puesta a tierra. Siguiendo los principios de la teoría de circuitos, se consideran los elementos resistivos, inductivos y capacitivos presentes en la malla. La aplicación de modelos de rejilla y pica en el modelado de la malla de puesta a tierra es crucial para representar con precisión la interconexión de los elementos de la malla. La estructura de rejilla simboliza la disposición geométrica de los conductores, considerando las distancias y dimensiones específicas. Por otro lado, el modelo de pica se utiliza para representar de manera detallada los puntos de conexión de los electrodos de puesta a tierra con el suelo.

Siguiendo el modelo planteado en [27], la malla de puesta a tierra planteada en la sección 3.1 puede modelarse de la siguiente forma:

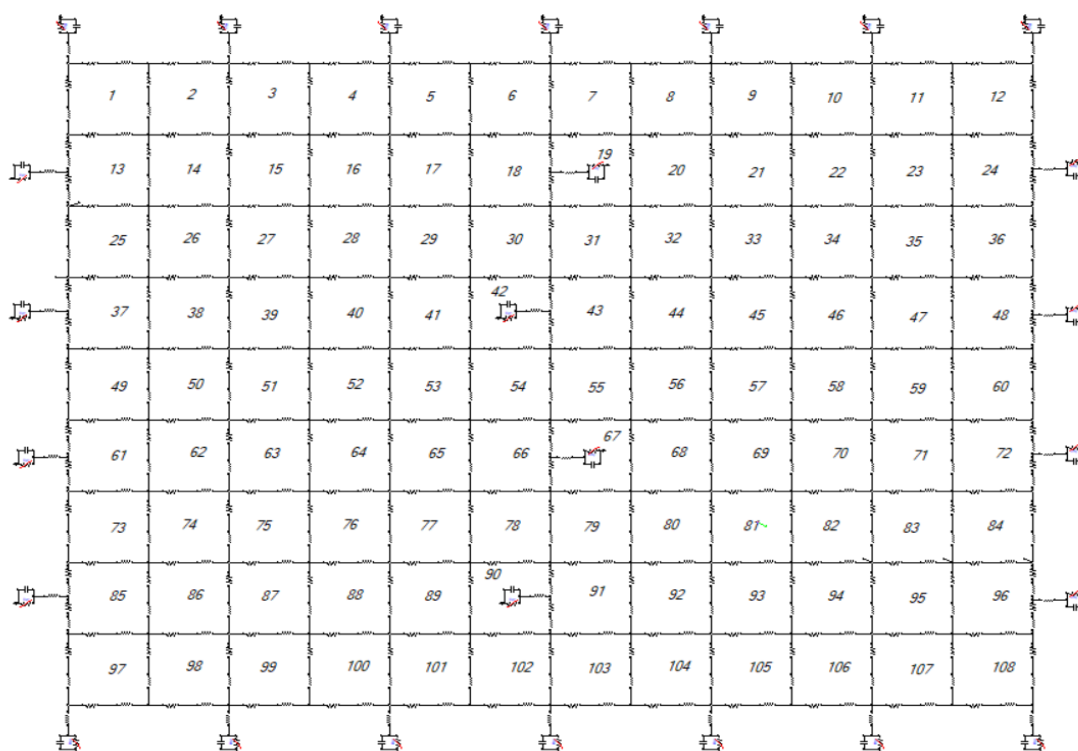


FIGURA N° 3.9: Modelado de la malla de puesta a tierra.

Fuente: Autor.

Este modelo teórico, respaldado por cálculos detallados en la sección previa, encuentra su implementación en ATPDRAW, una herramienta integral para la representación gráfica y simulación de sistemas eléctricos, incluyendo efectos electromagnéticos transitorios. La elección de ATPDRAW se basa en su capacidad para representar con precisión componentes, proporcionando una visualización clara del modelo teórico, así como en su habilidad para simular sistemas eléctricos de manera precisa, alineándose con los objetivos específicos del estudio.

La utilización de ATPDRAW facilita no solo el diseño detallado, sino también la realización de simulaciones exhaustivas que permiten comprender el comportamiento dinámico de la malla de puesta a tierra. Este enfoque integrado garantiza una evaluación completa del sistema, identificando posibles escenarios de operación y optimizando el diseño en función de los resultados

obtenidos, lo que subraya la efectividad de ATPDRAW en la representación y simulación de sistemas eléctricos de manera precisa y significativa.

3.4 Modelado del cuerpo humano para voltajes de paso y toque

El análisis de los efectos de voltajes de paso y toque en el cuerpo humano frente a impulsos de rayos constituye un aspecto crítico en la evaluación de la seguridad eléctrica. Dada la complejidad de la interacción entre el cuerpo humano y los fenómenos transitorios, se recurre a modelos específicos para comprender y cuantificar estos efectos. En este contexto, es esencial destacar la diversidad de modelos disponibles, cada uno diseñado para abordar distintos aspectos y condiciones.

El modelo seleccionado, derivado de [27], se distingue por su simplicidad. Está compuesto por tres resistencias lineales, distribuidas de manera diferenciada para casos específicos. Esta estructura permite una representación más ágil y eficiente en el contexto de impulsos de rayos. Aunque existen modelos más detallados que consideran diversas variables fisiológicas y anatómicas, la elección de este enfoque simplificado se justifica por la necesidad de abordar de manera práctica y accesible la evaluación de riesgos eléctricos durante tormentas eléctricas.

Modelo tensión de paso

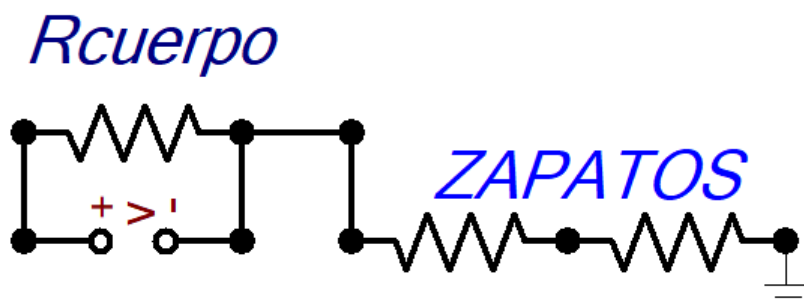


FIGURA N° 3.10: Circuito equivalente del cuerpo humano para voltaje de paso V_p .
Fuente: [27].

En este estudio, se han adoptado valores específicos para las resistencias asociadas al cuerpo humano. Se ha tomado $R_{cuerpo} = 1000\Omega$ y $R_{zapato} = 1M\Omega$. Estas elecciones son fundamentales para determinar la respuesta del cuerpo humano frente a tensiones de paso y toque en escenarios de descargas atmosféricas. La resistencia R_{cuerpo} representa la resistencia característica del cuerpo humano, mientras que R_{zapato} , basada en la norma ASTM F2413-18, simboliza la resistencia asociada a la superficie de contacto entre el cuerpo y el suelo a través del calzado. Estos valores, tomados de la literatura especializada, permiten modelar de manera más precisa

la interacción entre el cuerpo humano y las corrientes inducidas durante eventos de descarga atmosférica.

Modelo tensión de toque

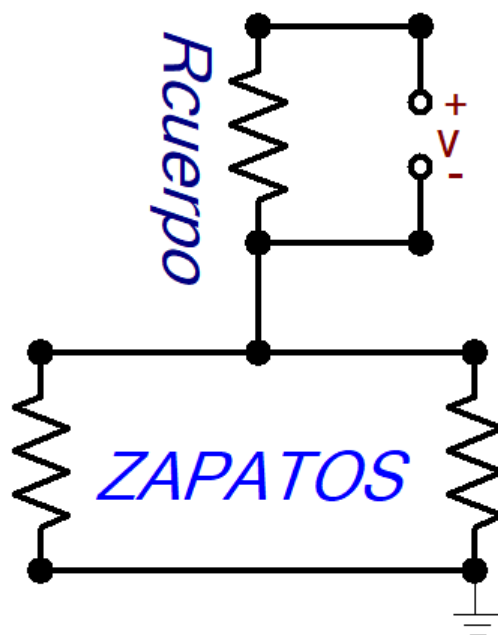


FIGURA N° 3.11: Circuito equivalente del cuerpo humano para voltaje de toque V_t .
Fuente: [27].

En resumen, este capítulo ha proporcionado detalles sobre los enfoques, procedimientos y herramientas específicos seleccionados con cautela para el modelado de la malla de puesta a tierra en el contexto de descargas atmosféricas tipo rayo. Cada elección metodológica se sustenta en su capacidad para abordar desafíos electromagnéticos específicos. La planificación cuidadosa busca ofrecer respuestas claras a los interrogantes fundamentales de la investigación, resaltando la importancia otorgada a la simulación y al análisis detallado de la respuesta de la malla ante descargas de rayo.

4. RESULTADOS

4.1 Simulaciones

Esta sección aborda la culminación del modelado integral de la malla de puesta a tierra, incluyendo la incorporación de modelos del cuerpo humano para estimar voltajes de paso y toque. La atención se centra ahora en la representación de la fuente de corriente tipo rayo, destacando la elección de la formulación matemática según la norma IEC y una forma de onda específica (10/350 μ s).

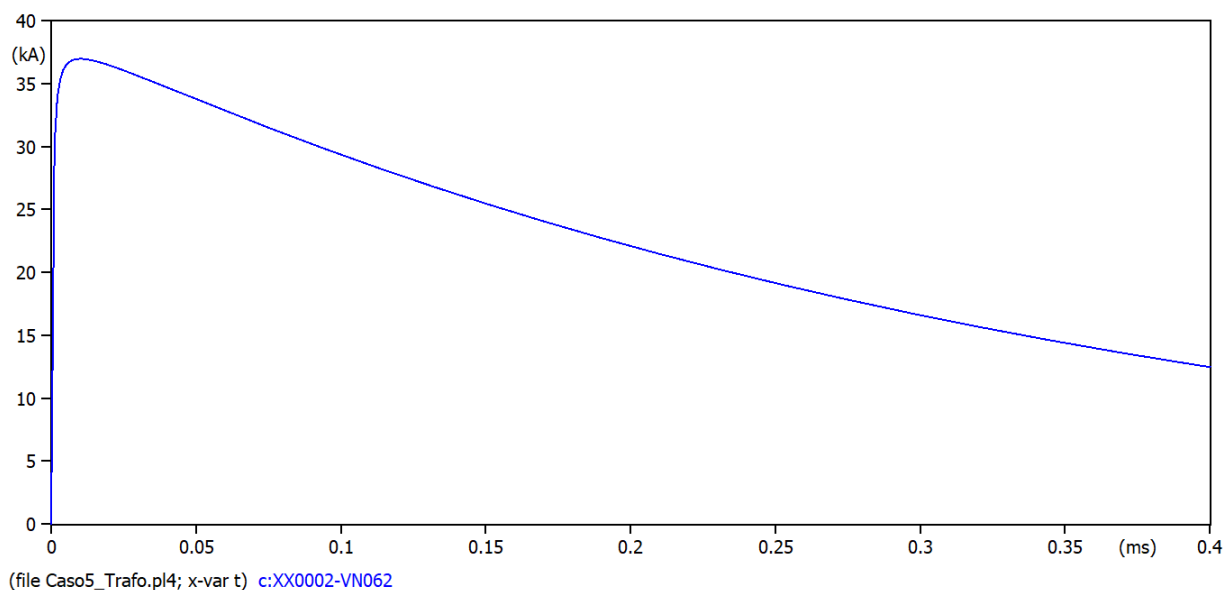


FIGURA N° 4.1: Forma de onda 10/350 μ s, para $I_m = 37$ kA.
Fuente: Autor.

La Figura 4.1 ilustra la forma de onda seleccionada (10/350 μ s, $I_m = 37$ kA), fundamentada en la idoneidad de la representación IEC para su uso en ATPDRAW mediante una fuente de corriente tipo Heilder (Figura 4.2). La elección de estos parámetros busca la adecuación tanto matemática como técnica para la simulación de descargas atmosféricas en entornos especializados.

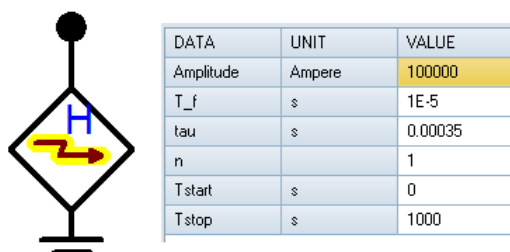


FIGURA N° 4.2: Fuente Heilder en ATPDRAW.
Fuente: Autor.

El objetivo primordial de esta etapa consiste en evaluar la respuesta del sistema frente a eventos de descarga atmosférica, concentrándose en el análisis detallado de la distribución de tensiones en la malla de puesta a tierra. Las simulaciones en ATPDRAW generarán resultados preliminares, fundamentales para comprender la eficacia de la malla en la mitigación de riesgos y su impacto en la seguridad operativa de la subestación.

En este estudio, se optó por considerar 5 puntos de entrada para la corriente del rayo, identificados como cuadrados rojos en la Figura 4.3. Estos puntos incluyen las bajantes de elementos como los porticos de 69 kV, los Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (DPS) en el lado de alta del transformador, el dipolo corona de la sala de control y los DPS de un alimentador de 13.8 kV. Cada punto de entrada se sometió a tres simulaciones, variando los picos de corriente (37, 100 y 200 kA) para explorar el comportamiento de la malla ante diferentes niveles de corriente del rayo.

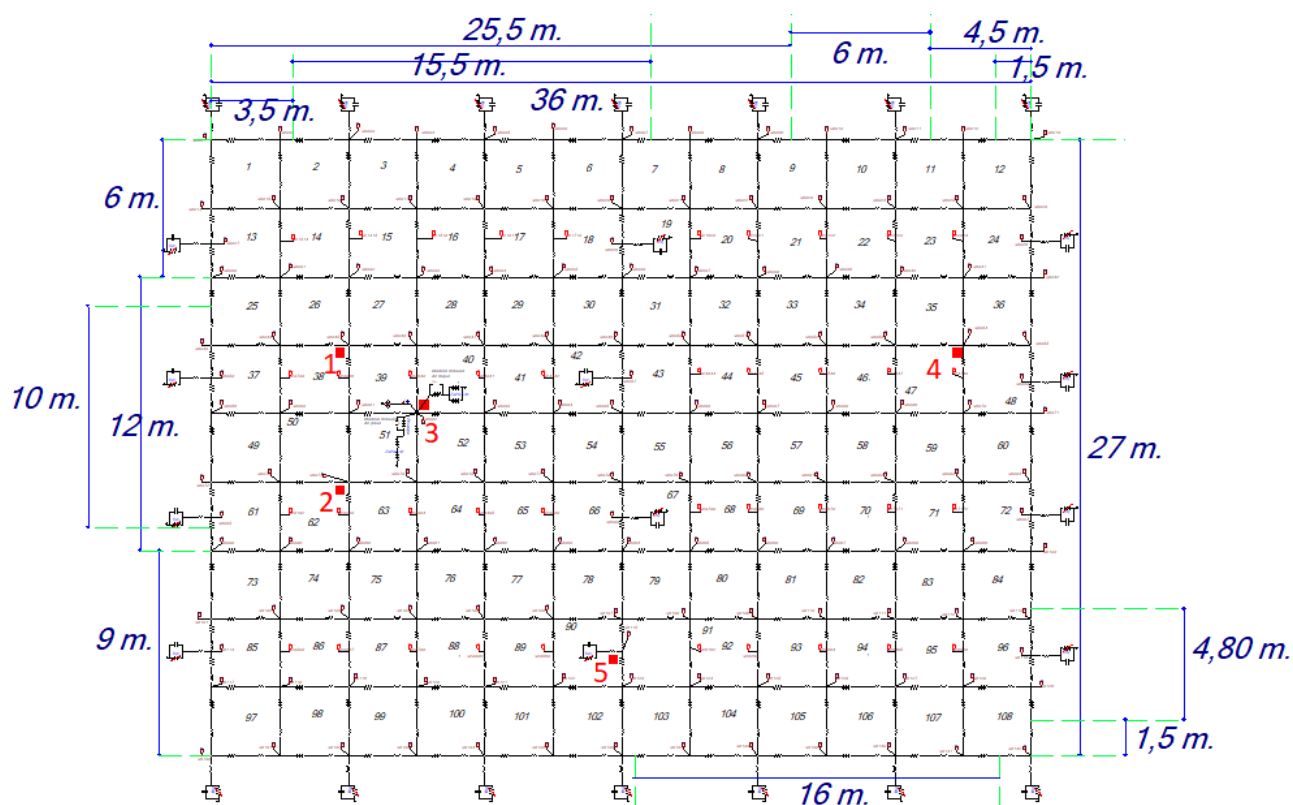


FIGURA N° 4.3: Malla de puesta a tierra en ATPDRAW.

Fuente: Autor.

La elección de los valores críticos, especialmente los picos de 100 y 200 kA, se justifica por su relevancia, al representar los picos más significativos registrados. Esta estrategia permitirá comprender el comportamiento de la malla de puesta a tierra frente a diversas intensidades de corriente del rayo en los puntos seleccionados.

Por otro lado, las mediciones de voltajes de paso y toque se realizaron en el punto de la malla de puesta a tierra con el mayor potencial en el momento de la entrada de la corriente del rayo

(Figura 4.4). Esta elección estratégica se basa en evaluar el escenario más crítico, donde la malla podría experimentar tensiones máximas, requiriendo atención especial en términos de seguridad y diseño.

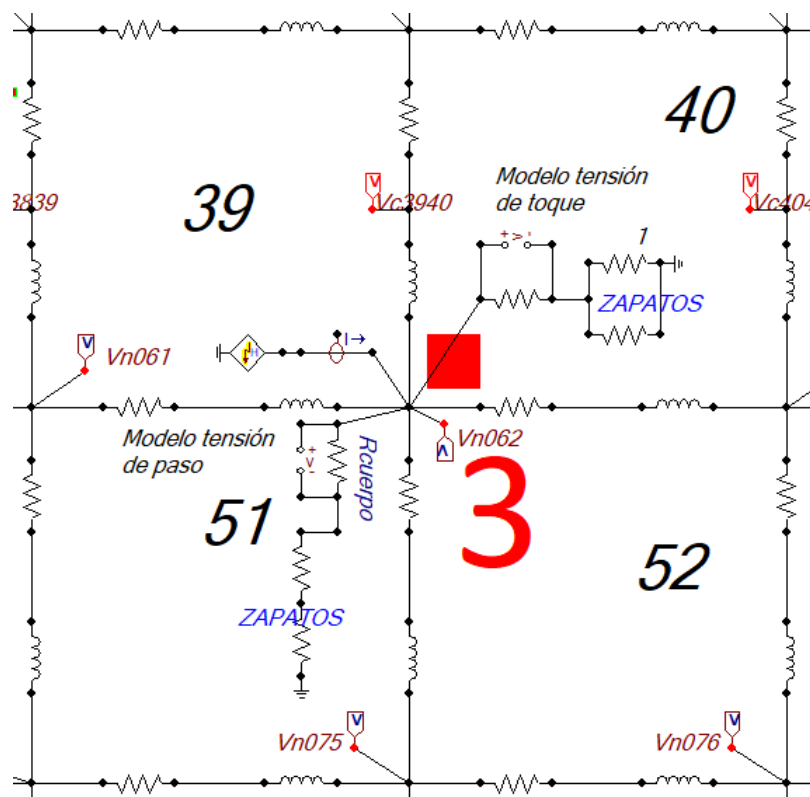


FIGURA N° 4.4: Punto de análisis n° 3 (DPS del transformador).

Fuente: Autor.

4.2 Resultados Obtenidos

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones descritas anteriormente en la sección de *Simulaciones*. Dada la extensión y profundidad de los datos, la información detallada se ha trasladado a los anexos para facilitar su acceso y análisis.

Después de finalizar las simulaciones, se procedió con la implementación de un código crucial en MATLAB, el cual desempeñó un papel fundamental al extraer y procesar los datos generados por ATPDRAW. Este proceso permitió una organización clara y depurada de la información pertinente, facilitando una comprensión más profunda y efectiva de los resultados obtenidos en las simulaciones. Para facilitar la transición de ATPDRAW a MATLAB, se contó con la ayuda de un software desarrollado por la comunidad de ATP/EMTP. Este software convierte los archivos pl4 generados en ATPDRAW a un formato mat compatible con MATLAB. La contribución de estos programas resultó esencial para agilizar el análisis posterior y mejorar la comprensión de los resultados de las simulaciones. El código implementado para este proyecto se encuentra disponible en los anexos adjuntos, lo que garantiza su accesibilidad para futuras referencias y

análisis.

Durante el análisis detallado de las simulaciones, se observó consistentemente que los puntos de mayor potencial en la malla coincidían con las ubicaciones de entrada de la corriente de rayo (ver Figura 4.5). Esta observación específica se limita al modelo bajo estudio y no puede generalizarse automáticamente a otros sistemas. La conexión directa entre los puntos de entrada de la corriente de rayo y los potenciales máximos en la malla se destaca por su relevancia. Para obtener detalles específicos sobre la ubicación de estos puntos y sus valores asociados, se remite a la documentación detallada en el Anexo B, correspondiente al caso 2 con una corriente pico de 37 kA.

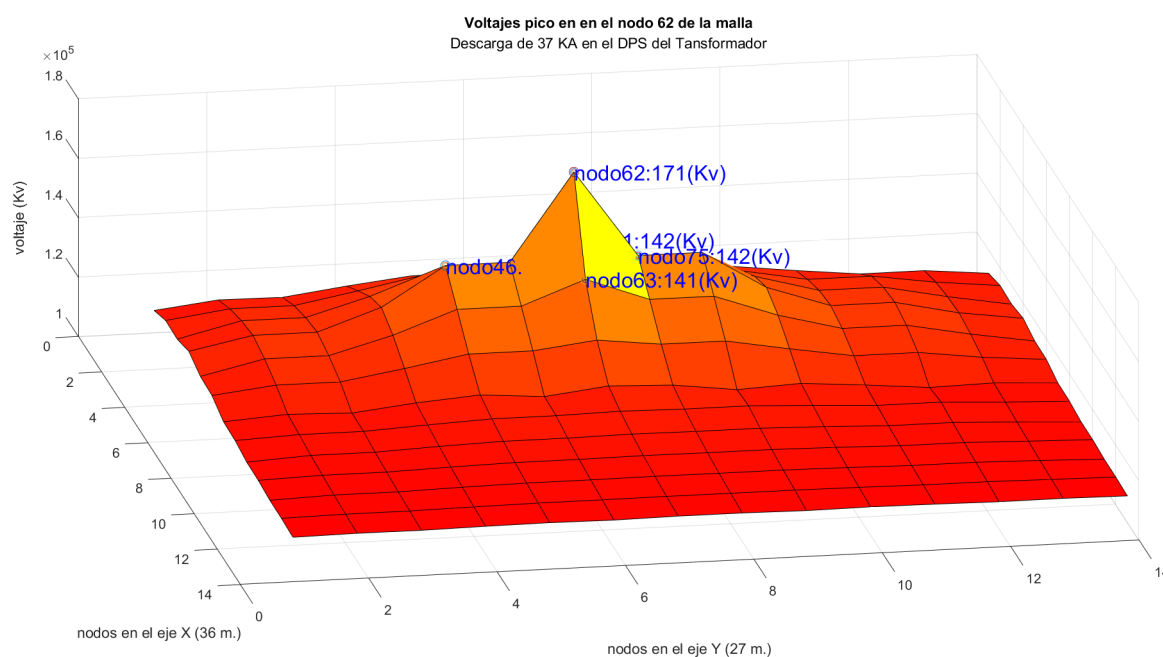


FIGURA N° 4.5: Voltajes en los nodos de la malla para $I_m = 37$ kA.

Fuente: Autor.

Los voltajes de toque y paso obtenidos en las simulaciones se compararon con los límites propuestos por la VDE (Asociación de Tecnología Eléctrica, Electrónica e Informática de Alemania), como se detalla en [32]. Estos límites, sugeridos como referencia, están establecidos en 50 kV para el voltaje de paso y 2 kV para el voltaje de toque. Es esencial señalar que estos valores no representan normas rígidas o leyes inalterables; más bien, se derivan de recomendaciones de varios autores y están condicionados por diversas variables, incluidas las características específicas del suelo. En el propio artículo de referencia, se presentan diferentes límites para distintas condiciones de suelo, reconociendo así la variabilidad en la aplicación de estos parámetros.

Las tablas a continuación detallan los voltajes de toque y paso para cada escenario simulado, evaluando la conformidad de los resultados con las pautas recomendadas. Estas tablas se complementan con gráficas representativas que ofrecen una visión del comportamiento de los voltajes de seguridad en cada caso. Estas representaciones gráficas enriquecen la comprensión global

del rendimiento del sistema frente a diversas condiciones de corriente de rayo.

TABLA N° 4.1: Caso 1: Bajante de Pórticos

Corriente pico del rayo [kA]	Voltaje de paso [V]	Voltaje de toque [V]
37	75.53	301.64
100	196.55	785.03
200	375.77	1500.84

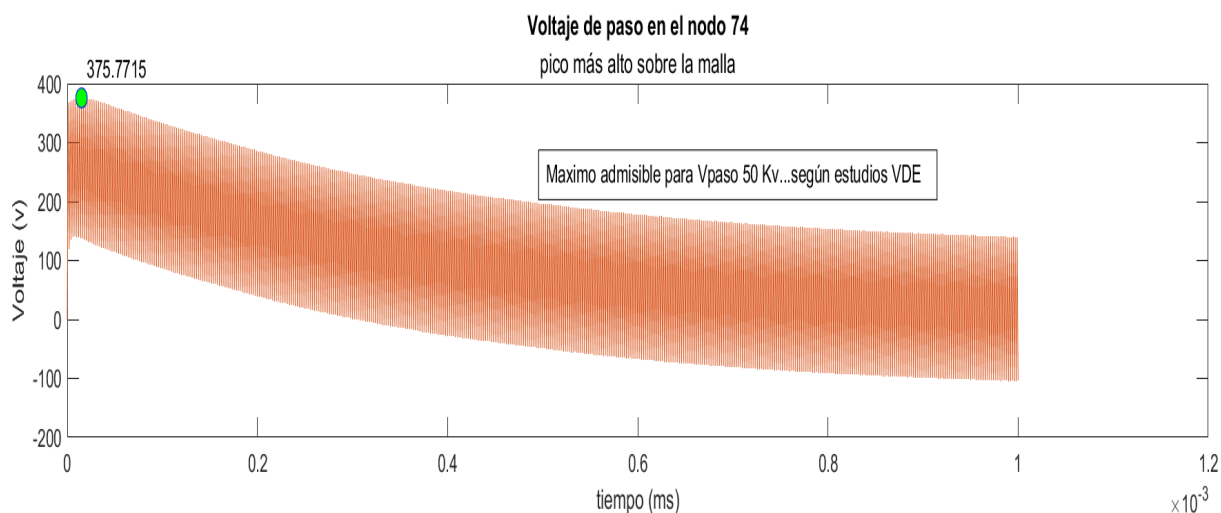


FIGURA N° 4.6: Voltaje de paso en el nodo 74 para $I_m = 200$ kA.
Fuente: Autor.

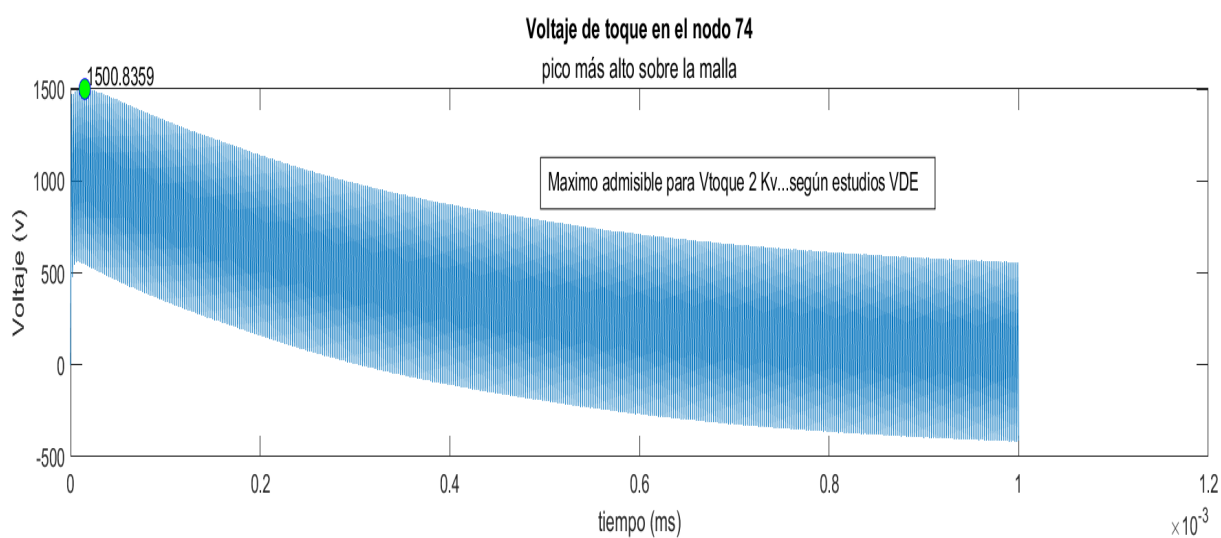
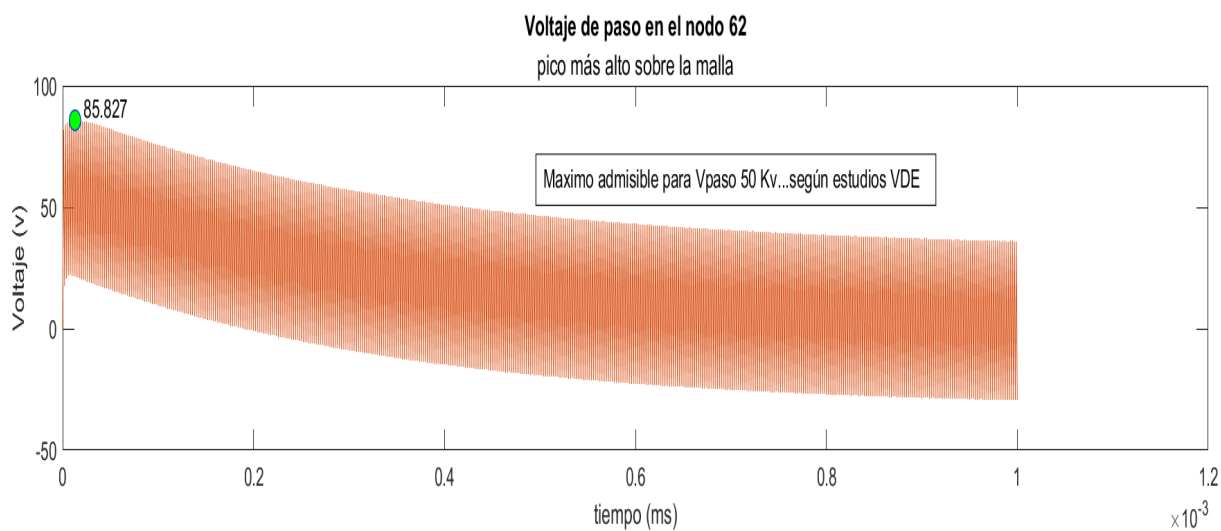


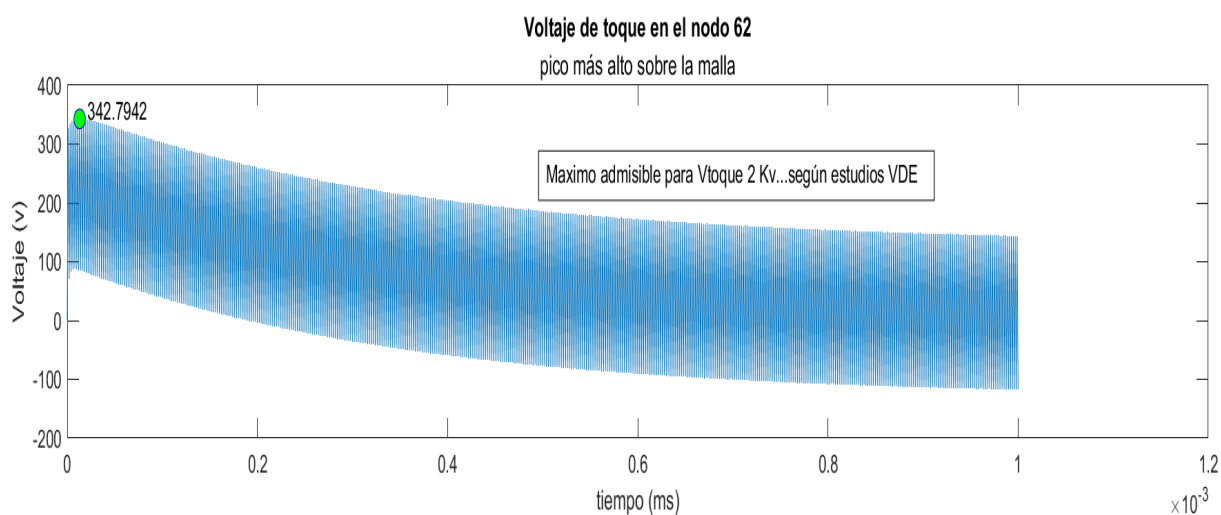
FIGURA N° 4.7: Voltaje de toque en el nodo 74 para $I_m = 200$ kA.
Fuente: Autor.

TABLA N° 4.2: Caso 2: DPS del Transformador

Corriente pico del rayo [kA]	Voltaje de paso [V]	Voltaje de toque [V]
37	85.83	342.79
100	224.38	896.17
200	431.42	1723.09

FIGURA N° 4.8: Voltaje de paso en el nodo 62 para $I_m = 37$ kA.

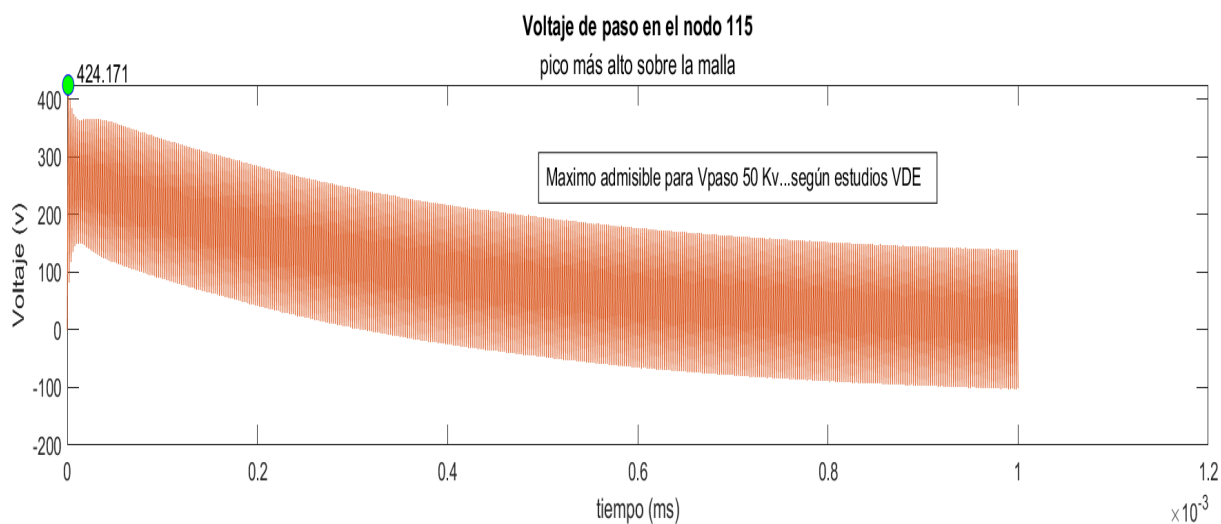
Fuente: Autor.

FIGURA N° 4.9: Voltaje de toque en el nodo 62 para $I_m = 37$ kA.

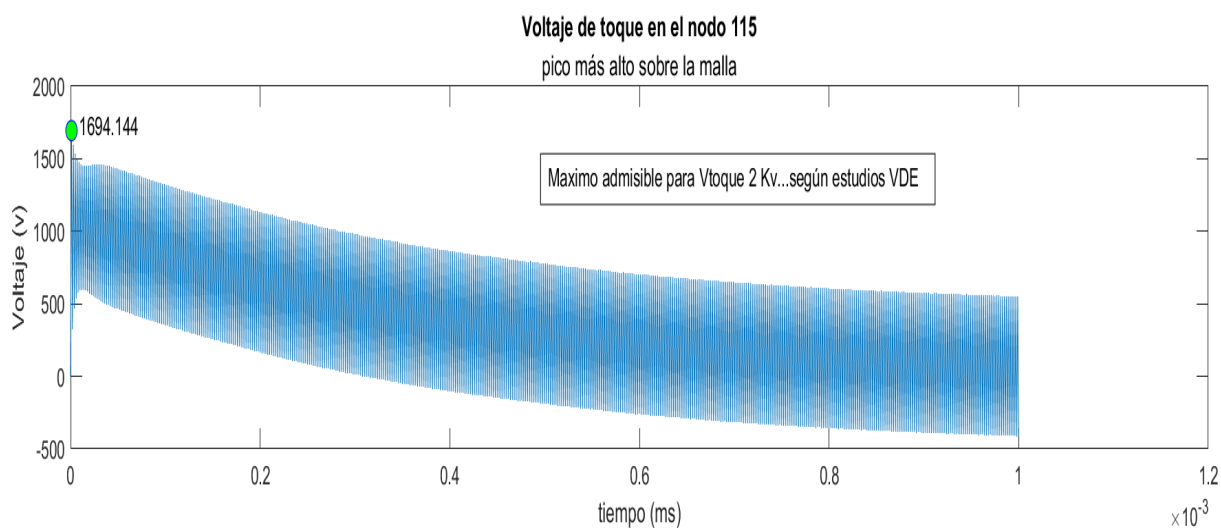
Fuente: Autor.

TABLA N° 4.3: Caso 3: Bajante de Sala de Control

Corriente pico del rayo [kA]	Voltaje de paso [V]	Voltaje de toque [V]
37	82.55	329.73
100	218.37	872.17
200	424.17	1694.14

FIGURA N° 4.10: Voltaje de paso en el nodo 115 para $I_m = 200$ kA.

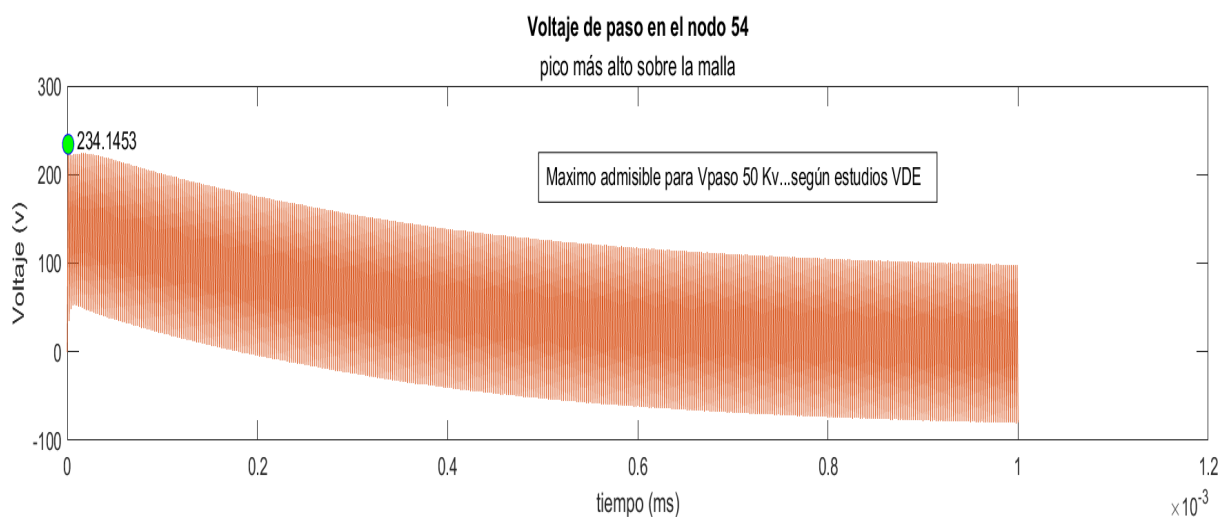
Fuente: Autor.

FIGURA N° 4.11: Voltaje de toque en el nodo 115 para $I_m = 200$ kA.

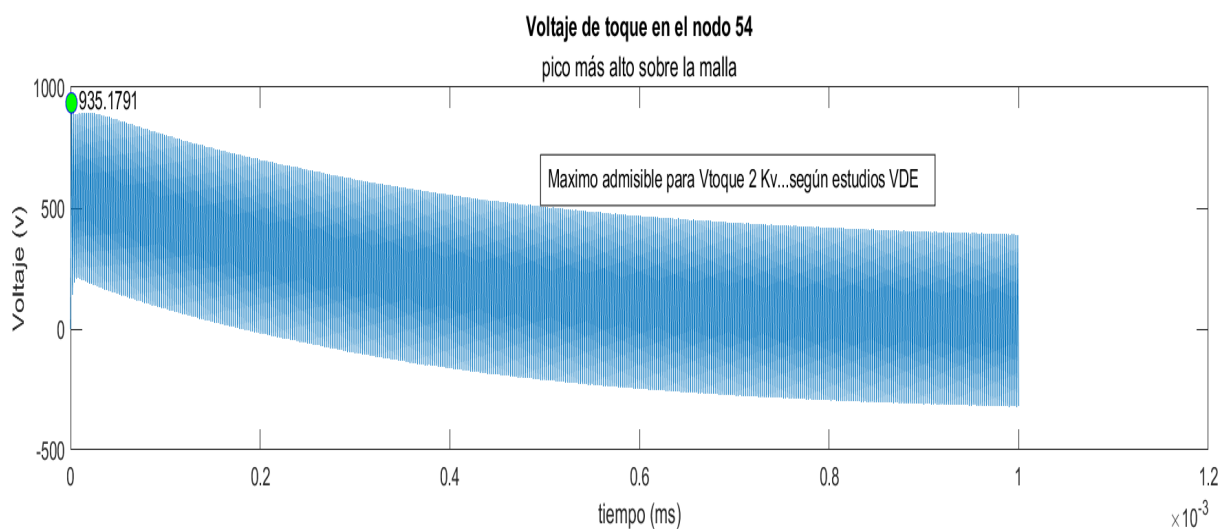
Fuente: Autor.

TABLA N° 4.4: Caso 4: DPS de Alimentador 13.8 kV

Corriente pico del rayo [kA]	Voltaje de paso [V]	Voltaje de toque [V]
37	88.35	352.88
100	234.14	935.17
200	455.09	1817.66

FIGURA N° 4.12: Voltaje de toque en el nodo 54 para $I_m = 100$ kA.

Fuente: Autor.

FIGURA N° 4.13: Voltaje de toque en el nodo 54 para $I_m = 100$ kA.

Fuente: Autor.

En todos los casos simulados, los resultados se mantuvieron consistentemente dentro de los límites definidos por [32]. La clave para asegurar que los voltajes de toque y paso, especialmente el primero, permanecieran dentro de los límites seguros, no solo se atribuye a la efectividad de la malla de puesta a tierra, sino principalmente a la cuidadosa elección de una resistencia

de $1\text{ M}\Omega$ para los zapatos dieléctricos de seguridad. Esta elección resultó crucial, ya que se observó que zapatos con una resistencia menor generaban voltajes de toque peligrosos en ciertos casos, posicionando así la resistencia específica de los zapatos como un factor determinante para salvaguardar la integridad y la seguridad del personal ante posibles descargas atmosféricas.

En el caso 1, la presencia de dos fuentes Heilder (Figura 4.14) resulta crucial. La suma de estas fuentes contribuye a la corriente pico seleccionada, dado que las bajantes del pórtico están conectadas eléctricamente mediante un hilo de guarda. Este diseño estratégico garantiza que, en caso de un impacto de rayo en cualquiera de los dos puntos, la corriente se distribuya en dos partes, proporcionando un nivel adicional de redundancia y eficiencia al sistema de puesta a tierra.

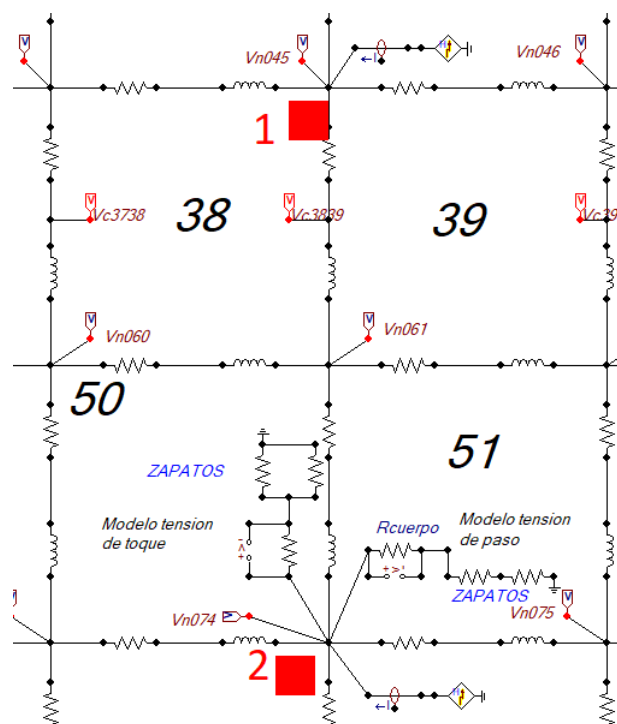


FIGURA N° 4.14: Modelado del caso n° 1 (Bajante de Pórticos).
Fuente: Autor.

En conclusión, las simulaciones realizadas proporcionan una visión general de la respuesta de la malla de puesta a tierra ante eventos de descarga atmosférica. Los resultados obtenidos permiten evaluar la eficacia y seguridad del sistema en términos de voltajes de toque y paso. La comparación con los límites propuestos en el artículo de la VDE (Asociación de Tecnología Eléctrica, Electrónica e Informática de Alemania) [32] brinda un marco de referencia claro. Los análisis resumidos en las tablas 4.1 a 4.4 posibilitan una revisión general de cada escenario simulado. Estos hallazgos no solo amplían la comprensión de la respuesta del sistema a eventos de descarga atmosférica, sino que también orientan las decisiones futuras en el diseño y optimización de sistemas de puesta a tierra, contribuyendo así al desarrollo de infraestructuras eléctricas más seguras y confiables.

CONCLUSIONES

A través de simulaciones detalladas y evaluaciones minuciosas, se han identificado patrones y tendencias cruciales que arrojan luz sobre la eficacia y seguridad del sistema en diversas condiciones. Estas conclusiones proporcionarán una visión general esclarecedora, destacando los puntos clave que surgen de la investigación y contribuyendo a la comprensión más profunda del comportamiento de la malla.

1. Las simulaciones, realizadas meticulosamente según la metodología establecida, han proporcionado una evaluación integral y confiable de la respuesta de la malla de puesta a tierra frente a eventos de descarga atmosférica. Los resultados obtenidos no solo cumplen con los estándares de seguridad, marcados por los límites de voltaje propuestos en el artículo de la VDE (Asociación de Tecnología Eléctrica, Electrónica e Informática de Alemania) [32], sino que también han revelado patrones significativos en términos de voltajes de toque y paso.
2. Un hallazgo notable durante las simulaciones se vincula directamente con la importancia crítica de los zapatos de seguridad en la efectividad de la malla de puesta a tierra. La elección cuidadosa de los valores asociados a estos elementos, ha demostrado ser un factor determinante para lograr resultados positivos en los voltajes de toque y paso. Esta conclusión destaca el papel fundamental que desempeñan los zapatos de seguridad en la protección del personal frente a tensiones eléctricas durante eventos de descarga atmosférica.
3. La conclusión de las simulaciones y la aplicación de modelos rigurosos destacan la importancia crucial de la simulación y la modelización en el diseño de sistemas de puesta a tierra. Este enfoque resulta esencial para evaluar la respuesta del sistema frente a eventos de descarga atmosférica. La mejora constante de las herramientas de simulación promete potenciar aún más el análisis de riesgos eléctricos, brindando perspectivas avanzadas para la mejora continua de la seguridad en las infraestructuras eléctricas. Este enfoque, efectivo en la actualidad, también señala el camino hacia avances continuos en la gestión y mejora de la seguridad eléctrica.
4. Las simulaciones no solo proporcionan información valiosa sino que se erigen como cimientos fundamentales para el diseño y la optimización de sistemas de puesta a tierra. Su contribución es crucial para avanzar hacia la creación de infraestructuras eléctricas más seguras y resilientes. Al proporcionar datos detallados sobre la respuesta del sistema ante eventos de descarga atmosférica, estas simulaciones informan decisiones clave en la planificación y mejora de infraestructuras eléctricas, subrayando su papel esencial en la construcción de un entorno eléctrico más robusto y confiable.

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de fortalecer aún más la investigación y sentar las bases para futuros desarrollos en el ámbito de la protección contra descargas atmosféricas, se presentan recomendaciones clave. Estas sugerencias se derivan de la reflexión crítica sobre los métodos utilizados y apuntan a áreas específicas que podrían beneficiarse de mejoras o extensiones. Al seguir estas recomendaciones, se abrirán nuevas perspectivas para investigaciones posteriores y se garantizará que la investigación siga siendo relevante y eficaz en el contexto de la evolución continua de las normativas y estándares de seguridad eléctrica.

1. Se recomienda realizar un estudio más detallado y extenso sobre las características del terreno donde se encuentra ubicada la malla de puesta a tierra. Obtener datos geotécnicos adicionales, como la resistividad del suelo en diferentes capas y la presencia de materiales conductivos, permitiría una modelización más precisa y, por ende, resultados de simulación más fidedignos.
2. Para una evaluación más completa de la malla de puesta a tierra, se sugiere ampliar el rango de corrientes simuladas. Considerar valores extremos y adicionales de corrientes de rayo proporcionaría información valiosa sobre el rendimiento del sistema en condiciones más diversas, permitiendo identificar posibles vulnerabilidades en un espectro más amplio de escenarios.
3. Se recomienda complementar las simulaciones con una validación experimental de los modelos utilizados. La realización de pruebas en campo, donde sea posible replicar condiciones similares a las simuladas, permitirá corroborar la precisión de los modelos y mejorar la confianza en los resultados obtenidos, fortaleciendo así la robustez de la investigación.
4. Dado que los eventos de descarga atmosférica están estrechamente relacionados con condiciones climáticas específicas, se sugiere realizar una evaluación del impacto de variables climáticas en la respuesta de la malla de puesta a tierra. Considerar factores como la humedad, la temperatura y la velocidad del viento en las simulaciones podría proporcionar información adicional sobre la variabilidad de la respuesta del sistema.
5. Es importante mantenerse al día con las normativas y estándares pertinentes en el campo de la protección contra descargas atmosféricas. Se recomienda realizar actualizaciones periódicas de la investigación a medida que evolucionen las normativas, garantizando que los resultados y conclusiones estén alineados con las últimas prácticas y recomendaciones de seguridad eléctrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 780 ® *NFPA Standard for the Installation of Lightning Protection Systems*, 2020. [Online]. Available: www.nfpa.org.
- [2] P. Hoole and S. Hoole, *Lightning Engineering: Physics, Computer-based Test-bed, Protection of Ground and Airborne Systems*. Springer International Publishing, 2022.
- [3] V. Cooray, *An Introduction to Lightning*. Springer Netherlands, 2015. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-94-017-8938-7>
- [4] M. A. Taha, L. Li, and P. Wang, “Estimation performance of the lightning protection system in an urban 110 kv grounding grid substation,” *Results in Engineering*, vol. 6, p. 100140, 6 2020.
- [5] G. Dias, D. S. Gazzana, A. S. Bretas, and M. Telló, “The need for standardization of human tolerability levels for lightning currents and voltages,” 2014, pp. 1804–1808.
- [6] C. M. de Seixas and S. Kurokawa, “Using circuit elements to represent the distributed parameters of a grounding system under lightning strokes,” *Electric Power Systems Research*, vol. 172, pp. 213–220, 7 2019. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779619301051>
- [7] S. Suchanek, “Untersuchungen an blitzschutzerdungsanlagen unter besonderer berücksichtigung der schrittspannung,” 1 2014. [Online]. Available: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3735/>
- [8] A. Taher, A. Said, T. Eliyan, and A. Hafez, “Analysis and mitigation of ground grid lightning potential rise,” *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2020.
- [9] S. M. Ghania, “Grounding systems under lightning surges with soil ionization for high voltage substations by using two layer capacitors (tlc) model,” *Electric Power Systems Research*, vol. 174, p. 105871, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779619301841>
- [10] A. Boutadjine, B. Nekhoul, B. Harrat, and M. Melit, “Realistic modeling of the grounding system transient behavior with frequency dependence,” *Electric Power Systems Research*, 2022.
- [11] “Ieee guide for safety in ac substation grounding,” *IEEE Std 80-2000*, pp. 1–192, 2000.
- [12] V. Cooray, “Iet power and energy series 58 lightning protection.”

- [13] I. E. Commission and I. E. C. T. C. 81., *Protection against lightning. Part 1, General principles*. International Electrotechnical Commission, 2010.
- [14] C. SC *et al.*, “Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines,” *CIGRE Technical Brochure*, vol. 63, 1991.
- [15] F. Heidler, J. Cvetic, and B. Stanic, “Calculation of lightning current parameters,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 399–404, 1999.
- [16] C. A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti, “Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 95, no. D12, pp. 20 395–20 408, 1990. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JD095iD12p20395>
- [17] V. Cooray, R. Montano, and V. Rakov, “A model to represent negative and positive lightning first strokes with connecting leaders,” *Journal of Electrostatics*, vol. 60, no. 2, pp. 97–109, 2004, selected Papers from the 26th International Conference on Lightning Protection. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388604000300>
- [18] R. Thottappillil, “Electromagnetic pulse environment of cloud-to-ground lightning for emc studies,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 44, no. 1, pp. 203–213, 2002.
- [19] F. Fisher and J. Plumer, *Lightning Protection of Aircraft*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=ufI1MQEACAAJ>
- [20] R. J. Fisher, G. H. Schnetzer, R. Thottappillil, V. A. Rakov, M. A. Uman, and J. D. Goldberg, “Parameters of triggered-lightning flashes in florida and alabama,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 98, no. D12, pp. 22 887–22 902, 1993. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/93JD02293>
- [21] S. Visacro, “A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386, 2007.
- [22] Y. Liu, M. Zitnik, and R. Thottappillil, “An improved transmission-line model of grounding system,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 3, pp. 348–355, 2001.
- [23] V. Arnautovski-Toseva and L. Grev, “Electromagnetic analysis of horizontal wire in two-layered soil,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 168,

- no. 1, pp. 21–29, 2004, selected Papers from the Second International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering (ACOMEN 2002). [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377042703009609>
- [24] V. Arnautovski-Toseva, L. Grcev, and M. Kacarska, “High frequency grounding study — image and transmission line models vs. electromagnetic model,” in *2013 21st International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks - (SoftCOM 2013)*, 2013, pp. 1–5.
- [25] L. Grcev and F. Dawalibi, “An electromagnetic model for transients in grounding systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 1773–1781, 1990.
- [26] G. Celli, E. Ghiani, and F. Pilo, “Behaviour of grounding systems: a quasi-static emtp model and its validation,” *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1–6, 2010. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:33952843>
- [27] S. G. Farkoush, A. Wadood, T. Khurshaid, C. H. Kim, M. Irfan, and S. B. Rhee, “Reducing the effect of lightning on step and touch voltages in a grounding grid using a nature-inspired genetic algorithm with atp-emtp,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 81 903–81 910, 2019.
- [28] E. D. Sunde, “Earth conduction effects in transmission systems,” (*No Title*), 1968.
- [29] K. Supanus, W. Thansiphaserth, N. Rugthaicharoencheep, and A. Phayomhom, “External grounding design to reduce effects of lightning damage in distribution system,” in *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, 2014, pp. 1–6.
- [30] “Modeling guidelines for fast front transients,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 493–506, 1996.
- [31] F. D. Naranjo, “Diseño de una subestación eléctrica ais de 69/13, 8kv a 16/24mva mediante el software sap 2000,” 2022.
- [32] D. R. Michael (TU Ilmenau, FG Blitz-und Überspannungsschutz, D. Z. Wolfgang (Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, and D. K. Jürgen (Wissenschaftl. Beratungsbüro Elektropathologie, Berlin, *Grenzwerte für Schritt- und Berührungsspannungen an Blitzschutz-Ableitungseinrichtungen und -Erdungsanlagen*. VDE-Verlag, 2015.

ANEXOS

Anexo A: Código Modelo Desarrollado en MATLAB

En este anexo se presenta el código modelo desarrollado en MATLAB para el análisis y procesamiento de datos obtenidos mediante simulaciones. El código se ha diseñado con el objetivo de extraer, organizar y analizar los resultados generados por el software de simulación ATPDRAW. La implementación de este código ha sido fundamental para automatizar tareas de análisis de datos, permitiendo una interpretación más eficiente y detallada de los resultados de las simulaciones realizadas en el presente estudio. A lo largo de este anexo, se detallan las funciones y procedimientos principales del código, junto con ejemplos de su aplicación en el procesamiento de datos específicos. Este recurso ofrece una herramienta valiosa para futuras investigaciones en el campo de la protección contra descargas atmosféricas, así como para la optimización y mejora de los sistemas de puesta a tierra en instalaciones eléctricas.

Código Matlab

```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Inicio %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 dos( 'C:\ATPDraw\EMIP\tpbig.exe disk C:\ATPDraw\ATP\XxxxxX.atp s -r ' )
3 copyfile C:\ATPDraw\ATP\XxxxxX.p14 F:\ CccccC\P142mat09\
4 dos( 'F:\ CccccC\P142mat09\pl42mat /m4 F:\ CccccC\P142mat09\XxxxxX.p14 ' )
5 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6 load( 'F:\ CccccC\P142mat09\XxxxxX.mat ', 'variable_1 ' );
7 load( 'F:\ CccccC\P142mat09\XxxxxX.mat ', 'variable_2 ' );
8 load( 'F:\ CccccC\P142mat09\XxxxxX.mat ', 'variable_3 ' );
9 voltímetros_ec={ 'conjuto1_variables ' };
10 voltímetros_nodo= { 'conjuto2_variables ' };
11 voltajes_nodo=load( 'F:\ CccccC\P142mat09\XxxxxX.mat ', voltímetros_nodo
    { : } );
12 voltajes_ec=load( 'F:\ Descarga\P142mat09\ caso2_salacontrol.mat ',
    voltímetros_ec { : } );
13 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
14 nodo=max( voltajes_nodo , [ ] , 1 );
15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16 voltajes_pico_ec=max( voltajes_ec , [ ] , 1 );
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18 matriz_vp= zeros( [14, 13] );
19 matriz_Vec= zeros( [14, 13] );
20 matriz_Vnodo= zeros( [14, 13] );
21 orden_voltajes_pico_nodo=sort( nodo, 'descend' );
22 nodos=tabla_voltajes_pico_nodo.Properties.VariableNames;
23 cinco_mayores=orden_voltajes_pico_nodo(1:5);
24 nodos_mayores={ ' ', ' ', ' ', ' ', ' ' };

```



```

25 voltaje_paso_pico= num2str(max('variable_1'));
26 voltaje_toque_pico= num2str(max('variable_2'));
27 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
28 disp('_____')
29 disp('volatajes picos en los nodos de la malla (v)')
30 for k=1:142
31     format bank
32     format compact
33     lect1_volt=fix((nodo(k))/1000);
34     texto1=sprintf('%s = %d (Kv)',cell2mat(nodos(k)),lect1_volt);
35     disp(texto1)
36 end
37 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
38 disp('_____')
39 disp(' los 5 mayores voltajes pico (v)');
40 for n=1:5
41     for m=1:142
42         if cinco_mayores(n) == nodo(m)
43             format bank
44             format compact
45             nodos_mayores(n)=nodos(m);
46             texto2=sprintf('%s = %d (Kv)',cell2mat(nodos_mayores(n)),fix(
cinco_mayores(n)/1000));
47             disp(texto2)
48         else
49             continue
50         end
51     end
52 end
53 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
54 disp('_____')
55 disp(' Voltaje de toque y paso en el nodo con el pico mas alto de la
malla ')
56 result=sprintf('Voltaje de toque = %s (v)\n Voltaje de paso = %s (v)\n',
    voltaje_toque_pico, voltaje_paso_pico);
57 disp(result)
58 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
59 acum2=0;
60 acum1=0;
61 for i=1:14
62     for j=1:13
63         if ((i == 3 || i == 6 || i == 9 || i == 12) && (j ~= 1 && j ~= 7 && j
~ 13))
64             acum1=acum1+1;
65             matriz_vp(i,j)=voltajes_pico_ec(acum1);
66             matriz_Vec(i,j)=voltajes_pico_ec(acum1);

```

```

67         matriz_Vnodo(i , j)=NaN;
68     else
69         acum2=acum2+1;
70         matriz_vp(i , j)=nodo(acum2);
71         matriz_Vnodo(i , j)=nodo(acum2);
72         matriz_Vec(i , j)=NaN;
73     end
74 end
75 end
76 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
77 figure()
78 surf(matriz_vp)
79 colormap autumn
80 xlabel('nodos en el eje X (36 m.)')
81 ylabel('nodos en el eje Y (27 m.)')
82 zlabel('voltaje (Kv)')
83 hold on
84 title('Voltajes pico en en el nodo 115 de la malla','Descarga de 37 KA en
      la sala de control')
85 for y = 1:14
86     for x = 1:13
87         %format shortE
88         z=matriz_Vnodo(y,x);
89         S = repmat([50,25,10],numel(x),1);
90         %C = repmat([1,2,3],numel(x),1);
91         s = S(:);
92         for p= 1:5
93             if cinco_mayores(p) == z
94                 notacion=fix(z/1000);
95                 %format bank
96                 texto=sprintf('%s= %d (Kv)',cell2mat(nodos_mayores(p)),
notacion);
97                 scatter3(x,y,z,s,'ColorVariable',z)
98                 text(x,y,z,texto,'Color','blue','FontSize',16)
99                 hold on
100                end
101            end
102        end
103    end
104 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
105 figure()
106 subplot(2,1,1)
107 format bank
108 plot(t,variable_1,'Color',[0.8500 0.3250 0.0980]);
109 hold on
110 for h=1:(length(t))

```

```

111     vpasso=max(variable_1);
112 if variable_1(h) == vpasso
113     plot(t(h),variable_1(h),Marker="o",MarkerSize=8,MarkerEdgeColor='b',
114         MarkerFaceColor='g')
115     text(t(h)+0.000009,variable_1(h)+20,voltaje_paso_pico)
116 hold on
117 else
118 continue
119 end
120 end
121 dim = [.45 .72 .06 .06];
122 annotation('textbox',dim,'String','Maximo admisible para Vpasso 50 Kv...
123         según estudios VDE','FitBoxToText','on')
124 xlabel('tiempo (ms)')
125 ylabel('Voltaje (v)')
126 title('Voltaje de paso en el nodo 115','pico más alto sobre la malla');
127 hold on
128 subplot(2,1,2)
129 format bank
130 plot(t,'variable_2');
131 hold on
132 for h=1:(length(t))
133     vtoque=max(variable_2);
134     if variable_2(h) == vtoque
135         plot(t(h),'variable_2'(h),Marker="o",MarkerSize=8,MarkerEdgeColor='b'
136             ,MarkerFaceColor='g')
137         text(t(h)+0.000008,'variable_2'(h)+40,voltaje_toque_pico)
138     end
139 end
140 dim1 = [.45 .33 .01 .01];
141 annotation('textbox',dim1,'String','Maximo admisible para Vtoque 2 Kv...
142         según estudios VDE','FitBoxToText','on')
143 xlabel('tiempo (ms)')
144 ylabel('Voltaje (v)')
145 title('Voltaje de toque en el nodo 115','pico más alto sobre la malla');
146 hold on
147
148 sgtitle('Descarga de 37 KA en la sala de control')
149 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Final %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Código A.1: Código MATLAB para análisis de datos de descargas atmosféricas

ANEXO B: Resultados Detallados de Simulaciones

Caso 1: Bajante de Pórticos

En esta sección, se presentan las gráficas detalladas de la distribución de tensiones en la malla de puesta a tierra para el Caso 1, donde la corriente de rayo impacta en la bajante de los porticos. En el primer escenario con una corriente pico de 37 kA, se observa que los cinco nodos con los potenciales más altos alcanzan valores de hasta 151 kV. Las visualizaciones de los voltajes de paso y toque, presentadas en las figuras correspondientes, proporcionan una clara representación de la respuesta del sistema ante esta condición. En el segundo escenario con 100 kA, los nodos críticos muestran valores más elevados, alcanzando hasta 393 kV. Las gráficas respectivas detallan la evolución de los voltajes en la malla de puesta a tierra bajo condiciones más críticas. Estos resultados ofrecen una visión completa del rendimiento del sistema frente a diferentes niveles de corriente de rayo, permitiendo una evaluación detallada de la eficacia y seguridad de la malla de puesta a tierra.

Resultados del Caso 1 - Bajante de Porticos, $I_m = 37 \text{ kA}$

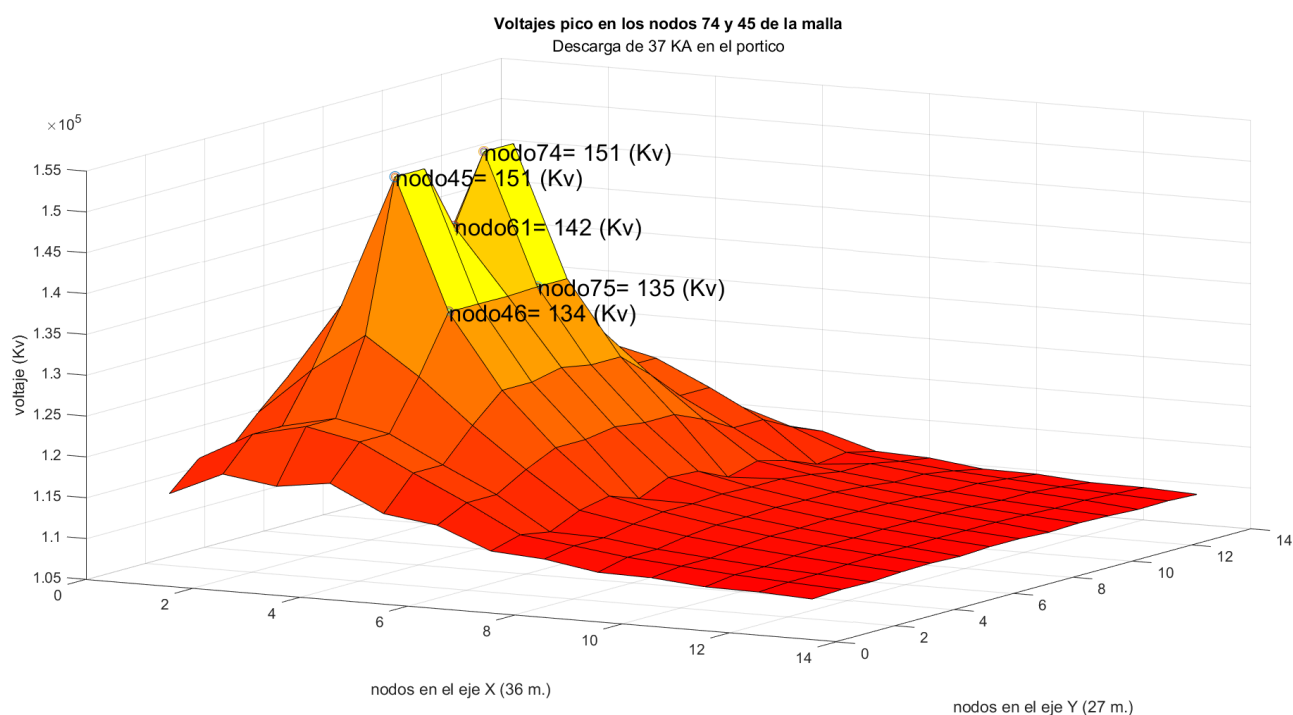


FIGURA B.1: Distribución de tensiones para el Caso 1, $I_m = 37 \text{ kA}$

Fuente: Autor.

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
74	151
45	151
61	142
75	135
46	134

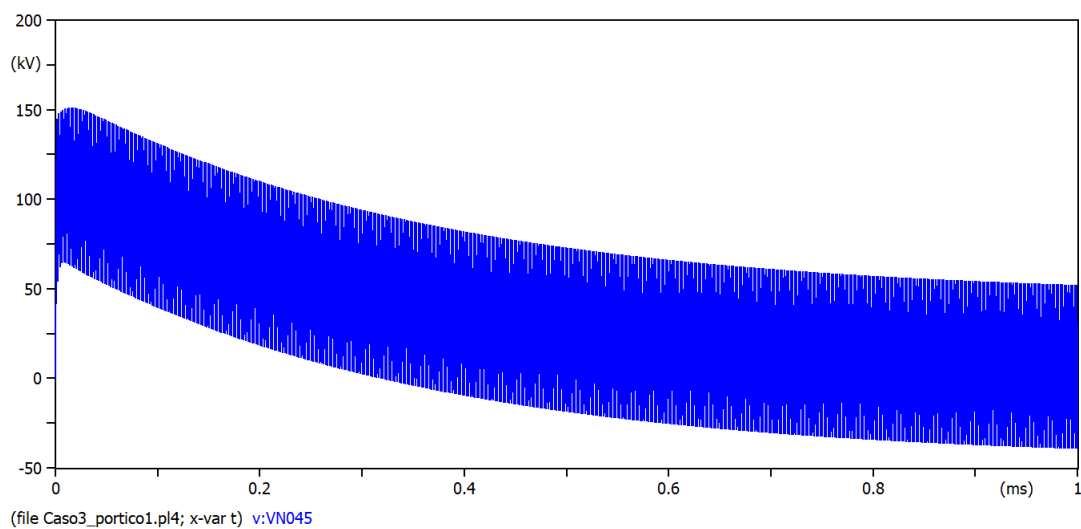


FIGURA B.2: Voltaje en el nodo 45 para el Caso 1, $I_m = 37$ kA
Fuente: Autor.

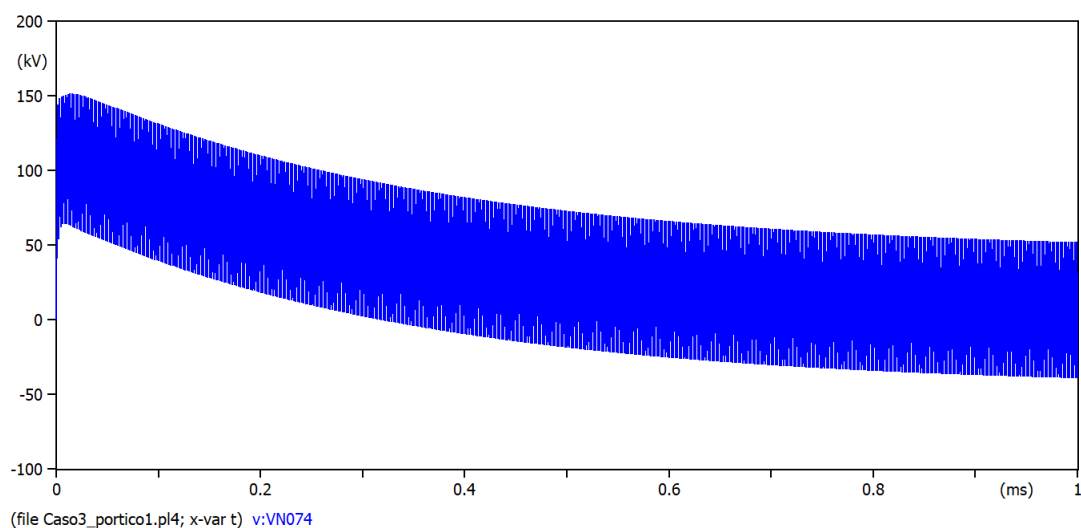


FIGURA B.3: Voltaje en el nodo 74 para el Caso 1, $I_m = 37$ kA
Fuente: Autor.

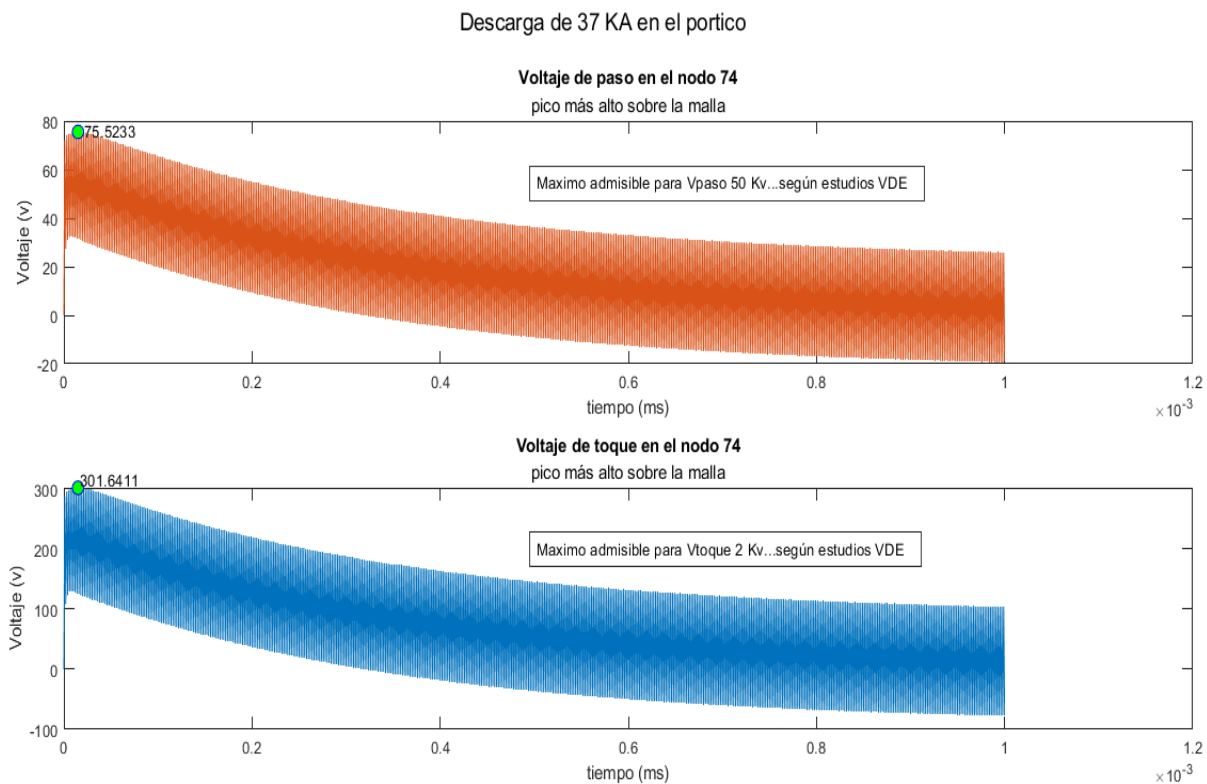


FIGURA B.4: Voltajes de toque y paso para el Caso 1, $I_m = 37$ kA
Fuente: Autor.

Resultados del Caso 1 - Bajante de Porticos, $I_m = 100 \text{ kA}$

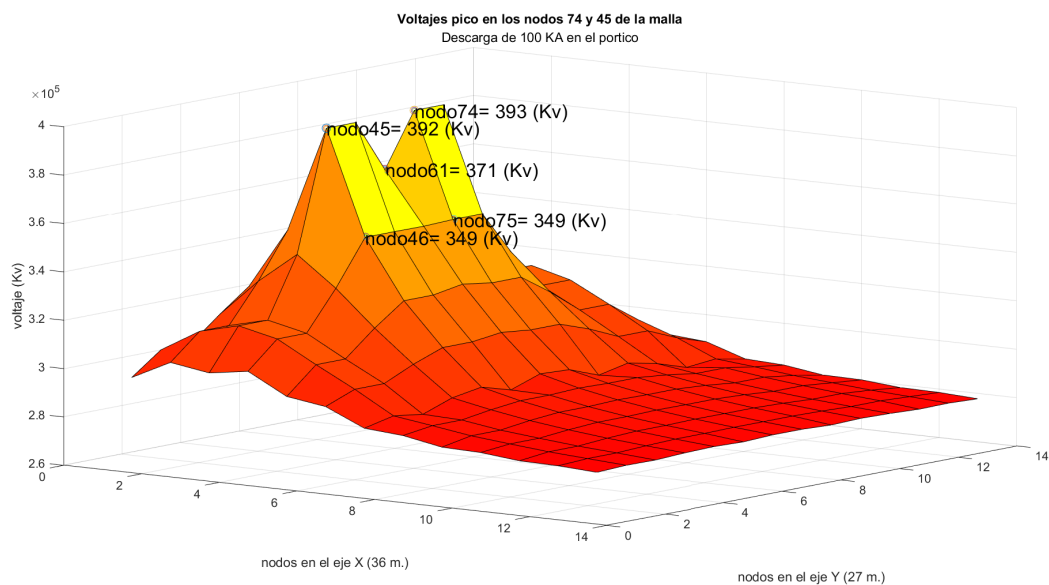


FIGURA B.5: Distribución de tensiones para el Caso 1, $I_m = 100 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
74	393
45	392
61	371
75	349
46	349

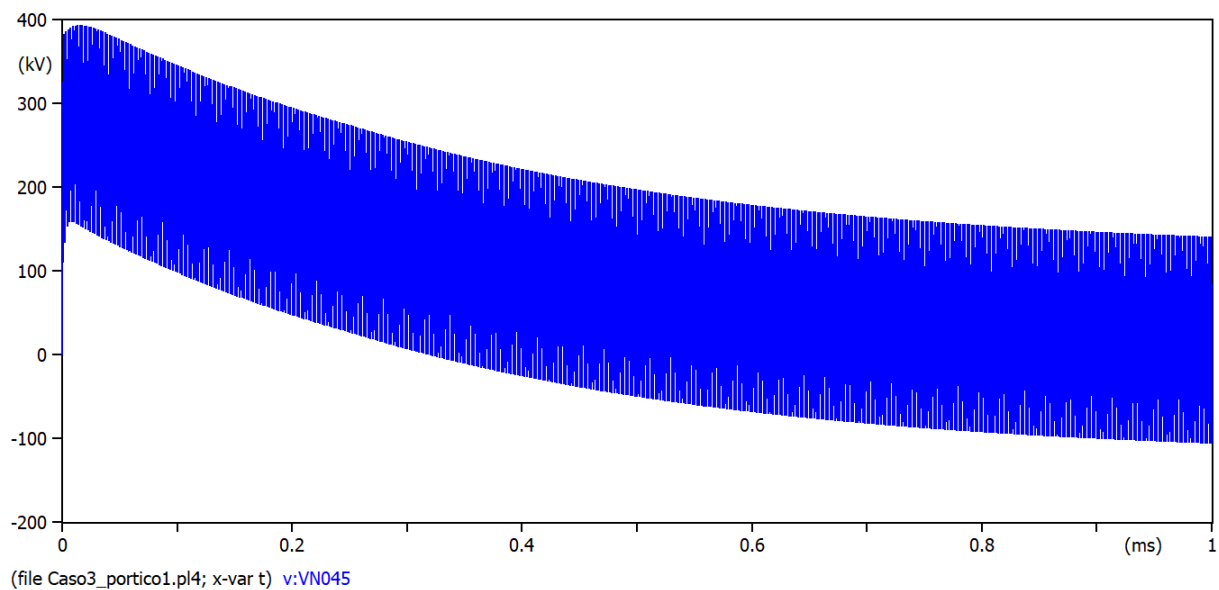


FIGURA B.6: Voltaje en el nodo 45 para el Caso 1, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

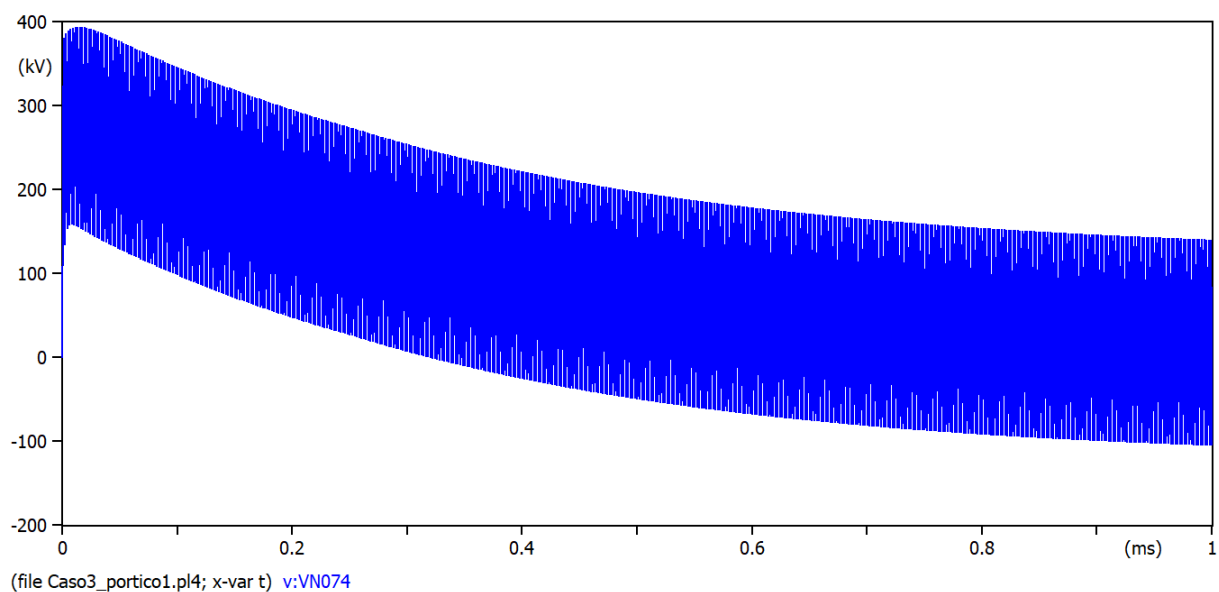


FIGURA B.7: Voltaje en el nodo 74 para el Caso 1, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

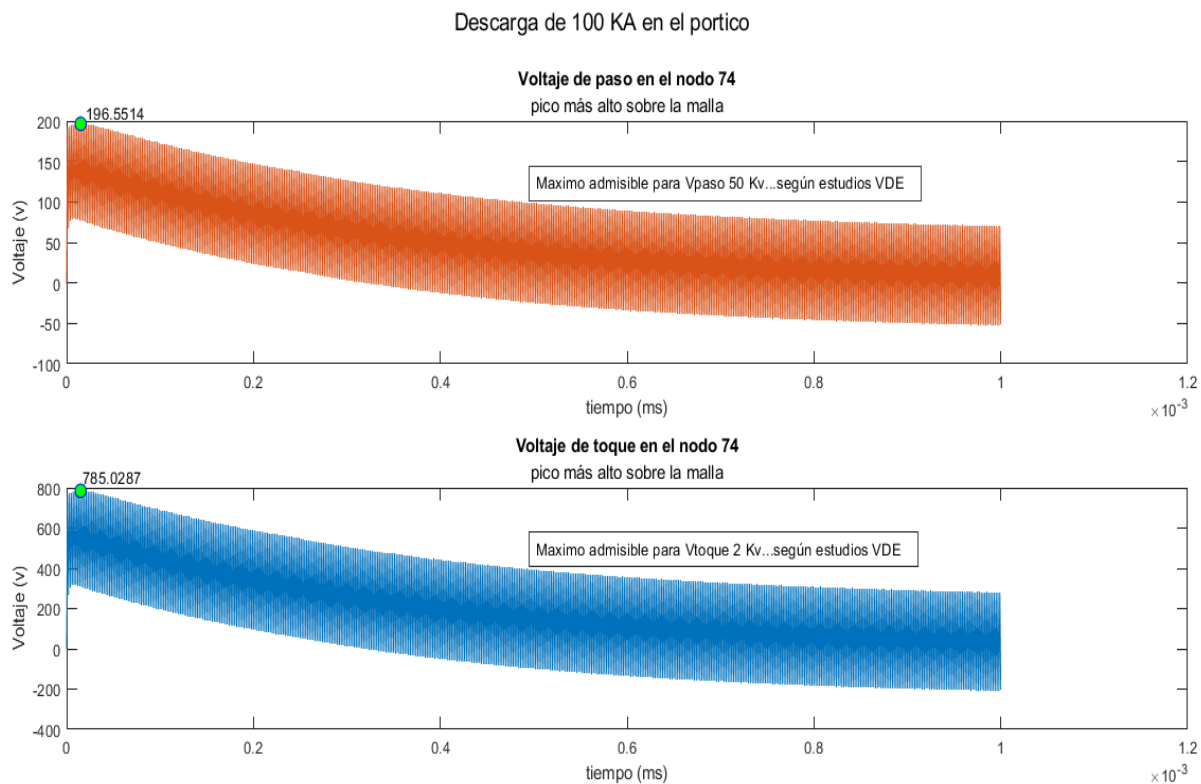


FIGURA B.8: Voltajes de toque y paso para el Caso 1, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

Resultados del Caso 1 - Bajante de Porticos, $I_m = 200 \text{ kA}$

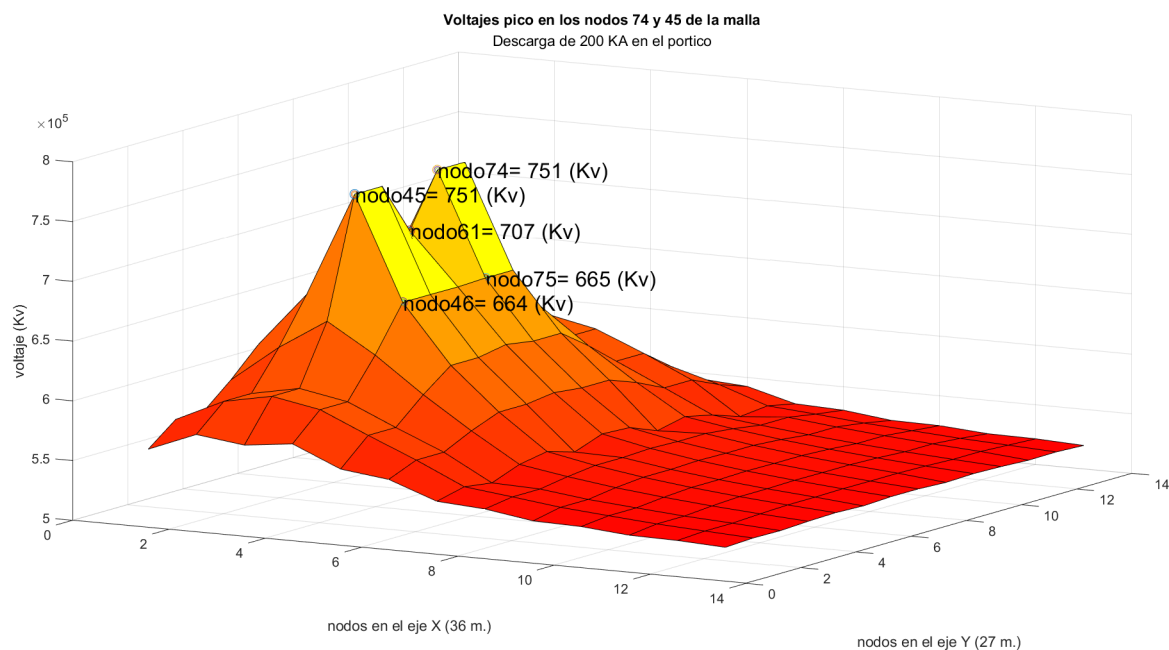


FIGURA B.9: Distribución de tensiones para el Caso 1, $I_m = 200 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
74	751
45	751
61	707
75	665
46	664

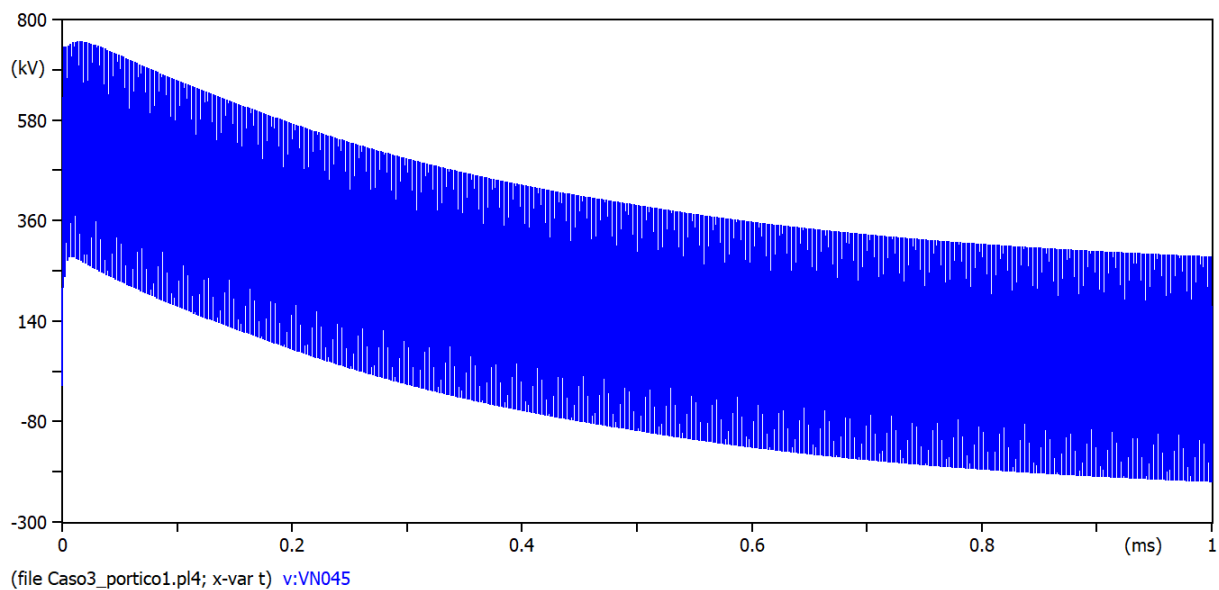


FIGURA B.10: Voltaje en el nodo 45 para el Caso 1, $I_m = 200$ kA
Fuente: Autor.

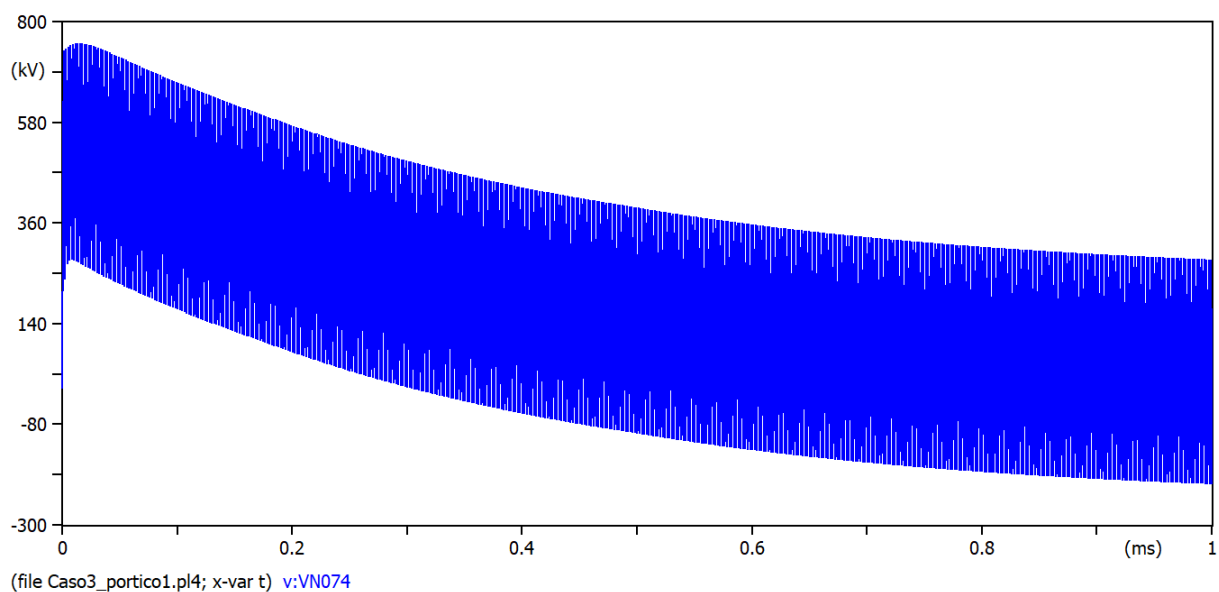


FIGURA B.11: Voltaje en el nodo 74 para el Caso 1, $I_m = 200$ kA
Fuente: Autor.

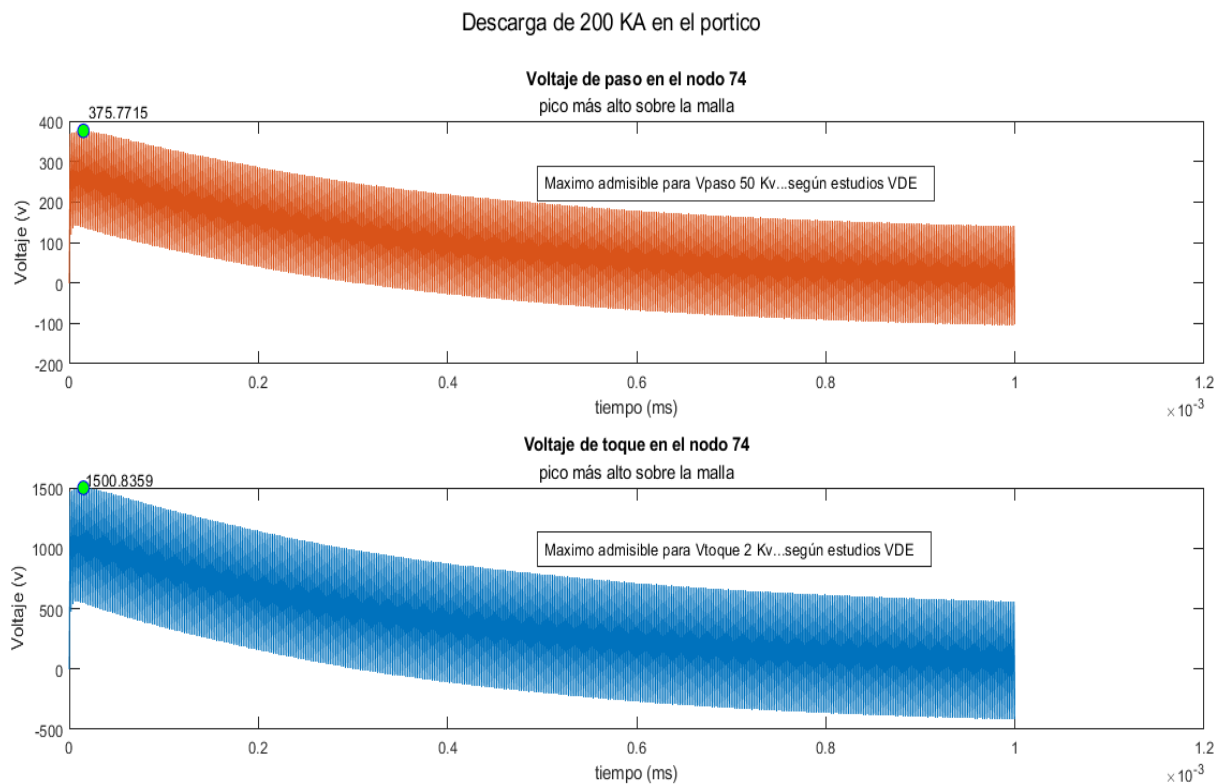


FIGURA B.12: Voltajes de toque y paso para el Caso 1, $I_m = 200$ kA
Fuente: Autor.

Caso 2: DPS del transformador

En esta sección, se presentan las gráficas detalladas de la distribución de tensiones en la malla de puesta a tierra para el Caso 2: DPS del Transformador. En el primer escenario, con una corriente pico de 37 kA, se observa que los cinco nodos críticos alcanzan valores de hasta 171 kV. Las representaciones visuales de los voltajes de paso y toque, disponibles en las figuras correspondientes, ofrecen una clara perspectiva de la respuesta del sistema a esta condición. En el segundo escenario, con 100 kA, los nodos críticos presentan valores más elevados, llegando hasta 448 kV. Las gráficas respectivas proporcionan una detallada evolución de los voltajes en la malla de puesta a tierra bajo condiciones más críticas. Estos resultados ofrecen una visión completa del rendimiento del sistema frente a diferentes niveles de corriente de rayo, permitiendo una evaluación detallada de la eficacia y seguridad de la malla de puesta a tierra.

Resultados del Caso 2 - DPS del transformador, $I_m = 37 \text{ kA}$

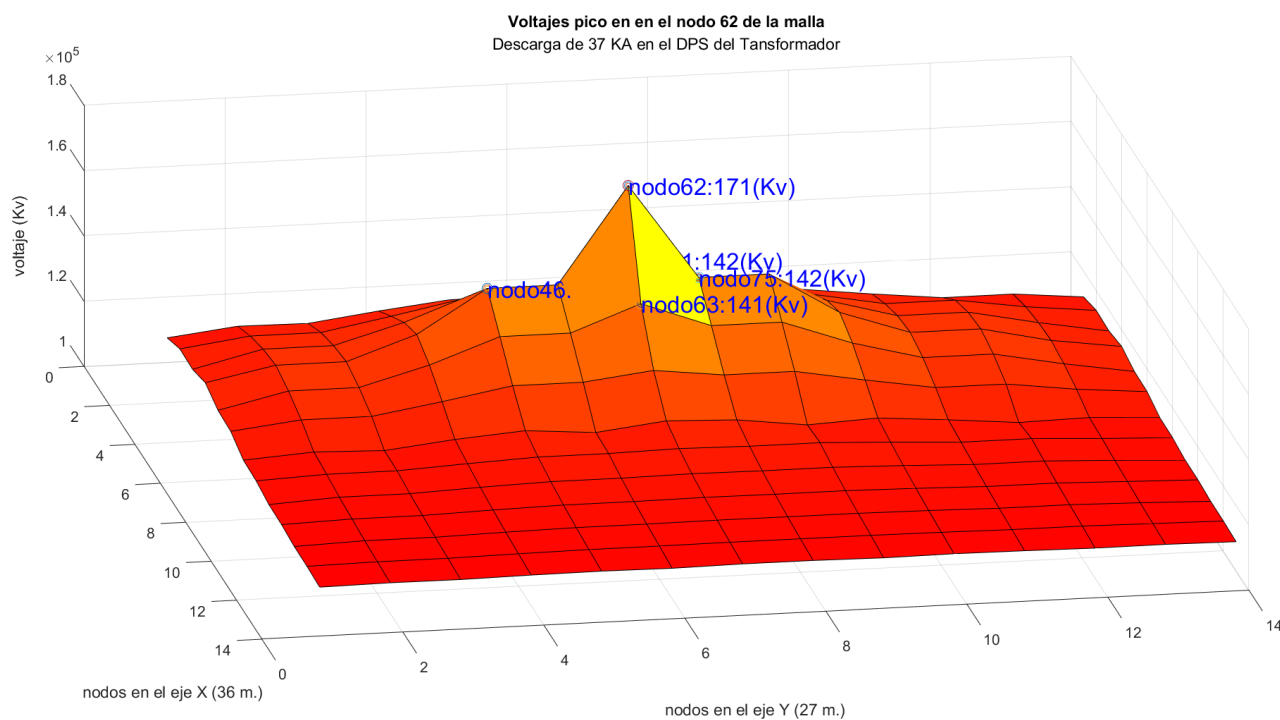


FIGURA B.13: Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 37 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
62	171
61	142
75	142
46	142
63	141

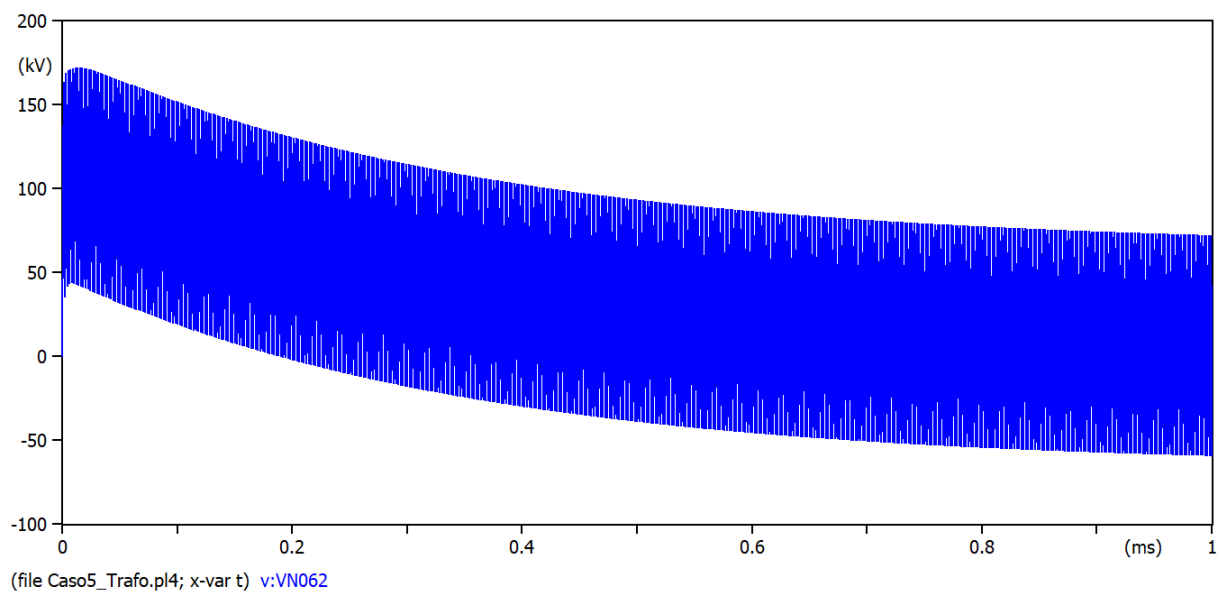


FIGURA B.14: Voltaje en el nodo 62 para el Caso 2, $I_m = 37 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

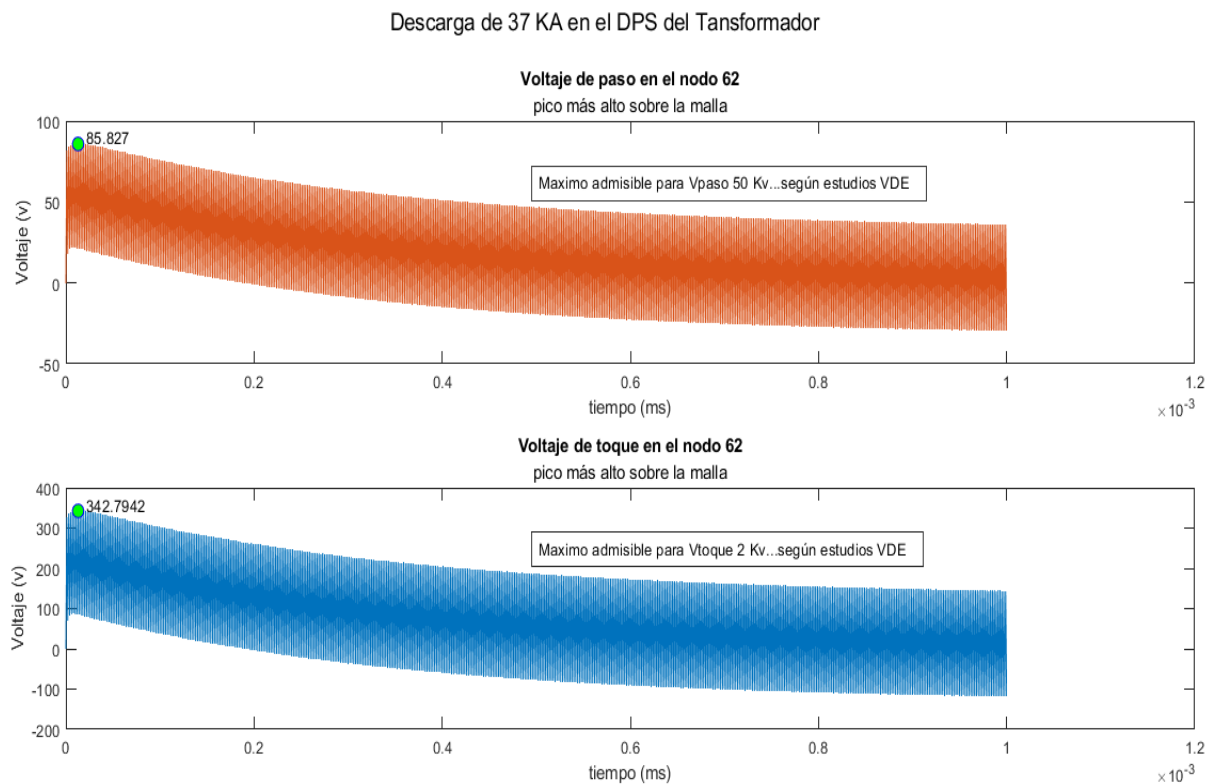


FIGURA B.15: Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 37$ kA
Fuente: Autor.

Resultados del Caso 2 - DPS del transformador, $I_m = 100$ kA

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
62	448
61	370
75	370
46	369
63	367

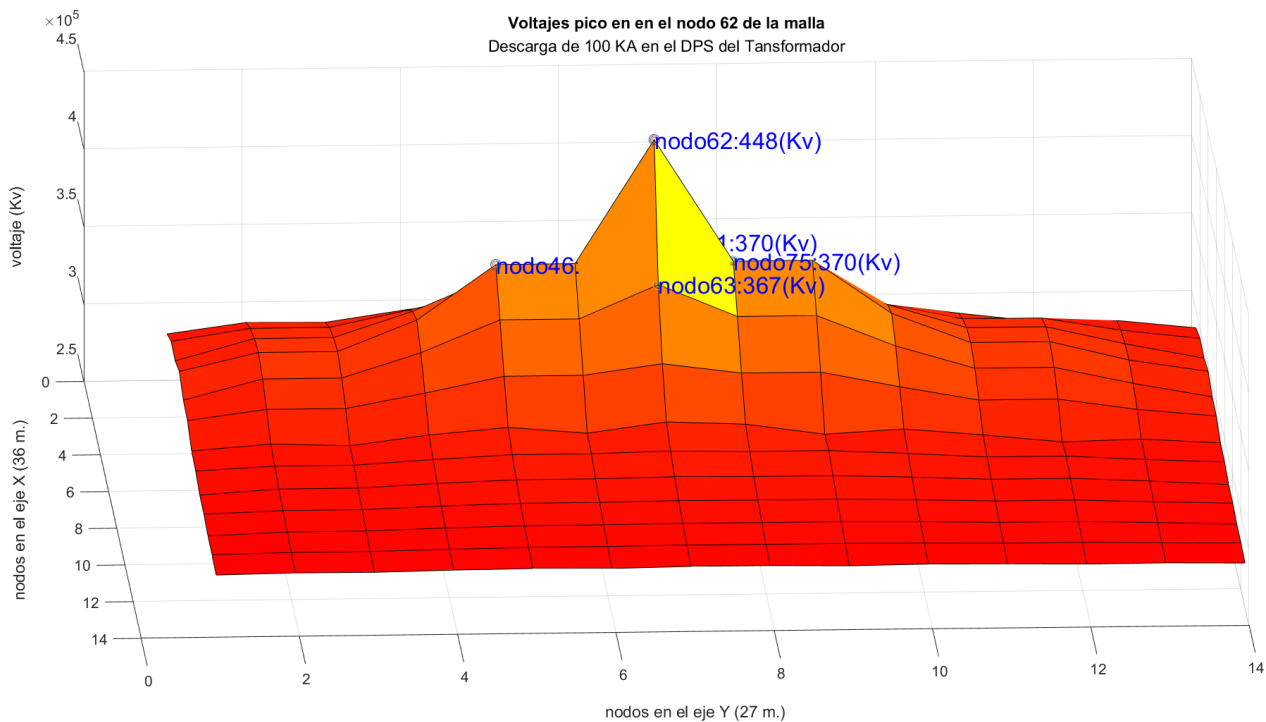


FIGURA B.16: Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

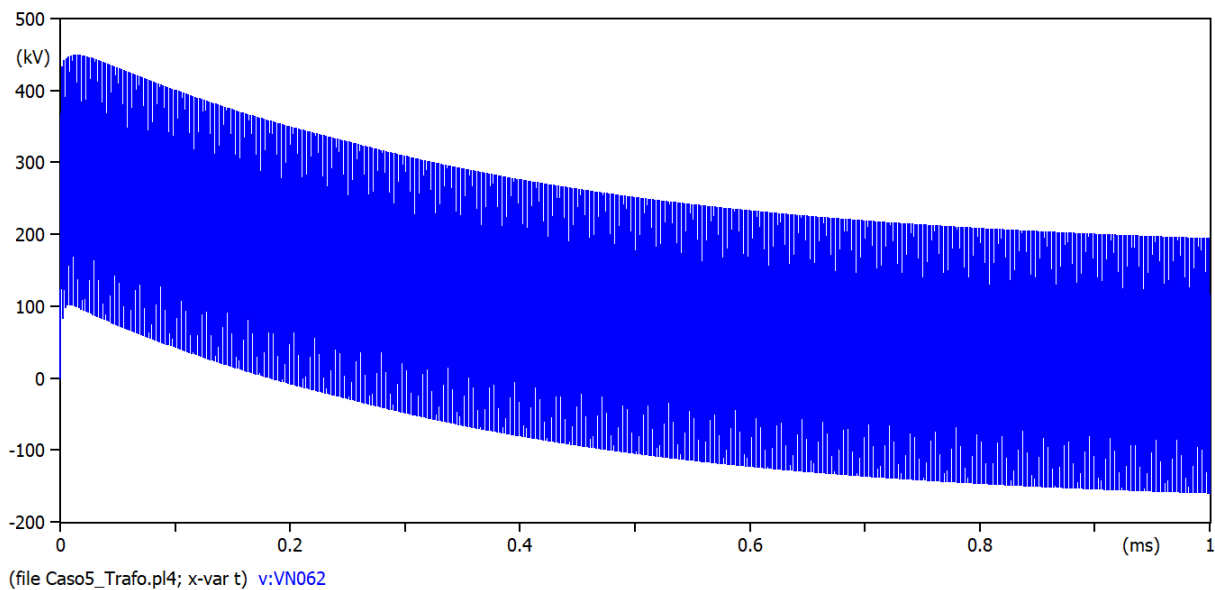


FIGURA B.17: Voltaje en el nodo 62 para el Caso 2, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

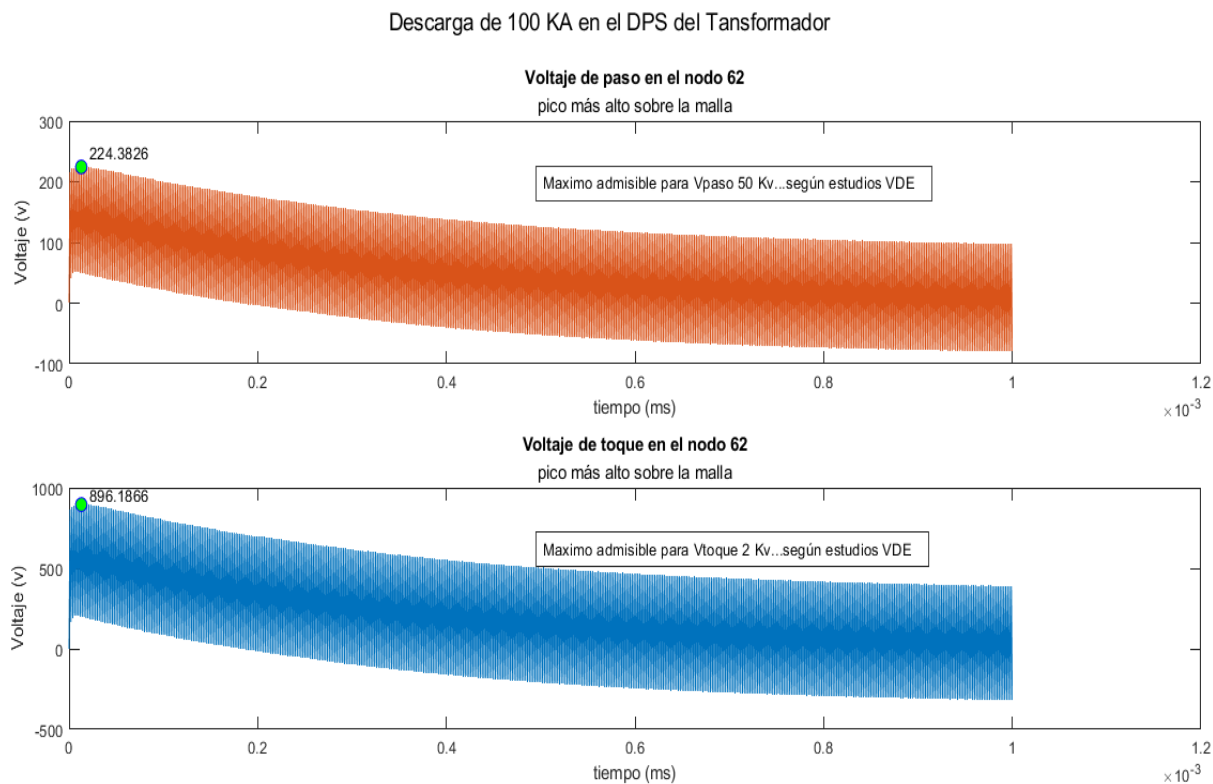


FIGURA B.18: Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 100$ kA
Fuente: Autor.

Resultados del Caso 2 - DPS del transformador, $I_m = 200$ kA

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
62	863
61	707
75	705
46	704
63	699

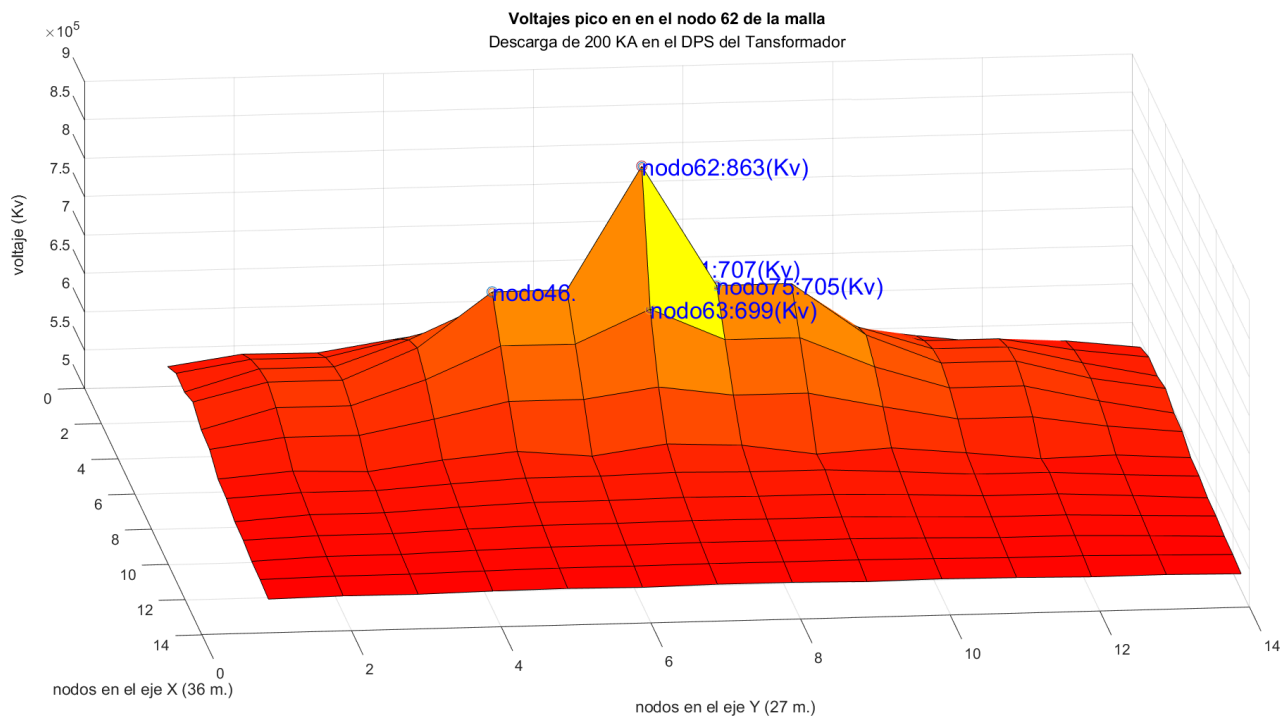


FIGURA B.19: Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 200\text{kA}$
Fuente: Autor.

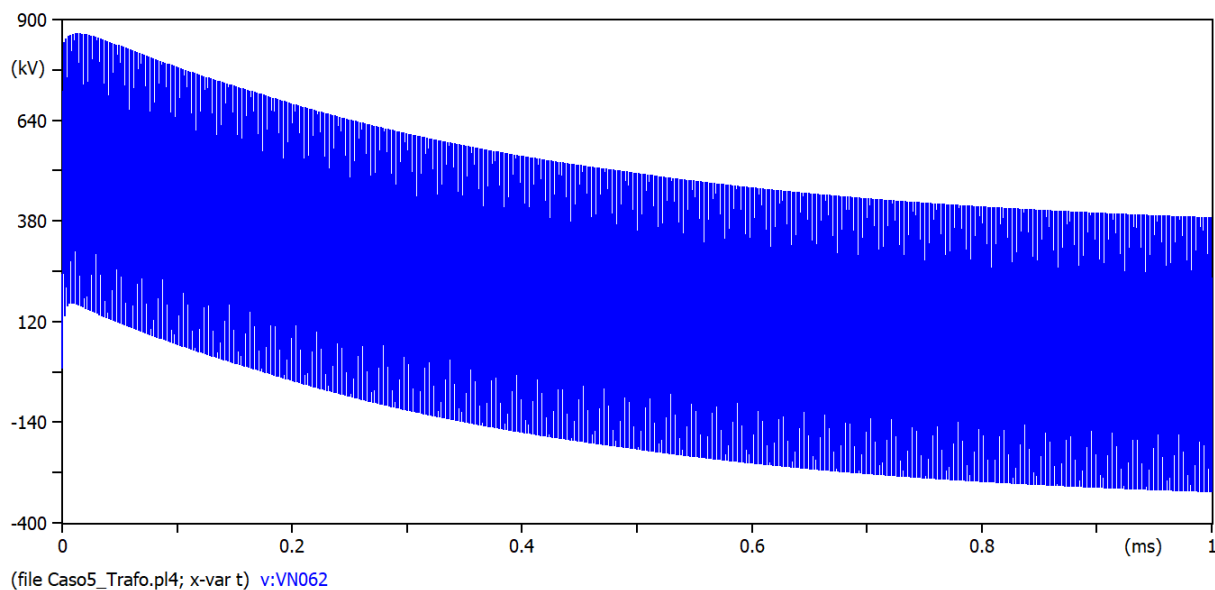


FIGURA B.20: Voltaje en el nodo 62 para el Caso 2, $I_m = 200\text{kA}$
Fuente: Autor.

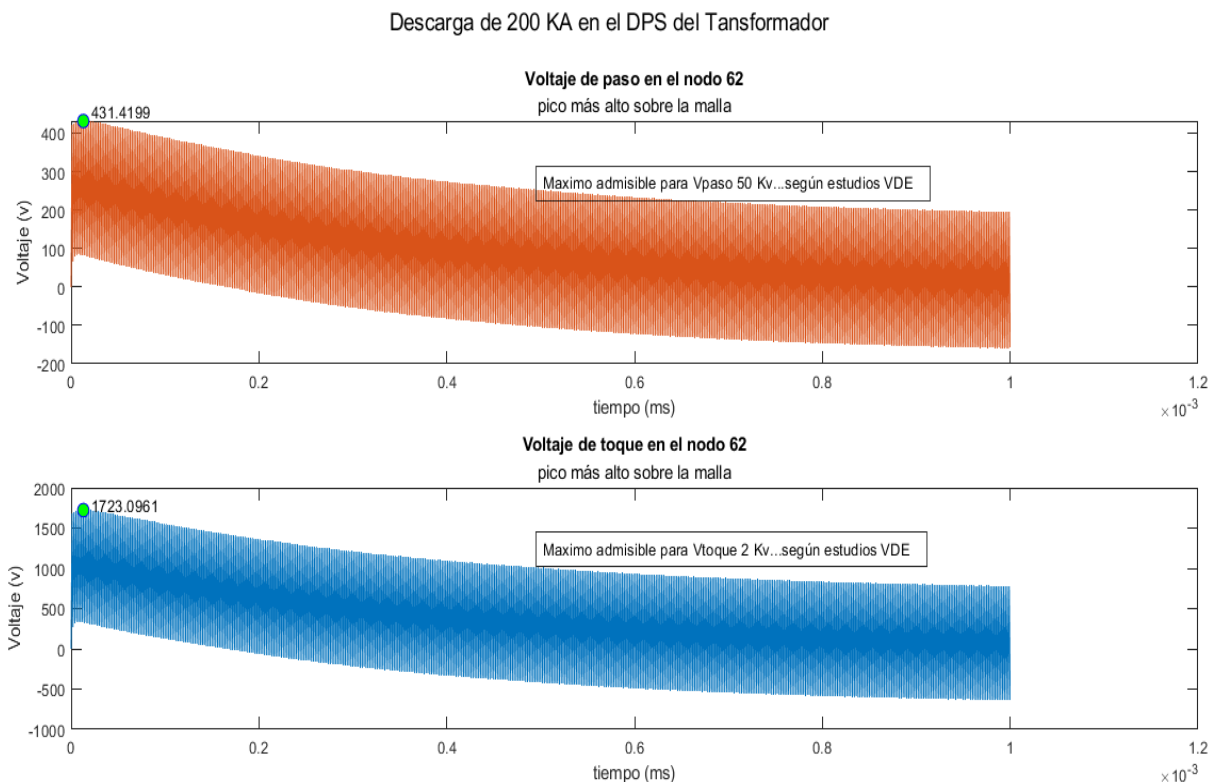


FIGURA B.21: Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 200$ kA

Fuente: Autor.

Caso 3: Bajante de sala de control

En esta sección, se presentan las gráficas detalladas de la distribución de tensiones en la malla de puesta a tierra para el Caso 3: Bajante de sala de control. En el primer escenario, con una corriente pico de 37 kA, se observa que los cinco nodos críticos alcanzan valores de hasta 165 kV. Las representaciones visuales de los voltajes de paso y toque, disponibles en las figuras correspondientes, ofrecen una clara perspectiva de la respuesta del sistema a esta condición. En el segundo escenario, con 100 kA, los nodos críticos presentan valores más elevados, llegando hasta 436 kV. Las gráficas respectivas proporcionan una detallada evolución de los voltajes en la malla de puesta a tierra bajo condiciones más críticas. Estos resultados ofrecen una visión completa del rendimiento del sistema frente a diferentes niveles de corriente de rayo, permitiendo una evaluación detallada de la eficacia y seguridad de la malla de puesta a tierra.

Resultados del Caso 3 - Bajante de sala de control, $I_m = 37 \text{ kA}$

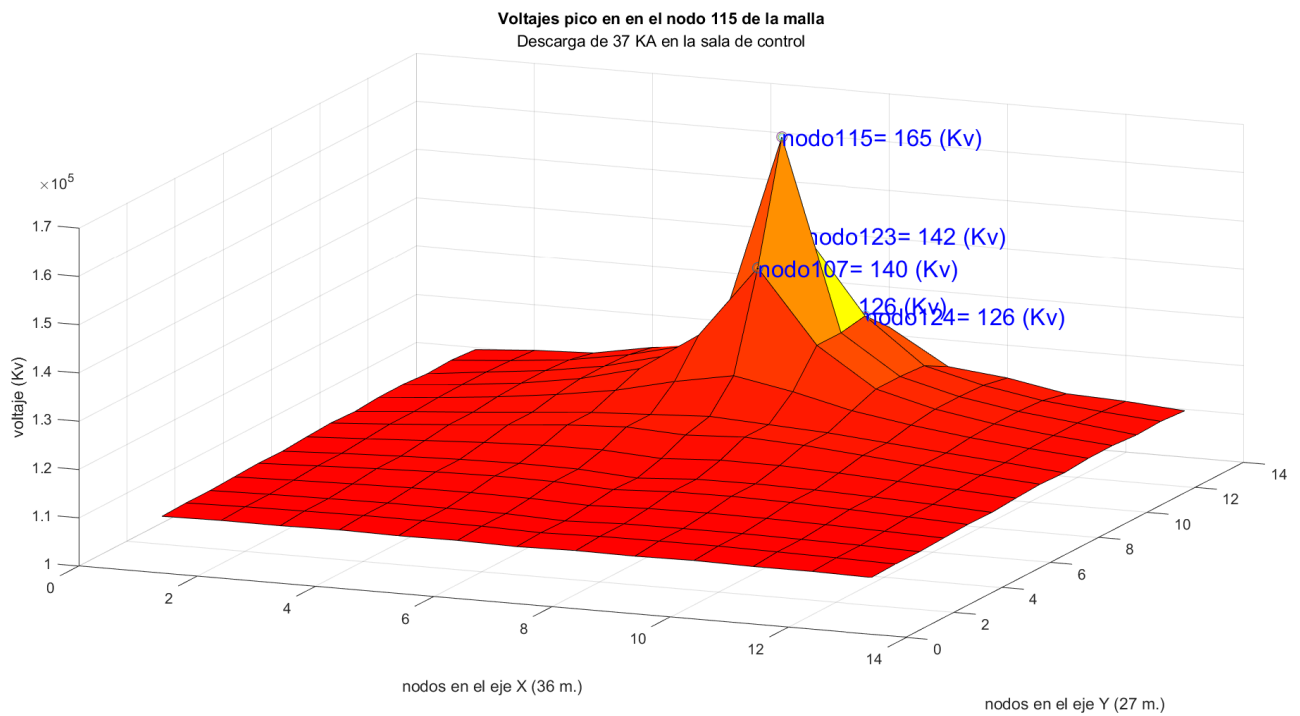


FIGURA B.22: Distribución de tensiones para el Caso 3, $I_m = 37 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
115	165
123	142
107	140
136	126
122	126

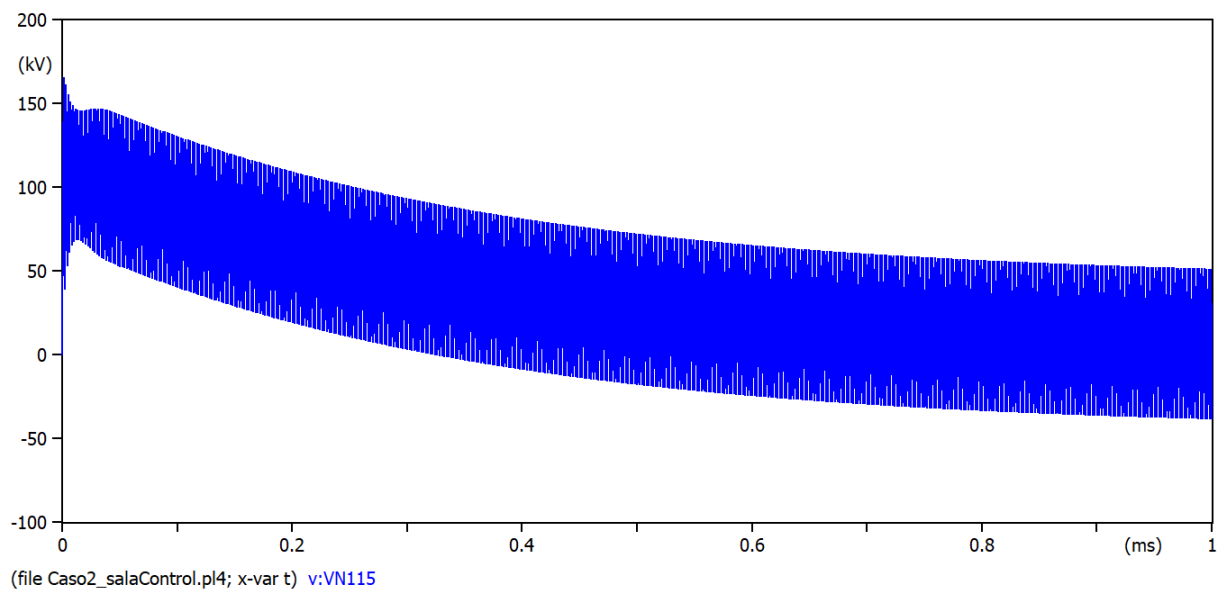


FIGURA B.23: Voltaje en el nodo 115 para el Caso 3, $I_m = 37 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Descarga de 37 KA en la sala de control

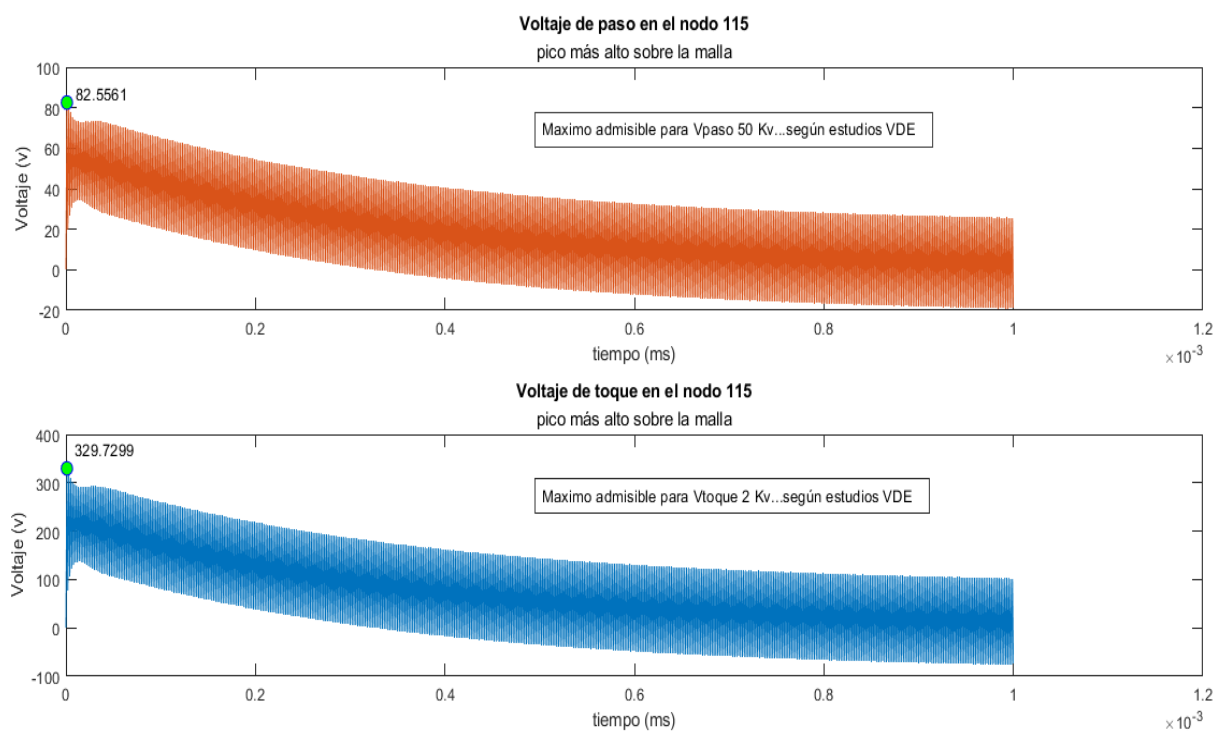


FIGURA B.24: Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 37 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Resultados del Caso 3 - Bajante de sala de control, $I_m = 100 \text{ kA}$

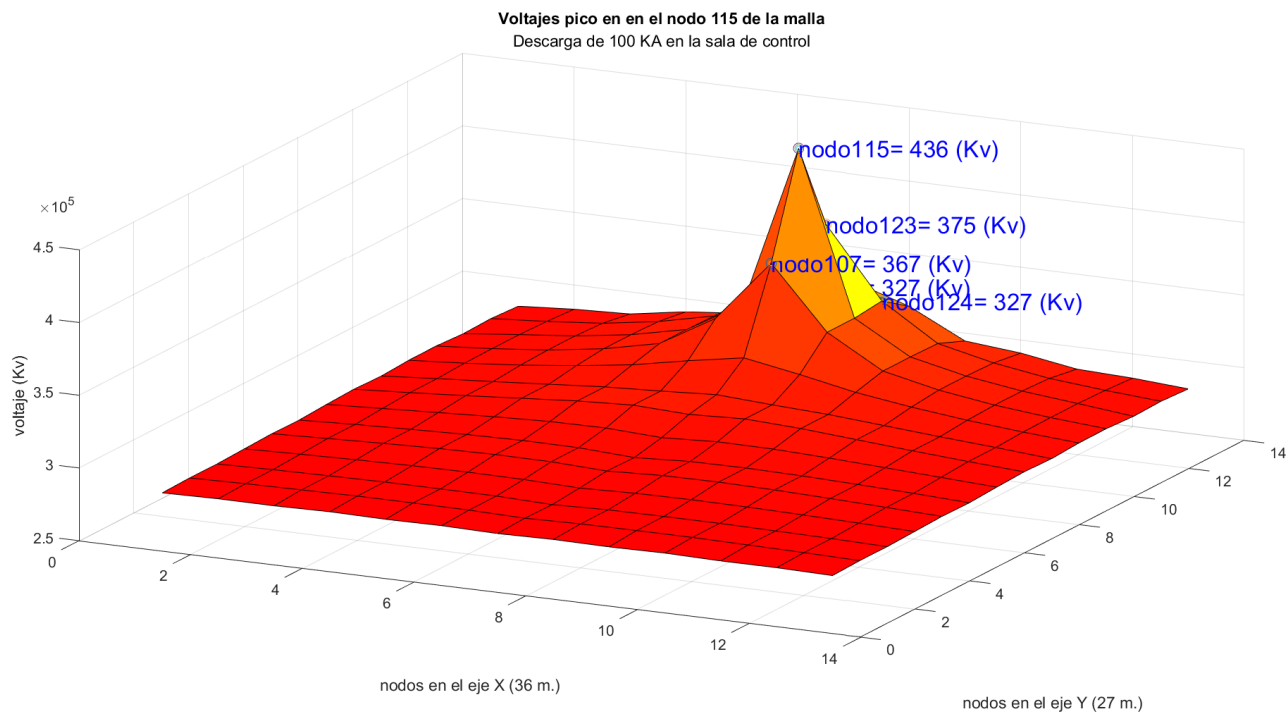


FIGURA B.25: Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 100 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
115	436
123	375
107	367
136	327
122	327

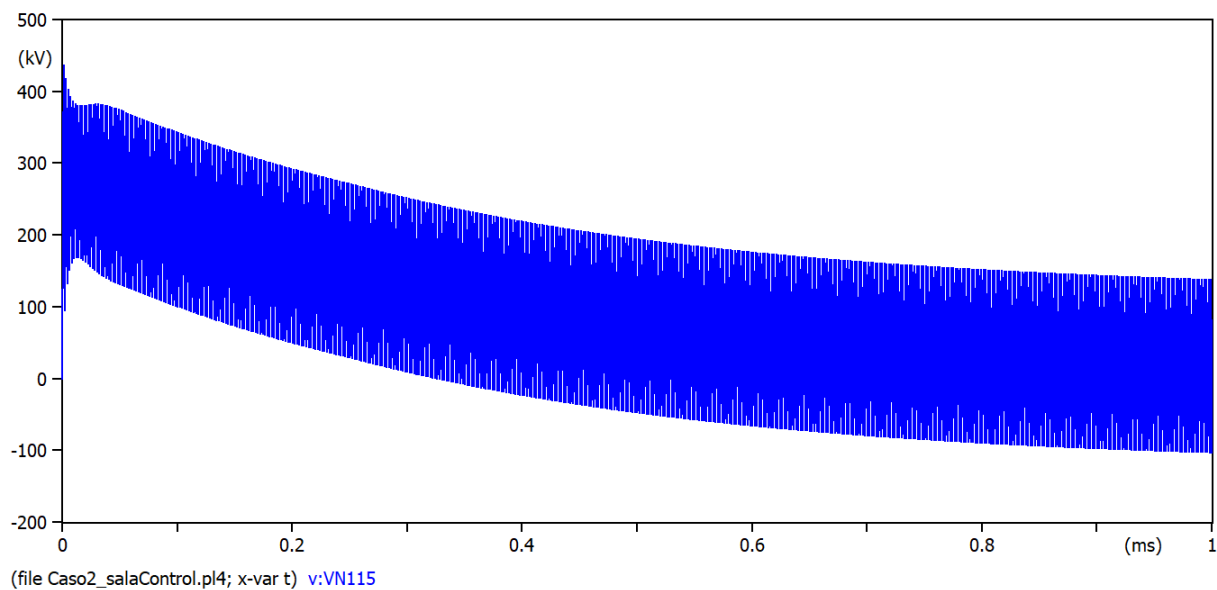


FIGURA B.26: Voltaje en el nodo 115 para el Caso 3, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

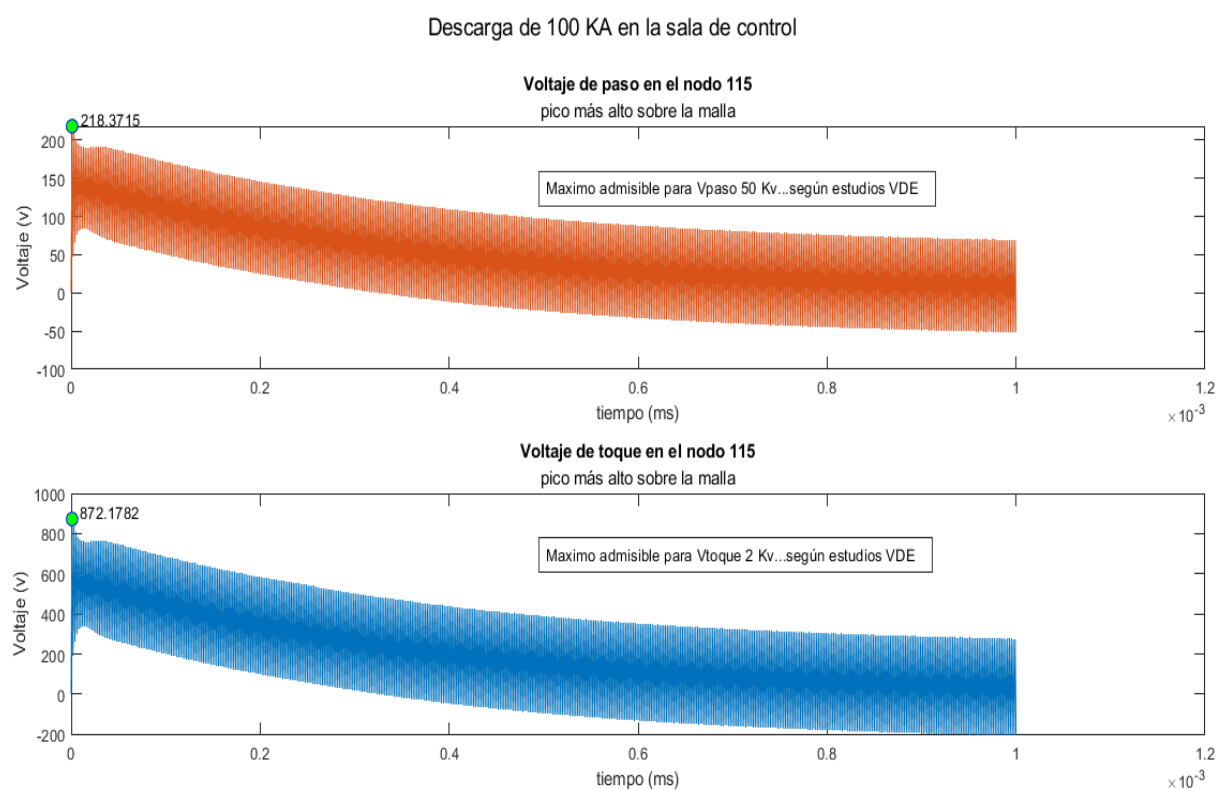


FIGURA B.27: Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

Resultados del Caso 3 - Bajante de sala de control, $I_m = 200 \text{ kA}$

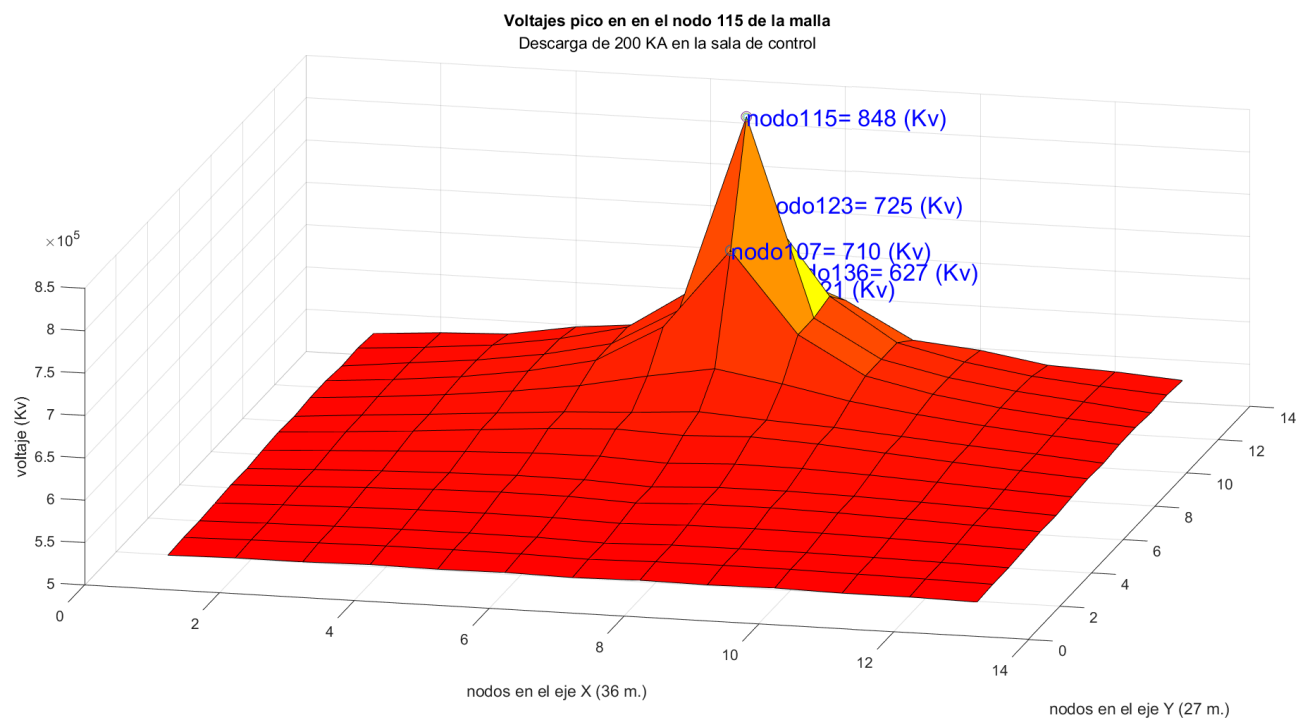


FIGURA B.28: Distribución de tensiones para el Caso 2, $I_m = 200 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
115	848
123	725
107	710
136	627
122	621

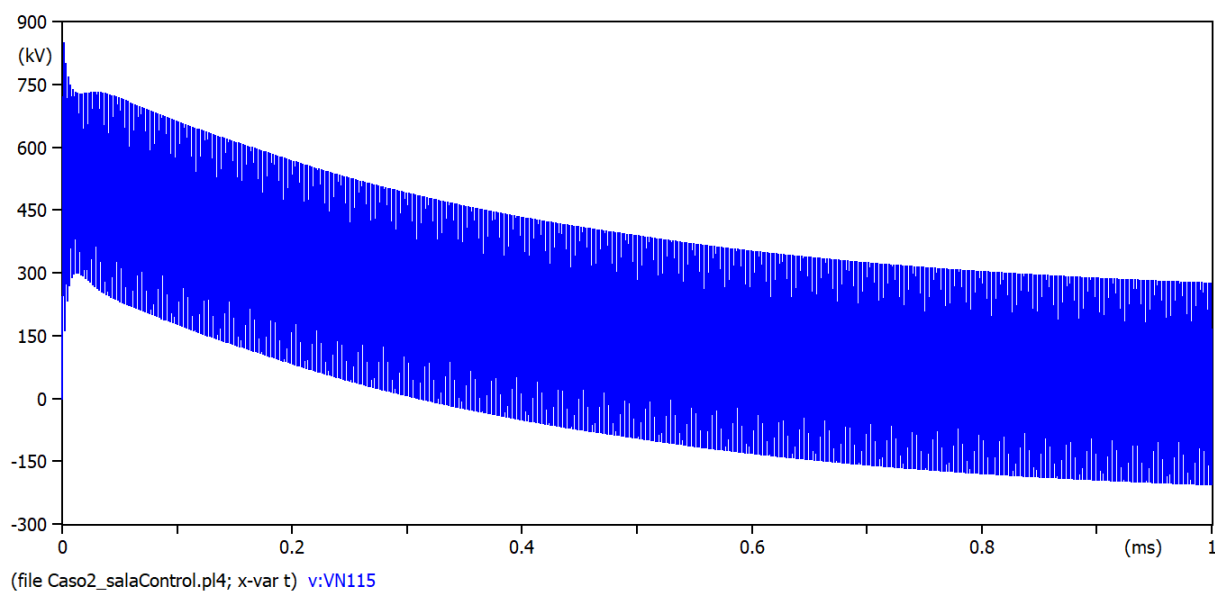


FIGURA B.29: Voltaje en el nodo 115 para el Caso 3, $I_m = 200$ kA
Fuente: Autor.

Descarga de 200 KA en la sala de control

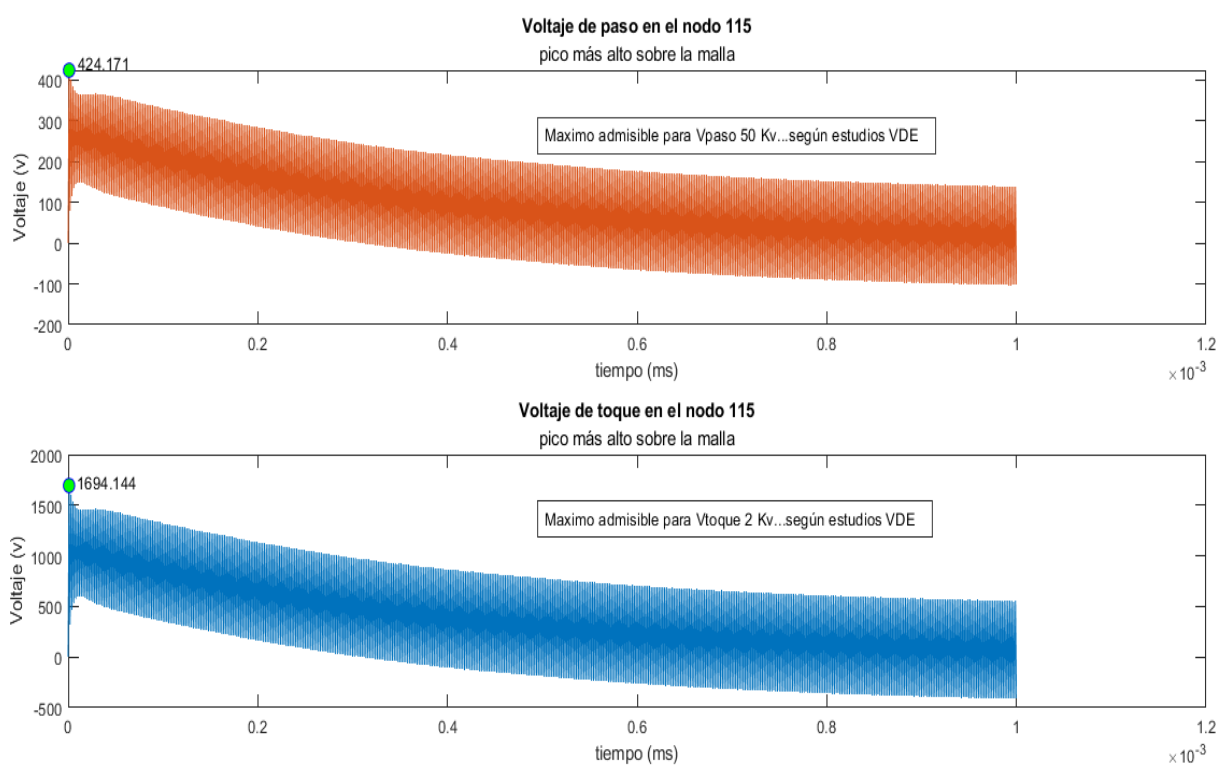


FIGURA B.30: Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 200$ kA
Fuente: Autor.

Caso 4: DPS del alimentador de 13.8 kV

En esta sección, se presentan las gráficas detalladas de la distribución de tensiones en la malla de puesta a tierra para el Caso 4: DPS del alimentador de 13.8 kV. En el primer escenario, con una corriente pico de 37 kA, se observa que los cinco nodos críticos alcanzan valores de hasta 176 kV. Las representaciones visuales de los voltajes de paso y toque, disponibles en las figuras correspondientes, ofrecen una clara perspectiva de la respuesta del sistema a esta condición. En el segundo escenario, con 100 kA, los nodos críticos presentan valores más elevados, llegando hasta 468 kV. Las gráficas respectivas proporcionan una detallada evolución de los voltajes en la malla de puesta a tierra bajo condiciones más críticas. Estos resultados ofrecen una visión completa del rendimiento del sistema frente a diferentes niveles de corriente de rayo, permitiendo una evaluación detallada de la eficacia y seguridad de la malla de puesta a tierra.

Resultados del Caso 4 - DPS del alimentador de 13.8 kV, $I_m = 37 \text{ kA}$

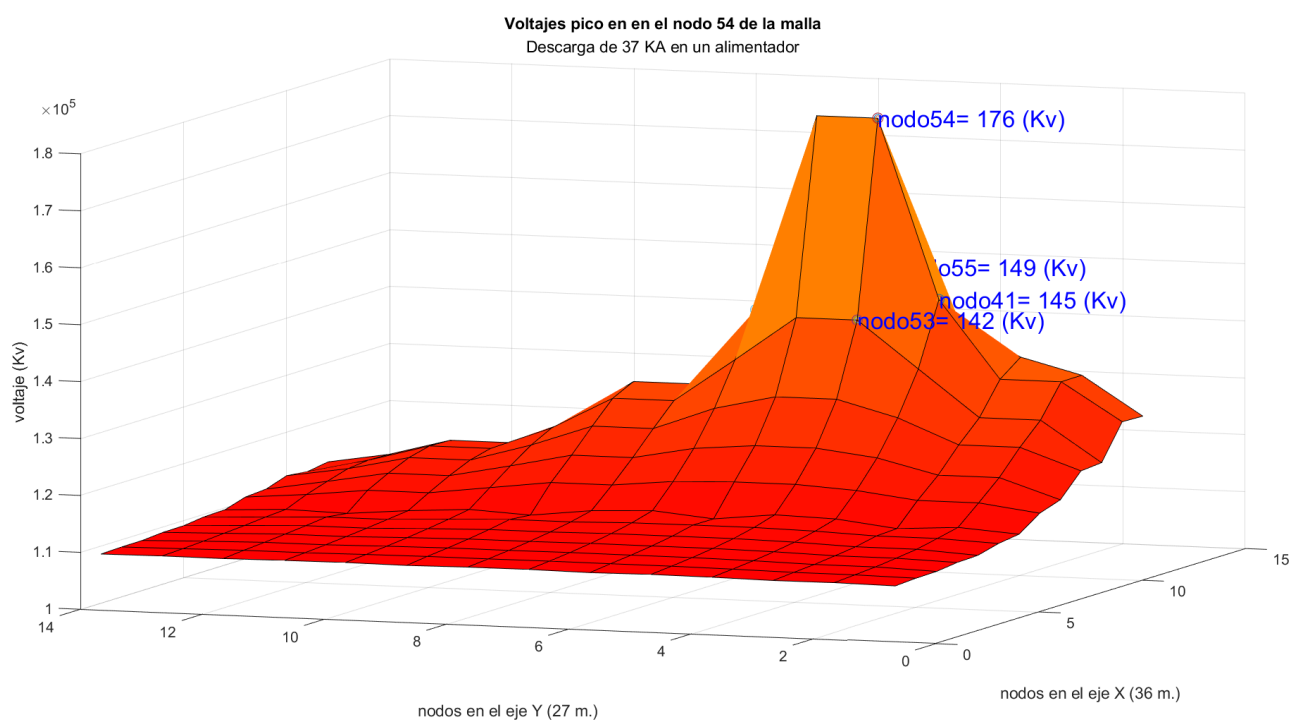


FIGURA B.31: Distribución de tensiones para el Caso 4, $I_m = 37 \text{ kA}$
Fuente: Autor.

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
54	176
55	149
41	145
70	142
58	142

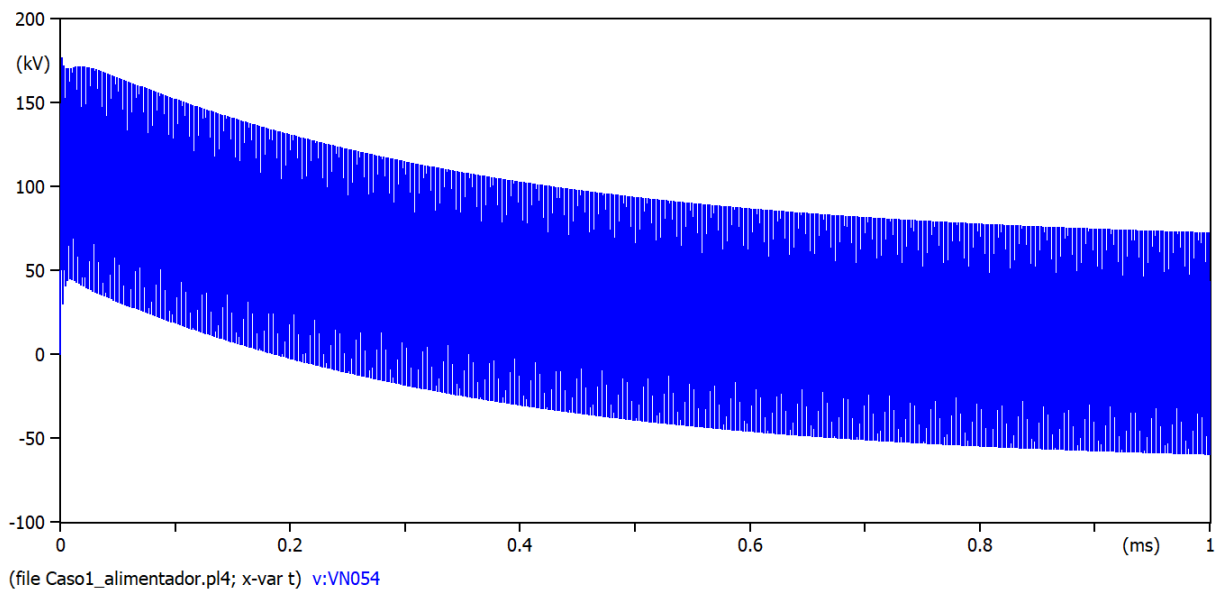


FIGURA B.32: Voltaje en el nodo 54 para el Caso 4, $I_m = 37\text{kA}$
Fuente: Autor.

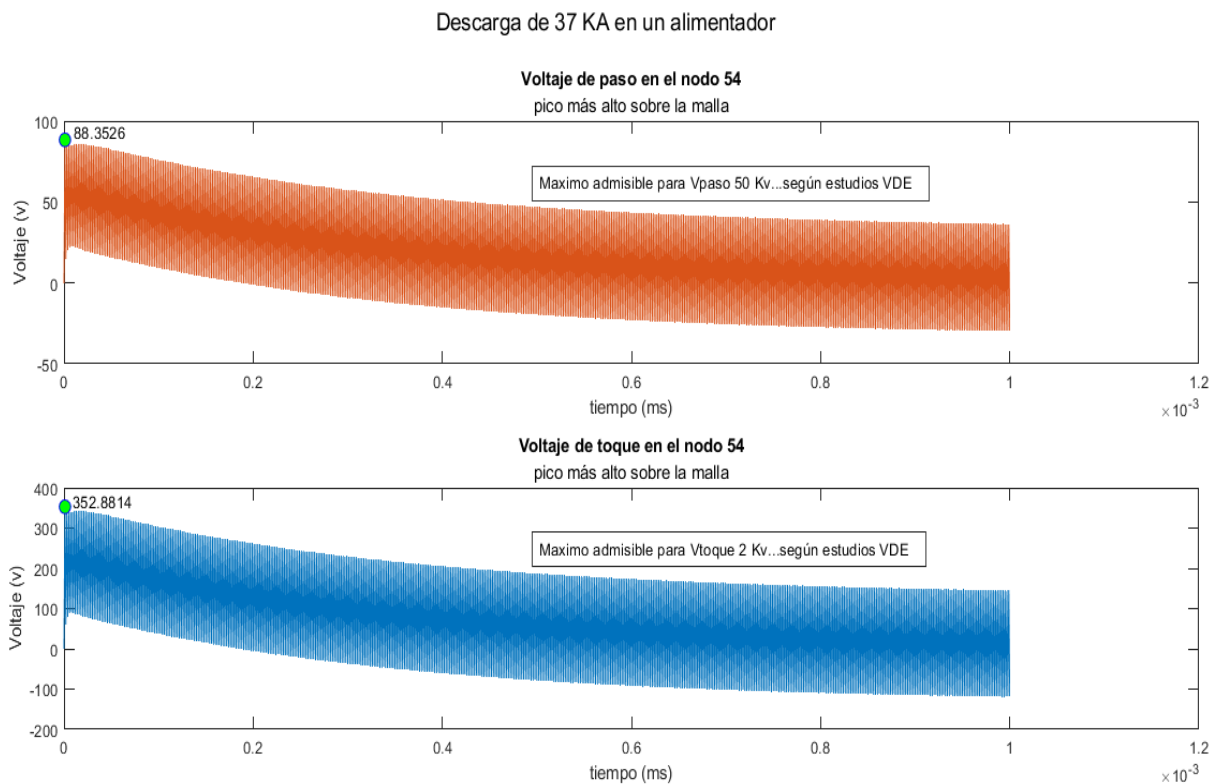


FIGURA B.33: Voltajes de toque y paso para el Caso 2, $I_m = 37$ kA
Fuente: Autor.

Resultados del Caso 4 - DPS del alimentador de 13.8 kV, $I_m = 100$ kA

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
54	468
55	394
41	383
70	375
58	374

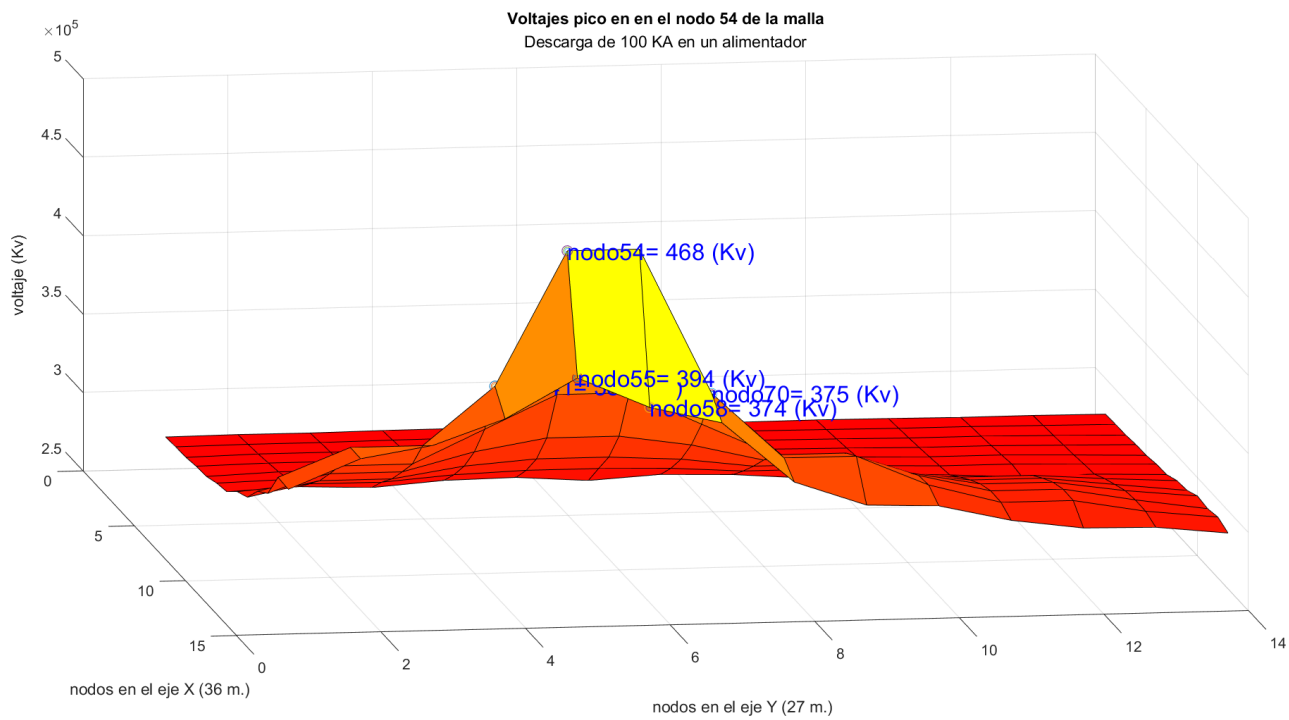


FIGURA B.34: Distribución de tensiones para el Caso 4, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

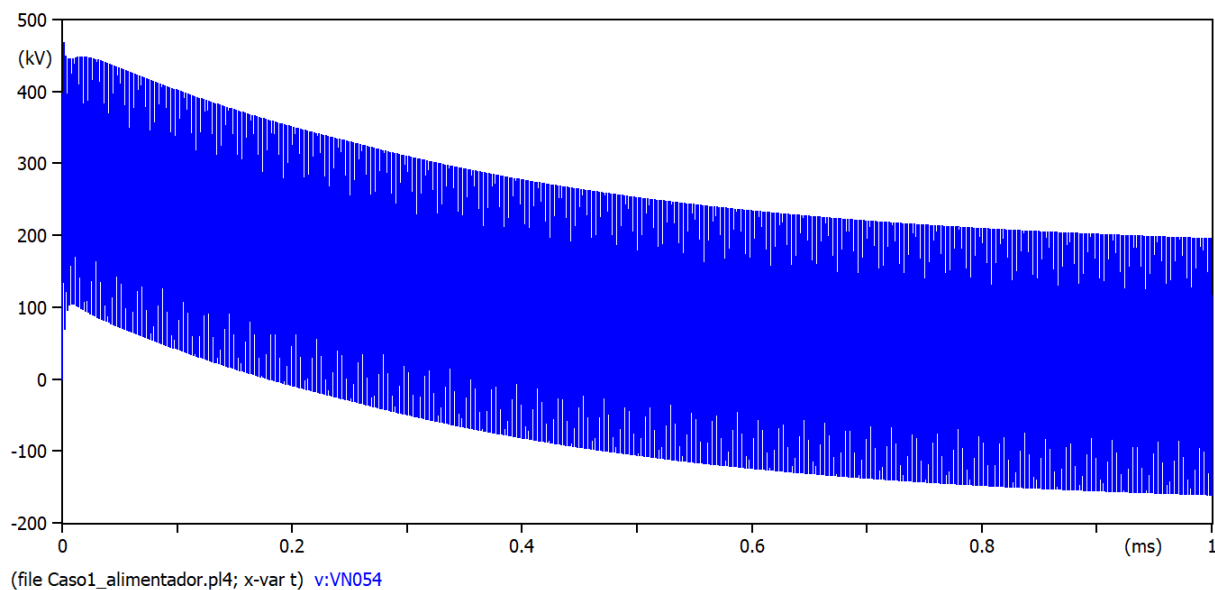


FIGURA B.35: Voltaje en el nodo 54 para el Caso 4, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

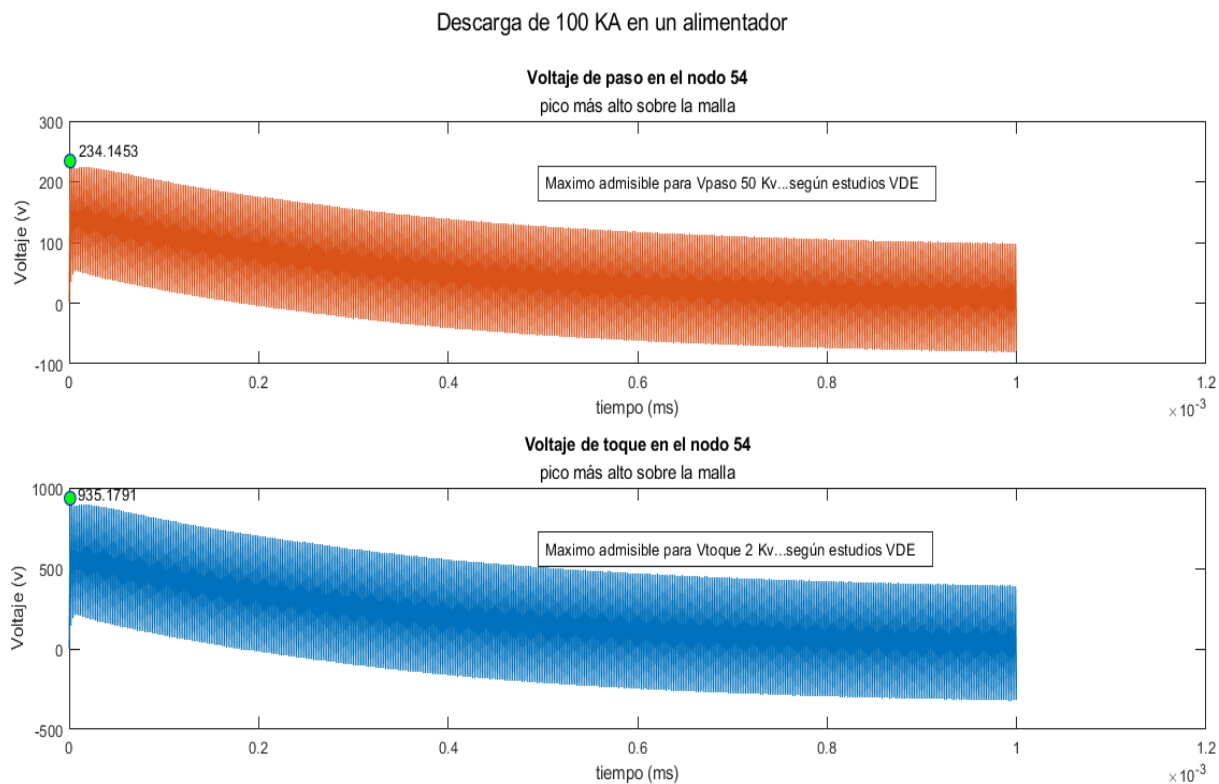


FIGURA B.36: Voltajes de toque y paso para el Caso 4, $I_m = 100\text{kA}$
Fuente: Autor.

Resultados del Caso 4 - DPS del alimentador de 13.8 kV, $I_m = 200\text{kA}$

Los cinco mayores voltajes pico (kV)

Nodo N°	Potencial (kV)
54	910
55	762
41	740
70	724
58	722

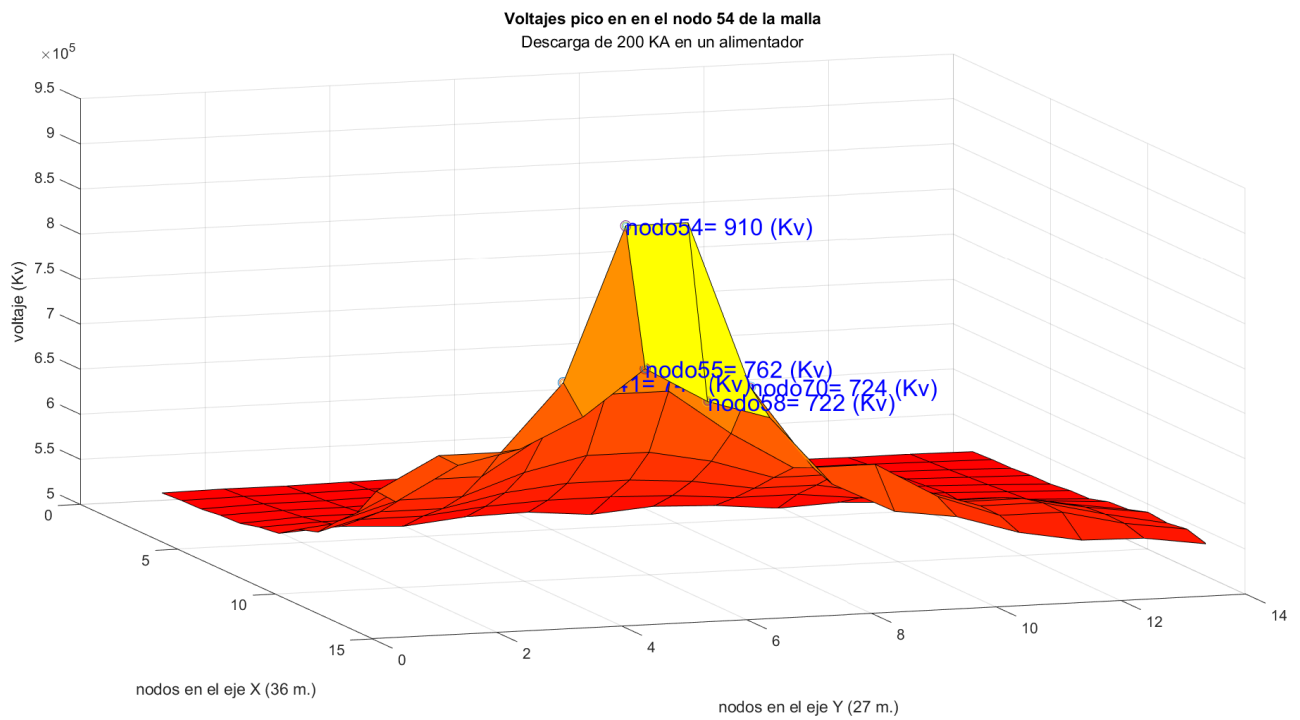


FIGURA B.37: Distribución de tensiones para el Caso 4, $I_m = 200\text{kA}$
Fuente: Autor.

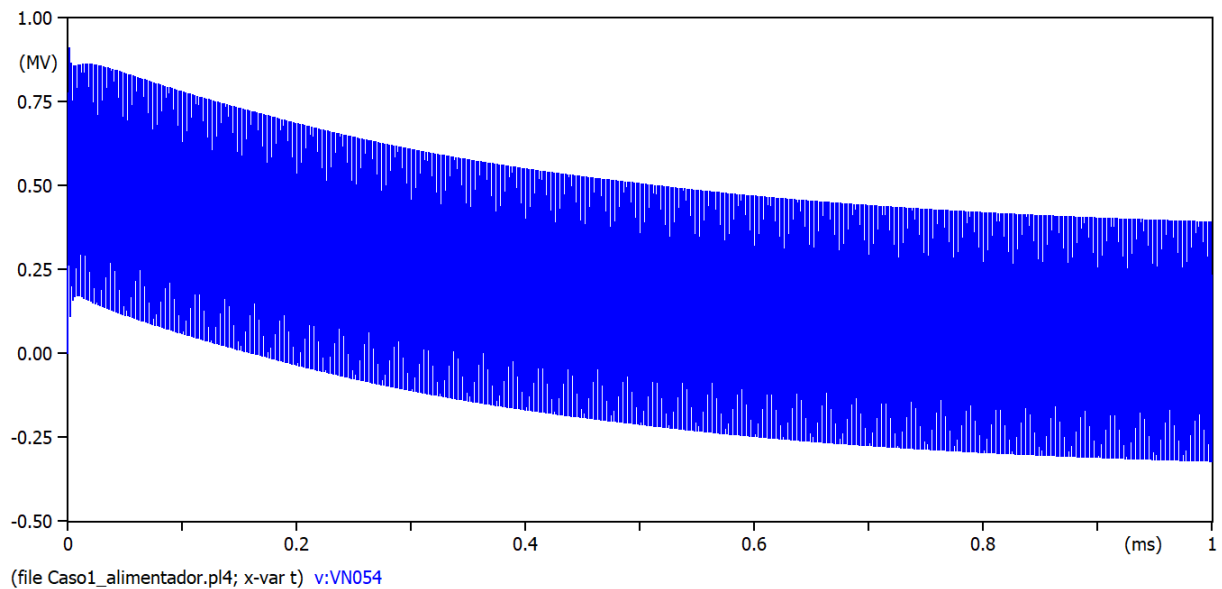


FIGURA B.38: Voltaje en el nodo 54 para el Caso 4, $I_m = 200\text{kA}$
Fuente: Autor.

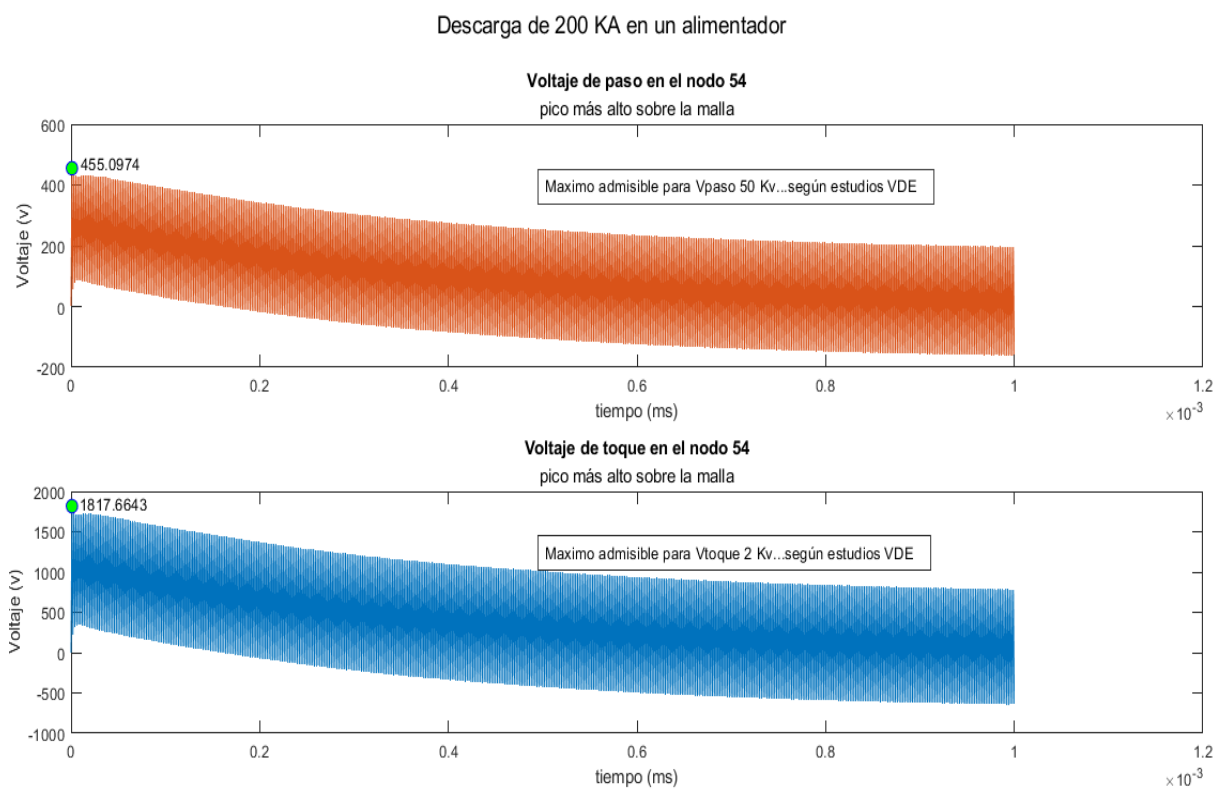


FIGURA B.39: Voltajes de toque y paso para el Caso 4, $I_m = 200\text{kA}$
Fuente: Autor.