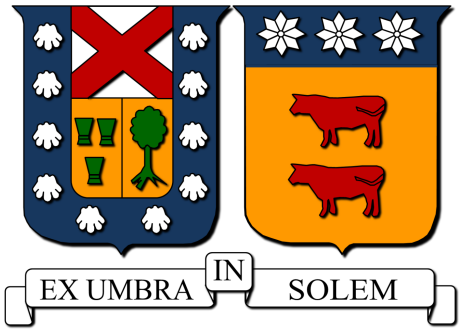
Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Valparaíso, Chile



Modelado de electrodos magnetoactivos en sistemas de puesta a tierra de media y baja tensión mediante elementos finitos

Alan Rodríguez Ayala

2026

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Electricista

Profesor Guía:
Dr. Johny Montaña (UTFSM)

Comisión:
Dr. Alejandro Angulo (UTFSM)

Valparaíso, 25 de septiembre de 2026.

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Modelado de electrodos magnetoactivos en sistemas de puesta a tierra de media y baja tensión mediante elementos finitos

Nombre del candidato(a): Alan Leroy Rodríguez Ayala

Carrera / Grado: Ingeniería Eléctrica / Ingeniero Electricista

Campus: Casa Central, Valparaíso **Departamento:** Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Johny Montaña Chaparro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

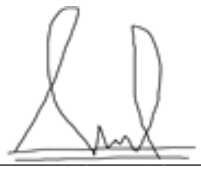
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis: Johny Montaña

Fecha: 6-10-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a): Alan Rodriguez

Fecha: 6-10-2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia. Gracias por apoyarme de manera incondicional en la compleja decisión de volver a las aulas luego de años de ejercer mi antigua profesión. Su confianza en mi capacidad para reinventarme y dar el paso de dejar atrás mi carrera militar, fue el pilar que me dio la fuerza para enfrentar este gran desafío académico.

A mis amigos, por estar siempre presentes, brindándome su apoyo constante y siendo un espacio de escucha en los momentos que más lo necesité. Quisiera hacer una mención especial a Doris y Kathya, quienes me han acompañado de cerca durante la mayor parte de este largo y exigente proceso, entregándome su consejo y compañía.

Quisiera extender mi gratitud a mi profesor guía, el Dr. Johny Montaña, por haberme brindado la oportunidad de trabajar en el desarrollo de este tema de investigación. Agradezco sinceramente su orientación constante, su disposición y la guía que recibí para llevar a buen término la realización de esta memoria.

Finalmente, agradezco a Eugenio Lena y Fabiola Meneses por brindar apoyo en la entrega de información y la explicación del funcionamiento de los electrodos, y, en general, a todas las personas que, de una u otra forma, me han acompañado y me han entregado una palabra de aliento en este camino. Sin el apoyo de cada uno de ustedes, alcanzar esta meta simplemente no habría sido posible.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos I

Índice de Figuras III

Índice de Tablas IX

Resumen 1

1. Introducción 2
- **1.1. Motivación.** 2
- **1.2. Objetivo general.** 3
- **1.3. Objetivos específicos.** 3

2. Marco Teórico 4
- **2.1. Sistemas de puesta a tierra.** 4
- **2.2. Normativas aplicables a los sistemas de puesta a tierra.** 5
- **2.3. Modelado de sistemas de puesta a tierra.** 6
- **2.4. Impedancia dependiente de frecuencia en sistemas de puesta a tierra.** 11
- **2.5. Electrodos Magnetoactivos.** 13

3. Metodología 16
- **3.1. Enfoque general de la investigación.** 16
- **3.2. Modelamiento en COMSOL Multiphysics.** 17
- **3.3. Modelamiento en ATPDraw.** 31

4. Resultados y análisis 33
- **4.1. Electrodo cónico con cemento conductor.** 33
- **4.2. Electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.** 37
- **4.3. Comparativa tensiones entre configuración sin y con cámara dieléctrica del electrodo cónico.** 40
- **4.4. Electrodo péndulo con cemento conductor.** 41
- **4.5. Electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica.** 44
- **4.6. Comparativa tensiones entre configuración sin y con cámara dieléctrica del electrodo péndulo.** 46
- **4.7. Implementación de electrodos en una malla de puesta a tierra.** 48
- **4.8. Simulación de ferritas en ATPDraw.** 54

5. Conclusiones 63

6. Trabajo futuro **65**

Apéndices **66**

A. Figuras, gráficas y tablas de COMSOL Multiphysics **66**
A.1. Trazados de líneas de evaluación. **66**
A.2. Electrodo cónico con cemento conductor. **68**
A.3. Electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. . . **72**
A.4. Tensiones en superficie entre configuración sin y con cámara dieléctrica del electrodo cónico. **77**
A.5. Electrodo péndulo con cemento conductor. **79**
A.6. Electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica. . **83**
A.7. Tensiones en superficie entre configuración sin y con cámara dieléctrica del electrodo péndulo. **87**
A.8. Mallas puesta a tierra. **89**

B. Figuras y gráficas sobre modelo de ferritas **92**
B.1. Gráficas de comportamiento de la impedancia en ferritas. **93**
B.2. comparativa de la impedancia obtenida frente a la curva original y respuesta en frecuencia. **94**
B.3. Señales de entrada a frecuencia industrial. **94**

C. Códigos MATLAB **96**

Bibliografía **101**

Índice de Figuras

3.1. Geometría tridimensional del dominio de suelo utilizado para la simulación individual de un electrodo de disipación vertical de alta eficiencia. La envolvente lateral e inferior corresponde a la región asignada al dominio de elementos infinitos. 20
3.2. Geometría tridimensional del dominio de suelo utilizado para las configuraciones que incorporan una malla de puesta a tierra. La envolvente lateral e inferior corresponde a la región asignada al dominio de elementos infinitos. . 20
3.3. Geometría del electrodo tipo cónico. 21
3.4. Geometría del electrodo tipo péndulo. 21
3.5. Geometría del electrodo tipo cónico con cemento conductor. 22
3.6. Geometría del electrodo tipo péndulo con cemento conductor. 22
3.7. Geometría del electrodo tipo cónico con cámara dieléctrica. 22
3.8. Geometría del electrodo tipo péndulo con cámara dieléctrica. 22
3.9. Mallado del dominio computacional correspondiente a la simulación individual de un electrodo de disipación vertical de alta eficiencia. (A): Visión general. (B): Visión ampliada. 29
3.10. Mallado del dominio computacional correspondiente a una malla de puesta a tierra. (A): Visión general. (B): Visión ampliada. 29

4.1. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A]. 34
4.2. Comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A]. 35
4.3. Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo cónico con cemento conductor. 35
4.4. Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra para modelo electrodo cónico con cemento conductor. 36
4.5. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A]. . . 37
4.6. Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. 39
4.7. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. (A): Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. (B): Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 1000 [A]. 40
4.8. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A]. 41

4.9. Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra para modelo electrodo péndulo con cemento conductor. 43
4.10. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A]. . . 44
4.11. Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica. 45
4.12. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. (A): Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. (B): Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 1000 [A]. 46
4.13. Puntos y distancia de evaluación general en superficie de las variables en los distintos casos de mallas definidos en la sección 3.2.3.d. 48
4.14. Ubicación de las distancias utilizadas para la evaluación de tensiones de paso y contacto según los casos de mallas definidos en la sección 3.2.3.d. . . 48
4.15. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para los distintos casos de mallas analizadas. 49
4.16. Tensiones de paso en las según las distancias escogidas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas simuladas. 51
4.17. Tensiones de contacto en las según las distancias escogidas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas simuladas. 53
4.18. Modelo Foster modificado de la ferrita con sus 4 etapas implementado en ATPDraw. 54
4.19. Comparativa de modelo Foster obtenido con dato del fabricante ferrita MnZn tipo 75. 55
4.20. Respuesta en frecuencia de modelo Foster para ferrita MnZn tipo 75 en ATPDraw. 55
4.21. Comparativa de modelo Foster obtenido con dato del fabricante ferrita MnZn tipo 73. 55
4.22. Respuesta en frecuencia de modelo Foster para ferrita MnZn tipo 73 en ATPDraw. 55
4.23. Comparativa de modelo Foster obtenido con dato del fabricante ferrita NiZn tipo 43. 56
4.24. Respuesta en frecuencia de modelo Foster para ferrita NiZn tipo 43 en ATPDraw. 56
4.25. Circuito eléctrico implementado en ATPDraw para el análisis de tensiones industriales. 57
4.26. Circuito eléctrico implementado en ATPDraw para el análisis de corrientes industriales. 57
4.27. Respuesta del sistema frente señal de frecuencia industrial.(A): Tensiones. (B): Corrientes. 58
4.28. Circuito eléctrico implementado en ATPDraw para el análisis de tensiones en alta frecuencia. 59
4.29. Circuito eléctrico implementado en ATPDraw para el análisis de corrientes en alta frecuencia. 59
4.30. Respuesta del sistema con ferrita MnZn tipo 75 frente a señal de alta frecuencia.(A): Tensiones. (B): Corrientes. 59
4.31. Respuesta del sistema con ferrita MnZn tipo 73 frente a señal de alta frecuencia.(A): Tensiones. (B): Corrientes. 60

4.32. Respuesta del sistema con ferrita NiZn tipo 43 frente a señal de alta frecuencia.(A): Tensiones. (B): Corrientes. 61

A.1. Trazado de evaluación horizontal. [A]: Electrodo cónico. [B]: Electrodo péndulo. 66
A.2. Trazado de evaluación horizontal con cámara dieléctrica. [A]: Electrodo cónico. [B]: Electrodo péndulo. 67
A.3. Trazado de evaluación vertical. [A]: Electrodo cónico. [B]: Electrodo péndulo. 67
A.4. Trazado de evaluación vertical con cámara dieléctrica. [A]: Electrodo cónico. [B]: Electrodo péndulo. 68
A.5. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 100 [A]. 68
A.6. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 250 [A]. 69
A.7. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 500 [A]. 69
A.8. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A]. 70
A.9. Comportamiento de la temperatura encontrada en superficie para modelo electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla 1000 [A]. 70
A.10. Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en la superficie para modelo electrodo cónico con cemento conductor. 70
A.11. Comportamiento de la máxima elevación de temperatura electrodo cónico con cemento conductor. 71
A.12. Comportamiento del GPR encontrado para modelo electrodo cónico con cemento conductor. 71
A.13. Comportamiento de la resistencia puesta a tierra para modelo electrodo cónico con cemento conductor. 72
A.14. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 100 [A]. . . . 72
A.15. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 250 [A]. . . . 73
A.16. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 500 [A]. . . . 73
A.17. Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A]. . . 74
A.18. Comportamiento de la temperatura encontrada en superficie para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla 1000 [A]. 74
A.19. Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en la superficie para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. . 74
A.20. Comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A]. 75
A.21. Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. 75

A.22.Comportamiento de la máxima elevación de temperatura electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. 75
A.23.Comportamiento del GPR encontrado para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. 76
A.24.Comportamiento de la resistencia puesta a tierra para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. 76
A.25.Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 100 [A]. 77
A.26.Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 250 [A]. 77
A.27.Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 500 [A]. 78
A.28.Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 1000 [A]. 78
A.29.Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 100 [A]. 79
A.30.Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 250 [A]. 79
A.31.Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 500 [A]. 80
A.32.Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A]. 80
A.33.Comportamiento de la temperatura encontrada en superficie para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla 1000 [A]. . . . 81
A.34.Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en la superficie para modelo electrodo péndulo con cemento conductor. 81
A.35.Comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A]. 81
A.36.Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo péndulo con cemento conductor. 81
A.37.Comportamiento del GPR encontrado para modelo electrodo péndulo con cemento conductor. 82
A.38.Comportamiento de la resistencia puesta a tierra para modelo electrodo péndulo con cemento conductor. 82
A.39.Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 100 [A]. . . . 83
A.40.Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 250 [A]. . . . 83
A.41.Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 500 [A]. . . . 84
A.42.Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A]. . . 84

A.43. Comportamiento de la temperatura encontrada en superficie para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla 1000 [A]. 85
A.44. Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en la superficie para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica. 85
A.45. Comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A]. 85
A.46. Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica. 85
A.47. Comportamiento del GPR encontrado para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica. 86
A.48. Comportamiento de la resistencia puesta a tierra para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica. 86
A.49. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. [1] Resistividades de 500 y 1000 [$\Omega \cdot m$]. [2] Resistividades de 2500 y 5000 [$\Omega \cdot m$]. Ambos con corriente de falla de 100 [A]. 87
A.50. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. [1] Resistividades de 500 y 1000 [$\Omega \cdot m$]. [2] Resistividades de 2500 y 5000 [$\Omega \cdot m$]. Ambos con corriente de falla de 250 [A]. 87
A.51. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. [1] Resistividades de 500 y 1000 [$\Omega \cdot m$]. [2] Resistividades de 2500 y 5000 [$\Omega \cdot m$]. Ambos con corriente de falla de 500 [A]. 88
A.52. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. [1] Resistividades de 500 y 1000 [$\Omega \cdot m$]. [2] Resistividades de 2500 y 5000 [$\Omega \cdot m$]. Ambos con corriente de falla de 1000 [A]. 88
A.53. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para los casos de 1 varilla tradicional y 1 electrodo cónico. 89
A.54. Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para los casos de 4 varillas tradicionales y 4 electrodos cónicos. 89
A.55. Comparativa del comportamiento de la densidad de corriente en la superficie para los distintos escenarios de mallas de puesta a tierra. 90
A.56. Comparativa del comportamiento de la temperatura en la superficie para los distintos escenarios de mallas de puesta a tierra. 90
A.57. Comparativa del comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 20 [cm] del centro del electrodo en la esquina inferior izquierda de la malla para los distintos escenarios de mallas de puesta a tierra. 91

B.1. Valores de elementos del modelo Foster modificado para las ferritas: [A] Ferrita MnZn tipo 75. [B] Ferrita MnZn tipo 73. [C] Ferrita NiZn tipo 43. . 92
B.2. Curva de impedancia dependiente de la frecuencia para ferrita MnZn tipo 75. 93
B.3. Curva de impedancia dependiente de la frecuencia para ferrita MnZn tipo 73. 93
B.4. Curva de impedancia dependiente de la frecuencia para ferrita NiZn tipo 43. 94
B.5. Señal de tensión industrial de la fuente. 94
B.6. Señal de corriente industrial de la fuente. 94
B.7. Señal de tensión de la fuente para casos de alta frecuencia. 95

B.8. Señal de corriente de la fuente para casos de alta frecuencia. 95

Índice de Tablas

4.1. Resumen de máxima elevación de temperatura electrodo cónico con cemento conductor obtenido en COMSOL Multiphysics. 35
4.2. Resumen de elevación del potencial de la puesta a tierra (GPR) del electrodo cónico con cemento conductor obtenido en COMSOL Multiphysics. 35
4.3. Resumen de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo cónico con cemento conductor obtenida en COMSOL Multiphysics. 36
4.4. Comparación de resistencia de la puesta a tierra (R_g) del electrodo cónico con cemento conductor obtenida en COMSOL Multiphysics respecto a modelos teóricos. 37
4.5. Resumen de máxima elevación de temperatura electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenido en COMSOL Multiphysics. 38
4.6. Resumen de elevación del potencial de puesta a tierra (GPR) del electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenido en COMSOL Multiphysics. 38
4.7. Resumen de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenida en COMSOL Multiphysics. 39
4.8. Resumen comparativo de tensiones en el primer metro de distancia en la superficie. A: Electrodo cónico con cemento conductor. B: Electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. [%]: Reducción porcentual de tensiones de B respecto a A. 40
4.9. Resumen de máxima elevación de temperatura electrodo péndulo con cemento conductor obtenido en COMSOL Multiphysics. 42
4.10. Resumen de elevación del potencial de la puesta a tierra (GPR) del electrodo péndulo con cemento conductor obtenido en COMSOL Multiphysics. 42
4.11. Resumen de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo péndulo con cemento conductor obtenida en COMSOL Multiphysics. 43
4.12. Comparación de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo péndulo con cemento conductor obtenida en COMSOL Multiphysics respecto a modelos teóricos. 43
4.13. Resumen de máxima elevación de temperatura del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenido en COMSOL Multiphysics. 45
4.14. Resumen de elevación del potencial de la puesta a tierra (GPR) del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenido en COMSOL Multiphysics. 45
4.15. Resumen de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenida en COMSOL Multiphysics. 46

4.16. Resumen comparativo de tensiones en el primer metro de distancia en la superficie. A: Electrodo péndulo con cemento conductor. B: Electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica. [%]: Reducción porcentual de tensiones de B respecto a A. 47
4.17. Valor de Tensiones [V] en los 4 puntos descritos en la figura 4.13 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra. 49
4.18. Diferencia porcentual de las tensiones en los 4 puntos descritos en la figura 4.13 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra respecto al caso base. 49
4.19. Valor de la resistencia de puesta a tierra [Ω] para los distintos casos de mallas de puesta a tierra. 50
4.20. Diferencia porcentual de la resistencia de puesta a tierra para los distintos casos de mallas respecto al caso base. 50
4.21. Valor de Tensiones de paso [V] en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra. 51
4.22. Diferencia porcentual de las tensiones de paso en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra respecto al caso base. 52
4.23. Diferencia porcentual de las tensiones de paso en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para la malla con 4 electrodos cónicos respecto al caso de malla con 4 varillas. 52
4.24. Valor de Tensiones de contacto [V] en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra. 52
4.25. Diferencia porcentual de las tensiones de contacto en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra respecto al caso base. 53
4.26. Diferencia porcentual de las tensiones de contacto en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para la malla con 4 electrodos cónicos respecto al caso de malla con 4 varillas. 54
4.27. Valores de resistencias, inductancias y capacitancias para modelo Foster modificado de la ferrita de manganeso-zinc tipo 75 (ver figura 4.18). 54
4.28. Valores de resistencias, inductancias y capacitancias para modelo Foster modificado de la ferrita de manganeso-zinc tipo 73 (ver figura 4.18). 56
4.29. Valores de resistencias, inductancias y capacitancias para modelo Foster modificado de la ferrita de níquel-zinc tipo 43 (ver figura 4.18). 56
4.30. Amplitudes de señales sinusoidales desde la fundamental y armónicos impares (3^{ro} al 11^{vo}). 57
4.31. Amplitudes de señales sinusoidales para el análisis de los casos de alta frecuencia. 58

A.1. Tensiones [V] extraídas de COMSOL Multiphysics para el calculo de tensiones de paso y contacto según las distancias descritas en figura 4.14. . . . 91
A.2. GPR [V] encontrado en COMSOL Multiphysics para las distintas mallas de puesta a tierra analizadas. 91

Nomenclatura

SPT	:	Sistemas de puesta a tierra.
GPR	:	Potencial de elevación de tierra.
Rg	:	Resistencia de puesta a tierra.
Z(f)	:	Impedancia de puesta a tierra dependiente de la frecuencia.
FEM	:	Modelo de elementos finitos.
FOP	:	Método de caída de potencial de entrada.
BT	:	Baja tensión.
MT	:	Media tensión.
AT	:	Alta tensión.
ρ	:	Resistividad del suelo.
σ	:	Conductividad eléctrica.
TEP	:	Transferencia electromagnética de potencial.
E_{step}	:	Tensión de paso.
E_{touch}	:	Tensión de contacto.
C_s	:	Factor de reducción.
I_f	:	Corriente total de falla.
I_g	:	Corriente de falla que circula por el sistema puesta a tierra.
MnZn	:	Manganeso-Zinc.
NiZn	:	Níquel-Zinc.

Resumen

La tecnología de sistemas de puesta a tierra ha evolucionado con la introducción de los denominados electrodos magnetoactivos, dispositivos comerciales que prometen optimizar la disipación de corrientes de falla, reducir la impedancia y filtrar impulsos de alta frecuencia. A pesar de su creciente uso en instalaciones de media y baja tensión, existe una notable escasez de información científica y técnica independiente que respalde los atributos declarados por los fabricantes. Ante este vacío de conocimiento, el problema radica en la necesidad de verificar de forma objetiva las verdaderas ventajas, desventajas y límites de operación de esta tecnología.

Para abordar esta problemática, se propone el desarrollo de un modelo computacional que combina la simulación por elementos finitos (FEM) y la síntesis de circuitos eléctricos. Utilizando el software COMSOL Multiphysics, se modelaron tridimensionalmente dos arquitecturas reales de electrodos de disipación vertical de alta eficiencia emplazados en suelos rocosos de alta resistividad, incorporando sus respectivos dominios de cemento conductor y cámara dieléctrica. Esto permitió evaluar la resistencia de puesta a tierra (R_g), la elevación del potencial de tierra (GPR) y el comportamiento térmico. Paralelamente, se utilizó ATPDraw para modelar el bloque filtrante del electrodo (acoplador) mediante modelos equivalentes de Foster de cerámicas ferromagnéticas (ferritas), evaluando su respuesta en frecuencia.

Los resultados obtenidos demuestran que los electrodos de disipación vertical de alta eficiencia logran una disminución sustancial de la resistencia de puesta a tierra frente a varillas convencionales; de forma aislada, el electrodo cónico redujo la R_g en un promedio del 57,57 % respecto al modelo de Dwight, mientras que el modelo tipo péndulo alcanzó un 65,30 % de reducción. Se comprobó que el uso de la cámara dieléctrica es altamente efectivo para restringir la conducción hacia la superficie, reduciendo las tensiones de paso en el primer metro radial en más de un 77 %. Al evaluar una malla de puesta a tierra, la incorporación de 4 electrodos cónicos homogeneizó los gradientes de potencial, disminuyendo las tensiones de paso y contacto hasta un 31,81 % y 42,77 %, respectivamente, en comparación con el uso de varillas tradicionales.

Por otra parte, el análisis en ATPDraw determinó que el sistema de filtrado de ferritas no posee capacidad de atenuación en frecuencias industriales, aunque sí demostró ser altamente efectivo mitigando componentes de alta frecuencia de forma direccional en el caso de la corriente y bidireccional en el caso de la tensión.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación.

La puesta a tierra es un elemento esencial para la seguridad y el desempeño de los sistemas eléctricos, especialmente en media y baja tensión. Su función principal es garantizar la protección de personas, equipos e instalaciones frente a fallas eléctricas, descargas atmosféricas y perturbaciones transitorias. Una puesta a tierra adecuada contribuye a la continuidad del suministro, reduciendo riesgos asociados a tensiones de paso y contacto.

La tecnología de puesta a tierra ha evolucionado desde electrodos tradicionales de varilla o malla hasta el uso de compuestos mejoradores de conductividad. En los últimos años, han surgido los electrodos magnetoactivos, presentados como una alternativa comercial innovadora. Estos dispositivos integran módulos en su estructura para modificar el comportamiento eléctrico del sistema, buscando optimizar la disipación de corrientes de falla y la respuesta frente a impulsos de alta frecuencia.

A pesar de su difusión en el mercado, existe una escasez o inexistencia de información académica y científica. La mayor parte de los antecedentes son catálogos industriales que carecen de validación independiente bajo criterios técnicos y normativos reconocidos, como los establecidos por la IEEE. Esta situación genera un vacío de conocimiento, ya que no existen estudios que permitan comprender su verdadero funcionamiento, establecer sus ventajas o limitaciones, ni verificar la validez de las afirmaciones comerciales.

Ante esta ausencia de evidencia técnica, surge la necesidad de desarrollar un modelo computacional que represente el comportamiento de los electrodos magnetoactivos en su interacción con el suelo y los sistemas de puesta a tierra. Un enfoque basado en simulación mediante Elementos Finitos (FEM) permitirá analizar parámetros clave como la resistencia/impedancia de una puesta a tierra, la distribución de potencial en superficie y la respuesta en frecuencia.

El desarrollo de este modelo no solo permitirá validar o refutar las propiedades atribuidas a los electrodos magnetoactivos, sino también aportar información objetiva y replicable a la comunidad académica y profesional. Asimismo, generará criterios técnicos que faciliten la toma de decisiones sobre la aplicación de esta tecnología en la práctica ingenieril, contribuyendo a la mejora de la seguridad eléctrica, la confiabilidad de las instalaciones y la eventual incorporación de nuevas alternativas en normativas y guías de diseño.

1.2. Objetivo general.

Desarrollar un modelo computacional de electrodos magnetoactivos, mediante técnicas de simulación de elementos finitos, para evaluar su desempeño eléctrico en sistemas de puesta a tierra de media y baja tensión.

1.3. Objetivos específicos.

- Definir el modelo conceptual y eléctrico equivalente de los electrodos magnetoactivos según catálogos de fabricantes disponibles en el mercado chileno.
- Caracterizar el suelo y los diferentes tipos de electrodos magnetoactivos con sus propiedades eléctricas y condiciones de contorno en software de elementos finitos.
- Desarrollar e implementar el modelo del electrodo magnetoactivo, simulando su comportamiento mediante software de elementos finitos y determinando valores para la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de paso y contacto.
- Comparar los resultados obtenidos en software de simulación del electrodo magnetoactivo con respecto a los electrodos convencionales de puesta a tierra para determinar las ventajas y desventajas que presenta.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Sistemas de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) son una infraestructura esencial en instalaciones eléctricas, tanto por razones de seguridad como de funcionamiento adecuado de los equipos. Su propósito principal es proporcionar un camino de baja impedancia hacia el terreno para la disipación de corrientes de falla, descargas atmosféricas y perturbaciones eléctricas, garantizando que las tensiones en el suelo no excedan los límites admisibles para las personas y la infraestructura. De acuerdo con la IEEE Std 80-2013, la función de un sistema de puesta a tierra es "controlar el potencial del suelo y las tensiones de paso y contacto durante condiciones de falla" [1].

2.1.1. Finalidad y funciones de un sistema de puesta a tierra.

Desde una perspectiva general, un SPT cumple cuatro funciones principales [1]:

a) Seguridad de las personas, limitando tensiones de paso y contacto.

b) Protección de equipos eléctricos, desviando fallas eléctricas.

c) Estabilidad del sistema eléctrico, entregando un punto de referencia común.

d) Control del comportamiento transitorio en descargas atmosféricas o maniobras de conmutación.

2.1.2. Componentes de un sistema de puesta a tierra.

Un sistema de puesta a tierra típico está formado por tres elementos principales. En primer lugar, los electrodos o elementos de captación son los encargados de establecer contacto directo con el suelo y determinan la resistencia y la impedancia total del sistema. Estos pueden presentarse como varillas verticales, cintas o conductores horizontales, anillos perimetrales, mallas enterradas, pozos profundos o electrodos químicos, y electrodos no convencionales como los magnetoactivos, los cuales son objeto de estudio en este trabajo [1].

En segundo lugar, los conectores y uniones proveen la continuidad eléctrica entre los electrodos y el resto de la instalación; sus características deben cumplir obligatoriamente

con normas como la IEC 62561 [2], [3], [4]. Finalmente, los conductores de puesta a tierra cumplen la función de conectar estructuras metálicas, envolventes, equipos y carcasas al sistema general. La selección de los materiales y secciones para estos conductores se encuentra normada en la IEEE 80 [1] y en la normativa chilena vigente [5], [6].

2.1.3. Comportamiento eléctrico del suelo.

El suelo es un medio complejo cuyas propiedades dependen de factores físicos y ambientales. La resistividad del suelo, parámetro utilizado para el diseño del SPT, se ve afectada por la naturaleza del terreno (arcilla, arena, grava, etc.), la humedad, temperatura, las variaciones estacionales, la densidad y compactación, los gradientes de estratificación y la salinidad [1]. Para su medición, la IEEE Std 81 establece métodos normalizados, destacando el método Wenner y el método Schlumberger, cuyos resultados permiten modelar el comportamiento del terreno como medios homogéneos, estratificados o con variaciones graduales [7]. Además, el comportamiento del suelo no es puramente resistivo; en presencia de impulsos o corrientes en alta frecuencia, muestra características capacitivas e inductivas distribuidas, modificando la impedancia del sistema [1].

2.1.4. Parámetros de diseño de un sistema de puesta a tierra.

De acuerdo con el estándar IEEE Std 80, los principales parámetros a considerar en el diseño son [1]:

- **Resistencia de puesta a tierra (Rg).** Es la medida del desempeño del electrodo bajo corriente continua o frecuencias bajas.
- **Impedancia de puesta a tierra (Z(f)).** Considera la variación con la frecuencia y es necesario para evaluar transitorios y condiciones dinámicas.
- **Tensiones de paso y contacto.** Definidas como la diferencia de potencial entre dos puntos del suelo separados por una distancia equivalente al paso humano, o entre la estructura conectada a tierra y el suelo circundante.
- **Elevación del potencial de tierra (GPR).** Es la elevación del potencial del sistema de tierras durante una falla.

2.1.5. Relevancia del estudio de electrodos no convencionales.

En suelos de alta resistividad, el diseño convencional puede ser inviable. Los electrodos magnetoactivos y electrodos de disipación vertical de alta eficiencia prometen mejorar la impedancia y el manejo de altas frecuencias, pero su respaldo es puramente comercial [8], [9], [10], [11]. Es imperativo el modelamiento numérico (FEM) y circuital para validar objetivamente su impacto en la Rg, el GPR y las tensiones de paso y contacto.

2.2. Normativas aplicables a los sistemas de puesta a tierra.

El diseño y evaluación se rigen por normativas nacionales e internacionales que definen los criterios de diseño, seguridad y materiales.

2.2.1. Normas internacionales.

IEEE e IEC estructuran los lineamientos globales para media y alta tensión. Siendo además explícitamente citadas en la normativa chilena vigente.

2.2.1.a. IEEE Std 80: "Guide for Safety in AC Substation Grounding".

La IEEE Std 80-2013 es la base para el diseño en corriente alterna. Fija los modelos de suelo, el cálculo del GPR, el diseño de mallas y los criterios de evaluación de tensiones de paso y contacto [1].

2.2.1.b. Normativas complementarias: IEEE Std 81, IEC 60364 e IEC 62561.

El diseño se complementa con la IEEE Std 81 para mediciones en terreno [7]. La IEC 60364-5-54 para requisitos de baja tensión [12]. Y la IEC 62561 partes 2 y 7 para ensayos de corrosión, exigencias mecánicas y compuestos mejoradores [3], [4].

2.2.2. Normativa chilena vigente.

En Chile, los sistemas de puesta a tierra se regulan mediante RIC N°06 (para instalaciones de consumo) [5] y RPTD N°06 (para instalaciones de producción, transmisión y distribución) [6]. Ambas normativas son emitidas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).

2.2.2.a. Reglamento de Instalaciones de Consumo (RIC) N°06: Puesta a tierra.

El RIC N°06 rige las instalaciones de baja tensión [5]. Dado que no contempla a los electrodos magnetoactivos explícitamente, exige que estos acrediten el cumplimiento de requisitos materiales y eléctricos equivalentes.

2.2.2.b. RPTD N°06: Puesta a Tierra (instalaciones de MT y AT).

El RPTD N°06 regula proyectos industriales y de distribución (media y alta tensión). Exige de forma explícita la utilización de la IEEE Std 80 como base para calcular tensiones tolerables y diseño de mallas [6].

2.3. Modelado de sistemas de puesta a tierra.

El análisis de sistemas de puesta a tierra se basa en representaciones analíticas del electrodo y del suelo que permiten estimar la resistencia de puesta a tierra, las tensiones de paso y contacto, y la corriente efectiva que circula hacia el terreno. Estos modelos son particularmente útiles en etapas de diseño preliminar, ya que entregan una primera aproximación del desempeño del sistema sin recurrir de inmediato a simulaciones numéricas más costosas. En esta sección se revisan los métodos establecidos por la IEEE Std 80 y los modelos analíticos presentes en la literatura técnica Dwight [13] y Sverak [14], los cuales son una de las referencias para el diseño de sistemas de puesta a tierra.

2.3.1. Varilla vertical.

El modelo de Dwight es una de las expresiones para representar una varilla vertical enterrada en un suelo homogéneo de resistividad ρ. Este modelo considera un electrodo de longitud L y diámetro d, y proporciona una estimación de la resistencia de puesta a tierra a partir de la geometría del electrodo y del medio circundante. La resistencia de una varilla vertical puede escribirse como [13]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l}\left(\ln\left[\frac{2l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{2l}\right)^2}\right)\right]+\frac{a}{2l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{2l}\right)^2}\right) \tag{2.1}$$

Donde a es el radio en metros, l longitud en metros y R resistencia puesta a tierra en [Ω]. Este modelo es válido solo para corriente continua o frecuencias extremadamente bajas (<100 Hz), ya que asume que la corriente se distribuye uniformemente a lo largo del electrodo [13].

En el contexto de subestaciones, la varilla vertical cumple una función de apoyo, ya que permite alcanzar capas más profundas del terreno cuando el estrato superficial presenta alta resistividad. Sin embargo, su aporte al control de las tensiones de paso y contacto es más limitado que el de una malla extendida, debido a que concentra la inyección de corriente en una región reducida del subsuelo [1].

2.3.2. Electrodos horizontales y anillos perimetrales.

Para conductores horizontales enterrados, la resistencia depende de su longitud relativa, su profundidad de enterramiento y de la resistividad del suelo. A diferencia de la varilla vertical, estos electrodos distribuyen la corriente sobre una mayor extensión lateral y son especialmente útiles para reducir gradientes de potencial en superficie. En sistemas reales, los anillos perimetrales y conductores horizontales de enlace cumplen además una función de equipotencialización, conectando estructuras, cercos, equipos y varillas complementarias a la red principal [1].

Modelos como los de Laurent y Sverak permiten aproximar la resistencia de "hilos enterrados" mediante expresiones basadas en la longitud efectiva del conductor, la geometría del sistema y el área de dispersión de corriente. En su forma más general, estos modelos buscan representar el hecho de que el conductor horizontal no se comporta como una línea aislada, sino como un elemento cuyo acoplamiento con el terreno depende de la disposición espacial y de la profundidad de instalación [14].

En general, los anillos perimetrales reducen la resistencia global del sistema y, sobre todo, ayudan a suavizar el perfil de potencial en los bordes de la instalación. Por esta razón, su presencia es habitual en subestaciones y patios eléctricos donde se requiere controlar las tensiones en zonas de acceso peatonal [1].

2.3.3. Mallas de puesta a tierra.

El modelo de Sverak, ampliamente referenciado en IEEE Std 80, estima la resistencia de una malla mediante fórmulas basadas en la profundidad del conductor, el área cubierta por la malla, la separación entre conductores y la resistividad del suelo. En su formulación,

el modelo incorpora factores de corrección para reflejar la influencia de la geometría y de la distribución no uniforme de la corriente en los conductores perimetrales e interiores [1].

La forma simplificada de este modelo establece que la resistencia depende de la longitud total de conductor enterrado L_T y del área ocupada por la malla A, lo que permite una evaluación rápida en etapa preliminar. La expresión usada en IEEE Std 80 para mallas enterradas en suelo uniforme puede escribirse como [1]:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \tag{2.2}$$

donde h es la profundidad de enterramiento. Esta formulación muestra que la resistencia disminuye cuando aumenta la longitud total de conductor o el área de la malla, y también se ve afectada por la profundidad de instalación, aunque esta última influencia es menor en rangos de profundidad típicos donde son construidas las mallas [1].

La IEEE Std 80 ocupa el modelo descrito anteriormente como base para el cálculo de la tensión de contacto y la tensión de paso, que son los criterios normativos más importantes para evaluar seguridad humana [1].

2.3.4. Resistencia de mallas y varillas combinadas.

Cuando una malla se complementa con varillas verticales, la resistencia global del sistema no puede obtenerse como una simple combinación en paralelo de la resistencia de la red horizontal y la resistencia del conjunto de varillas. La razón es que ambos subconjuntos de electrodos no operan de manera independiente, sino que existe acoplamiento mutuo entre ellos a través del suelo [1], [15].

Schwarz formuló la resistencia total del sistema combinado considerando tres magnitudes: la resistencia de la malla horizontal R_1, la resistencia del banco de varillas R_2 y la resistencia mutua R_m entre ambos grupos de electrodos. La expresión es [15]:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \tag{2.3}$$

Donde R_g es la resistencia total de puesta a tierra, R_1 la resistencia de la malla, R_2 la resistencia del banco de varillas y R_m la resistencia mutua entre ambos subconjuntos. Esta formulación muestra que la presencia de varillas puede reducir la resistencia total más de lo que se obtendría por una suma o paralelo idealizado [15].

La resistencia de la malla R_1 puede aproximarse en suelo homogéneo mediante la formulación de Schwarz basada en el total de conductor horizontal enterrado L_c [15]:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln\left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \tag{2.4}$$

donde a' depende del diámetro del conductor y de la profundidad de enterramiento, A es el área de la malla, y k_1 y k_2 son coeficientes geométricos que dependen de la relación largo-ancho y de la profundidad [15].

La resistencia del banco de varillas R_2 se obtiene a partir de la longitud de cada varilla L_r, su radio b, el número de varillas n_R y el área ocupada por el sistema A [15]:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r}\left[\ln\left(\frac{4L_r}{b}\right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}}(\sqrt{n_R} - 1)^2\right] \tag{2.5}$$

Finalmente, la resistencia mutua entre la malla y el banco de varillas se define como [15]:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c}\left[\ln\left(\frac{2L_c}{L_r}\right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1\right] \tag{2.6}$$

La resistencia mutua representa el grado de acoplamiento entre la malla horizontal y las varillas verticales. Si R_m es grande, significa que ambos subconjuntos comparten de manera importante el mismo volumen de suelo y su interacción es fuerte; si R_m es menor, el efecto de las varillas sobre la resistencia total es más favorable. Por esta razón, el diseño de sistemas de puesta a tierra no puede tratar la malla y las varillas como elementos independientes, sino como un sistema acoplado [1], [15].

2.3.5. Electrodos embebidos en concreto.

La IEEE Std 80 considera explícitamente el caso de electrodos recubiertos o embebidos en concreto, también conocidos como *concrete-encased electrodes*. Estos electrodos son relevantes en subestaciones donde parte del sistema de puesta a tierra se integra con las fundaciones de estructuras, columnas o muros de hormigón armado. El concreto, al ser higroscópico, puede presentar resistividades relativamente bajas cuando está saturado, lo que modifica el acoplamiento eléctrico entre el electrodo metálico y el suelo circundante [1].

Según Fagan y Lee, el electrodo embebido puede modelarse como un cilindro metálico de longitud L_r y diámetro d rodeado por una camisa de concreto de diámetro D_c, en un suelo de resistividad ρ y concreto de resistividad ρ_c. La resistencia equivalente del electrodo embebido en concreto se obtiene sumando la contribución del tramo interno de concreto y la del tramo externo de suelo [16]. La ecuación presentada en (2.7) describe lo mencionado.

$$R_{CE-rod} = \frac{1}{2\pi L_r}\left[\rho_c \ln\left(\frac{D_c}{d}\right) + \rho\left(\ln\left(\frac{8L_r}{D_c}\right) - 1\right)\right] \tag{2.7}$$

En comparación con la resistencia de una varilla convencional, dada por [13]:

$$R_{rod} = \frac{\rho}{2\pi L_r}\left[\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1\right] \tag{2.8}$$

La presencia del concreto introduce un término adicional asociado a ρ_c y al radio D_c, lo que puede disminuir significativamente la resistencia si $\rho_c < \rho$. En la práctica, hormigones con alto contenido de humedad y sales pueden presentar resistividades del orden de 30–200 $[\Omega \cdot m]$, valores típicamente inferiores a los del suelo superficial en zonas áridas [16].

La norma IEEE Std 80 advierte que la utilización de concreto como medio conductor debe evaluarse considerando aspectos mecánicos y de durabilidad. Corrientes sostenidas de gran magnitud pueden producir evaporación rápida del agua contenida en el hormigón, fisuración y degradación de la interfase cobre–concreto. Por ello, el electrodo embebido se

considera apropiado principalmente para mejorar la resistencia estática de puesta a tierra en condiciones de falla de corta duración, y no como soporte permanente de corrientes de fuga o corrientes continuas [1].

En el contexto de este documento, este tipo de electrodos se utiliza como referencia para el modelado de los electrodos magnetoactivos embebidos en cemento u hormigones conductores. La ecuación (2.7) permite comparar la resistencia equivalente obtenida en simulación con la predicha por el modelo, asegurando coherencia con los criterios establecidos en IEEE Std 80.

2.3.6. Tensiones de paso y contacto.

El diseño de sistemas de puesta a tierra incorpora criterios de seguridad basados en las tensiones de paso y contacto que pueden experimentar las personas durante una falla. La IEEE Std 80 desarrolla estas expresiones a partir de la corriente tolerable por el cuerpo humano, del tiempo de exposición y de la resistividad del medio entre los pies y el terreno [1].

En presencia de una capa superficial de grava u otro material de alta resistividad, la norma introduce un factor de reducción C_s que corrige el efecto de dicha capa sobre la resistencia aparente de los pies. Cuando se adopta un material superficial de resistividad ρ_s y espesor h_s (en metros), el factor C_s se evalúa mediante la siguiente expresión [1]:

$$C_s = 1 - \frac{0{,}09\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0{,}09} \tag{2.9}$$

Donde ρ es la resistividad del suelo bajo el material superficial. Con este factor, y adoptando una resistencia promedio del cuerpo humano de 1.000 [Ω], la IEEE Std 80 define directamente los límites admisibles de tensión de paso y contacto para el diseño seguro de las instalaciones [1].

Para una masa corporal de referencia de 50 kg, las tensiones admisibles se formulan de la siguiente manera [1]:

$$E_{\text{step50}} = (1000 + 6C_s\rho_s)\frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \tag{2.10}$$

$$E_{\text{touch50}} = (1000 + 1,5C_s\rho_s)\frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \tag{2.11}$$

Donde ρ_s es la resistividad del material superficial y t_s es el tiempo de exposición, normalmente tomado igual al tiempo de despeje de la falla o al tiempo de operación del esquema de protección. El término $0,116/\sqrt{t_s}$ proviene de la relación empírica de Dalziel [17] para la corriente tolerable por el cuerpo humano. Para una masa corporal de 70 [kg], se utilizan coeficientes análogos sustituyendo la constante 0,116 por 0,157 [1].

Estas ecuaciones incorporan la resistencia del cuerpo, la resistencia adicional debida al material superficial (términos con $C_s\rho_s$) y la dependencia fisiológica con el tiempo de exposición. Por su forma concisa y directa, estas son las expresiones que se implementan habitualmente en hojas de cálculo, memorias de cálculo y software de diseño en la industria eléctrica.

2.3.6.a. Relación con el potencial de elevación de la puesta a tierra.

La elevación del potencial de la puesta a tierra durante una falla se expresa como [1]:

$$GPR = R_g I_g \tag{2.12}$$

Donde R_g es la resistencia de puesta a tierra del sistema e I_g es la corriente que efectivamente ingresa a la malla. A partir del GPR y de la distribución de potencial en la superficie del terreno, el modelado proporciona valores calculados de tensiones de paso y contacto (por ejemplo, las tensiones E_m y E_s obtenidas del capitulo 16.5 "*Calculation of maximum step and mesh voltages*" de la norma IEEE Std 80 [1]), que se comparan con los límites admisibles dados por las ecuaciones (2.10) y (2.11).

2.4. Impedancia dependiente de frecuencia en sistemas de puesta a tierra.

La impedancia de un electrodo enterrado no es constante, varía significativamente con la frecuencia debido a los fenómenos electromagnéticos asociados al suelo, al conductor y a la geometría del sistema [7], [18], [19], [20]. Esta variación es relevante para el estudio de los electrodos magnetoactivos y electrodos de disipación vertical de alta eficiencia, cuyo principio de funcionamiento se basa en la interacción de elementos resistivos, inductivos y capacitivos internos con el medio circundante.

2.4.1. Concepto general de impedancia en electrodos enterrados.

La impedancia de puesta a tierra Z(f) representa la relación entre el potencial aplicado al electrodo y la corriente inyectada al suelo, a una frecuencia dada [21]:

$$Z(f) = \frac{V(f)}{I(f)} \tag{2.13}$$

En baja frecuencia Z(f) es dominada por la resistividad del suelo y corresponde al valor de resistencia de puesta a tierra. Sin embargo, en media y alta frecuencia aparece componente inductiva asociada al conductor, aparece componente capacitiva asociada al acoplamiento electrodo–suelo y la distribución de corriente deja de ser uniforme, el área efectiva de disipación cambia, los transitorios modifican el perfil espacial del potencial. Por estas razones, el análisis de impedancia en función de la frecuencia es necesario [18], [20], [21].

2.4.2. Comportamiento resistivo, inductivo y capacitivo del electrodo.

La impedancia de un electrodo enterrado puede descomponerse en tres contribuciones principales: una componente resistiva, asociada a la disipación de energía en el suelo, una componente inductiva, vinculada al campo magnético generado por las corrientes que circulan por el electrodo y por los conductores vecinos y una componente capacitiva, relacionada con la capacidad entre el electrodo y el suelo o entre distintas regiones del suelo con diferente potencial. Es por lo anterior que el comportamiento general de un electrodo

enterrado puede representarse mediante un circuito R–L–C distribuido, según múltiples estudios (Grcev [18], Visacro [19], [22], Cavka [20]):

$$Z(f) = R(f) + jX(f) \tag{2.14}$$

Donde $R(f)$ es componente resistiva dependiente de frecuencia y $X(f) = X_L(f) - X_C(f)$ es reactancia resultante. Este comportamiento no aparece en los modelos (como Dwight), pero sí es evidente en mediciones experimentales y simulaciones.

2.4.3. Ecuaciones base para el modelamiento FEM de impedancia.

En el contexto de la modelación mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), la impedancia eléctrica del sistema electrodo–suelo se determina resolviendo la ecuación de la corriente eléctrica en el dominio de la frecuencia. Este enfoque es el que implementan los módulos de conducción y AC/DC de COMSOL y se deriva directamente de las ecuaciones de Maxwell bajo la aproximación cuasiestática [23], [24].

2.4.3.a. Ecuación del potencial.

En un medio conductivo y dieléctrico, la ecuación de continuidad de la corriente se expresa como [24]:

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_{\text{total}} = 0 \tag{2.15}$$

Donde la densidad de corriente total incluye tanto la corriente de conducción como la corriente de desplazamiento [24]:

$$\mathbf{J}_{\text{total}} = \sigma \mathbf{E} + j\omega\epsilon \mathbf{E} \tag{2.16}$$

Y el campo eléctrico se relaciona con el potencial escalar V mediante [24]:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \tag{2.17}$$

Sustituyendo estas relaciones, la ecuación gobernante que utiliza COMSOL para el potencial eléctrico en el dominio del suelo se puede escribir como [24]:

$$\nabla \cdot [(\sigma + j\omega\epsilon)\, \nabla V] = 0 \tag{2.18}$$

Donde el término $(\sigma + j\omega\epsilon)$ corresponde a la conductividad compleja efectiva del medio. Esta es, de manera directa, la ecuación que resuelve el solver de COMSOL en los estudios de frecuencia y AC para medios lineales y homogéneos por subdominio [24].

2.4.3.b. Cálculo de la densidad de corriente y de la impedancia.

Una vez resuelta la distribución del potencial V en el dominio mediante FEM, la densidad de corriente total $\mathbf{J}_{\text{total}}$ se calcula utilizando la forma microscópica de la ley de Ohm generalizada [24]:

$$\mathbf{J}_{\text{total}} = -(\sigma + j\omega\epsilon)\,\nabla V \tag{2.19}$$

Para obtener la corriente total inyectada por el electrodo a la frecuencia f, se integra la componente normal de la densidad de corriente sobre la superficie metálica S [24]:

$$I(f) = \int_S \mathbf{J}_{\text{total}} \cdot \mathbf{n}\, dS \tag{2.20}$$

Donde $\mathbf{n}$ es el vector normal unitario a la superficie del electrodo. Esta integral es exactamente la operación que realiza COMSOL cuando se evalúa la corriente total asociada a una frontera con condición de potencial o de corriente impuesta [24].

Finalmente, la impedancia compleja dependiente de la frecuencia $Z(f)$ se determina mediante la relación entre la tensión aplicada y la corriente calculada [24]:

$$Z(f) = \frac{V_{\text{aplicado}}}{I(f)} \tag{2.21}$$

2.4.3.c. Modelo equivalente en ATPDraw.

A diferencia de COMSOL, ATPDraw no se utiliza para modelar el electrodo completo ni el suelo, sino únicamente la respuesta en frecuencia de los elementos ferromagnéticos integrados en el módulo magnetoactivo [23], [24]. El objetivo es disponer de un modelo de circuito capaz de reproducir la impedancia obtenida a partir de medidas o de simulaciones de materiales, en el rango de frecuencias de interés.

Para ello se emplea la técnica de *vector fitting* y la síntesis de circuitos, construyendo un modelo equivalente tipo Foster modificado de orden cuatro. Este modelo se implementa en ATPDraw como una red de bloques RLC en configuración serie, cuya impedancia se escribe, de forma genérica, como [25]:

$$Z_{\text{foster}}(f) = \sum_{k=1}^{4} \left[R_k + j\left(2\pi f L_k - \frac{1}{2\pi f C_k}\right)\right] \tag{2.22}$$

Donde R_k, L_k y C_k son los parámetros identificados para cada rama del modelo Foster modificado, ajustados mediante vector fitting de modo que $Z_{\text{foster}}(f)$ coincida con la impedancia medida o simulada del material ferromagnético [25].

2.5. Electrodos Magnetoactivos.

En cuanto a electrodos magnetoactivos, la principal referencia académica disponible proviene de la tesis desarrollada en la UNAM, donde se documenta la arquitectura y operación del sistema Faragauss, uno de los pocos sistemas magnetoactivos comercialmente difundidos [8]. Dado que la literatura científica revisada muestra una ausencia casi total de estudios independientes, este documento se convierte en una fuente importante para este trabajo.

Los denominados electrodos magnetoactivos son dispositivos comerciales para puesta a tierra que integran, en su propia estructura, un elemento declarado como filtro o acoplador de impedancia, habitualmente descrito por los fabricantes como un módulo L–R–C junto con un electrodo metálico y, en la mayoría de los kits, un compuesto mejorador de conductividad para rellenar el pozo de instalación. Marcas y proveedores ampliamente comercializados incluyen Faragauss, Total Ground, Baselli, grupo Voltex, Proynet y otros distribuidores que ofrecen kits con electrodo, filtro y compuesto [9], [10], [11].

Los fabricantes publicitan ventajas tales como reducción permanente de la resistencia de puesta a tierra, "filtrado" de componentes de alta frecuencia, mejora en la disipación de impulsos y "polarización" o direccionamiento de corrientes hacia el electrodo. Estas afirmaciones son la motivación de la presente investigación: analizar mediante modelación matemática y simulación FEM qué efectos físicamente plausibles puede introducir un módulo L–R–C integrado y en qué condiciones estas ventajas se sostienen frente a electrodos convencionales [9], [10], [11].

2.5.1. Arquitectura reportada del Electrodo Magnetoactivo.

Según la tesis revisada, el electrodo magnetoactivo Faragauss está constituido por una estructura tubular triangular, con dos triángulos extremos que funcionan como ánodo y cátodo en un sistema de polarización geomagnética y gravitacional [8].

Este diseño no es meramente geométrico: la estructura se orienta intencionadamente para aprovechar el vector gravitacional y el campo geomagnético de la Tierra, generando una diferencia de potencial interna que induce una polarización catódica del terreno circundante según lo descrito [8], [9], [10].

Las características constructivas se basan en materiales de alta estabilidad física y química, como acero o cobre tratados con recubrimientos anticorrosivos, típicamente sulfato de zinc, y uniones realizadas por soldadura de plata, para asegurar integridad eléctrica y mecánica de largo plazo [8].

Entre los atributos funcionales destacados se mencionan la larga vida útil sin necesidad de realizar mantenciones, estabilidad ante condiciones ambientales variables, comportamiento eléctrico, magnético y térmico mejorado y baja impedancia permanente en un amplio rango de frecuencias. Estos atributos, según el documento [8], permiten una disipación más eficiente de energía en el terreno, fundamentando la promesa comercial del sistema.

2.5.2. Dispositivo resonante LCR.

Un componente clave del electrodo magnetoactivo es el dispositivo LCR resonante, el cual opera de forma bidireccional frente a frecuencias que se alejan del valor industrial de 50 [Hz]. Su rango de operación, según la referencia [8], abarca desde 100 [Hz] hasta 3,5 [GHz], lo que abarca desde perturbaciones armónicas hasta fenómenos impulsivos de alta frecuencia, como descargas atmosféricas.

Este dispositivo funciona como un filtro electromagnético pasivo, cuya finalidad es reducir la impedancia efectiva en alta frecuencia, desviar componentes impulsivas hacia el electrodo, absorber y confinar energía en el subsuelo y sincronizar la admitancia del

sistema frente a variaciones del espectro de excitación [8].

2.5.3. Acondicionador del Suelo.

El sistema utiliza un compuesto electro-acondicionador orgánico, que se mezcla con tierra vegetal para formar un núcleo de alta conductividad alrededor del electrodo. Este compuesto, a diferencia de sales y geles, afirma no generar corrosión ni impactos ambientales negativos y mantiene conductividad estable en ausencia de humedad elevada [8]. Debe notarse que, desde un punto de vista de modelamiento, esto significa que el suelo inmediato al electrodo debe considerarse como una capa de resistividad distinta, lo cual afecta a la distribución del potencial, la corriente dispersada, la impedancia de puesta a tierra y la respuesta en frecuencia local [1], [16].

2.5.4. Principios electromagnéticos declarados.

Según la documentación [8], la tecnología de electrodos magnetoactivos (Faragauss) se fundamenta en:

- Polarización dominante negativa del terreno, inducida por acoplamiento geomagnético y gravitacional.
- Incremento del acoplamiento electromagnético suelo–subsuelo.
- Disipación polidireccional de corrientes.
- Supresión de interferencias EMI/RFI.
- Bloqueo de corrientes geoelectromagnéticas.

Aunque estos fenómenos no están demostrados con literatura científica externa, sí están explícitamente descritos en la tesis [8], por lo que deben incorporarse como parte del panorama teórico disponible. Para el modelamiento por FEM, solo pueden considerarse los efectos basados en leyes físicas demostrables: ecuaciones de Maxwell, impedancia dependiente de frecuencia, polarización dieléctrica y conducción.

2.5.5. Aplicaciones industriales reportadas.

La documentación [8], [9], [10], [11] atribuye aplicaciones en subestaciones de transmisión y distribución, sistemas de protección contra rayos, telecomunicaciones, sistemas electrónicos sensibles, sector hospitalario, industria pesada, petrolera y energética.

Estas aplicaciones, según los textos [8], [9], [10], [11], se relacionan con la mejora en la disipación de corrientes impulsivas, reducción de tensiones de paso y contacto, minimización del TEP (transferencia electromagnética de potencial), estabilidad frente a perturbaciones armónicas y ruido electromagnético. Todas estas afirmaciones provienen del contenido de la tesis citada y de los fabricantes, y aún carecen de respaldo independiente.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Enfoque general de la investigación.

El trabajo se desarrolla como un estudio comparativo basado en dos software complementarios: software de método de elementos finitos en COMSOL Multiphysics y el software de circuitos eléctricos mediante modelos equivalentes RLC en ATPDraw. Ambos enfoques se utilizan para caracterizar la resistencia y la influencia de elementos ferromagnéticos en el desempeño del sistema de puesta a tierra.

3.1.1. Uso de modelos teóricos de puesta a tierra.

El marco teórico definido en el capítulo anterior se adopta como línea base de la metodología. Las expresiones para resistencia de puesta a tierra de mallas y varillas, tensiones de paso y contacto y potencial de elevación de la puesta a tierra se emplean como herramienta de comparación y validación para verificar que los resultados numéricos obtenidos en COMSOL se mantienen dentro de rangos físicamente consistentes.

3.1.2. Objetivo metodológico.

El objetivo metodológico es establecer un procedimiento reproducible que permita:

- Construir un modelo de referencia de un electrodo de disipación vertical de alta eficiencia, en suelo homogéneo, y determinar su resistencia de puesta a tierra, GPR, tensiones de paso y contacto mediante simulación FEM en COMSOL.
- Construir un modelo equivalente del bloque ferromagnético asociado al electrodo de disipación vertical de alta eficiencia, utilizando síntesis de circuitos y un modelo Foster modificado de orden cuatro en ATPDraw, para obtener su impedancia $Z(f)$ y la atenuación que produce en una red simple.
- Comparar, bajo las mismas condiciones de suelo y corrientes de falla, el desempeño del electrodo convencional, una malla convencional y del electrodo de disipación vertical de alta eficiencia en términos de su Rg, GPR y tensiones de paso y contacto, utilizando como referencia las expresiones normativas de la IEEE Std 80.

3.1.3. Resistencia de puesta a tierra y mallas.

Para la resistencia de puesta a tierra de sistemas convencionales se adoptan las formulaciones de la IEEE Std 80 para varillas y mallas.

- Las expresiones de resistencia equivalente de mallas en suelo homogéneo (modelo de placa y modelo de Sverak) [1], [14].
- Las ecuaciones para varillas verticales y para varillas embebidas en concreto (modelo de Dwight, Fagan y Lee) [13], [16].

Estas fórmulas se utilizan para:

- Dimensionar las geometrías que se modelan en COMSOL.
- Comparar que la resistencia equivalente R_g obtenida en simulación se encuentra dentro del rango esperado para las condiciones de suelo consideradas y diferencias de R_g entre un electrodo de disipación vertical de alta eficiencia y un electrodo convencional.

3.1.4. Tensiones de paso y contacto.

Las tensiones de paso y contacto se calculan siguiendo las expresiones normativas de la IEEE Std 80 [1]. Estas tensiones se emplean como criterio de comparación para los resultados que se extraen de COMSOL.

- A partir de los perfiles de potencial y de la resistencia de puesta a tierra obtenidas en simulación, se calculan tensiones de paso y contacto.
- Se compara dichas tensiones obtenidas en la simulación con los cálculos teóricos y si dichas tensiones cumplen los límites admisibles en caso que la comparación aplique.

3.2. Modelamiento en COMSOL Multiphysics.

COMSOL Multiphysics se utilizó para resolver el problema eléctrico del sistema electrodo–suelo. El objetivo de este modelo fue determinar la distribución espacial de potencial eléctrico, densidad de corriente y temperatura para las configuraciones de electrodo analizadas, además de obtener la resistencia de puesta a tierra equivalente.

3.2.1. Descripción de los módulos y tipo de estudio utilizado.

Para abordar los distintos fenómenos, se emplearon los siguientes módulos del software:

- **AC/DC Module.** Utilizado para resolver el comportamiento electromagnético del sistema. Este módulo permite determinar la distribución de potencial en el terreno, las densidades de corriente disipadas por el electrodo, suelo y cemento acondicionador y las impedancias equivalentes del sistema de puesta a tierra.

- **Heat Transfer Module.** Implementado para evaluar el calentamiento por efecto Joule resultante de la inyección de la corriente de cortocircuito. Este módulo calcula la elevación térmica transitoria tanto en el cobre del electrodo como en el suelo rocoso y cemento acondicionador.

Respecto a la configuración de la simulación, la evaluación se realizó a través del estudio dependiente del tiempo (Time Dependent). Se configuró con un tiempo de falla de 500 [ms] con un paso de 5 [ms].

3.2.2. Físicas modeladas y ecuaciones gobernantes.

El modelo se basa en el acoplamiento bidireccional de fenómenos electromagnéticos y térmicos. Para representar este comportamiento, se emplearon dos interfaces físicas y un nodo de acoplamiento multifísico, regidos por las siguientes ecuaciones diferenciales:

3.2.2.a. Corrientes eléctricas.

Para determinar la distribución de potencial y la densidad de corriente durante la inyección de la falla, se resuelve la ecuación de conservación de la carga eléctrica en régimen estacionario. La física de corrientes eléctricas se rige por la ley de Ohm extendida y la ecuación de continuidad [26]. Estas ecuaciones conforman el modelo matemático continuo, el cual es aproximado numéricamente mediante el método de elementos finitos [24] implementado en la interfaz de conservación de corriente de COMSOL. El sistema se expresa de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,v} \tag{3.1}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_e \tag{3.2}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \tag{3.3}$$

Donde $\mathbf{J}$ es la densidad de corriente total, $Q_{j,v}$ es la fuente de corriente, σ es la conductividad eléctrica del medio, $\mathbf{E}$ es el campo eléctrico, $\mathbf{D}$ es el desplazamiento eléctrico y V es el potencial eléctrico.

3.2.2.b. Transferencia de calor en sólidos.

Para evaluar la respuesta térmica del electrodo y el suelo circundante, se utiliza la ecuación general de transferencia de calor, la cual se fundamenta en el principio de conservación de la energía [27]. Estas ecuaciones fundamentales conforman el modelo físico que es resuelto numéricamente por la interfaz de transferencia de calor en sólidos del software COMSOL. El sistema que describe la variación de la temperatura T se expresa de la siguiente manera:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ted} \tag{3.4}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \tag{3.5}$$

Donde ρ es la densidad del material, C_p es la capacidad calorífica a presión constante, $\mathbf{u}$ es el vector de velocidad (cuyo valor es cero al tratarse de medios sólidos estáticos), $\mathbf{q}$ es el flujo de calor por conducción, k es la conductividad térmica, Q representa las fuentes de calor internas (como el calentamiento resistivo de Joule producto de la inyección de corriente) y Q_{ted} corresponde al término de amortiguamiento termoelástico.

3.2.2.c. Multifísica: Calentamiento electromagnético.

La interacción directa entre los fenómenos eléctricos y térmicos se rige por el principio de conservación de la energía, donde las pérdidas resistivas del sistema actúan como una fuente de calor volumétrica [26], [27]. Este acoplamiento multifísico es resuelto numéricamente por el nodo de Calentamiento Electromagnético del software COMSOL. Al emplear un estudio de tipo dependiente del tiempo, las interfaces de corrientes eléctricas y transferencia de calor en sólidos se combinan, resultando en la siguiente ecuación gobernante:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \tag{3.6}$$

En esta expresión, los términos del lado izquierdo de (3.6) representan la acumulación de energía transitoria y la transferencia convectiva de calor. Dado que el dominio de simulación está compuesto por medios sólidos, el campo de velocidades es nulo ($\mathbf{u} = 0$), por lo que el término convectivo se anula. En el lado derecho de la ecuación (3.6) se agrupan la transferencia de calor por conducción dependiente de la conductividad térmica (k) y la fuente de calor volumétrica Q_e. Esta fuente térmica corresponde a las pérdidas por efecto Joule provenientes del electromagnetismo. Este acoplamiento permite que las pérdidas resistivas generadas durante el cortocircuito eleven dinámicamente la temperatura de los materiales involucrados en el modelo del electrodo de disipación vertical de alta eficiencia.

3.2.3. Construcción de la geometría del modelo.

Para la evaluación de los sistemas de puesta a tierra se desarrollaron dos configuraciones geométricas destinadas a representar tanto el comportamiento individual de los electrodos de disipación vertical de alta eficiencia como su posterior integración en una malla de puesta a tierra. En ambos casos, el dominio principal corresponde a un volumen tridimensional de suelo homogéneo de alta resistividad, cuyas dimensiones fueron adaptadas de acuerdo con la extensión física del sistema analizado.

Para las simulaciones individuales de los electrodos de disipación vertical de alta eficiencia, el suelo se representó mediante un paralelepípedo de 30 [m] de ancho, 30 [m] de largo y 20 [m] de profundidad. Estas dimensiones permiten representar la propagación local de la corriente desde el electrodo hacia el terreno, manteniendo una distancia suficiente entre el dispositivo y las fronteras externas del dominio computacional.

En los escenarios que incorporan una malla de puesta a tierra, la extensión horizontal del dominio de suelo se incrementó hasta 200 [m] y 67 [m] de profundidad. Este aumento responde a la mayor superficie ocupada por el sistema conductor y a la necesidad de disminuir la influencia de las fronteras artificiales sobre la distribución de potencial, particularmente en las regiones periféricas de la malla.

3.2.3.a. Dominio del suelo y capa de elementos infinitos.

El volumen de suelo se estructuró incorporando una capa periférica destinada a operar como dominio de elementos infinitos. Esta región se generó sobre las cuatro caras laterales del paralelepípedo: izquierda, derecha, frente y fondo y sobre su cara inferior, mientras que la superficie superior se excluyó debido a que representa físicamente la interfaz entre el terreno y el aire.

El espesor geométrico de la capa periférica fue parametrizado en función de la longitud característica del dominio de suelo correspondiente a una décima parte de la longitud del suelo ($l_{suelo}/10$). En COMSOL Multiphysics, los dominios pertenecientes a esta envolvente exterior fueron definidos mediante la herramienta *Infinite Element Domain*, utilizando un sistema de coordenadas cartesiano y una prolongación espacial de tipo racional. Mediante esta formulación, el espesor finito de la capa exterior es transformado matemáticamente para representar una extensión espacial no acotada. De esta manera, el potencial eléctrico y la densidad de corriente pueden continuar su decaimiento hacia regiones alejadas del electrodo sin necesidad de incrementar físicamente el dominio hasta dimensiones excesivamente grandes.

Las Figuras 3.1 y 3.2 muestran las configuraciones geométricas utilizadas para el caso de un electrodo de disipación vertical de alta eficiencia individual y para el caso de una malla de puesta a tierra, respectivamente. En ambas configuraciones puede distinguirse el dominio central de suelo finito y la envolvente exterior destinada a los elementos infinitos.

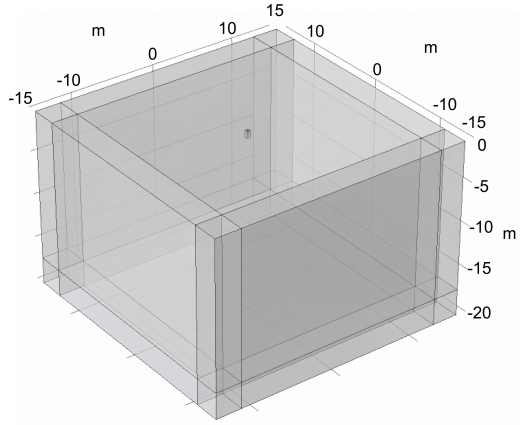


Figura 3.1: Geometría tridimensional del dominio de suelo utilizado para la simulación individual de un electrodo de disipación vertical de alta eficiencia. La envolvente lateral e inferior corresponde a la región asignada al dominio de elementos infinitos.

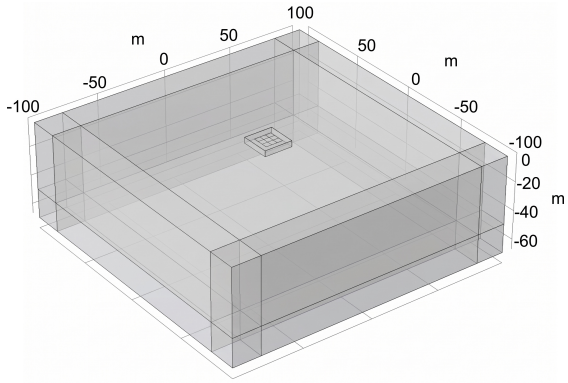


Figura 3.2: Geometría tridimensional del dominio de suelo utilizado para las configuraciones que incorporan una malla de puesta a tierra. La envolvente lateral e inferior corresponde a la región asignada al dominio de elementos infinitos.

3.2.3.b. Modelado de electrodos de disipación vertical de alta eficiencia.

Se diseñan dos modelos tridimensionales de electrodos basados en los datos comerciales, respetando dimensiones de fabricación.

- **Modelo tipo cónico:** presenta una altura total de 840 [mm], un disco superior de 300 [mm] de diámetro y un cuerpo cónico invertido de 705 [mm] de longitud (ver figura 3.3).
- **Modelo tipo péndulo:** posee una altura total de 1070 [mm], una boya de 220 [mm] de altura y 200 [mm] de diámetro y un cilindro de 715 [mm] de longitud con un diámetro de 76,2 [mm] (ver figura 3.4).

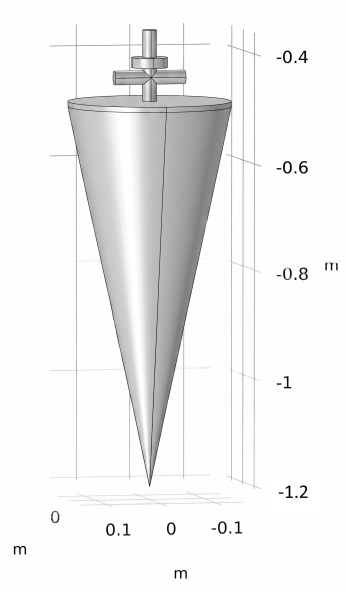


Figura 3.3: Geometría del electrodo tipo cónico.

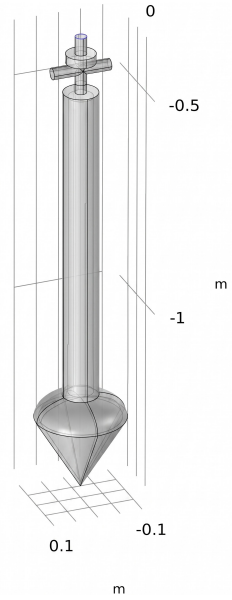


Figura 3.4: Geometría del electrodo tipo péndulo.

3.2.3.c. Acondicionamiento del terreno (caja dieléctrica y cemento conductor).

Para replicar las condiciones reales de instalación de los electrodos de disipación vertical de alta eficiencia, se modelaron los dominios correspondientes al tratamiento de suelo circundante.

- **Cemento conductor:** consiste en un prisma rectangular de 40 [cm] de ancho y largo. Su profundidad, que envuelve al electrodo, se definió en 98 [cm] para el electrodo tipo péndulo (ver figura 3.6) y 76 [cm] para el electrodo tipo cónico (ver figura 3.5).
- **Caja dieléctrica:** se construyó como un prisma rectangular hueco de 42,5 [cm] de ancho y largo, con un espesor de pared de 25 [mm]. La profundidad asignada dependió del electrodo a albergar, siendo de 120 [cm] para el modelo tipo péndulo (ver figura 3.8) y de 100 [cm] para el modelo tipo cónico (ver figura 3.7).

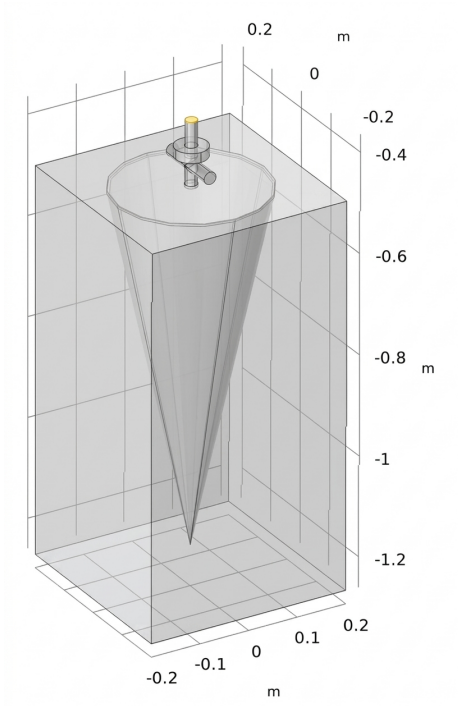


Figura 3.5: Geometría del electrodo tipo cónico con cemento conductor.

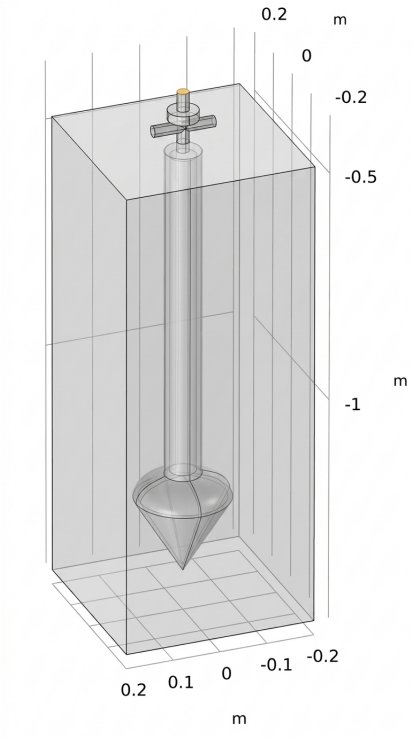


Figura 3.6: Geometría del electrodo tipo péndulo con cemento conductor.

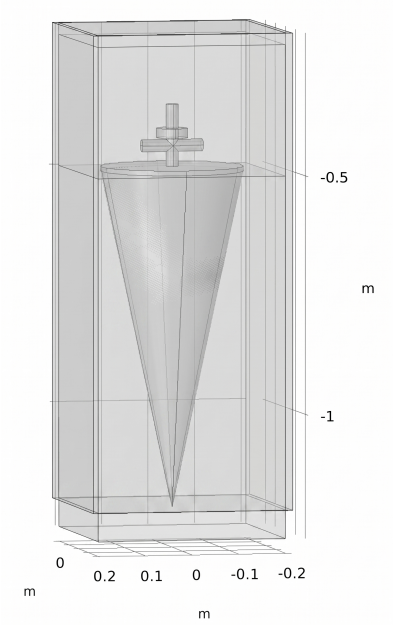


Figura 3.7: Geometría del electrodo tipo cónico con cámara dieléctrica.

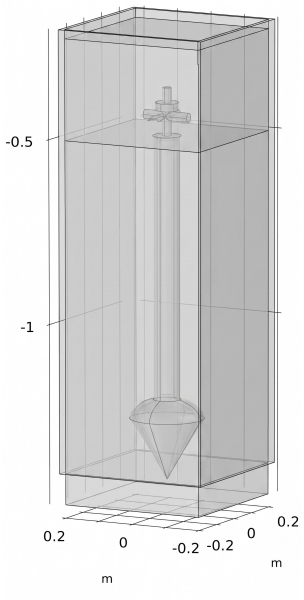


Figura 3.8: Geometría del electrodo tipo péndulo con cámara dieléctrica.

3.2.3.d. Configuraciones de la malla de Puesta a tierra.

Para el análisis del comportamiento de un electrodo junto con una malla, se construyó una malla de puesta a tierra de 12×12 [m], con un reticulado simétrico de 4 [m]. Los conductores se modelaron con un radio de 9,27 [mm] de cobre y con profundidad de enterramiento de 50 [cm]. A partir de esta geometría base, el estudio se dividió en tres escenarios comparativos:

1. **Caso 1: malla base.** Malla de 12×12 [m] inmersa en el dominio de suelo rocoso de 200 [m].
2. **Caso 2: malla con 1 electrodo convencional.** Se incorpora a la malla base un electrodo tipo barra (convencional) de 1 [m] de longitud y 9,27 [mm] de radio instalado en la esquina inferior izquierda de la malla.
3. **Caso 3: malla con 1 electrodo de disipación vertical de alta eficiencia.** Se acopla a la malla el modelo completo de 1 electrodo cónico con su relleno de cemento conductor en la esquina inferior izquierda de la malla.
4. **Caso 4: malla con 4 electrodos convencionales.** Se incorpora a la malla base 4 electrodos tipo barra (convencional) de 1 [m] de longitud y 9,27 [mm] de radio cada uno, instalados en las 4 esquinas exteriores de la malla.
5. **Caso 5: malla con 4 electrodos de disipación vertical de alta eficiencia.** Se acopla a la malla el modelo completo de 4 electrodos cónicos con su relleno de cemento conductor instalados en las 4 esquinas exteriores de la malla.

3.2.4. Definición de materiales y sus propiedades.

Para una correcta evaluación del comportamiento multifísico, se caracterizan las propiedades electromagnéticas y térmicas de los materiales.

3.2.4.a. Cobre.

Las propiedades base del cobre se extrajeron de la librería de COMSOL Multiphysics; sin embargo, para capturar la pérdida de eficiencia conductiva por el calentamiento y la variación de su inercia térmica, se implementaron las siguientes correcciones lineales en función de la temperatura. [1], [27], [28]:

- Conductividad eléctrica del cobre:

$$\sigma_{Cu}(T) = \frac{5{,}998 \cdot 10^7}{1 + 0{,}00393(T - 293{,}15)} \quad \left[\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{m}}\right] \tag{3.7}$$

- Capacidad calorífica del cobre:

$$C_{p,Cu}(T) = 385 + 0{,}1(T - 293{,}15) \quad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}}\right] \tag{3.8}$$

3.2.4.b. Suelo rocoso de alta resistividad.

El dominio principal se modeló representando un suelo rocoso de alta resistividad, representativo de formaciones en zonas hiperáridas (desierto de Atacama). Las propiedades físicas, eléctricas y térmicas asignadas en el software se detallan a continuación:

- **Densidad ($\rho = 2400$ $\mathbf{kg/m^3}$).** La litología de la zona de estudio está fuertemente influenciada por basamentos de rocas ígneas y complejos plutónicos, tales como la granodiorita [29], [30]. El valor de 2400 $\mathrm{kg/m^3}$ es representativo de este medio rocoso consolidado y compacto. Esta densidad se ubica lógicamente por encima de la densidad aparente típica de los sedimentos aluviales superficiales no consolidados del desierto (estimada entre 1400 y 1900 $\mathrm{kg/m^3}$) [31], [32], pero es coherente y cercana a la densidad de partícula sólida real de estos minerales, la cual alcanza los 2600 $\mathrm{kg/m^3}$ [32].

- **Permitividad relativa ($\varepsilon_r = 6$).** La constante dieléctrica del suelo está fuertemente condicionada por el contenido de agua. El núcleo del desierto de Atacama opera bajo condiciones de hiperaridez extrema, con precipitaciones medias anuales inferiores a 2 mm/año [31], [32], [33]. Esta restricción hídrica severa resulta en una ausencia casi total de agua libre en la matriz del terreno [32]. Al no existir humedad que eleve la permitividad, se adoptó un valor de $\varepsilon_r = 6$, el cual es el estándar para suelos rocosos completamente secos.

- **Conductividad térmica ($k = 2$ $\mathbf{W/(m \cdot K)}$).** Al carecer de agua libre que facilite mecanismos de convección hídrica o que actúe como sumidero de calor [32], el estrato se comporta térmicamente como un sólido puro. Se estableció un coeficiente de conducción de 2 $\mathrm{W/(m \cdot K)}$, típico para macizos rocosos consolidados que están sometidos a las drásticas fluctuaciones diarias de temperatura propias del desierto [34].

- **Conductividad eléctrica dependiente de la temperatura ($\sigma(T)$).** Los terrenos rocosos desérticos presentan condiciones sumamente adversas para la disipación, con resistividades que, debido a su extrema sequedad y no uniformidad superficial, pueden superar holgadamente los 2000 $[\Omega \cdot \mathrm{m}]$ [35]. Debido a que la inyección de la corriente de falla genera un gradiente térmico transitorio que altera las propiedades del medio local, se implementó una función dinámica basada en la literatura de efectos de conducción en tierra e instalaciones de puesta a tierra [36]:

$$\sigma(T) = \frac{1}{\rho_{\text{suelo}}} \cdot [1 - 0,0002 \cdot (T - 293,15)] \quad \left[\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{m}}\right] \tag{3.9}$$

- **Capacidad térmica a presión constante ($C_p(T)$).** De manera homóloga, la inercia térmica del suelo rocoso requiere corrección por temperatura para modelar correctamente la acumulación de energía disipada por efecto Joule durante el cortocircuito. Se utilizó la siguiente ecuación para la corrección por temperatura [37]:

$$C_p(T) = 900 + 1,2 \cdot (T - 293,15) \quad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}}\right] \tag{3.10}$$

3.2.4.c. Cemento Conductor.

El cemento conductor es una mezcla cuya inercia térmica depende fuertemente de su estado de hidratación. Según los datos del fabricante [38], [39], la composición másica en polvo seco consta de un 50 % de bentonita sódica, 35 % de grafito de alta pureza y 15 % de cemento resistente a sulfatos. Utilizando los valores termodinámicos de la literatura para estos componentes [27], [40], la capacidad calorífica teórica de la mezcla seca ($C_{p,seco}$) a 20°C es:

$$C_{p,seco} = 0,50(850) + 0,35(710) + 0,15(800) = 793,5 \quad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}\right] \tag{3.11}$$

Dado que la instalación exige una relación agua/sólidos de 0,22 (en masa) y considerando que la capacidad calorífica del agua es de 4184 $\mathrm{J/(kg\cdot K)}$, el calor específico del material ya instalado y fraguado ($C_{p,instalado}$) se corrige mediante la siguiente ponderación:

$$C_{p,instalado} = \frac{1(793,5) + 0,22(4184)}{1,22} = 1404,9 \approx 1405 \quad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}\right] \tag{3.12}$$

A partir de este valor base, se ingresó a COMSOL la función dependiente de la temperatura para el cemento conductor:

$$C_{p,cem}(T) = 1405 + 2,0(T - 293,15) \quad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}\right] \tag{3.13}$$

3.2.4.d. Caja Dieléctrica.

Para confinar el cemento conductor y aislar el entorno inmediato del electrodo, se modeló una caja dieléctrica basada en las propiedades del Tablero Biosintético Warp [41]. Este material está fabricado a partir de residuos plásticos industriales. Dado que su composición base es una matriz polimérica, las propiedades eléctricas y térmicas ingresadas al software se sustentan en los certificados de calidad del fabricante y en las propiedades estándar de polímeros industriales de alta densidad (PE-HD), resultando en los siguientes parámetros:

- **Densidad ($\rho = 1015,9$ $\mathbf{kg/m^3}$).** El valor exacto de la masa volumétrica se extrajo directamente de los ensayos mecánicos (norma ASTM D792-20) realizados al tablero biosintético [41].
- **Conductividad eléctrica ($\sigma = 1 \times 10^{-14}$ $\mathbf{S/m}$).** Al ser un material compuesto íntegramente por plásticos recuperados, actúa como un aislante perfecto [41]. Este valor de conductividad (equivalente a una resistividad de 10^{14} $[\Omega \cdot m]$) concuerda con la resistividad superficial característica de los polímeros termoestables como el polietileno de alta densidad (PE-HD), la cual es $\geq 10^{14}$ $[\Omega \cdot m]$ [42].
- **Conductividad térmica ($k = 0,3$ $\mathbf{W/(m\cdot K)}$).** Las matrices de polietileno de alta densidad presentan una conductividad térmica de 0,38 $\mathrm{W/(m\cdot K)}$ [42]. El valor aproximado de 0,3 $\mathrm{W/(m\cdot K)}$ es coherente con un material compuesto de fibras y

minerales encapsulados en plástico, proporcionando una barrera térmica que confina el calor dentro del cemento conductor.

- **Permitividad relativa ($\varepsilon_r = 2,4$) y capacidad térmica ($C_p = 1700$ $\mathbf{J/(kg{\cdot}K)}$).** Estos valores corresponden a las propiedades dieléctricas y termodinámicas características de los polímeros industriales base (como el PE-HD) [42] que conforman la materia prima reciclada del tablero. La alta capacidad térmica del material contribuye a absorber parte de la energía térmica generada por el electrodo sin degradarse.

3.2.5. Condiciones de frontera y excitación.

La resolución del sistema de ecuaciones acopladas mediante el método de elementos finitos requiere establecer condiciones de frontera que representen adecuadamente la interacción del sistema de puesta a tierra con el terreno circundante. Estas condiciones determinan la forma en que la corriente es inyectada al modelo, la referencia utilizada para el potencial eléctrico y el comportamiento de las fronteras exteriores del dominio computacional. Debido a que el modelo incorpora simultáneamente las interfaces de *Corrientes Eléctricas* y *Transferencia de Calor en Sólidos*, las condiciones de frontera se definieron separadamente para los fenómenos electromagnéticos y térmicos.

3.2.5.a. Condiciones de frontera electromagnéticas.

La evaluación de la dispersión de corriente hacia el terreno requiere establecer una fuente de corriente y una referencia de potencial remoto. Para ello se implementaron las siguientes condiciones:

- **Excitación mediante terminal de corriente.** La corriente de falla se inyectó en el punto de conexión superior del electrodo o de la malla mediante la condición *Terminal* (tipo *Corriente*) en la interfaz *Electric Currents* de COMSOL Multiphysics. Esta condición iguala la corriente total a través de la superficie a un valor especificado I_0:

$$\int_{\partial\Omega} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n}\, dS = I_0 \tag{3.14}$$

  donde $\partial\Omega$ es la superficie del terminal, $\mathbf{J}$ la densidad de corriente eléctrica y $\mathbf{n}$ el vector normal [24]. Para el estudio transitorio, el inicio de la falla se modeló con una función escalón unitario (*Step Function*):

$$I_0(t) = I_{\text{falla}} \cdot \text{step1}(t[1/s]) \tag{3.15}$$

  Las simulaciones se ejecutaron en un intervalo de 500 [ms] con pasos de cálculo de 5 [ms].

- **Referencia de potencial remoto y dominio de elementos infinitos.** Las caras laterales y la base del suelo se rodearon con un *Infinite Element Domain* para simular la extensión infinita del terreno. Se utilizó un sistema de coordenadas cartesiano con función de prolongación racional, lo que produce un escalamiento progresivo de la región exterior [43], [44].

La condición de tierra (*Ground*, $V = 0$) se aplicó exclusivamente en las superficies exteriores de esta capa infinita. Las fronteras internas entre el suelo finito y los dominios infinitos mantuvieron continuidad para permitir el flujo natural de la corriente.

- **Aislamiento eléctrico en la superficie del terreno.** La superficie superior del suelo que representa la interfaz terreno-aire se modeló con la condición de aislamiento eléctrico ($\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$). Al anular la componente normal de la densidad de corriente, se asume que no hay conducción hacia la atmósfera [26], obligando a la corriente inyectada a disiparse hacia el interior y las regiones laterales del suelo.

- **Continuidad en las interfaces internas.** Los diferentes materiales que componen el sistema: cobre, cemento conductor, suelo rocoso y, cuando corresponde, material dieléctrico, fueron construidos mediante una geometría conformante utilizando la operación *Form Union*. Esto permite conservar las fronteras internas comunes entre materiales y establecer continuidad entre los dominios adyacentes.

  En ausencia de resistencias de contacto adicionales, las interfaces internas satisfacen la continuidad del potencial eléctrico ($V_1 = V_2$) y de la componente normal de la densidad de corriente ($\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2) = 0$) Esta condición resulta especialmente relevante en las interfaces cobre-cemento y cemento-suelo, debido a que en estas regiones se produce la transferencia de corriente desde el electrodo hacia el medio circundante.

3.2.5.b. Condiciones de frontera térmicas.

Dado el acoplamiento a través del nodo multifísico de *Calentamiento Electromagnético*, el cual ingresa las pérdidas resistivas como una fuente de calor volumétrica (Q_e), fue necesario establecer el estado inicial y las restricciones de propagación de calor en los bordes del modelo.

- **Valores iniciales.** Se definió una temperatura de inicio para todos los dominios del modelo (electrodo, cemento, caja y suelo) en el instante $t = 0$, con una temperatura inicial de 293,15 K (20°C).

- **Aislamiento térmico.** El modelo de transferencia de calor se configuró bajo la condición de aislamiento térmico en todas sus fronteras exteriores. Matemáticamente, esto impone una condición homogénea, estableciendo que el flujo de calor normal a las fronteras es nulo tal como se describe a continuación:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0 \tag{3.16}$$

3.2.6. Mallado.

Se implementó una malla definida por el usuario que combina elementos tetraédricos libres en los dominios finitos, refinamiento local cerca de los electrodos y discretización barrida (*Swept Mesh*) en los dominios infinitos. Esta estrategia se fundamenta en el modelo geoeléctrico de referencia de COMSOL Multiphysics [44].

3.2.6.a. Mallado del dominio finito.

En las zonas alejadas del sistema de puesta a tierra se usó un mallado grueso, ya que los gradientes eléctricos y térmicos disminuyen con la distancia. Esto evita un exceso de grados de libertad en áreas donde la solución presenta una baja variación.

Por el contrario, las regiones cercanas a los electrodos exigen una alta densidad de malla debido a los fuertes gradientes de potencial y la concentración de corriente. En consecuencia, se aplicó un tamaño de elemento más fino en el cemento conductor, las piezas de cobre y la cámara dieléctrica.

En las simulaciones con malla de puesta a tierra (12×12 [m]) se añadió un subdominio de control de $20 \times 20 \times 4$ [m]. Este volumen conserva las propiedades físicas del suelo y sirve únicamente para guiar la discretización. Allí, el tamaño máximo de elemento se limitó a 1 [m], lo que permite concentrar la resolución numérica sobre la malla sin sobrecargar innecesariamente el resto del terreno.

Los tamaños de los elementos se asignaron según las dimensiones geométricas y los requerimientos de la solución: *normal* para el cemento conductor, *fino* para la caja dieléctrica y *extremadamente fino* para el cobre y las interfaces estrechas.

3.2.6.b. Transición entre regiones con diferente densidad de malla.

Un aspecto relevante del proceso de discretización corresponde a la transición entre regiones con tamaños de elemento diferentes. Una variación excesivamente abrupta entre una zona altamente refinada y otra de elementos considerablemente mayores produce tetraedros con elevada distorsión geométrica, por tanto puede disminuir la calidad de la malla y deteriorar el condicionamiento del sistema numérico.

La utilización de dominios intermedios permite reducir cambios bruscos de tamaño entre zonas adyacentes. Este criterio resulta particularmente importante en las interfaces cobre-cemento, cemento-suelo y en las paredes de las cámaras dieléctricas, debido a que estas regiones combinan pequeñas dimensiones geométricas con elevados gradientes de las variables de interés.

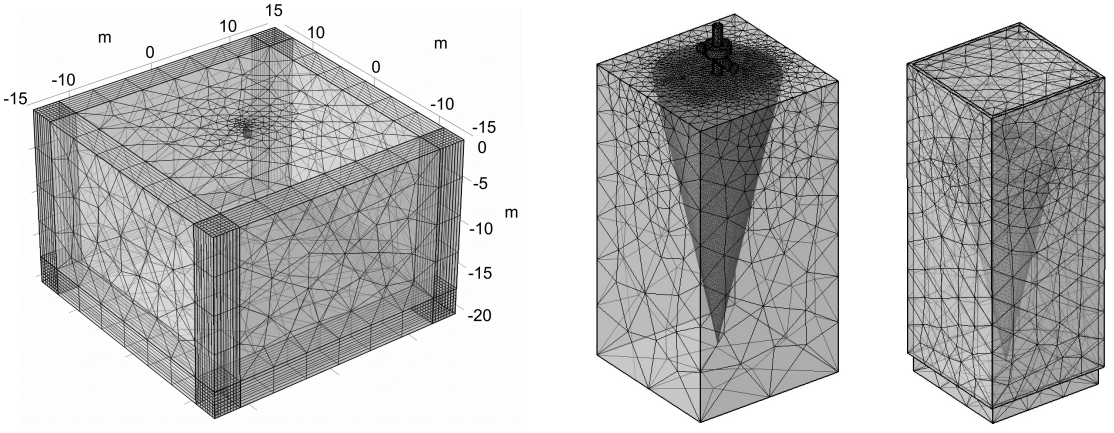
3.2.6.c. Mallado de los dominios infinitos.

Los dominios de elementos infinitos requieren un enfoque distinto al del volumen interior. Dado que su transformación de coordenadas produce un estiramiento matemático, una malla tetraédrica libre pierde calidad efectiva frente al escalamiento espacial.

Siguiendo las directrices de COMSOL [43], la periferia del modelo se discretizó mediante la operación *Swept Mesh*, alineando el barrido con la dirección del escalamiento. Esto genera capas ordenadas desde el límite del suelo finito hacia el exterior. En la envolvente tridimensional, las regiones asociadas a caras, aristas y esquinas poseen una, dos o tres direcciones de prolongación, respectivamente. El barrido se configuró para respetar progresivamente esta topología geométrica.

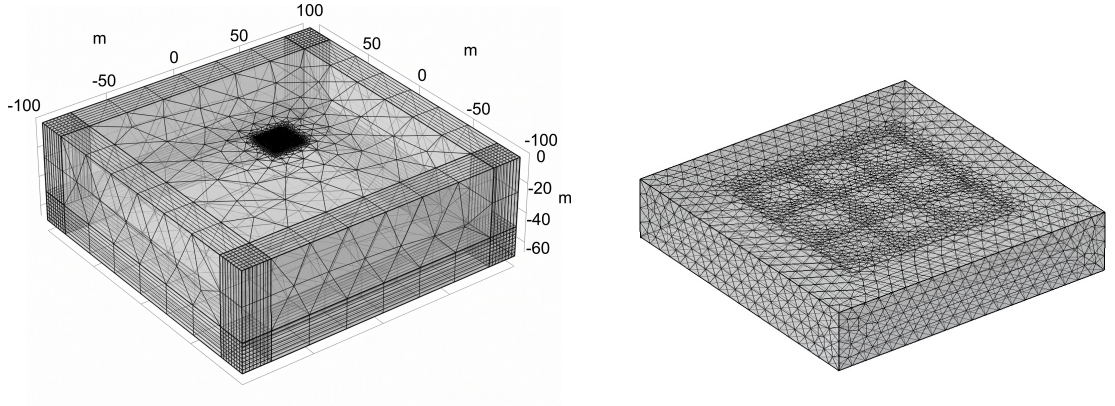
Mediante un nodo de distribución se establecieron múltiples capas a través del espesor del dominio infinito. Finalmente, esta secuencia se integró a la malla principal controlada por el usuario.

Las Figuras 3.9 y 3.10 ilustran las mallas resultantes para un electrodo de disipación vertical de alta eficiencia individual y para una configuración con malla de puesta a tierra. En ambas se aprecia el refinamiento en la zona de interés y la estructura barrida en los bordes.



(A) (B)

Figura 3.9: Mallado del dominio computacional correspondiente a la simulación individual de un electrodo de disipación vertical de alta eficiencia. (A): Visión general. (B): Visión ampliada.



(A) (B)

Figura 3.10: Mallado del dominio computacional correspondiente a una malla de puesta a tierra. (A): Visión general. (B): Visión ampliada.

3.2.7. Magnitudes extraídas.

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones acopladas, se procedió a la etapa de posprocesamiento para extraer las variables de interés. Para el análisis espacial, se utilizaron conjuntos de datos del tipo *Línea de corte en 3D*, lo que permitió trazar perfiles y obtener gráficas unidimensionales a partir del modelo tridimensional.

La extracción de datos se estructuró de la siguiente manera:

3.2.7.a. Extracción espacial (Líneas de corte).

Para caracterizar el decaimiento de las variables a medida que se alejan del punto de inyección, se definieron dos vectores de evaluación principales:

- **Evaluación en superficie.** Se configuró una línea de corte horizontal a nivel de piso ($Z = 0$), proyectada radialmente desde el centro hacia el exterior. Esta trayectoria se ocupa para caracterizar el gradiente de potencial que experimentaría un transeúnte en la superficie del terreno.
- **Evaluación en profundidad.** Se configuraron líneas de corte verticales descendentes (por ejemplo, evaluando desde $Z = 0$ hasta $Z = -3$ m), incluyendo líneas paralelas adicionales equidistantes al eje central del electrodo. Esto permite observar cómo penetran las líneas de corriente y el frente de calor a través del cemento conductor y el terreno rocoso en distintos radios.

3.2.7.b. Magnitudes directas.

A partir de las físicas modeladas, el software entregó la distribución espacial y temporal de las siguientes variables:

- **Potencial eléctrico** $[V]$**.** Su distribución en la superficie de la tierra define la curva de elevación de potencial de tierra. Es la variable base para determinar los gradientes de tensión.
- **Densidad de corriente** $[A/m^2]$**.** Permite identificar las zonas de mayor concentración de disipación de corriente, revelando la eficacia del acondicionador de terreno para distribuir el flujo eléctrico hacia el suelo rocoso.
- **Temperatura** $[T]$**.** Verifica la respuesta térmica transitoria de los materiales. Su monitoreo en los puntos críticos asegura que el calor generado por efecto Joule no degrade el cemento conductor ni indique que el suelo circundante alcance temperaturas donde sus propiedades cambien de forma permanente.

3.2.7.c. Magnitudes derivadas e indirectas.

Mediante el uso de herramientas de *Evaluación Global* y cálculos derivados de los resultados directos, se obtuvieron los parámetros normativos de diseño:

- **Resistencia equivalente (**R_{eq}**).** Se calculó de manera indirecta a través de la relación entre el voltaje instantáneo medido en el nodo terminal (V_{term}) y la corriente de falla inyectada (I_0), mediante la ley de Ohm ($R_{eq} = V_{\text{term}}/I_0$). Esta magnitud cuantifica el desempeño global de cada configuración geométrica.
- **Tensiones de paso y contacto.** A partir de la curva GPR extraída en la superficie del modelo, se evaluaron las diferencias de potencial entre puntos separados por 1 [m] (tensión de paso) y entre la estructura conectada a tierra y un punto a 1 [m] de distancia (tensión de contacto).

3.3. Modelamiento en ATPDraw.

Los fabricantes de electrodos magnetoactivos indican que el acoplador superior del dispositivo posee la capacidad de filtrar ruido eléctrico y atenuar componentes de alta frecuencia. Sin embargo, por secreto industrial, no se especifica la naturaleza exacta de los componentes internos. Ante esto, se evaluaron diversas hipótesis sobre los elementos que podrían conformar dicho filtro, tales como imanes, diodos de potencia, o arreglos convencionales de filtros pasabajos con reactores y capacitores discretos.

Estas hipótesis fueron descartadas por criterios de viabilidad física y evidencia académica. En primer lugar, no existe literatura científica que respalde el uso de imanes como filtros pasivos para armónicos industriales o señales de alta frecuencia. Por otro lado, la incorporación de diodos de potencia o arreglos inductivo-capacitivos capaces de soportar las severas corrientes de cortocircuito exigidas a un sistema de puesta a tierra requeriría componentes de dimensiones físicas que excederían ampliamente el volumen disponible en la cámara del acoplador del electrodo.

Por tanto, el único material pasivo físicamente viable para ser integrado en ese espacio reducido y capaz de realizar el filtrado de señales de alta frecuencia es la ferrita. Las ferritas son cerámicas ferromagnéticas ampliamente utilizadas para la supresión de interferencias electromagnéticas sin introducir pérdidas en bajas frecuencias [45]. Por lo mencionado anteriormente se selecciona el software ATPDraw para el análisis de transitorios, permitiendo implementar modelos circuitales equivalentes que representan el comportamiento dependiente de la frecuencia del material frente a diversas señales de excitación [46].

3.3.1. Elección de la ferrita y síntesis mediante modelo de Foster.

El comportamiento de atenuación de una ferrita no es el de un inductor ideal, sino que se rige por su permeabilidad relativa compleja, expresada como $\mu_r(f) = \mu'_r(f) - j\mu''_r(f)$ [45], [46]. La componente real (μ'_r) modela el almacenamiento de energía magnética (inductancia), mientras que la componente imaginaria (μ''_r) modela las pérdidas por absorción (resistencia). A medida que la frecuencia aumenta, las pérdidas resistivas se vuelven dominantes, atenuando el ruido de alta frecuencia convirtiéndolo en calor [45].

Para caracterizar el espectro de atenuación, se seleccionaron tres tipos de ferritas comerciales, representativas de distintas familias y rangos de operación:

- **Ferrita Manganeso-Zinc (MnZn) Tipo 75.** Presenta alta permeabilidad inicial y su pico de impedancia se sitúa alrededor de los 800 [kHz], ideal para el rango bajo de atenuación [47].
- **Ferrita Manganeso-Zinc (MnZn) Tipo 73.** Orientada al rango de atenuación medio, presentando su máxima impedancia en el orden de los 11 [MHz] [48].
- **Ferrita Níquel-Zinc (NiZn) Tipo 43.** Caracterizada por una alta resistividad, esta familia de ferritas es idónea para la supresión de ruidos de banda ancha, alcanzando su pico de impedancia cerca de los 480 [MHz] [49].

Dado que ATPDraw opera en el dominio del tiempo, no es posible ingresar directamente curvas de impedancia dependientes de la frecuencia. Para resolver este problema, se aplicó la técnica de síntesis de circuitos para resolver el problema inverso: a partir de las curvas

de impedancia (Z vs f) extraídas de las fichas técnicas de los fabricantes [47], [48], [49], se determinó una topología equivalente de componentes.

Se utilizó un modelo de Foster modificado de cuarto orden. Esto consiste en cuatro bloques conectados en serie, donde cada bloque está compuesto por una resistencia, una inductancia y una capacitancia en paralelo. En este modelo, responsable de ajustar y reproducir la o las curvas de resonancia específicas observadas en la curva de datos experimentales del material.

Los parámetros R, L y C de cada bloque fueron calculados y ajustados mediante la técnica del vector fitting aplicado a un algoritmo computacional en MATLAB, logrando una resolución muy cercana entre la respuesta sintetizada del modelo de Foster y el comportamiento real de la ferrita. Una vez sintetizados los circuitos, se incorporaron a ATPDraw, permitiendo simular la inyección de señales industriales, armónicos y transitorios de alta frecuencia, y validar cuantitativamente la capacidad del bloque magnetoactivo para atenuar dichas perturbaciones.

Capítulo 4

Resultados y análisis

4.1. Electrodo cónico con cemento conductor.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación del electrodo cónico en el software COMSOL Multiphysics. Para evaluar de manera exhaustiva el desempeño del sistema, el análisis se desarrolló considerando las siguientes condiciones:

- Corrientes de falla: 100, 250, 500 y 1000 [A].
- Resistividades del suelo: 500, 1000, 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$.

A lo largo de las siguientes subsecciones se exponen las gráficas más representativas para las distintas variables físicas estudiadas (potencial eléctrico, densidad de corriente y temperatura). Con el propósito de mantener la fluidez del documento y evitar la redundancia visual ante el elevado volumen de datos generados, se adoptará como caso base de referencia el escenario evaluado con una resistividad de 1000 $[\Omega \cdot m]$ y una corriente de inyección de 1000 [A]. No obstante, todos los resultados simulados han sido considerados para el análisis integral.

4.1.1. Comportamiento de tensiones en superficie del terreno.

En este apartado se presentan los resultados de la tensión superficial tomando como origen (punto 0) el centro del electrodo en la superficie del terreno, tal como se ilustra en la figura A.1. Desde dicho punto se traza una línea recta hacia el exterior con una longitud de 3 metros para evaluar el comportamiento de la tensión.

En la figura 4.1 se observa que las cuatro curvas presentan un decaimiento exponencial a medida que aumenta la distancia desde el centro del electrodo. Este comportamiento concuerda plenamente con lo esperado según diversos modelos matemáticos. En cuanto a los valores, la curva azul (correspondiente a una resistividad de 500 $[\Omega \cdot m]$) muestra una tensión de 85,67 [kV] en la posición cero. Al duplicar la resistividad a 1000 $[\Omega \cdot m]$ (curva naranja), el valor en el mismo punto asciende a 171,08 [kV], es decir, prácticamente el doble.

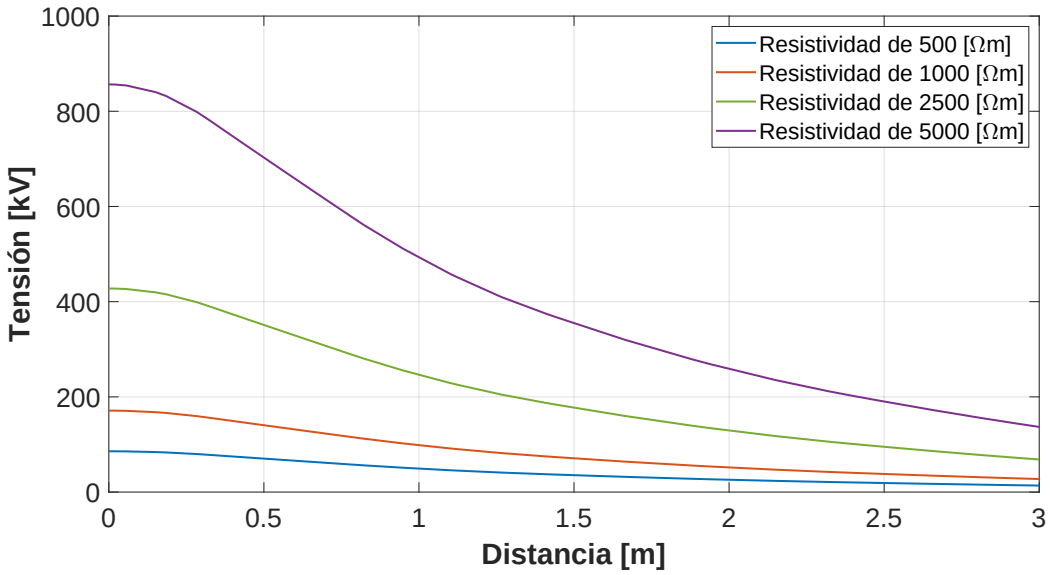


Figura 4.1: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A].

Por lo tanto, se evidencia un escalamiento lineal: al duplicar la resistividad del terreno, la tensión se duplica en el mismo punto de evaluación. Esta proporcionalidad se confirma al comparar la curva verde (2500 $[\Omega \cdot m]$, con 425,66 [kV] en el origen) frente a la curva morada (5000 $[\Omega \cdot m]$), que alcanza 856,43 [kV] en la misma posición, duplicando nuevamente el valor de tensión respectivo. Al revisar las figuras de la sección del apéndice A.2.1, se constata que este patrón de comportamiento se mantiene constante para el resto de los casos simulados en este tipo de electrodo.

4.1.2. Comportamiento de temperatura y densidad de corriente.

El análisis del comportamiento térmico y de la densidad de corriente revela dos escenarios contrastantes. En la superficie del terreno, la variación térmica ante la inyección de la falla es mínima, manteniéndose en torno a los $20°C$ iniciales. Esto ocurre debido a que la geometría del electrodo y la alta conductividad del cemento canalizan la mayor densidad de corriente hacia las capas más profundas, minimizando significativamente las pérdidas por efecto Joule a nivel superficial (ver figuras A.9 y A.10).

En contraste, el análisis en profundidad muestra un incremento térmico abrupto (punto caliente) localizado exactamente en la interfaz entre el cemento conductor y el suelo rocoso (ver figura 4.2). Este fenómeno obedece al cambio brusco de conductividad eléctrica entre ambos medios: al abandonar el cemento, la corriente se encuentra con un terreno hiperárido, concentrando la disipación térmica en dicha superficie de contacto. La tabla 4.1 resume los valores máximos alcanzados en esta zona. Cabe advertir que, en los escenarios más extremos, temperaturas por sobre los $200°C$ podrían alterar permanentemente las propiedades de los materiales involucrados, representando un factor a considerar en la vida útil de la instalación.

Cabe destacar que este análisis es extrapolable a los demás casos de electrodos estudiados (secciones 4.2.2, 4.4.2 y 4.5.2), por lo que se hará referencia a este apartado para evitar redundancias a lo largo del documento.

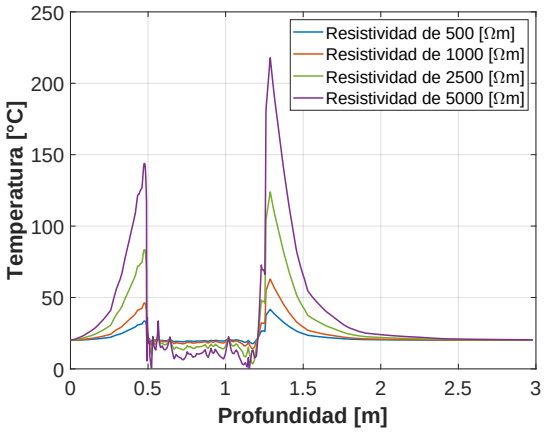


Figura 4.2: Comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A].

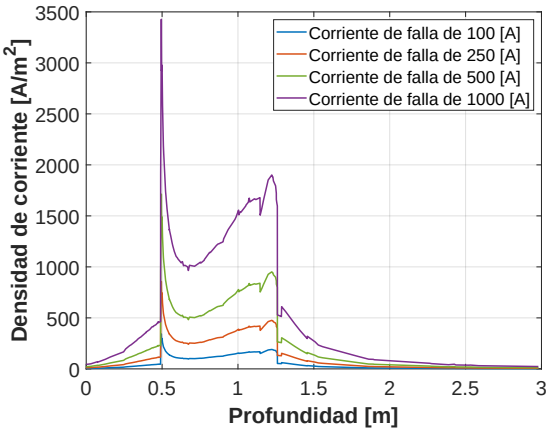


Figura 4.3: Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo cónico con cemento conductor.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	20,51 [°C]	21,01 [°C]	22,51 [°C]	25,02 [°C]
250	23,19 [°C]	26,32 [°C]	30,26 [°C]	51,13 [°C]
500	32,73 [°C]	45,16 [°C]	60,38 [°C]	100,83 [°C]
1 000	69,88 [°C]	118,54 [°C]	172,20 [°C]	326,75 [°C]

Tabla 4.1: Resumen de máxima elevación de temperatura electrodo cónico con cemento conductor obtenido en COMSOL Multiphysics.

4.1.3. Evaluación del aumento del potencial de tierra.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	13,01 [kV]	25,93 [kV]	64,67 [kV]	129,24 [kV]
250	32,53 [kV]	64,96 [kV]	161,74 [kV]	323,43 [kV]
500	65,08 [kV]	129,73 [kV]	324,05 [kV]	649,08 [kV]
1 000	130,40 [kV]	260,18 [kV]	652,49 [kV]	1 314,60 [kV]

Tabla 4.2: Resumen de elevación del potencial de la puesta a tierra (GPR) del electrodo cónico con cemento conductor obtenido en COMSOL Multiphysics.

La tabla 4.2 presenta los resultados del GPR para todos los escenarios simulados con este electrodo. Al igual que las demás variables analizadas, su crecimiento es lineal y directamente proporcional tanto al incremento de la resistividad del suelo como a la magnitud de la corriente de falla. Este comportamiento se detalla gráficamente en la figura A.12 del apéndice.

4.1.4. Evaluación de la resistencia de puesta a tierra.

Al observar la figura 4.4, se evidencia la dependencia lineal de la resistencia de puesta a tierra (R_g) respecto a la resistividad del suelo. Además, para una resistividad determinada, el valor de R_g se mantiene constante independientemente de la magnitud de la corriente de falla inyectada. Este resultado concuerda plenamente con los modelos teóricos, los cuales emplean únicamente resistividades y características geométricas como variables de entrada. La tabla 4.3 detalla los valores de resistencia obtenidos en todos los casos simulados.

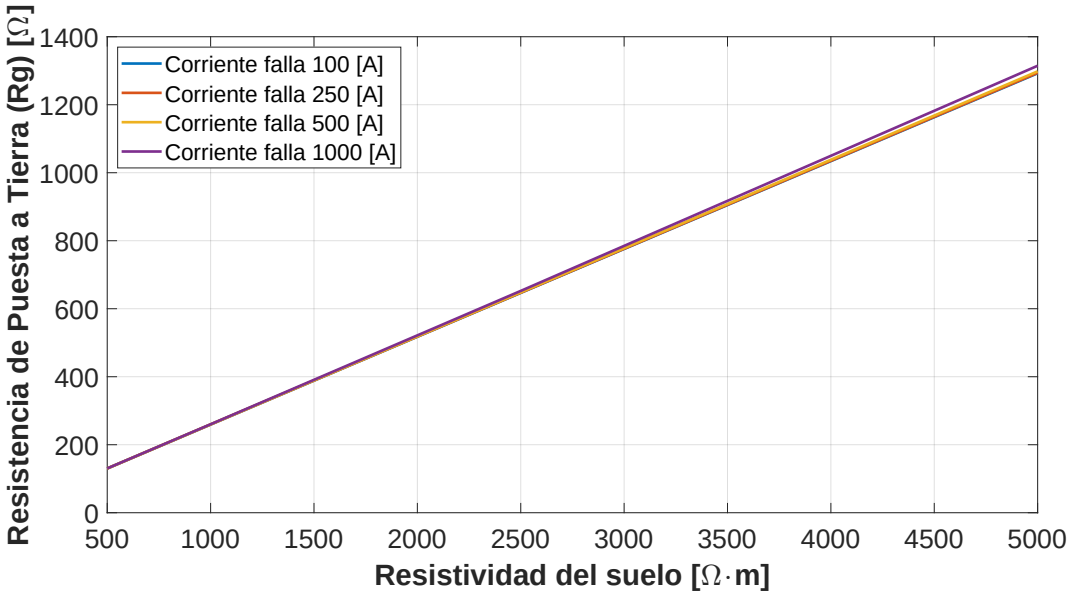


Figura 4.4: Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra para modelo electrodo cónico con cemento conductor.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	130,10 [Ω]	259,32 [Ω]	646,65 [Ω]	1 292,45 [Ω]
250	130,11 [Ω]	259,47 [Ω]	646,98 [Ω]	1 293,73 [Ω]
500	130,16 [Ω]	259,84 [Ω]	648,10 [Ω]	1 298,16 [Ω]
1 000	130,34 [Ω]	260,18 [Ω]	652,40 [Ω]	1 314,60 [Ω]
Promedio	130,18 [Ω]	259,70 [Ω]	648,53 [Ω]	1 299,74 [Ω]

Tabla 4.3: Resumen de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo cónico con cemento conductor obtenida en COMSOL Multiphysics.

La tabla 4.4 presenta una comparativa entre los resultados de la simulación y dos modelos teóricos de varillas analizados en el marco teórico. A partir de estos datos, se concluye que la R_g simulada es, en promedio, un 57,57 % menor que la calculada mediante el modelo de Dwight, y un 24,67 % inferior en comparación con el modelo de electrodo revestido en concreto de Fagan y Lee.

En consecuencia, se demuestra que la implementación del electrodo cónico con cemento conductor reduce de manera significativa y consistente la resistencia de la puesta a tierra,

en comparación con los valores teóricos esperados para electrodos cilíndricos convencionales de dimensiones equivalentes.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Modelo	500	1 000	2 500	5 000
Dwigth	305,47 [Ω]	610,95 [Ω]	1 527,39 [Ω]	3 054,78 [Ω]
Reducción	57,38 [%]	57,49 [%]	57,54 [%]	57,45 [%]
Fagan y Lee	172,84 [Ω]	345,02 [Ω]	861,56 [Ω]	1 722,46 [Ω]
Reducción	24,68 [%]	24,73 [%]	24,73 [%]	24,54 [%]

Tabla 4.4: Comparación de resistencia de la puesta a tierra (R_g) del electrodo cónico con cemento conductor obtenida en COMSOL Multiphysics respecto a modelos teóricos.

4.2. Electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación en el software COMSOL Multiphysics para la configuración con cámara dieléctrica. Los casos de análisis siguen siendo los mismos descritos en la sección 4.1. Nuevamente se tomará como base comparativa el escenario evaluado con una resistividad de 1000 $[\Omega \cdot m]$ y una corriente de inyección de 1000 [A] para la exposición de gráficos, no obstante, todas las simulaciones han sido consideradas para el análisis general.

4.2.1. Comportamiento de tensiones en superficie del terreno.

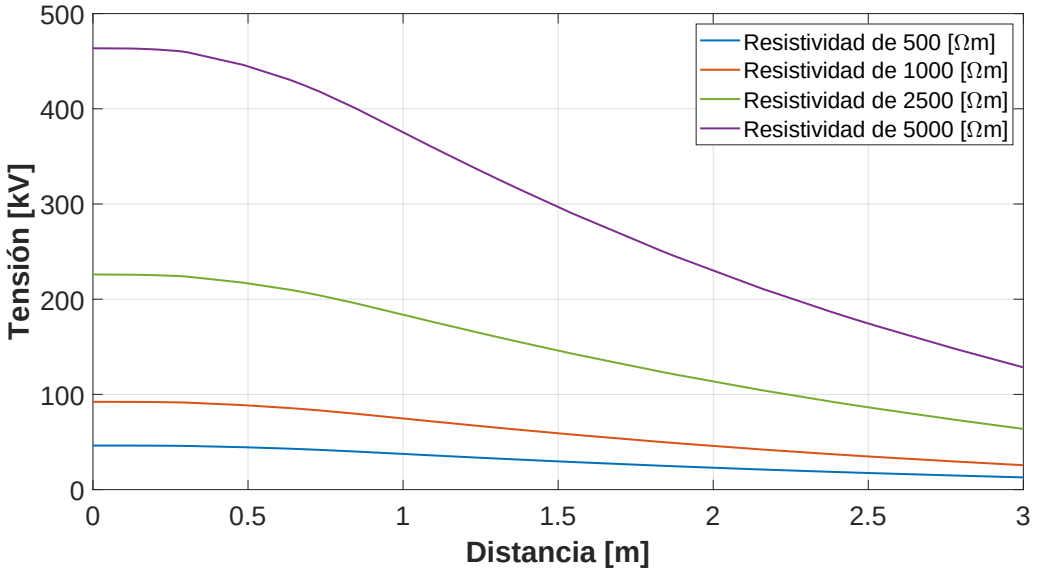


Figura 4.5: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A].

En este apartado se presentan los resultados de la tensión superficial tomando como origen (punto 0) el centro del electrodo en la superficie del terreno, tal como se ilustra en

la figura A.1. Desde dicho punto se traza una línea recta hacia el exterior con una longitud de 3 metros para evaluar el comportamiento del gradiente de potencial.

En la figura 4.5 se observa que las cuatro curvas presentan un decaimiento exponencial a medida que aumenta la distancia desde el centro del electrodo. A diferencia del caso analizado en la sección 4.1.1, en esta configuración se observa un comportamiento plano (meseta) de la tensión en los primeros 25 a 30 [cm]. Este fenómeno se debe a la incorporación de la cámara dieléctrica, la cual actúa como barrera física que limita y controla la elevación del potencial en el área inmediata de instalación. Aun así, se mantiene la linealidad en los resultados globales, aumentos proporcionales en la resistividad del terreno se traducen en incrementos proporcionalmente equivalentes en las tensiones superficiales.

4.2.2. Comportamiento de temperatura y densidad de corriente.

Tal como se analizó en la sección 4.1.2, la temperatura en la superficie del terreno no presenta variaciones significativas, conservándose cercana a los $20°C$ base debido a la reducida densidad de corriente en este estrato.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	21,08 [°C]	22,16 [°C]	25,40 [°C]	30,69 [°C]
250	26,76 [°C]	33,45 [°C]	53,35 [°C]	85,63 [°C]
500	46,59 [°C]	72,87 [°C]	147,77 [°C]	263,34 [°C]
1 000	123,46 [°C]	218,56 [°C]	468,28 [°C]	814,96 [°C]

Tabla 4.5: Resumen de máxima elevación de temperatura electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenido en COMSOL Multiphysics.

Respecto al comportamiento en profundidad, el fenómeno térmico se agudiza debido a la presencia de la cámara dieléctrica. Al confinar lateralmente el arreglo, esta barrera fuerza a que la totalidad de la corriente de falla sea evacuada de manera exclusiva por la base del cemento conductor hacia el terreno rocoso (ver figuras A.20 y A.21 del apéndice). Esto genera concentraciones de densidad de corriente y temperaturas notablemente superiores a las del electrodo sin cámara. Los valores máximos (ver tabla 4.5) evidencian que, ante inyecciones de 1000 [A], el límite crítico de $200°C$ es superado con mayor facilidad, concentrando un mayor estrés térmico localizado en la parte inferior del dispositivo.

4.2.3. Evaluación del aumento del potencial de tierra.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	28,33 [kV]	56,21 [kV]	140,10 [kV]	280,78 [kV]
250	71,11 [kV]	141,64 [kV]	356,91 [kV]	727,10 [kV]
500	144,12 [kV]	290,50 [kV]	744,88 [kV]	1 580,33 [kV]
1 000	302,09 [kV]	637,13 [kV]	1 533,52 [kV]	3 377,26 [kV]

Tabla 4.6: Resumen de elevación del potencial de puesta a tierra (GPR) del electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenido en COMSOL Multiphysics.

La tabla 4.6 presenta los resultados del GPR para todos los escenarios simulados. Al igual que las demás variables analizadas, su crecimiento es lineal y directamente proporcional tanto al incremento de la resistividad del suelo como a la magnitud de la corriente de falla. Este comportamiento se ilustra gráficamente en la figura A.47 del apéndice.

4.2.4. Evaluación de la resistencia de puesta a tierra.

Al observar la figura 4.6, se evidencia la dependencia lineal de la resistencia de puesta a tierra (R_g) respecto a la resistividad del suelo. Además, para una resistividad determinada, el valor de R_g se mantiene de manera casi constantes independientemente de la magnitud de la corriente de falla inyectada. La tabla 4.7 detalla los valores de resistencia obtenidos en todos los casos simulados.

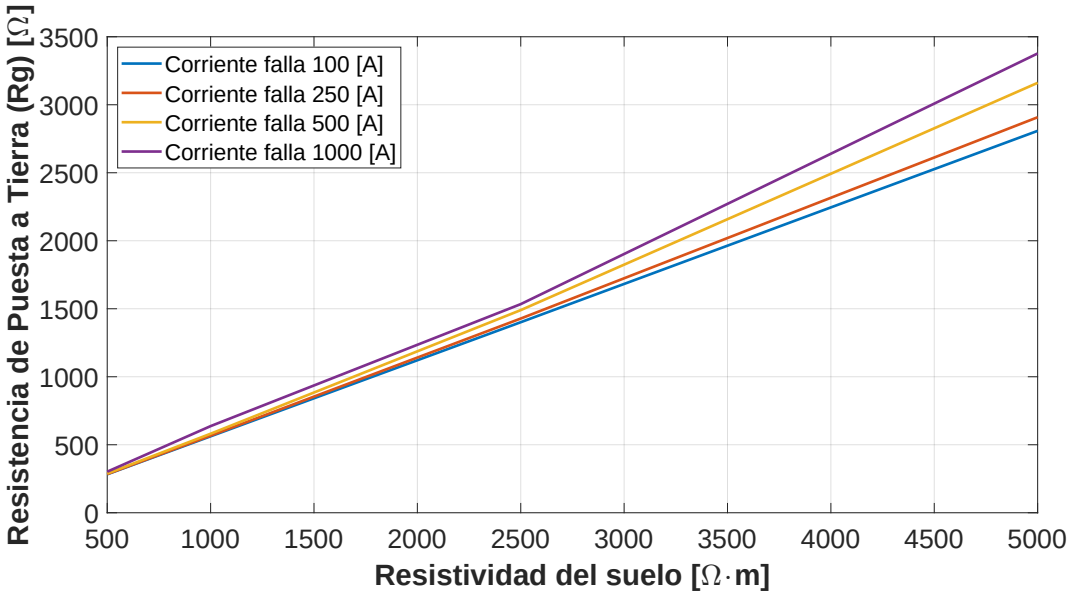


Figura 4.6: Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	283 [Ω]	562 [Ω]	1 401 [Ω]	2 808 [Ω]
250	284 [Ω]	567 [Ω]	1 428 [Ω]	2 908 [Ω]
500	288 [Ω]	581 [Ω]	1 490 [Ω]	3 161 [Ω]
1 000	302 [Ω]	637 [Ω]	1 534 [Ω]	3 377 [Ω]
Promedio	290 [Ω]	587 [Ω]	1 463 [Ω]	3 064 [Ω]

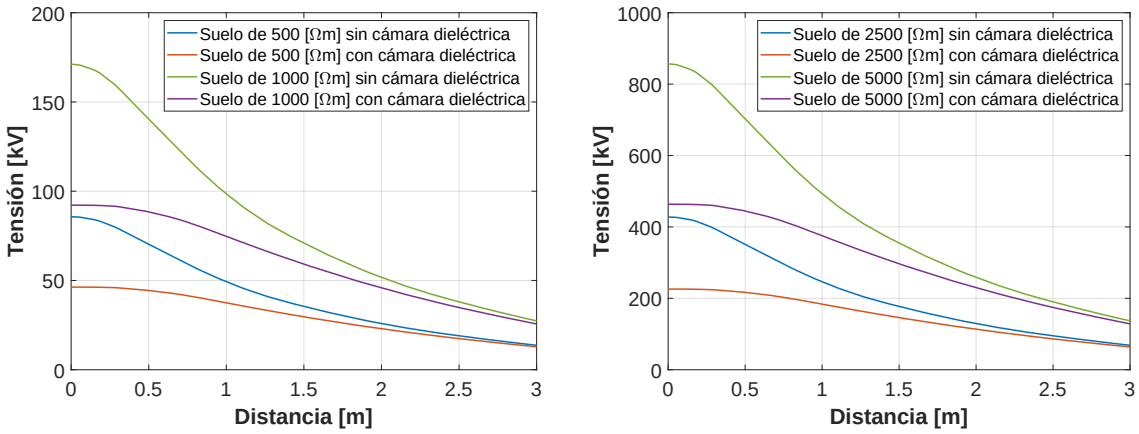
Tabla 4.7: Resumen de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenida en COMSOL Multiphysics.

Es importante señalar que en esta sección no se realiza una comparativa directa con modelos teóricos, dado que la formulación analítica convencional no contempla la inclusión de un medio dieléctrico que encapsule lateralmente el arreglo del electrodo cónico y el cemento conductor. A pesar de esto, los valores simulados de R_g se mantienen en un

orden de magnitud similar al aportado por el modelo de Dwight, pero logrando resultados significativamente menores en las tensiones superficiales.

4.3. Comparativa tensiones entre configuración sin y con cámara dieléctrica del electrodo cónico.

En la figura 4.7 se presenta una comparativa visual entre el electrodo cónico con cemento conductor y el mismo diseño adicionando la cámara dieléctrica. Los resultados detallados para todos los demás escenarios simulados se encuentran disponibles en la sección A.4 del apéndice.



(A) (B)

Figura 4.7: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. (A): Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. (B): Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 1000 [A].

Icc [A]	**Resistividad** $[\Omega \cdot m]$											
	500			1 000			2 500			5 000		
	A [V]	B [V]	[%]	A [V]	B [V]	[%]	A [V]	B [V]	[%]	A [V]	B [V]	[%]
100	3 949	895	77,3	7 874	1 789	77,3	16 393	4 473	72,7	39 267	8 941	77,2
250	9 872	2 235	77,4	19 694	4 469	77,3	49 120	12 895	73,7	98 193	22 259	77,3
500	19 747	4 464	77,4	39 374	8 911	77,4	98 289	22 161	77,5	196 592	43 912	77,7
1 000	39 508	8 878	77,5	78 812	17 632	77,6	196 995	42 663	78,3	394 858	89 064	77,4

Tabla 4.8: Resumen comparativo de tensiones en el primer metro de distancia en la superficie. A: Electrodo cónico con cemento conductor. B: Electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica. [%]: Reducción porcentual de tensiones de B respecto a A.

A partir de los resultados expuestos en la figura 4.7 y la tabla 4.8, se evidencia un cambio sustancial en el comportamiento del gradiente de potencial al incorporar la cámara dieléctrica en la configuración del electrodo. El análisis de este fenómeno se puede desglosar en las siguientes observaciones.

Al evaluar el electrodo con cámara dieléctrica, se observa que la presencia de la barrera física de dicha cámara dieléctrica restringe la conducción de corriente hacia la superficie.

Para el caso con resistividad de 500 $[\Omega \cdot m]$, al comparar la configuración estándar (curva azul) con la encapsulada (curva naranja), la tensión en los primeros centímetros se reduce aproximadamente a la mitad. Este mismo comportamiento de mitigación se repite para el escenario de 1000 $[\Omega \cdot m]$ (curvas verde y morada).

El impacto más significativo desde el punto de vista de la seguridad eléctrica ocurre dentro del primer metro de distancia radial, una de las zonas para la evaluación de las tensiones de paso. Según los datos de la tabla 4.8, la solución con cámara dieléctrica logra una reducción promedio en torno al 77,3 % en las tensiones de paso dentro de este primer metro.

A pesar de la alta eficiencia inicial, el efecto de la cámara dieléctrica es un fenómeno netamente localizado. Al observar la distribución de la tensión en la figura 4.7, la diferencia de tensión inicial entre ambas soluciones disminuye entre 1 a 1,5 metros de distancia. Al superar los 2,5 metros, las curvas de ambas configuraciones convergen casi en su totalidad. Esto indica que, para el terreno adyacente lejano, la capacidad de disipación y el perfil de tensión superficial son idénticos independientemente de si el electrodo cuenta o no con la cámara dieléctrica.

4.4. Electrodo péndulo con cemento conductor.

Dado que los fenómenos que están presentes en está configuración son análogos a los estudiados para el modelo cónico, esta sección presenta los resultados de manera resumida. Para la justificación física detallada del comportamiento de las variables, se hace referencia a los análisis desarrollados en la sección 4.1.

4.4.1. Comportamiento de tensiones en superficie del terreno.

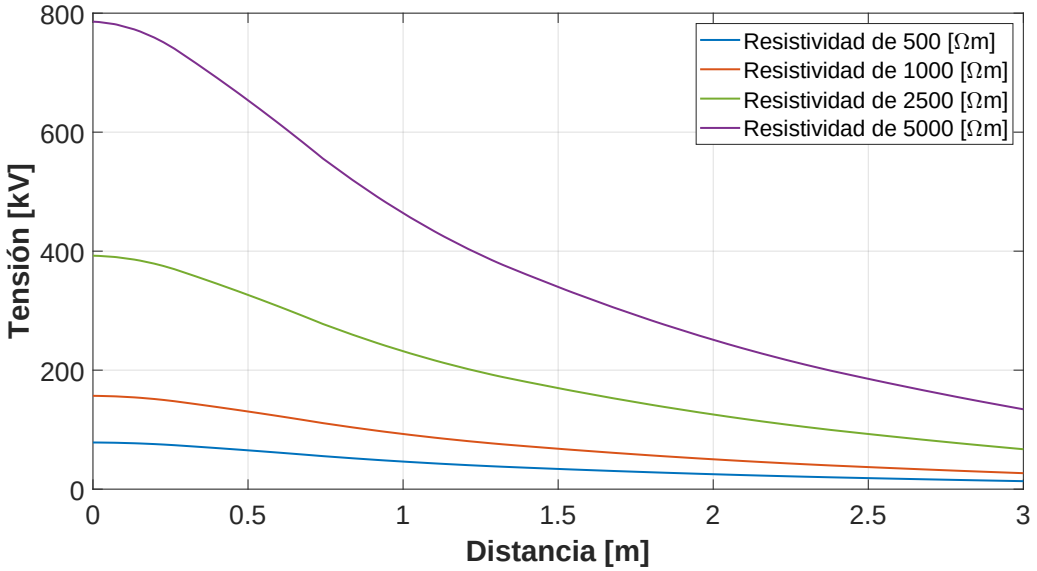


Figura 4.8: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A].

En la figura 4.8 se constata que las tensiones superficiales presentan el mismo decaimiento exponencial y escalamiento lineal (proporcional a la resistividad del terreno) evidenciado en el modelo cónico (ver inciso 4.1.1). Para visualizar todos los casos referirse al inciso A.5.1 del apéndice.

4.4.2. Comportamiento de temperatura y densidad de corriente.

En congruencia con el comportamiento base ya descrito (sección 4.1.2), la elevación térmica superficial para el modelo péndulo es prácticamente nula, registrando temperaturas constantes en torno a los $20°C$.

En el análisis en profundidad, los incrementos térmicos se localizan nuevamente en la interfaz de cambio de conductividad entre el cemento y la roca. No obstante, la particularidad geométrica de la boya central en el electrodo tipo péndulo propicia que las mayores concentraciones de corriente, y por ende los puntos calientes, tanto en la frontera superior como en la inferior del electrodo (ver figuras en el Apéndice A.5.2). La tabla 4.9 detalla las temperaturas máximas alcanzadas en estos puntos, conservando la tendencia de proporcionalidad lineal frente a la resistividad del terreno.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	20,25 [°C]	20,51 [°C]	21,29 [°C]	22,59 [°C]
250	21,61 [°C]	23,23 [°C]	28,06 [°C]	36,06 [°C]
500	26,44 [°C]	32,86 [°C]	51,84 [°C]	82,63 [°C]
1 000	45,51 [°C]	70,38 [°C]	141,26 [°C]	249,44 [°C]

Tabla 4.9: Resumen de máxima elevación de temperatura electrodo péndulo con cemento conductor obtenido en COMSOL Multiphysics.

4.4.3. Evaluación del aumento del potencial de tierra.

Los resultados del GPR (tabla 4.10) mantienen el comportamiento lineal y directamente proporcional frente a las variaciones de corriente de falla y resistividad del terreno.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	11,54 [kV]	22,99 [kV]	57,35 [kV]	114,63 [kV]
250	28,85 [kV]	57,49 [kV]	143,43 [kV]	286,75 [kV]
500	57,71 [kV]	115,03 [kV]	287,19 [kV]	574,81 [kV]
1 000	115,52 [kV]	230,47 [kV]	576,92 [kV]	1 159,44 [kV]

Tabla 4.10: Resumen de elevación del potencial de la puesta a tierra (GPR) del electrodo péndulo con cemento conductor obtenido en COMSOL Multiphysics.

4.4.4. Evaluación de la resistencia de puesta a tierra.

De manera análoga al modelo cónico, la resistencia de puesta a tierra (R_g) de la configuración en péndulo figura 4.9 resulta ser independiente de la corriente inyectada,

variando únicamente en función de la resistividad del suelo. En la tabla 4.11 se presentan los valores exactos de R_g para cada caso simulado.

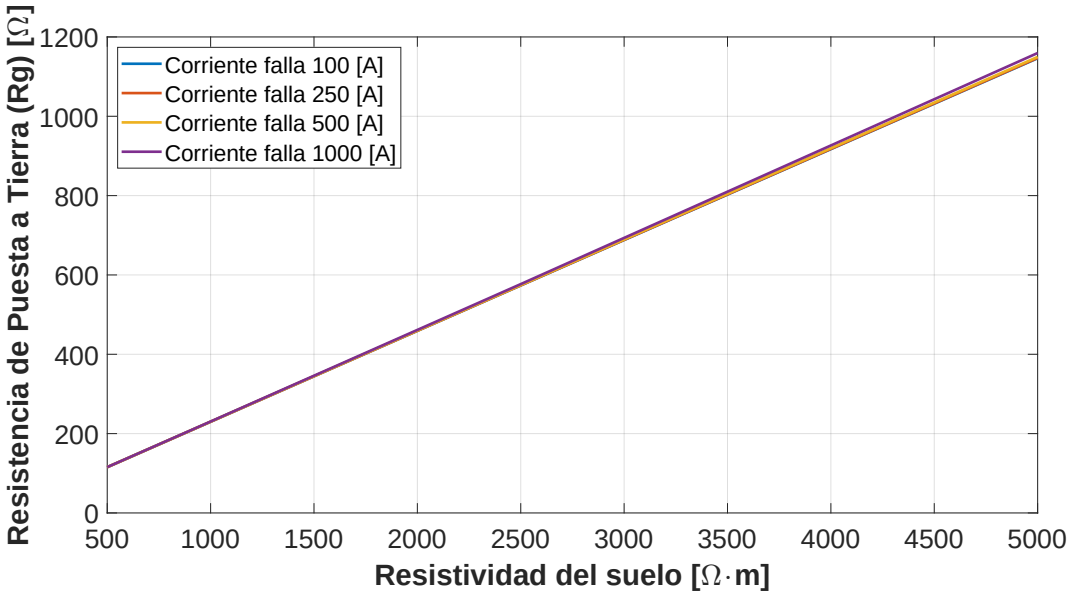


Figura 4.9: Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra para modelo electrodo péndulo con cemento conductor.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	115,38 [Ω]	229,91 [Ω]	573,52 [Ω]	1 146,26 [Ω]
250	115,39 [Ω]	229,94 [Ω]	573,71 [Ω]	1 147,01 [Ω]
500	115,41 [Ω]	230,05 [Ω]	574,37 [Ω]	1 149,61 [Ω]
1 000	115,52 [Ω]	230,47 [Ω]	576,92 [Ω]	1 159,44 [Ω]
Promedio	115,43 [Ω]	230,09 [Ω]	574,63 [Ω]	1 150,58 [Ω]

Tabla 4.11: Resumen de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo péndulo con cemento conductor obtenida en COMSOL Multiphysics.

Al comparar los resultados simulados con los modelos teóricos (ver tabla 4.12), se observa que el electrodo péndulo con cemento conductor logra una reducción promedio constante del 65,30 % respecto al modelo de Dwight, y del 28,72 % frente al modelo de Fagan y Lee, reafirmando la superioridad de esta solución de electrodos frente a las varillas convencionales.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Modelo	500	1 000	2 500	5 000
Dwigth	331,76 [Ω]	663,53 [Ω]	1 658,82 [Ω]	3 317,65 [Ω]
Reducción	65,21 [%]	65,32 [%]	65,36 [%]	65,32 [%]
Fagan y Lee	161,98 [Ω]	323,09 [Ω]	806,41 [Ω]	1 611,94 [Ω]
Reducción	28,74 [%]	28,78 [%]	28,74 [%]	28,62 [%]

Tabla 4.12: Comparación de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo péndulo con cemento conductor obtenida en COMSOL Multiphysics respecto a modelos teóricos.

4.5. Electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica.

Dado que la incorporación de la cámara dieléctrica en este modelo replica las restricciones de contorno evaluadas en la configuración cónica con cámara dieléctrica, esta sección expone los resultados de manera resumida. Los fenómenos observados corresponden a los detallados en la sección 4.2 referente al electrodo cónico con cámara dieléctrica.

4.5.1. Comportamiento de tensiones en superficie del terreno.

En la figura 4.10 se observa el mismo decaimiento exponencial del gradiente de potencial detallado en escenarios anteriores. Adicionalmente, se aprecia la característica meseta de tensión en los primeros 25 a 30 [cm] de distancia radial, producto de la limitación impuesta por la barrera física de la cámara dieléctrica, tal como se analizó en el inciso 4.2.1.

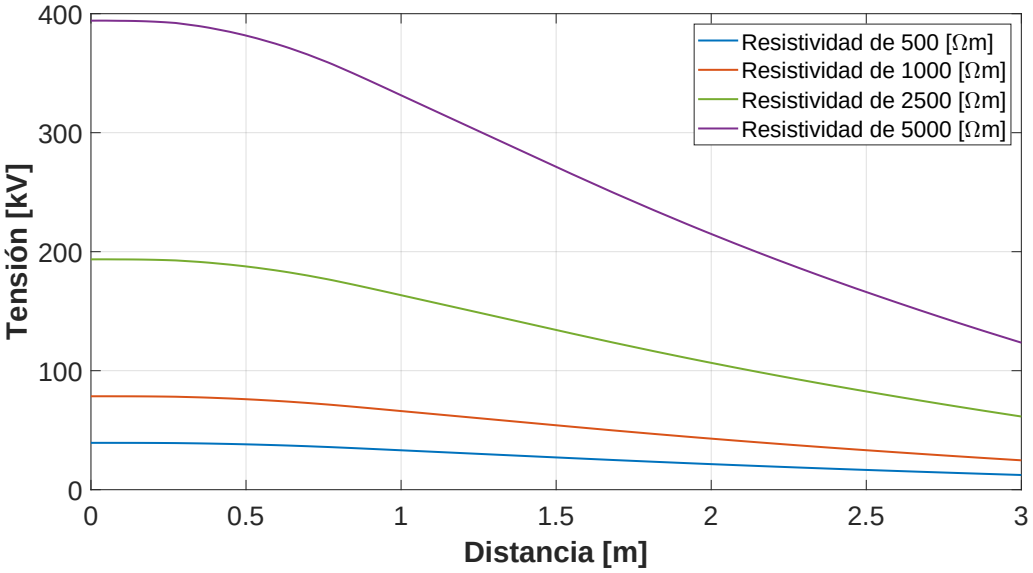


Figura 4.10: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A].

4.5.2. Comportamiento de temperatura y densidad de corriente.

Al igual que en las configuraciones anteriores, la temperatura en la superficie se mantiene estable sin presentar riesgos térmicos.

Al estar confinado lateralmente por la cámara dieléctrica, el electrodo tipo péndulo se ve forzado a evacuar la totalidad de la corriente de falla a través de la cara inferior del cemento conductor hacia el suelo rocoso. Este comportamiento replica el fenómeno analizado en la sección 4.2.2, concentrando los valores máximos de densidad de corriente y los puntos calientes exclusivamente en la cara inferior (ver figuras A.45 y A.46). Las elevaciones máximas de temperatura producto de esta restricción se detallan en la tabla 4.13.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	20,54 [°C]	21,07 [°C]	22,68 [°C]	25,37 [°C]
250	23,37 [°C]	26,72 [°C]	36,71 [°C]	53,14 [°C]
500	33,44 [°C]	46,66 [°C]	85,43 [°C]	147,20 [°C]
1 000	72,69 [°C]	123,13 [°C]	262,44 [°C]	468,17 [°C]

Tabla 4.13: Resumen de máxima elevación de temperatura del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenido en COMSOL Multiphysics.

4.5.3. Evaluación del aumento del potencial de tierra.

Los resultados de GPR (tabla 4.14) conservan dependencia lineal y proporcional ante las variaciones de resistividad e intensidad de corriente de falla.

	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	26,41 [kV]	52,50 [kV]	130,95 [kV]	262,35 [kV]
250	66,25 [kV]	132,10 [kV]	332,44 [kV]	675,10 [kV]
500	133,97 [kV]	269,74 [kV]	693,04 [kV]	1 464,23 [kV]
1 000	278,49 [kV]	581,45 [kV]	1 410,45 [kV]	3 047,66 [kV]

Tabla 4.14: Resumen de elevación del potencial de la puesta a tierra (GPR) del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenido en COMSOL Multiphysics.

4.5.4. Evaluación de la resistencia de puesta a tierra.

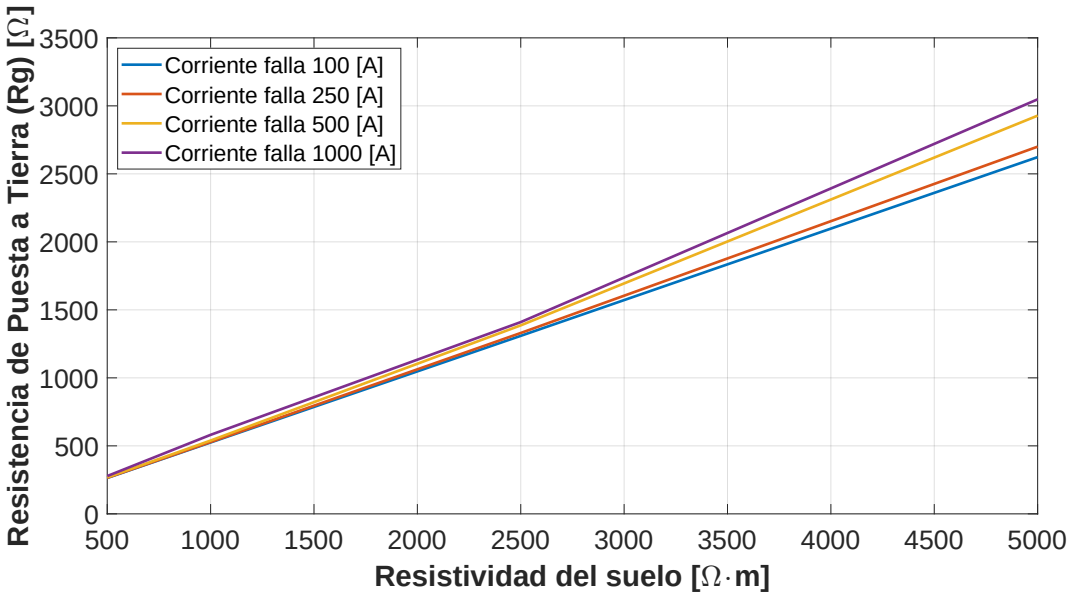


Figura 4.11: Comportamiento de la resistencia de puesta a tierra para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica.

Finalmente, la resistencia de puesta a tierra (R_g) mantiene un valor casi constante para cada nivel de resistividad, mostrando la independencia de este parámetro respecto a la magnitud de la corriente inyectada (ver figura 4.11 y tabla 4.15).

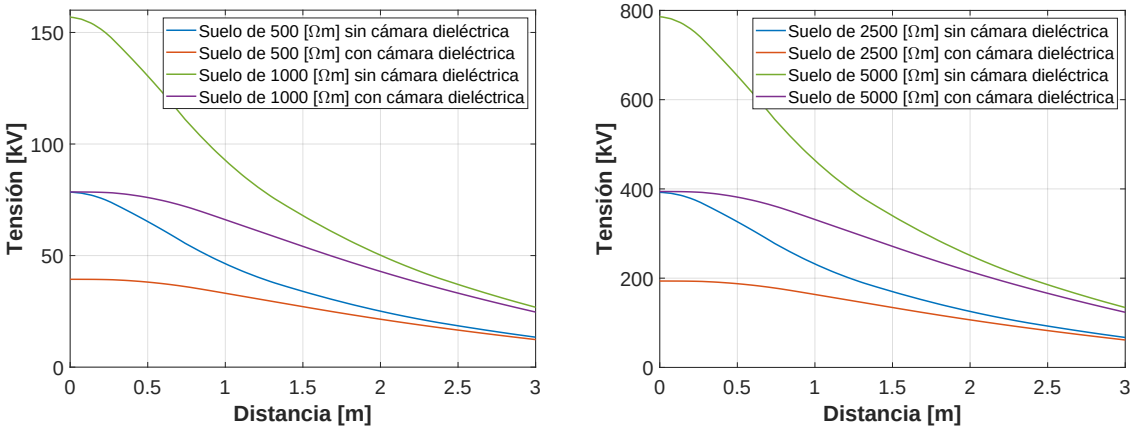
	Resistividad $[\Omega \cdot m]$			
Icc [A]	500	1 000	2 500	5 000
100	264 [Ω]	525 [Ω]	1 309 [Ω]	2 623 [Ω]
250	265 [Ω]	528 [Ω]	1 330 [Ω]	2 700 [Ω]
500	268 [Ω]	539 [Ω]	1 386 [Ω]	2 928 [Ω]
1 000	278 [Ω]	581 [Ω]	1 410 [Ω]	3 048 [Ω]
Promedio	269 [Ω]	544 [Ω]	1 359 [Ω]	2 825 [Ω]

Tabla 4.15: Resumen de la resistencia de puesta a tierra (R_g) del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica obtenida en COMSOL Multiphysics.

Es importante señalar que en esta sección no se realiza una comparativa directa con modelos teóricos, dado que la formulación analítica convencional no contempla la inclusión de un medio dieléctrico que encapsule lateralmente el arreglo del electrodo péndulo y el cemento conductor. A pesar de esto, los valores simulados de R_g se mantienen en un orden de magnitud similar al aportado por el modelo de Dwight, pero logrando resultados significativamente menores en las tensiones superficiales.

4.6. Comparativa tensiones entre configuración sin y con cámara dieléctrica del electrodo péndulo.

En la figura 4.12 se presenta una comparativa visual entre el electrodo péndulo con cemento conductor y el mismo diseño adicionando la cámara dieléctrica. Los resultados detallados para todos los demás escenarios simulados se encuentran disponibles en la sección A.7 del apéndice.



(A) (B)

Figura 4.12: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. (A): Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. (B): Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 1000 [A].

A partir de los resultados expuestos en la figura 4.12 y la tabla 4.16, se evidencia un cambio sustancial en el comportamiento del gradiente de potencial al incorporar la cámara dieléctrica en la configuración del electrodo. El análisis de este fenómeno está descrito en el inciso 4.3.

Icc [A]	**Resistividad** $[\Omega \cdot m]$											
	500			1 000			2 500			5 000		
	A [V]	B [V]	[%]	A [V]	B [V]	[%]	A [V]	B [V]	[%]	A [V]	B [V]	[%]
100	3 278	622	81,0	6 553	1 401	78,6	16 376	3 500	78,6	32 751	6 997	78,6
250	8 197	1 555	81,0	16 384	3 498	78,6	40 947	8 733	78,7	81 896	17 429	78,7
500	16 395	3 495	78,7	32 773	6 977	78,7	81 932	15 421	81,2	163 944	30 577	81,3
1 000	32 801	6 955	78,8	65 593	13 822	78,9	164 163	29 755	81,9	329 078	69 738	78,8

Tabla 4.16: Resumen comparativo de tensiones en el primer metro de distancia en la superficie. A: Electrodo péndulo con cemento conductor. B: Electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica. [%]: Reducción porcentual de tensiones de B respecto a A.

En cuanto a la evaluación de las tensiones de paso, según los datos de la tabla 4.16, la solución con cámara dieléctrica logra una reducción promedio en torno al 78,8 % en las tensiones de paso dentro de este primer metro.

A pesar de la alta eficiencia inicial, el efecto de la cámara dieléctrica es un fenómeno netamente localizado. Al observar la distribución de la tensión en la figura 4.12, la diferencia de tensión inicial entre ambas soluciones disminuye a medida que se aleja del punto 0 del electrodo. Al superar los 2,5 metros, las curvas de ambas configuraciones convergen casi en su totalidad, este fenómeno se evidenció de la misma manera para la configuración del electrodo cónico y descrito en el inciso 4.3. Esto indica que, para el terreno adyacente lejano, la capacidad de disipación y el perfil de tensión superficial son idénticos independientemente de si el electrodo cuenta o no con la cámara dieléctrica.

4.6.1. Comparativa de desempeño de tensiones entre electrodo cónico y péndulo.

El análisis comparativo entre las configuraciones del electrodo cónico y el electrodo tipo péndulo, basado en las tensiones de paso expuestas en las tablas 4.8 y 4.16, revela cierto grado de diferencias. Para la configuración base (solo con cemento conductor), el electrodo cónico registró una tensión de paso de 78,81 [kV], frente a los 65,59 [kV] del electrodo péndulo, lo que representa una reducción del 16,77 % a favor de este último.

Por otra parte, al evaluar la configuración que incorpora cemento conductor y cámara dieléctrica, el electrodo cónico presentó una tensión de paso de 17,63 [kV], mientras que el electrodo péndulo alcanzó los 13,82 [kV], evidenciando una disminución del 21,61 % respecto a su contraparte cónica.

En conclusión, la implementación del electrodo tipo péndulo demostró un desempeño superior al reducir las tensiones de paso en ambos escenarios analizados.

4.7. Implementación de electrodos en una malla de puesta a tierra.

En este apartado se muestran los resultados de la simulación para las distintas configuraciones de la malla de puesta a tierra, descritas previamente en el inciso 3.2.3.d, y se presenta una comparación detallada entre ellas. Para todos los escenarios evaluados, se inyecta una corriente de 1000 [A] durante 0,5 [s], considerando una resistividad del suelo de 1000 $[\Omega \cdot m]$.

Con base en lo anterior, se analizan los valores de tensión, densidad de corriente y temperatura según el esquema ilustrado en la figura 4.13. En dicho esquema, los puntos A, B, C y D corresponden a las ubicaciones donde se evalúa el valor máximo (o *peak*) de tensión producido, complementado con una evaluación general de las variables en la superficie a lo largo de 37 metros según la línea azul mostrada. Por otra parte, en la figura 4.14 se establecen las cuatro distancias escogidas para analizar las tensiones de paso y contacto en los distintos casos de estudio (ver secciones 4.7.3 y 4.7.4). Estos lugares fueron seleccionados debido a que allí ocurren las diferencias de potencial más abruptas en la menor distancia, representando así las condiciones más críticas para la evaluación de seguridad de la malla.

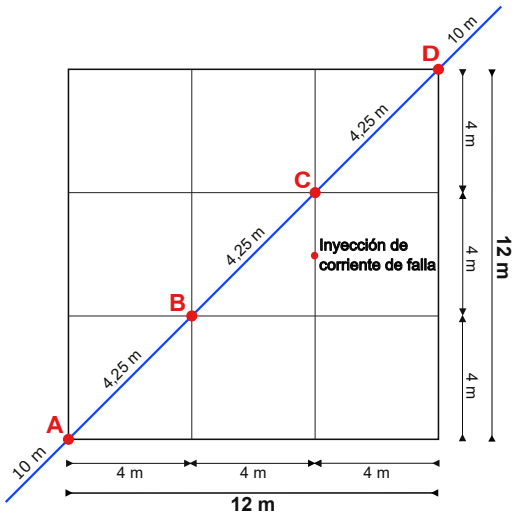


Figura 4.13: Puntos y distancia de evaluación general en superficie de las variables en los distintos casos de mallas definidos en la sección 3.2.3.d.

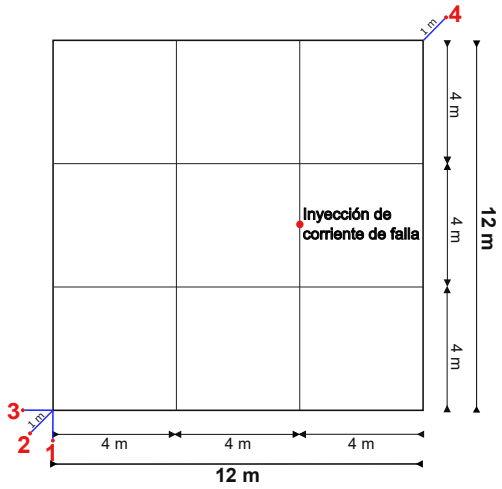


Figura 4.14: Ubicación de las distancias utilizadas para la evaluación de tensiones de paso y contacto según los casos de mallas definidos en la sección 3.2.3.d.

4.7.1. Evaluación del potencial en la superficie.

En la figura 4.15 se visualiza, de manera general, el comportamiento de la tensión en la superficie de la malla de puesta a tierra a lo largo de la línea dispuesta en la figura 4.13. En esta gráfica, cada pico representa los puntos dispuestos sobre la recta evaluada. Para una mejor visualización particular de los casos que utilizan 1 electrodo y 4 electrodos, se recomienda consultar las figuras A.53 y A.54 ubicadas en el apéndice.

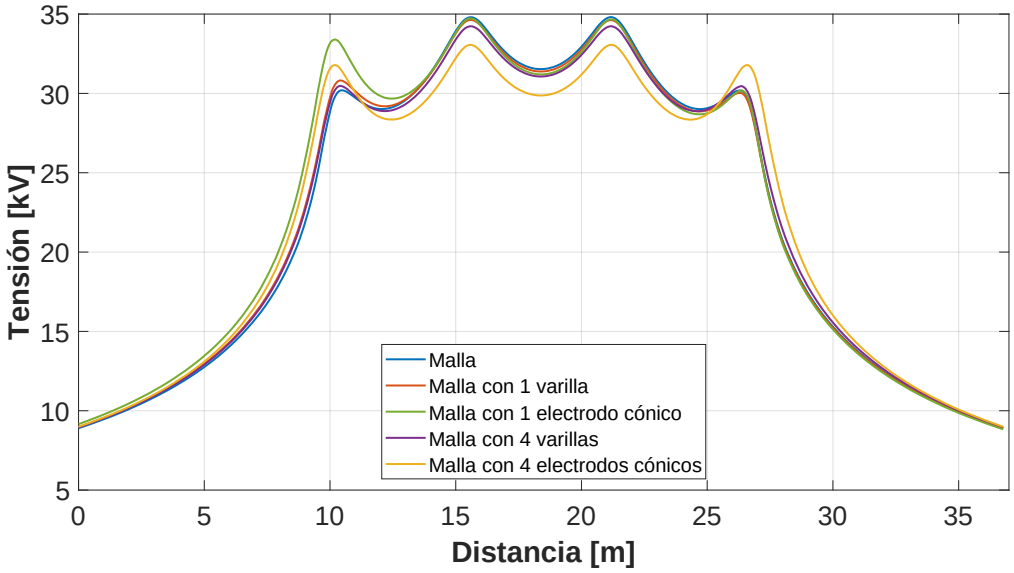


Figura 4.15: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para los distintos casos de mallas analizadas.

Al analizar la gráfica de la figura 4.15, se observa que el caso base de la malla presenta las elevaciones de tensión más desiguales entre el borde y el centro de la instalación (mayor gradiente de potencial). Por otro lado, aunque el caso de la malla con 4 electrodos cónicos presenta una elevación de potencial ligeramente mayor en los bordes, las tensiones hacia el interior de esta tienden a valores mucho más uniformes. Esto evidencia una clara homogeneización del perfil de tensiones dentro del área de la malla. Para cuantificar este fenómeno, se presentan los resultados exactos en las tablas 4.17 y 4.18.

	base	1 varilla	1 electr. cónico	4 varillas	4 electr. cónicos
Punto A	30 195	30 818	33 395	30 474	31 785
Punto B	34 796	34 629	34 728	34 229	33 055
Punto C	34 806	34 622	34 668	34 233	33 060
Punto D	30 179	30 036	30 192	30 457	31 787

Tabla 4.17: Valor de Tensiones [V] en los 4 puntos descritos en la figura 4.13 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra.

	1 varilla	1 electr. cónico	4 varillas	4 electr. cónicos
Punto A	2,06 [%]	10,60 [%]	0,92 [%]	5,27 [%]
Punto B	-0,48 [%]	-0,20 [%]	-1,63 [%]	-5,00 [%]
Punto C	-0,53 [%]	-0,40 [%]	-1,65 [%]	-5,02 [%]
Punto D	-0,51 [%]	0,04 [%]	0,92 [%]	5,33 [%]

Tabla 4.18: Diferencia porcentual de las tensiones en los 4 puntos descritos en la figura 4.13 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra respecto al caso base.

A partir de los datos expuestos en las tablas 4.17 y 4.18, se puede apreciar que introducir un solo electrodo (ya sea una varilla estándar o un electrodo cónico) en la esquina inferior izquierda de la malla genera un aumento localizado en la elevación de potencial

justo en el punto de instalación. En el caso de 1 varilla, este aumento es del 2,06 %, mientras que con 1 electrodo cónico el alza es del 10,60 % respecto al mismo punto en la malla base. Sin embargo, esta concentración de tensión en la esquina produce, como contraparte, una reducción del potencial en el resto de los puntos evaluados: una caída de aproximadamente 0,51 % para el caso de la varilla y de un 0,30 % para el electrodo cónico.

Al evaluar las configuraciones de 4 varillas y 4 electrodos cónicos (ambos casos instalados en las 4 esquinas exteriores de la malla), se constata una elevación del potencial en las esquinas de la malla en promedio de 0,92 % y 5,30 %, respectivamente. No obstante, esto se compensa con una disminución del potencial en el interior de la malla (puntos B y C) de un 1,65 % con varillas y un 5,02 % con electrodos cónicos. Este comportamiento indica que la distribución en las esquinas de las varillas pero sobre todo de los electrodos cónicos logra una mayor homogeneización de los potenciales dentro de la malla. En términos de seguridad, un perfil de tensiones más plano y homogéneo se traduce en menores tensiones de paso a lo largo de todo el terreno donde está instalada la malla. En los incisos posteriores se profundizará en dichos valores para su respectiva comparativa.

4.7.2. Resistencia de la puesta a tierra.

En cuanto a los valores de la resistencia de puesta a tierra obtenidos para los distintos casos de mallas simuladas, estos se resumen en la tabla 4.19.

base	1 varilla	1 electr. cónico	4 varillas	4 electr. cónicos
37,81	37,59	37,20	36,99	35,12

Tabla 4.19: Valor de la resistencia de puesta a tierra [Ω] para los distintos casos de mallas de puesta a tierra.

1 varilla	1 electr. cónico	4 varillas	4 electr. cónicos
-0,574 [%]	-1,619 [%]	-2,169 [%]	-7,110 [%]

Tabla 4.20: Diferencia porcentual de la resistencia de puesta a tierra para los distintos casos de mallas respecto al caso base.

El análisis conjunto de las tablas 4.19 y 4.20 permite concluir que la adición de 1 electrodo cónico a la configuración base reduce la resistencia total en 0,61 [Ω] (una mejora del 1,62 %). En contraste, agregar una única varilla tradicional ofrece una reducción de 0,22 [Ω] (0,57 %).

La mejora más significativa se encuentra en la configuración equipada con 4 electrodos cónicos, logrando una caída en la resistencia de 2,69 [Ω], lo que equivale a una reducción del 7,11 % respecto al caso base. Además, resulta de alto interés comparar de forma directa las configuraciones de 4 varillas convencionales con el uso de 4 electrodos cónicos, el uso de 4 electrodos cónicos disminuye la resistencia en 1,87 [Ω] respecto al caso de 4 varillas. Esto demuestra, como conclusión de este ensayo, que la implementación de electrodos cónicos optimiza el valor de resistencia a tierra en aproximadamente un 5 % en comparación con su contraparte de instalación tradicional bajo las mismas condiciones de terreno estudiadas.

4.7.3. Tensiones de paso.

Tal como se mencionó anteriormente, se analizan las tensiones de paso obtenidas en las cuatro distancias definidas en la figura 4.14. Los resultados se presentan gráficamente en la figura 4.16, mientras que sus valores exactos se detallan en la tabla 4.21.

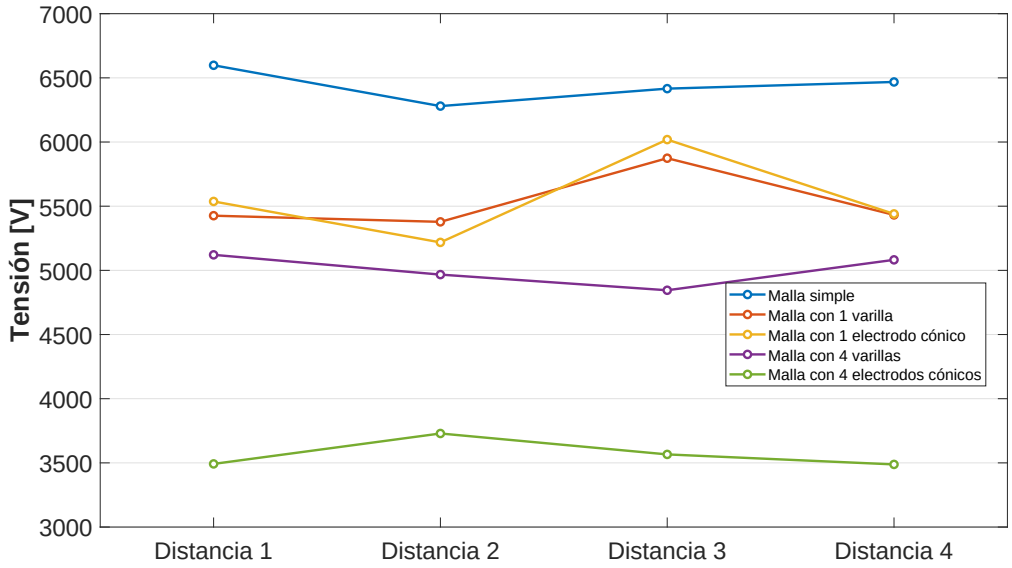


Figura 4.16: Tensiones de paso en las según las distancias escogidas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas simuladas.

	base	1 varilla	1 electr. cónico	4 varillas	4 electr. cónicos
Distancia 1	6 598	5 426	5 537	5 121	3 492
Distancia 2	6 280	5 378	5 218	4 967	3 729
Distancia 3	6 416	5 874	6 019	4 845	3 566
Distancia 4	6 468	5 432	5 440	5 082	3 488

Tabla 4.21: Valor de Tensiones de paso [V] en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra.

A partir de los resultados expuestos en la figura 4.16 y en la tabla 4.21, se observa que, en términos generales, la incorporación de un electrodo cónico en la esquina inferior izquierda de la malla en las distancias 1, 2 y 4 registran una disminución de la tensión de paso en aproximadamente 1033 [V], lo que se traduce en una caída cercana al 16,29 % respecto al caso base. Sin embargo, el impacto en la distancia 3 es menor, se evidencia una reducción de 397 [V] (equivalente a un 6,91 %). Esta reducción menor se debe a la propia ubicación del electrodo, el cual concentra una elevación de potencial en su punto de instalación mayor a la del caso base (fenómeno descrito previamente en el inciso 4.7.1).

Por otro lado, al evaluar el desempeño de la malla con 4 electrodos cónicos respecto a la malla base, se constata una disminución de aproximadamente 2872 [V] en las tensiones de paso, representando reducción porcentual del 44,55 %. En contraste, la configuración de 4 varillas convencionales logra una reducción de 1437 [V] (22,30 %) frente al caso base. Si bien ambos escenarios con electrodos perimetrales (varillas y electrodos cónicos en

todas las esquinas) presentan reducciones significativas, el modelo con 4 electrodos cónicos demuestra un desempeño superior en la mitigación de las tensiones.

	1 varilla	1 electr. cónico	4 varillas	4 electr. cónicos
Distancia 1	-17,76 [%]	-16,08 [%]	-22,39 [%]	-47,07 [%]
Distancia 2	-14,36 [%]	-16,91 [%]	-20,91 [%]	-40,62 [%]
Distancia 3	-8,45 [%]	-6,19 [%]	-24,49 [%]	-44,42 [%]
Distancia 4	-16,02 [%]	-15,89 [%]	-21,43 [%]	-46,07 [%]

Tabla 4.22: Diferencia porcentual de las tensiones de paso en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra respecto al caso base.

Finalmente, al realizar una comparativa directa de desempeño entre el caso de 4 varillas y el de 4 electrodos cónicos, los datos de la tabla 4.23 indican que la alternativa con electrodos cónicos proporciona reducciones que fluctúan entre un 24,92 % y un 31,81 %. Esto equivale a una disminución de tensiones que va desde los 1238 [V] hasta los 1629 [V] en comparación con el uso de varillas en todas las esquinas. Cabe destacar, además, que en la configuración con 4 electrodos cónicos se registran las menores diferencias de tensión de paso entre las cuatro distancias evaluadas. Este comportamiento reafirma que existe una homogeneización de las tensiones de paso a lo largo de todo el contorno de la instalación.

Distancia 1	Distancia 2	Distancia 3	Distancia 4
-31,81 [%]	-24,92 [%]	-26,40 [%]	-31,37 [%]

Tabla 4.23: Diferencia porcentual de las tensiones de paso en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para la malla con 4 electrodos cónicos respecto al caso de malla con 4 varillas.

4.7.4. Tensiones de contacto.

Se analizan las tensiones de contacto obtenidas en las cuatro distancias definidas en la figura 4.14. Los resultados se presentan gráficamente en la figura 4.17, mientras que sus valores exactos se detallan en la tabla 4.24.

	base	1 varilla	1 electr. cónico	4 varillas	4 electr. cónicos
Distancia 1	15 201	12 980	11 133	12 417	7 106
Distancia 2	13 892	12 150	10 018	11 481	7 064
Distancia 3	15 019	13 428	11 115	12 141	7 180
Distancia 4	14 095	12 997	11 943	11 613	6 820

Tabla 4.24: Valor de Tensiones de contacto [V] en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra.

A partir de los resultados expuestos en la figura 4.17 y en la tabla 4.24, se observa que, en términos generales, la incorporación de un electrodo cónico en la esquina inferior izquierda de la malla reduce la tensión de contacto en aproximadamente 3500 [V], lo que corresponde a un 23,98 % respecto a la malla base. Por su parte, al utilizar una varilla tradicional en la misma ubicación, se obtiene una disminución de 1663 [V] (equivalente a un 11,38 %). Si bien en ambos escenarios se evidencia una reducción de las tensiones de

contacto en todas las distancias evaluadas frente al caso base, la implementación del electrodo cónico representa una reducción adicional del 14,25 % en la mitigación al compararlo directamente con el uso de una varilla.

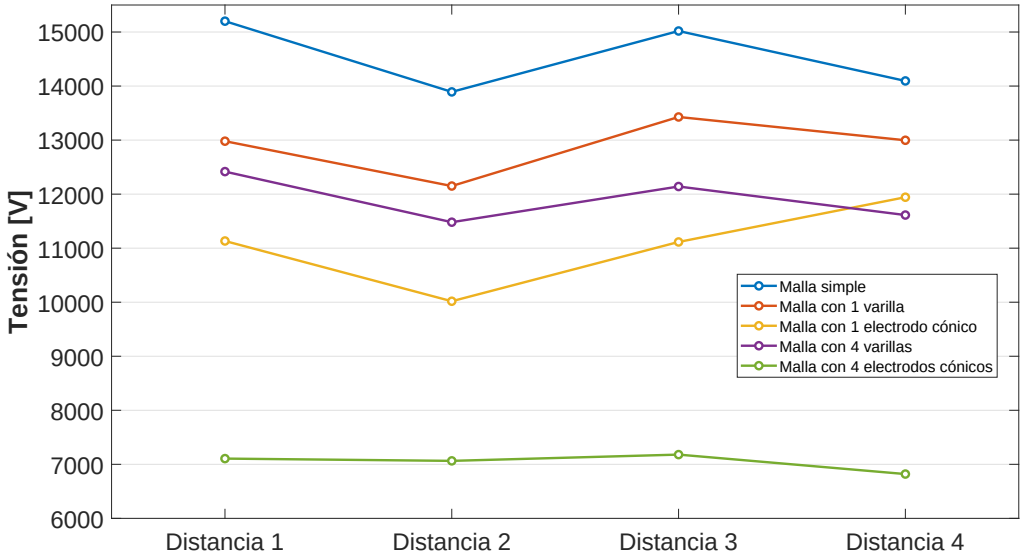


Figura 4.17: Tensiones de contacto en las según las distancias escogidas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas simuladas.

Por otro lado, al evaluar el desempeño de la malla con 4 electrodos cónicos respecto a la malla base, se constata una disminución de aproximadamente 7509 [V] en las tensiones de contacto, representando reducción porcentual del 51,55 %. En contraste, la configuración de 4 varillas convencionales logra una reducción de 2639 [V] (18,11 %) frente al caso base. Si bien ambos escenarios con electrodos (varillas y electrodos cónicos en todas las esquinas) presentan reducciones significativas, el modelo con 4 electrodos cónicos demuestra un mejor desempeño en la mitigación de las tensiones.

	1 varilla	1 electr. cónico	4 varillas	4 electr. cónicos
Distancia 1	-14,61 [%]	-26,76 [%]	-18,31 [%]	-53,25 [%]
Distancia 2	-12,54 [%]	-27,89 [%]	-17,36 [%]	-49,15 [%]
Distancia 3	-10,59 [%]	-25,99 [%]	-19,16 [%]	-52,19 [%]
Distancia 4	-7,79 [%]	-15,27 [%]	-17,61 [%]	-51,61 [%]

Tabla 4.25: Diferencia porcentual de las tensiones de contacto en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para los distintos casos de mallas de puesta a tierra respecto al caso base.

La reducción de tensiones del modelo con 4 electrodos cónicos equivale a 4870 [V] (40,84 %) en comparación con el uso de varillas en todas las esquinas. Cabe mencionar, al igual que en el caso de las tensiones de paso, que en la configuración con 4 electrodos cónicos se registran las menores diferencias de tensiones de contacto entre las cuatro distancias evaluadas. Este comportamiento vuelve a reafirmar que existe una homogeneización de las tensiones a lo largo de todo el contorno de la instalación.

Distancia 1	Distancia 2	Distancia 3	Distancia 4
-36,83 [%]	-35,31 [%]	-39,22 [%]	-35,66 [%]

Tabla 4.26: Diferencia porcentual de las tensiones de contacto en las 4 distancias descritas en la figura 4.14 para la malla con 4 electrodos cónicos respecto al caso de malla con 4 varillas.

4.8. Simulación de ferritas en ATPDraw.

Como se mencionó en la sección 3.3, se utilizan elementos ferromagnéticos llamados ferritas para analizar la capacidad de los electrodos magnetoactivos de suprimir armónicos de frecuencia industrial, así como otras señales de alta frecuencia. Para ello, se recurre a la síntesis de circuitos a través de un modelo de Foster modificado, tal como se menciona en la sección 3.3.1.

4.8.1. Curva de comportamiento de las ferritas.

A través de un algoritmo implementado en MATLAB (códigos C.1, C.2 y C.3), se ingresan los datos de las curvas de comportamiento de los tres tipos de ferritas analizadas.

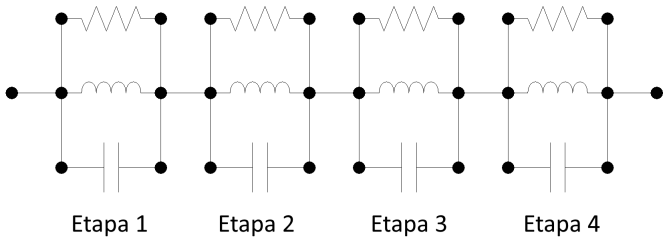


Figura 4.18: Modelo Foster modificado de la ferrita con sus 4 etapas implementado en ATPDraw.

4.8.1.a. Ferrita de manganeso-zinc tipo 75.

Para obtener el modelo de la ferrita tipo 75 [47], se recurre al algoritmo de MATLAB C.1 con el fin de hallar el modelo eléctrico equivalente del comportamiento de la impedancia en función de la frecuencia. En la tabla 4.27 se presentan los valores de resistencias, inductancias y capacitancias que se deben ingresar en ATPDraw. Asimismo, en la figura 4.19 se muestra la comparativa de la impedancia obtenida frente a la curva original, y en la figura 4.20 se ilustra su respuesta en frecuencia dentro de ATPDraw.

Etapa (bloque RLC)	Resistencia [Ω]	Inductancia [μH]	Capacitancia [nF]
Etapa 1	36,3596	7,2297	2,8290
Etapa 2	14,0760	3,4636	26,9827
Etapa 3	32,5943	6,4214	6,9247
Etapa 4	43,3524	6,8171	0,2987

Tabla 4.27: Valores de resistencias, inductancias y capacitancias para modelo Foster modificado de la ferrita de manganeso-zinc tipo 75 (ver figura 4.18).

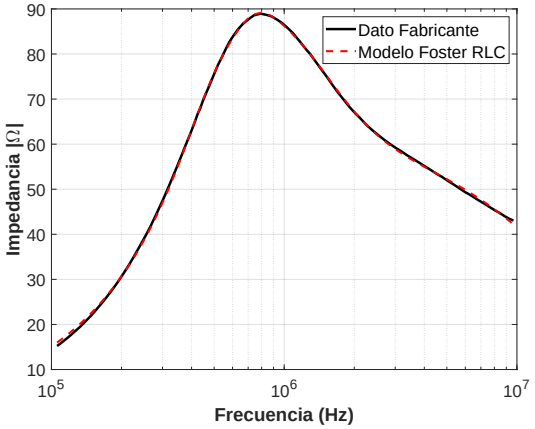


Figura 4.19: Comparativa de modelo Foster obtenido con dato del fabricante ferrita MnZn tipo 75.

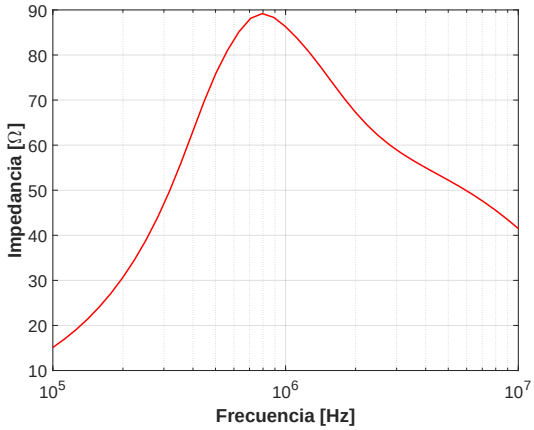


Figura 4.20: Respuesta en frecuencia de modelo Foster para ferrita MnZn tipo 75 en ATPDraw.

4.8.1.b. Ferrita de manganeso-zinc tipo 73.

De igual manera que en el inciso anterior, el modelo de la ferrita tipo 73 [48] se determina mediante el algoritmo de MATLAB C.2. La tabla 4.28 detalla los valores de resistencias, inductancias y capacitancias a ingresar en ATPDraw. Por su parte, la figura 4.21 contrasta la impedancia en función de la frecuencia con la curva original, mientras que la figura 4.22 ilustra la respuesta del modelo en ATPDraw.

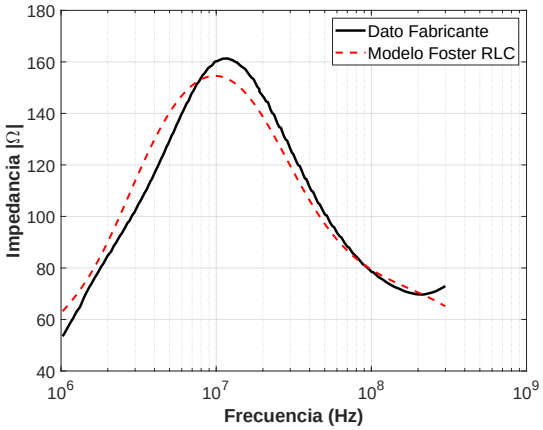


Figura 4.21: Comparativa de modelo Foster obtenido con dato del fabricante ferrita MnZn tipo 73.

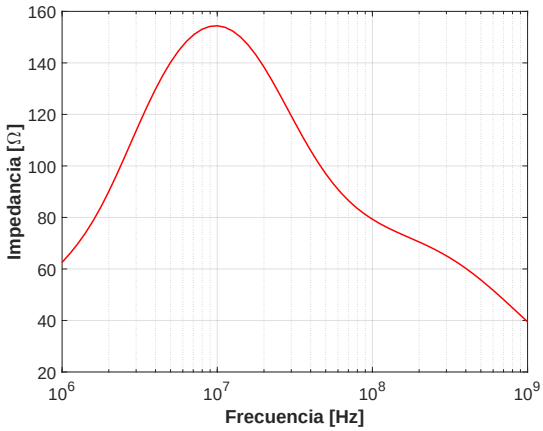


Figura 4.22: Respuesta en frecuencia de modelo Foster para ferrita MnZn tipo 73 en ATPDraw.

Etapa (bloque RLC)	Resistencia [Ω]	Inductancia [μH]	Capacitancia [nF]
Etapa 1	27,1085	10,1663	2,7272
Etapa 2	129,9579	7,3656	0,0518
Etapa 3	35,8190	0,3393	0,0093
Etapa 4	30,1772	0,5143	0,0050

Tabla 4.28: Valores de resistencias, inductancias y capacitancias para modelo Foster modificado de la ferrita de manganeso-zinc tipo 73 (ver figura 4.18).

4.8.1.c. Ferrita de níquel-zinc tipo 43.

Finalmente, el modelo de la ferrita tipo 43 [49] se obtiene utilizando el algoritmo de MATLAB C.3. En la tabla 4.29 se resumen los parámetros requeridos para ATPDraw. La figura 4.23 presenta la comparativa de la impedancia obtenida respecto a los datos del fabricante, y la figura 4.24 exhibe el desempeño del modelo en ATPDraw.

Etapa (bloque RLC)	Resistencia [Ω]	Inductancia [μH]	Capacitancia [nF]
Etapa 1	23,7925	1,0871	0,1879
Etapa 2	68,3087	0,3847	0,0080
Etapa 3	487,2536	0,1365	0,0008
Etapa 4	59,3637	0,0454	0,0070

Tabla 4.29: Valores de resistencias, inductancias y capacitancias para modelo Foster modificado de la ferrita de níquel-zinc tipo 43 (ver figura 4.18).

Al analizar el comportamiento de la impedancia de los tres tipos de ferritas estudiadas, se observa que en todas ellas la aproximación lograda mediante el modelo de Foster es equiparable a la curva original de comportamiento indicada por los fabricantes. Por consiguiente, se concluye que el modelo de Foster representa fielmente la respuesta de estas ferritas a lo largo de un amplio rango de frecuencias.

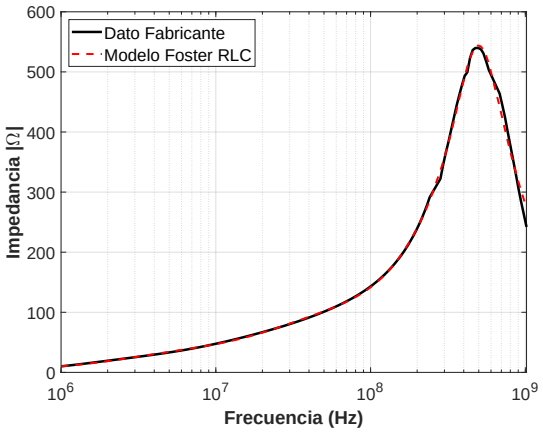


Figura 4.23: Comparativa de modelo Foster obtenido con dato del fabricante ferrita NiZn tipo 43.

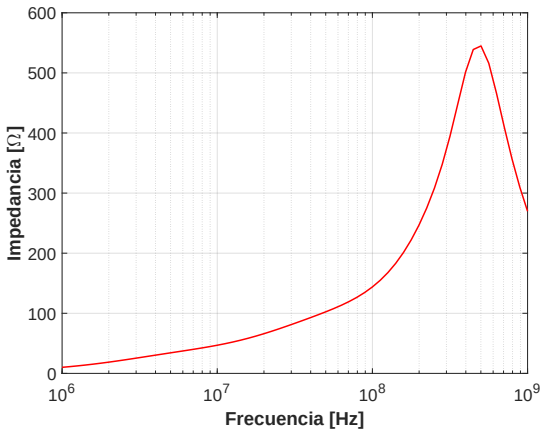


Figura 4.24: Respuesta en frecuencia de modelo Foster para ferrita NiZn tipo 43 en ATPDraw.

4.8.2. Atenuación de señales industriales.

Para el análisis de la atenuación de señales armónicas presentes a frecuencia industrial, se dispone de dos circuitos eléctricos: uno destinado al análisis de armónicos de tensión (ver figura 4.25) y otro al análisis de armónicos de corriente (ver figura 4.26). En ambos casos, las señales generadas son sinusoidales y sus respectivas amplitudes se detallan en la tabla 4.30.

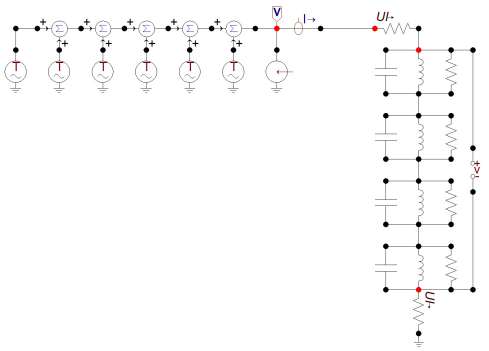


Figura 4.25: Circuito eléctrico implementado en ATPDraw para el análisis de tensiones industriales.

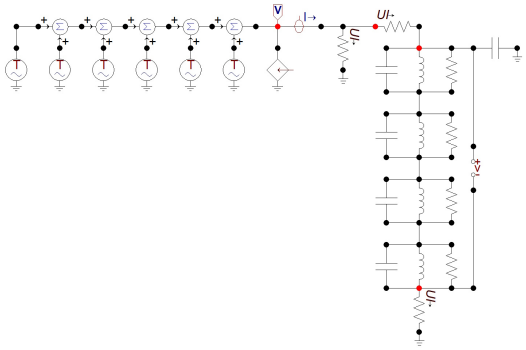


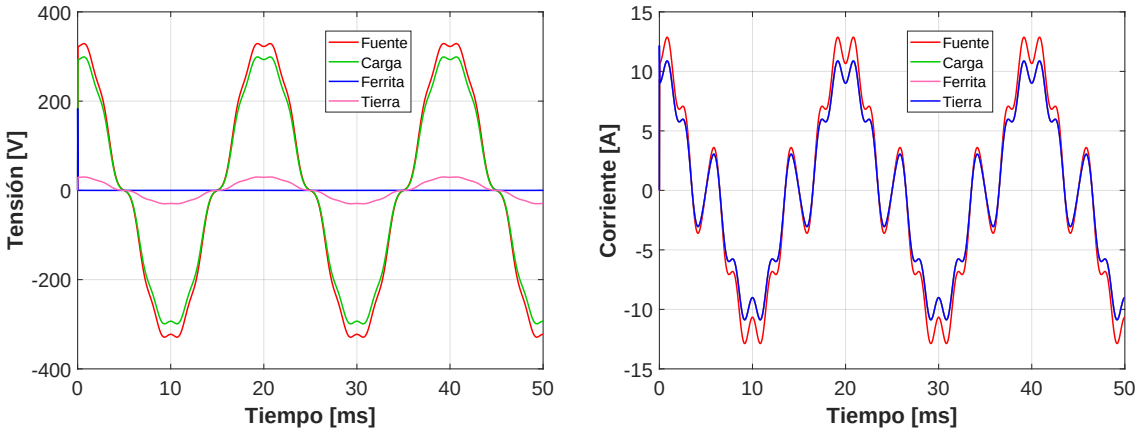
Figura 4.26: Circuito eléctrico implementado en ATPDraw para el análisis de corrientes industriales.

Señales [Hz]	Tensión [V_{peak}]	Corriente [A_{peak}]
50	314 (100 %)	10 (100 %)
150	31 (10 %)	3,33 (33,3 %)
250	20 (6,37 %)	2 (20 %)
350	10 (3,18 %)	1,43 (14,3 %)
450	7,5 (2,39 %)	1,1 (11 %)
550	5 (1,59 %)	1 (10 %)

Tabla 4.30: Amplitudes de señales sinusoidales desde la fundamental y armónicos impares (3^{ro} al 11^{vo}).

Al observar el comportamiento ilustrado en la figura 4.27(A), correspondiente a las tensiones, se tiene que la diferencia entre la tensión de entrada (roja) y la tensión en la carga (verde) es casi inexistente. Esto indica que no hay atenuación de los armónicos comúnmente presentes a frecuencia industrial. Dicha observación se corrobora al notar que la tensión presente en el modelo de Foster de la ferrita (azul) es de prácticamente 0 [V].

Por otro lado, respecto a la figura 4.27(B), referente a las corrientes, los valores de las señales verde, rosa y azul son idénticos debido a que se trata de una conexión en serie. Al igual que en el análisis de tensiones, la diferencia entre la corriente de entrada y la corriente de carga es imperceptible, lo que confirma que no existe una atenuación de dichos armónicos.



(A) (B)

Figura 4.27: Respuesta del sistema frente señal de frecuencia industrial.(A): Tensiones. (B): Corrientes.

Esta dinámica de comportamiento es idéntica para los tres tipos de ferritas analizadas, motivo por el cual no se presentan gráficas separadas para cada una. A partir de esto, es posible concluir que en el espectro de armónicos de frecuencia industrial las ferritas no logran atenuar estas señales, ni en su componente de tensión ni en su componente de corriente.

4.8.3. Atenuación de señales de alta frecuencia.

Para el análisis de la atenuación de señales de alta frecuencia, se dispone de dos circuitos eléctricos: uno para el análisis de tensión (ver figura 4.28) y otro para el análisis de corriente (ver figura 4.29). La señal sinusoidal inyectada en cada caso corresponde a la suma de una señal fundamental de 50 [Hz] con una señal de alta frecuencia de la misma amplitud. Esto permite una mejor visualización de la posible atenuación de la componente de alta frecuencia (ver figuras B.7 y B.8). En la tabla 4.31 se muestran los valores y las frecuencias de las señales sinusoidales utilizadas en los tres tipos de ferritas.

Ferrita	Frecuencia	Tensión [V_{peak}]	Corriente [A_{peak}]
MnZn tipo 75	50 [Hz]	100	10
	850 [kHz]	100	10
MnZn tipo 73	50 [Hz]	100	10
	11 [Mhz]	100	10
MnZn tipo 75	50 [Hz]	100	10
	480 [MHz]	100	10

Tabla 4.31: Amplitudes de señales sinusoidales para el análisis de los casos de alta frecuencia.

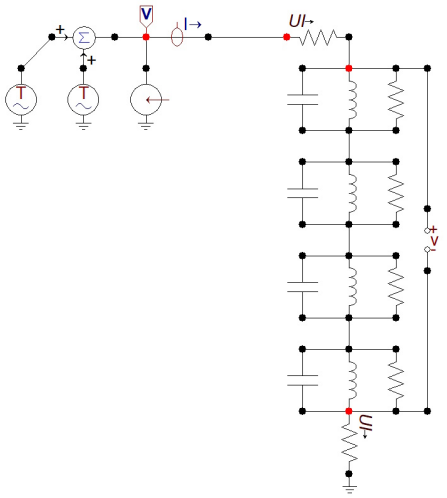


Figura 4.28: Circuito eléctrico implementado en ATPDraw para el análisis de tensiones en alta frecuencia.

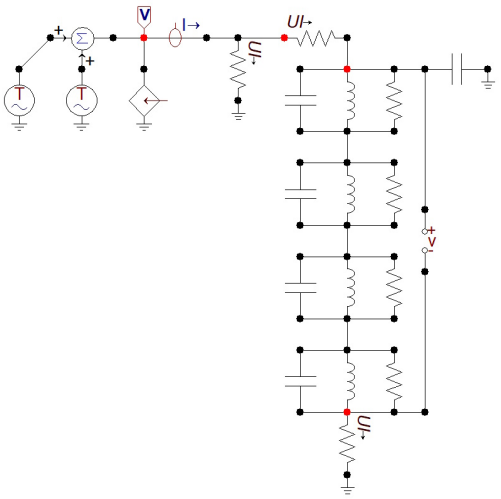
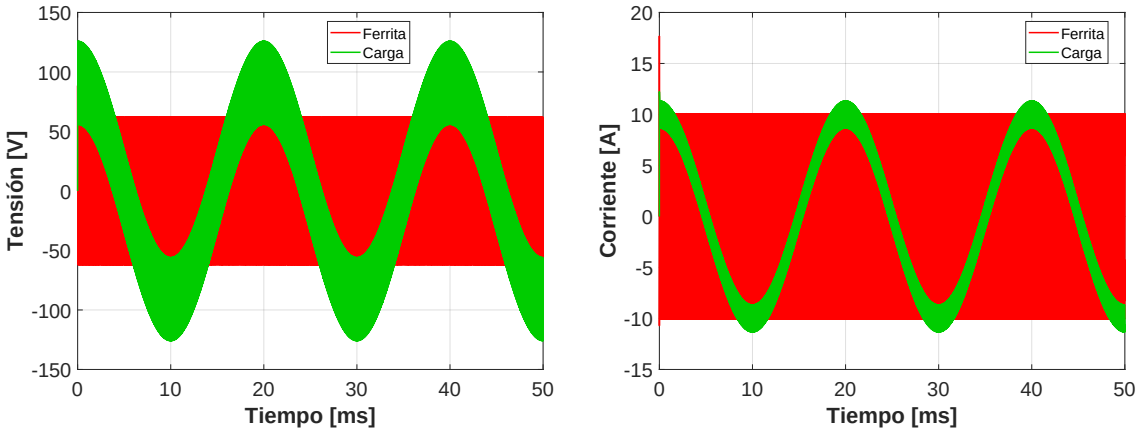


Figura 4.29: Circuito eléctrico implementado en ATPDraw para el análisis de corrientes en alta frecuencia.

4.8.3.a. Ferrita manganeso-zinc tipo 75.

En este caso, se inyecta una señal de 50 [Hz] en conjunto con una señal de 850 [kHz] de la misma amplitud. El comportamiento medido en la resistencia de carga (señal verde) y el comportamiento en el modelo de Foster de la ferrita (señal roja) se ilustran en la figura 4.30.



(A) (B)

Figura 4.30: Respuesta del sistema con ferrita MnZn tipo 75 frente a señal de alta frecuencia.(A): Tensiones. (B): Corrientes.

Según la figura 4.30(A), que muestra el comportamiento de la variable de tensión, se observa que la señal sinusoidal de amplitud 100 [V] a 850 [kHz] (verde) se reduce a una amplitud de 37,5 [V] en la resistencia de carga, lo que se traduce en una atenuación del 62,5 % de la componente de alta frecuencia. Por su parte, la mayor caída de tensión de esta componente recae sobre el modelo de Foster de la ferrita, alcanzando una amplitud

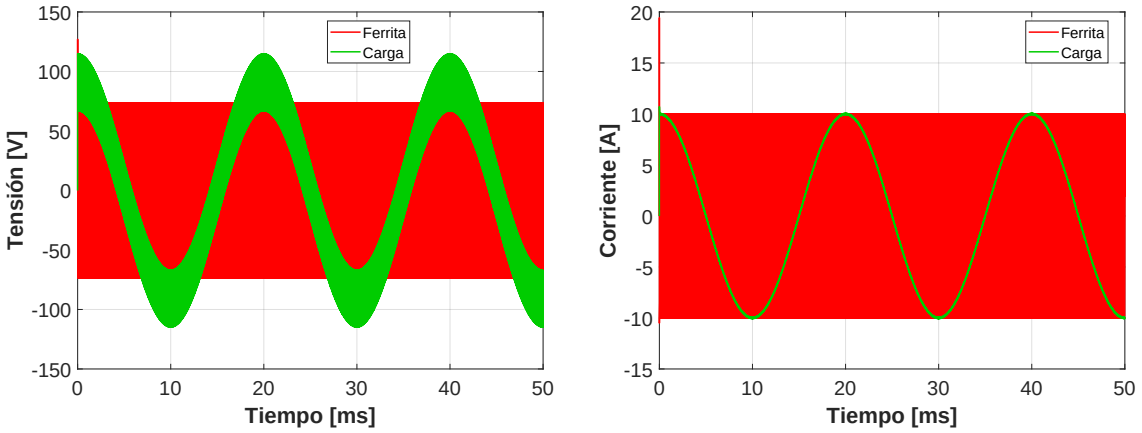
de 62 [V]. Este resultado indica que la ferrita de MnZn tipo 75 realiza una atenuación efectiva de dicha componente, específicamente en torno al 62 % de su valor original.

Para el caso de las corrientes, mostrado en la figura 4.30(B), se obtiene una atenuación aún más significativa. En la resistencia de carga (verde) se presenta una componente de alta frecuencia de solo 1,5 [A], lo que representa una reducción del 85 %. De esto se deduce que casi la totalidad de la componente de alta frecuencia queda contenida en el modelo de Foster de la ferrita (rojo).

Cabe mencionar que, en los análisis de corrientes a distintas frecuencias, el efecto de atenuación de las señales de alta frecuencia solo se produce después de que dicha señal haya pasado por el modelo de Foster. En consecuencia, cualquier elemento conectado antes de este no presenta atenuación alguna ante componentes de corriente de alta frecuencia. En la práctica, esto significa que solo las señales de corriente de alta frecuencia que provengan desde el neutro o la tierra hacia la carga experimentarán el efecto mostrado en la figura 4.30(B). Por el contrario, las perturbaciones de corriente que provengan de la fuente o de la fase hacia la carga no sufrirán atenuación. Esta dinámica aplica para todos los casos de ferritas analizados en el presente documento.

4.8.3.b. Ferrita manganeso-zinc tipo 73.

Al igual que el inciso anterior, se inyecta una señal de 50 [Hz] en conjunto con una señal de 11 [MHz] de la misma amplitud. El comportamiento medido en la resistencia de carga (señal verde) y el comportamiento en el modelo de Foster de la ferrita (señal roja) se ilustran en la figura 4.31.



(A) (B)

Figura 4.31: Respuesta del sistema con ferrita MnZn tipo 73 frente a señal de alta frecuencia.(A): Tensiones. (B): Corrientes.

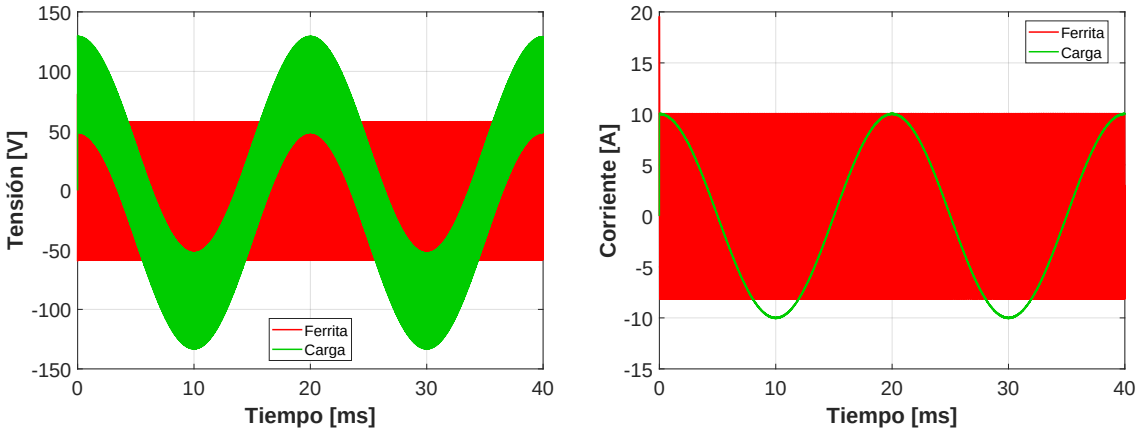
Según la figura 4.31(A), que muestra el comportamiento de la variable de tensión, se observa que la señal sinusoidal de amplitud 100 [V] a 11 [MHz] (verde) se reduce a una amplitud de 25 [V] en la resistencia de carga, lo que se traduce en una atenuación del 75 % de la componente de alta frecuencia. Al igual que el caso anterior, la mayor caída de tensión de esta componente recae sobre el modelo de Foster de la ferrita, alcanzando una amplitud de 72 [V]. Este resultado indica que la ferrita de MnZn tipo 73 realiza una

atenuación efectiva de la señal de tensión de alta frecuencia, en torno al 75 % de su valor original.

Para el caso de las corrientes, mostrado en la figura 4.31(B), se obtiene una atenuación en la resistencia de carga (verde) de la componente de alta frecuencia, donde solo está presente 0,25 [A] de dicha componente de alta frecuencia, lo que representa una reducción del 97,5 %. De esto se deduce que casi la totalidad de la componente de alta frecuencia queda contenida en el modelo de Foster de la ferrita (ver señal roja).

4.8.3.c. Ferrita níquel-zinc tipo 43.

Finalmente, se inyecta una señal de 50 [Hz] en conjunto con una señal de 480 [MHz] de la misma amplitud. El comportamiento medido en la resistencia de carga (señal verde) y el comportamiento en el modelo de Foster de la ferrita (señal roja) se ilustran en la figura 4.32.



(A) (B)

Figura 4.32: Respuesta del sistema con ferrita NiZn tipo 43 frente a señal de alta frecuencia.(A): Tensiones. (B): Corrientes.

Según la figura 4.32(A), que muestra el comportamiento de la variable de tensión, se tiene que la señal sinusoidal de amplitud 100 [V] a 480 [MHz] (verde) se reduce a una amplitud de 39 [V] en la resistencia de carga, lo que se traduce en una atenuación del 61 % de la componente de alta frecuencia. Al igual que el caso anterior, la mayor caída de tensión de esta componente recae sobre el modelo de Foster de la ferrita, alcanzando una amplitud de 60 [V]. Este resultado indica que la ferrita de MnZn tipo 43 realiza una atenuación de la señal de tensión de alta frecuencia, en torno al 61 % de su valor original.

Para el caso de las corrientes, mostrado en la figura 4.32(B), se observa que en la resistencia de carga (verde) la componente de alta frecuencia es de solo de 0,37 [A], lo que representa una reducción del 96,3 %. De esto se deduce que casi la totalidad de la componente de alta frecuencia queda contenida en el modelo de Foster de la ferrita tal como se observa en la señal roja de la gráfica.

4.8.4. Desempeño global de las ferritas.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones para los tres tipos de ferritas estudiadas (MnZn tipo 75, MnZn tipo 73 y NiZn tipo 43), se evidencian dos comportamientos opuestos que dependen netamente del espectro de frecuencia de las señales analizadas.

En primer lugar, respecto al espectro de frecuencia industrial y sus armónicos característicos (evaluados desde la fundamental de 50 [Hz] hasta el 11^{vo} armónico en 550 [Hz]), las simulaciones demuestran que las ferritas no presentan capacidad de mitigación alguna. Como se comprobó tanto en los circuitos de tensión como de corriente, la diferencia entre la señal de entrada y la señal medida en la carga es imperceptible, registrando una caída de tensión en el modelo de Foster prácticamente nula (0 [V]). Esto permite concluir que, en el espectro de bajas frecuencias, estos elementos ferromagnéticos se comportan como un conductor, lo cual indica que no interfieren con la transmisión de la energía eléctrica a frecuencia industrial ni logren atenuar los armónicos de baja frecuencia típicos de la red.

Por otra parte, las tres ferritas demostraron absorber la mayor parte de las componentes de alta frecuencia, concentrando en su propio modelo las caídas de tensión y corriente. Los niveles de atenuación logrados en la resistencia de carga para cada caso se resumen de la siguiente manera:

- **Ferrita MnZn tipo 75 (a 850 [kHz]):** logró una atenuación del 62,5 % en la señal de tensión y del 85 % en la señal de corriente.
- **Ferrita MnZn tipo 73 (a 11 [MHz]):** presentó el mayor grado de mitigación general, alcanzando una atenuación del 75 % en tensión y del 97,5 % en corriente.
- **Ferrita NiZn tipo 43 (a 480 [MHz]):** registró una reducción del 61 % para la componente de tensión y del 96,3 % para la componente de corriente.

Más allá de los valores porcentuales, el análisis de los circuitos revela dos dinámicas de funcionamiento respecto a la naturaleza de la señal atenuada.

Se observa que la atenuación de las componentes de tensión de alta frecuencia posee un carácter bidireccional. Esto significa que la mitigación de la señal ocurre independientemente del punto de origen de la perturbación. En consecuencia, cualquier componente o elemento del sistema eléctrico que se encuentre conectado tanto antes como después del modelo de Foster de la ferrita experimentará la atenuación correspondiente. Esta característica garantiza una protección en términos de tensión en el nodo donde se instale.

En contraste con la tensión, la atenuación de las señales de corriente de alta frecuencia está condicionada por la posición de la ferrita respecto al flujo de la señal. El efecto de mitigación sobre la corriente solo se materializa después de que la señal perturbadora haya atravesado el modelo de Foster. Por lo tanto, si se desea proteger un elemento específico (como la carga), es necesario que la ferrita se encuentre topológicamente antes de dicho elemento en la dirección de la perturbación. Como se evidenció en las simulaciones, los componentes ubicados antes del modelo de Foster no presentan atenuación alguna; en la práctica, que un electrodo magnetoactivo solo puede suprimir corrientes parásitas provenientes de tierra o neutro ya que debido a su instalación, se interpone de manera directa en el trayecto hacia el equipo que se busca proteger.

Capítulo 5

Conclusiones

El objetivo general de esta memoria se cumplió mediante el desarrollo de un modelo computacional para evaluar el comportamiento de electrodos magnetoactivos en sistemas de puesta a tierra de media y baja tensión. Los resultados obtenidos permiten establecer diferencias cuantificables respecto de configuraciones convencionales, considerando la resistencia de puesta a tierra, la distribución de potencial en superficie, las tensiones de paso y contacto y la respuesta del acoplador frente a distintas frecuencias.

Para los electrodos analizados individualmente, la incorporación de cemento conductor permitió obtener menores valores de resistencia de puesta a tierra respecto de los modelos teóricos utilizados como referencia. En el caso del electrodo cónico se obtuvo una reducción promedio de 57,57 % respecto del modelo de Dwight y de 24,67 % respecto del modelo de Fagan y Lee. Para el electrodo tipo péndulo, las reducciones alcanzaron 65,30 % y 28,72 %, respectivamente. Estos resultados permiten caracterizar el comportamiento de ambas geometrías bajo las condiciones de resistividad de terreno consideradas en el estudio.

La incorporación de la cámara dieléctrica modificó la distribución del potencial en la superficie del terreno, generando una zona de variación reducida durante los primeros 25 a 30 cm radiales. Como consecuencia, las tensiones de paso en el primer metro disminuyeron en 77,3 % para el electrodo cónico y en 78,8 % para el electrodo tipo péndulo.

En la configuración de malla de 12 x 12 m, la instalación de cuatro electrodos cónicos en sus vértices produjo una reducción de 7,11 % en la resistencia de puesta a tierra respecto de la malla base, mientras que cuatro varillas convencionales produjeron una reducción de 2,17 %. En la comparación directa entre ambas configuraciones, los electrodos cónicos redujeron hasta un 31,81 % las tensiones de paso y hasta un 40,84 % las tensiones de contacto. Estos resultados muestran además una distribución más homogénea de los potenciales en el contorno de la malla.

Respecto al comportamiento del acoplador caracterizado mediante una ferrita, las simulaciones realizadas mediante el modelo equivalente de Foster muestran un comportamiento dependiente de la frecuencia. En el rango de frecuencia industrial y sus armónicos estudiados, no se observó una atenuación apreciable de las señales, mientras que en alta frecuencia se obtuvo una atenuación máxima de 75 % para la tensión y de 97,5 % para la corriente. La atenuación de tensión presentó un comportamiento bidireccional, mientras que la atenuación de corriente estuvo condicionada por la dirección de propagación de la perturbación y por la posición de la ferrita dentro del circuito.

Finalmente, el análisis multifísico permitió identificar la interfaz entre el cemento conductor y el suelo rocoso como la zona de mayor elevación de temperatura, especialmente en las configuraciones con cámara dieléctrica y bajo condiciones de alta resistividad del terreno y elevada corriente de falla. Mientras que en los dominios adyacentes las temperaturas se mantuvieron cercanas a los 20°C, en la frontera cemento-suelo se registraron valores máximos del orden de 200°C para una corriente de falla de 1 [kA]. Este comportamiento evidencia una concentración térmica localizada en la interfaz entre ambos materiales.

En términos globales, el principal aporte identificado en los electrodos magnetoactivos radica en integrar, dentro de una misma solución de puesta a tierra, funciones que en configuraciones convencionales deben abordarse de manera independiente. El uso de cemento conductor favorece el acoplamiento eléctrico entre el electrodo y terrenos de alta resistividad, su incorporación a una malla contribuye a una distribución más uniforme del potencial y al control de las tensiones de paso y contacto, mientras que el acoplador representado mediante una ferrita incorpora una respuesta selectiva frente a perturbaciones de alta frecuencia, capacidad que una varilla o una malla convencional no posee por sí sola al no disponer de un elemento específicamente destinado al filtrado. En consecuencia, bajo las condiciones y modelos evaluados en esta memoria, la principal ventaja de la tecnología estudiada corresponde a su carácter multifuncional, combinando disipación de corriente hacia el terreno, control de gradientes de potencial y mitigación de componentes de alta frecuencia.

Capítulo 6

Trabajo futuro

A partir de los resultados obtenidos, se proponen las siguientes líneas de continuidad para el estudio de los electrodos magnetoactivos.

En primer lugar, se propone realizar una validación experimental mediante la adquisición de muestras físicas de los electrodos estudiados y su implementación en una instalación de prueba. Se deberán medir la resistencia de puesta a tierra, la distribución de potencial y las tensiones de paso y contacto antes y después de la instalación, bajo condiciones equivalentes de operación.

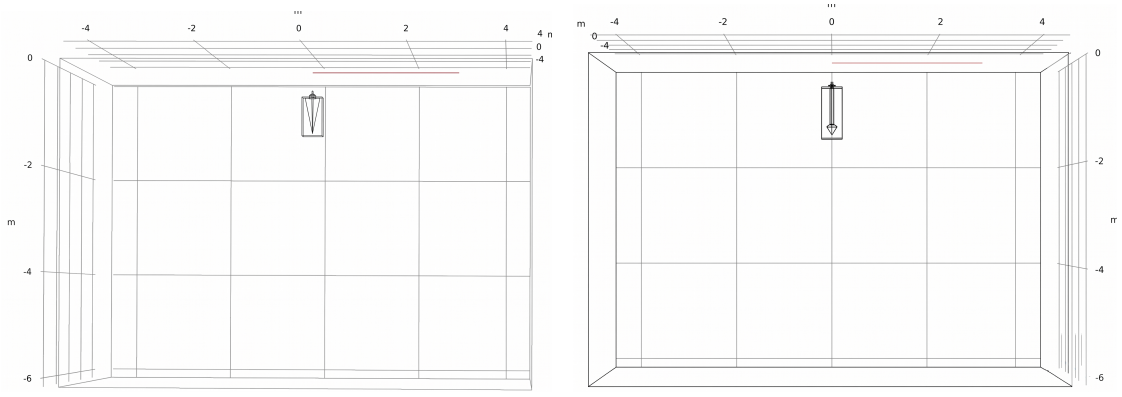
En segundo lugar, se propone caracterizar experimentalmente el acoplador representado por ferritas en esta memoria mediante mediciones de impedancia y ensayos con señales de frecuencia industrial y alta frecuencia. Estos resultados permitirán contrastar la respuesta medida con el modelo equivalente de Foster desarrollado en ATPDraw y ajustar sus parámetros de acuerdo con el comportamiento físico del dispositivo.

Finalmente, se propone complementar el análisis térmico mediante simulaciones en una segunda plataforma especializada y mediante mediciones experimentales en los puntos de mayor concentración térmica. La comparación entre los resultados numéricos y experimentales permitirá caracterizar con mayor precisión la respuesta térmica de la interfaz entre el cemento conductor y el suelo.

Apéndice A

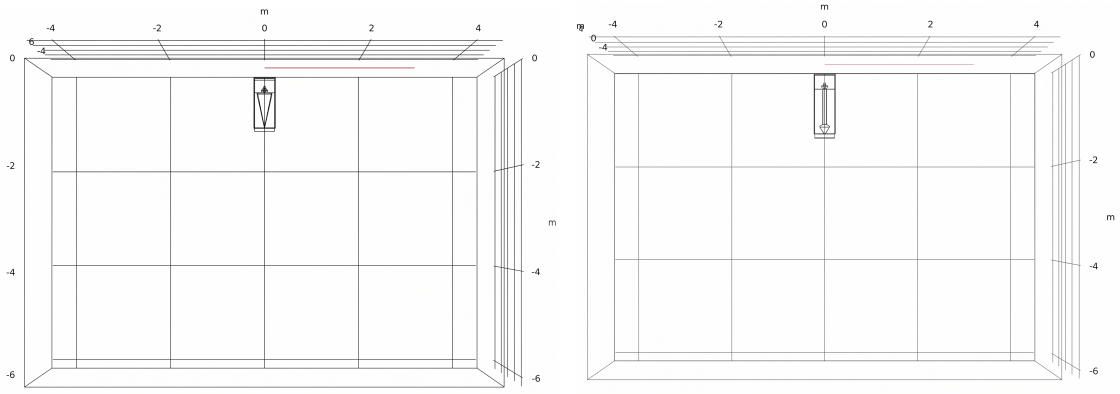
Figuras, gráficas y tablas de COMSOL Multiphysics

A.1. Trazados de líneas de evaluación.



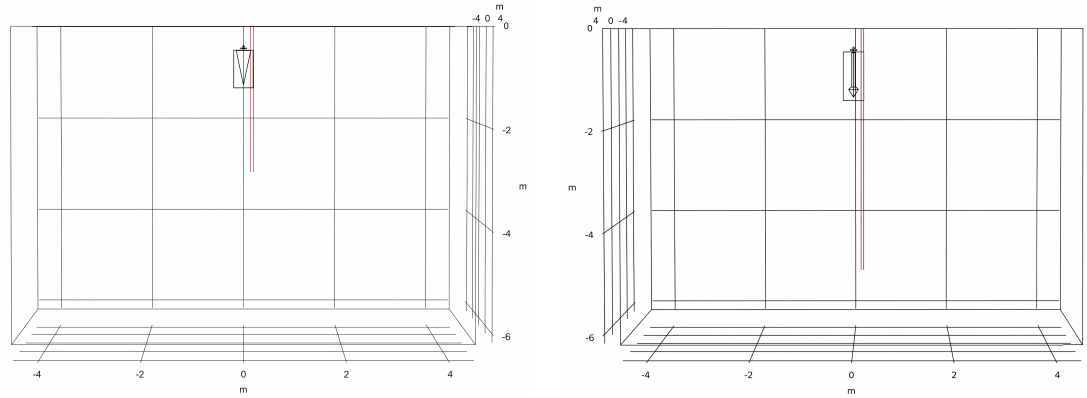
[A] [B]

Figura A.1: Trazado de evaluación horizontal. [A]: Electrodo cónico. [B]: Electrodo péndulo.



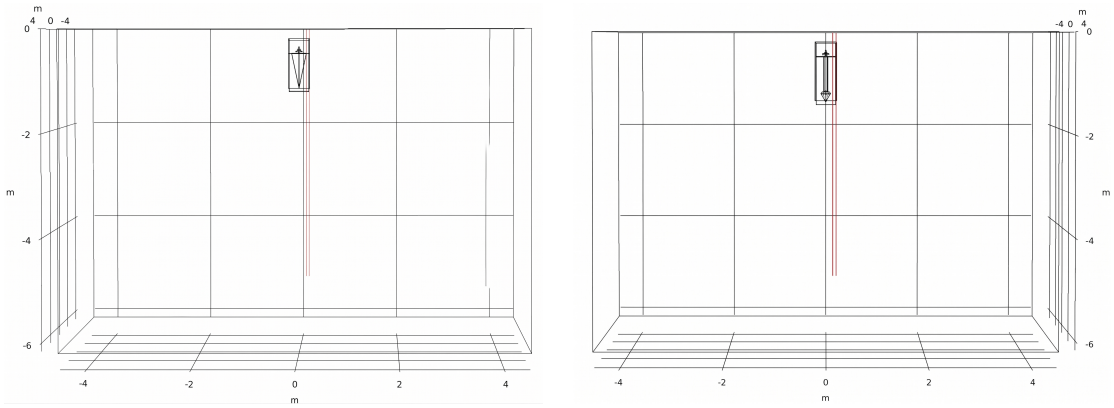
[A] [B]

Figura A.2: Trazado de evaluación horizontal con cámara dieléctrica. [A]: Electrodo cónico. [B]: Electrodo péndulo.



[A] [B]

Figura A.3: Trazado de evaluación vertical. [A]: Electrodo cónico. [B]: Electrodo péndulo.



[A] [B]

Figura A.4: Trazado de evaluación vertical con cámara dieléctrica. [A]: Electrodo cónico. [B]: Electrodo péndulo.

A.2. Electrodo cónico con cemento conductor.

A.2.1. Comportamiento de tensiones en superficie.

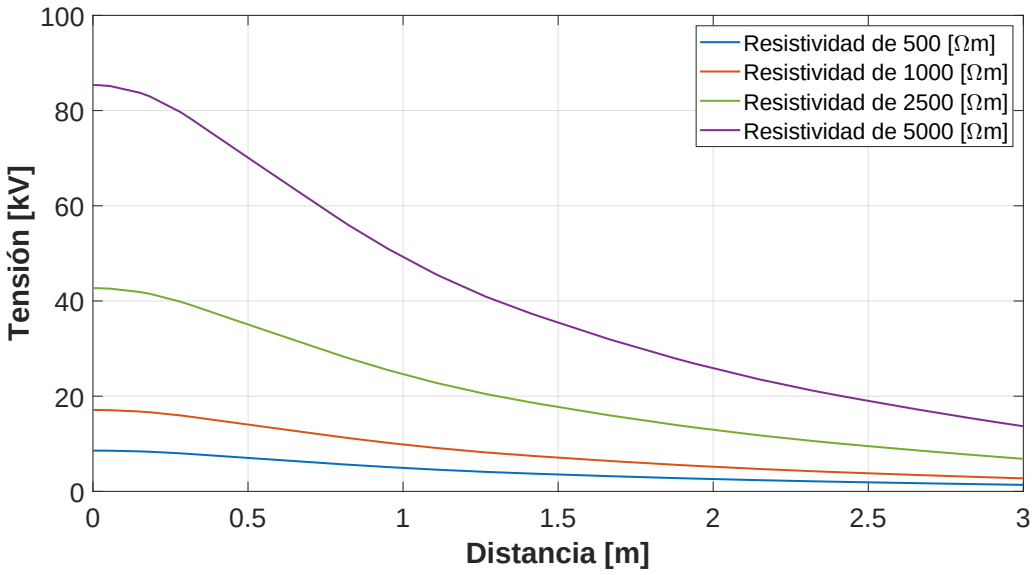


Figura A.5: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 100 [A].

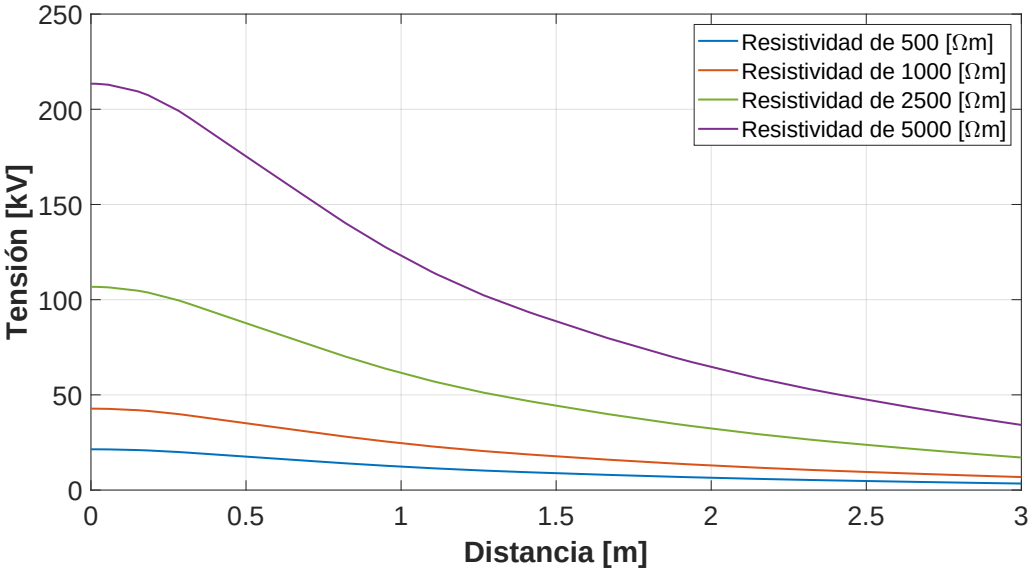


Figura A.6: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 250 [A].

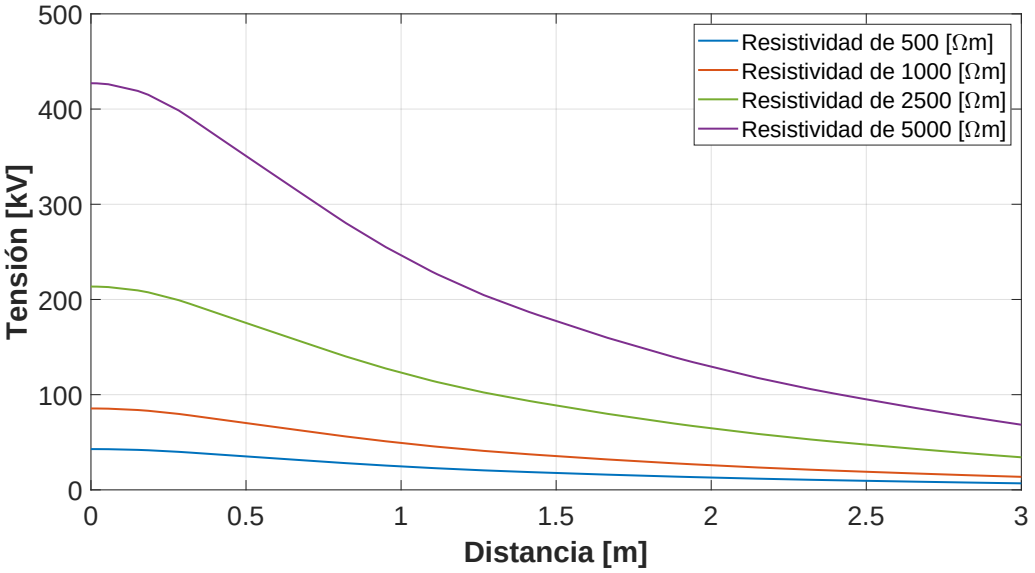


Figura A.7: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 500 [A].

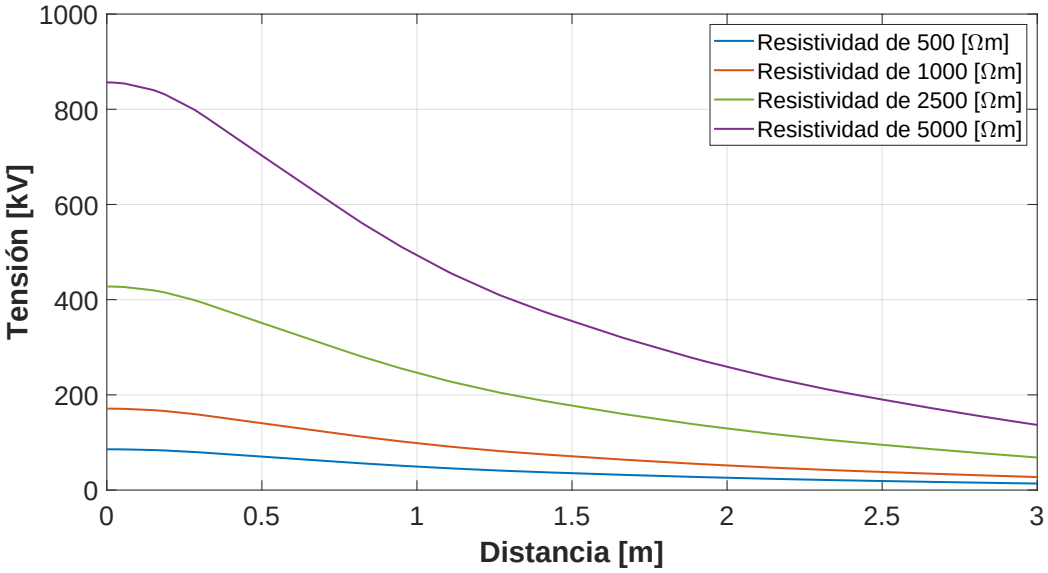


Figura A.8: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A].

A.2.2. Comportamiento de la temperatura.

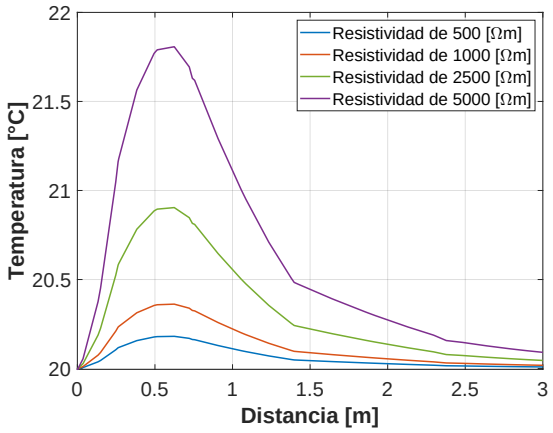


Figura A.9: Comportamiento de la temperatura encontrada en superficie para modelo electrodo cónico con cemento conductor y corriente de falla 1000 [A].

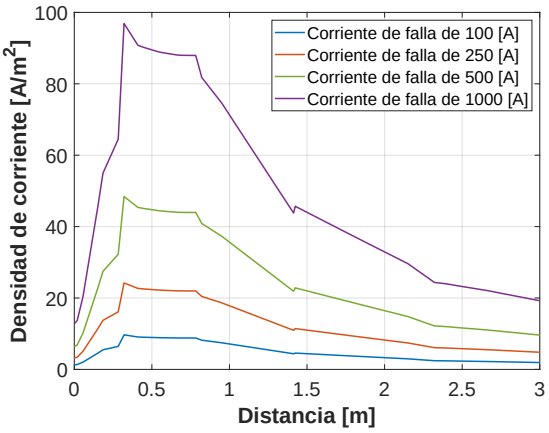


Figura A.10: Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en la superficie para modelo electrodo cónico con cemento conductor.

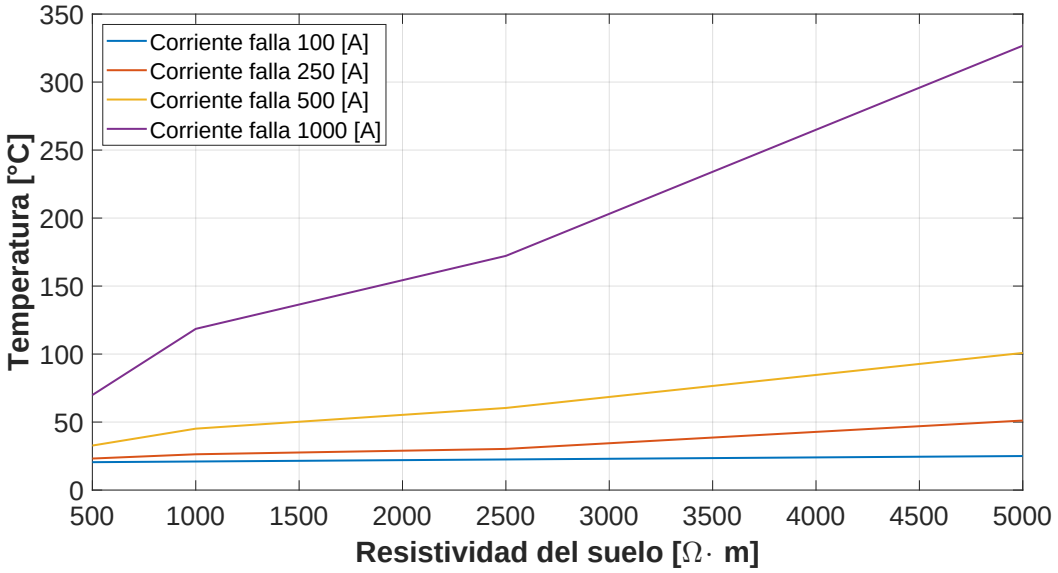


Figura A.11: Comportamiento de la máxima elevación de temperatura electrodo cónico con cemento conductor.

A.2.3. Comportamiento del aumento del potencial de tierra.

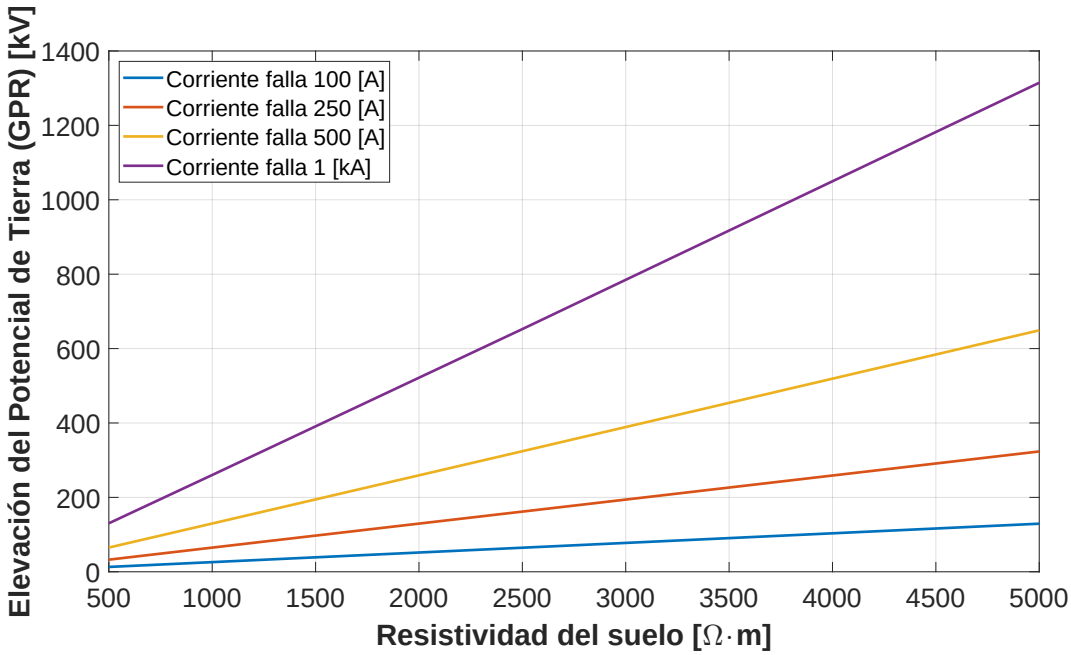


Figura A.12: Comportamiento del GPR encontrado para modelo electrodo cónico con cemento conductor.

A.2.4. Comportamiento de la resistencia puesta a tierra.

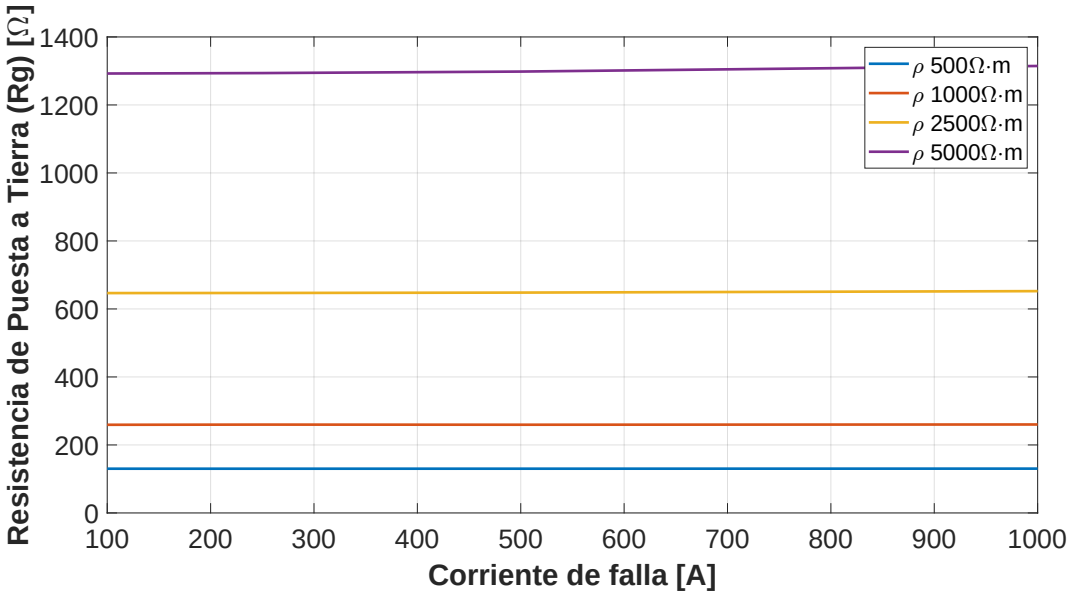


Figura A.13: Comportamiento de la resistencia puesta a tierra para modelo electrodo cónico con cemento conductor.

A.3. Electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.

A.3.1. Comportamiento de tensiones en superficie.

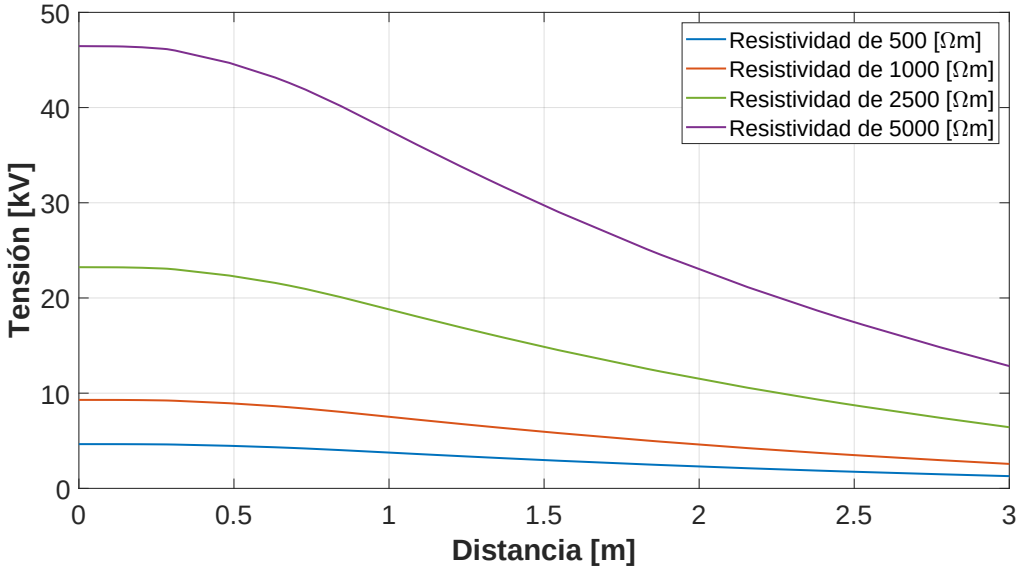


Figura A.14: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 100 [A].

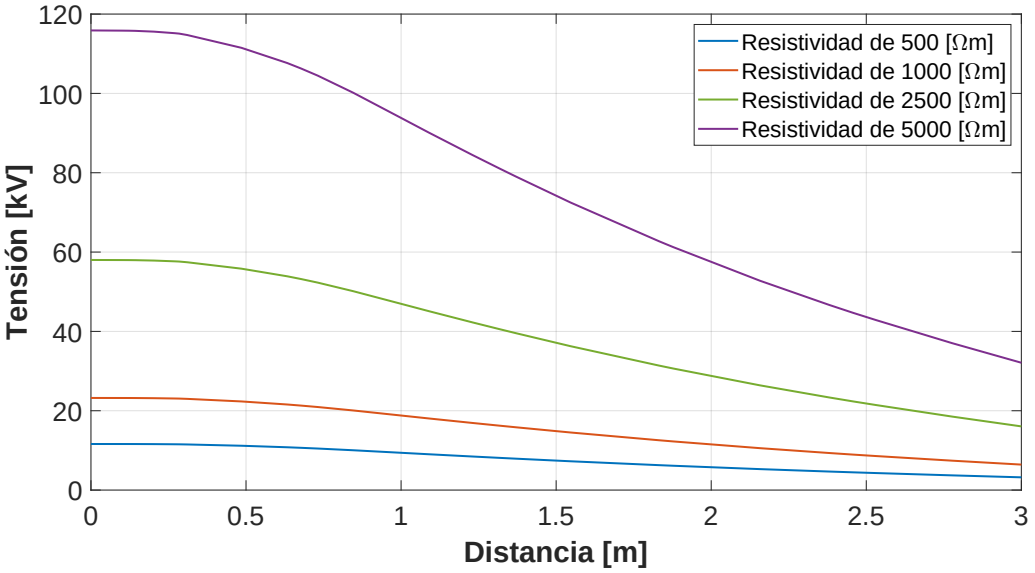


Figura A.15: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 250 [A].

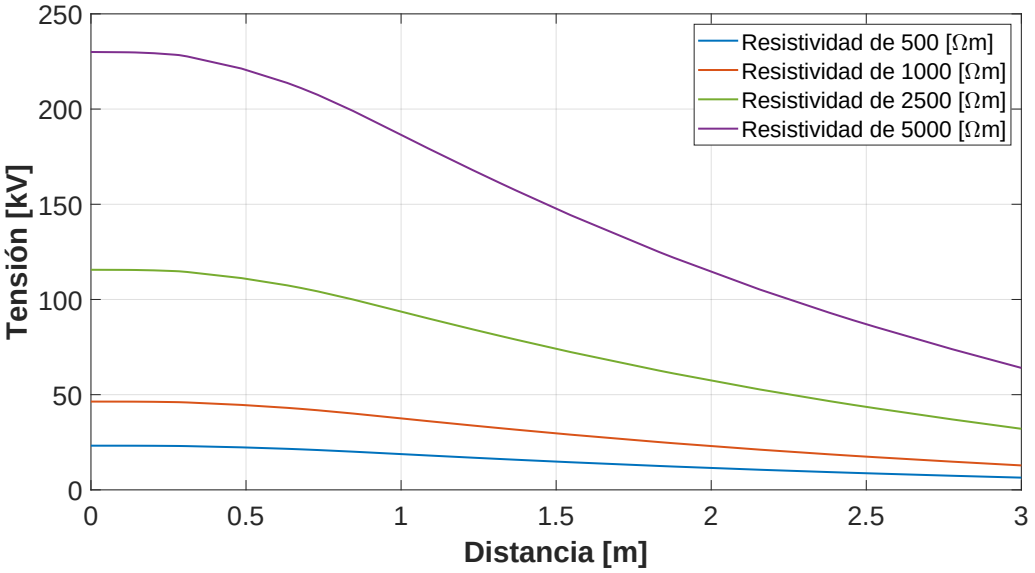


Figura A.16: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 500 [A].

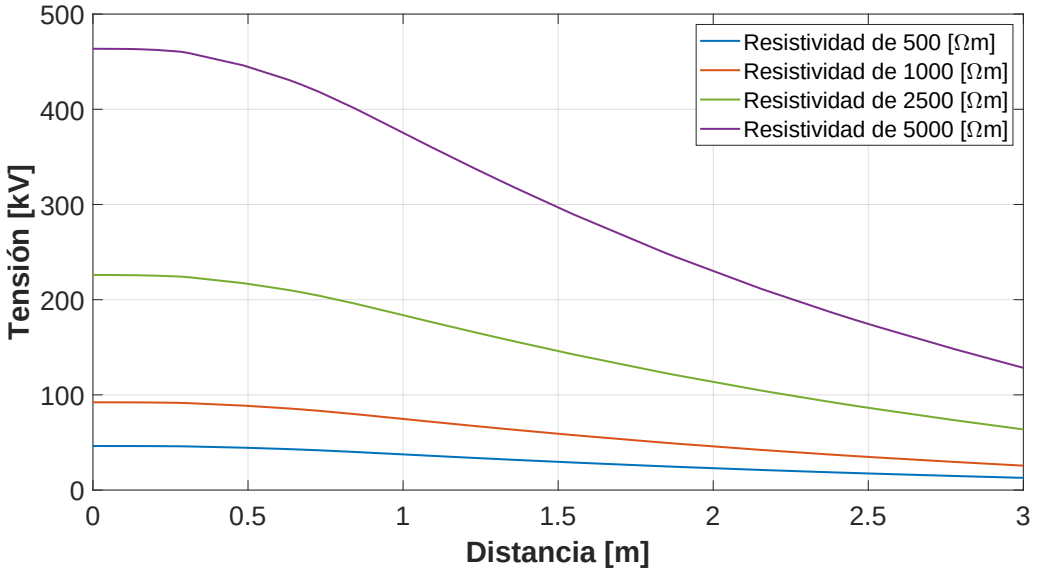


Figura A.17: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A].

A.3.2. Comportamiento de la temperatura y densidad de corriente.

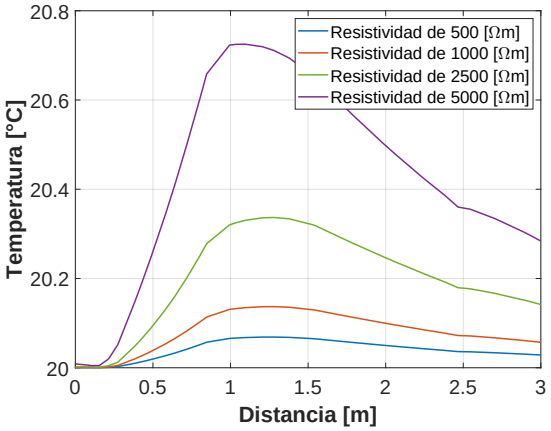


Figura A.18: Comportamiento de la temperatura encontrada en superficie para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla 1000 [A].

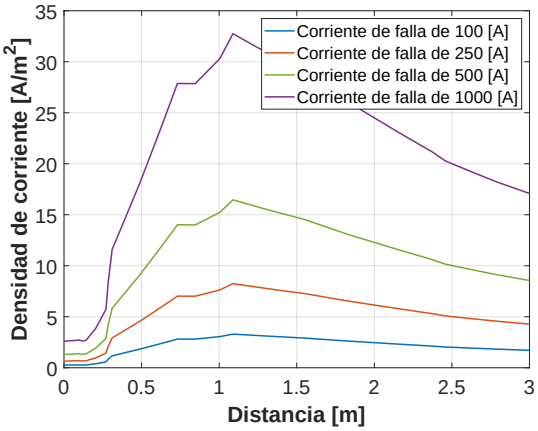


Figura A.19: Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en la superficie para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.

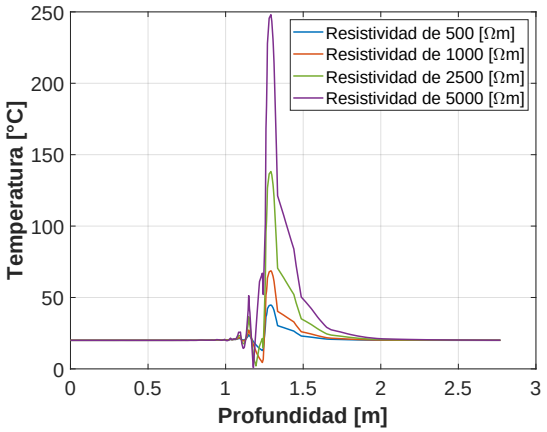


Figura A.20: Comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A].

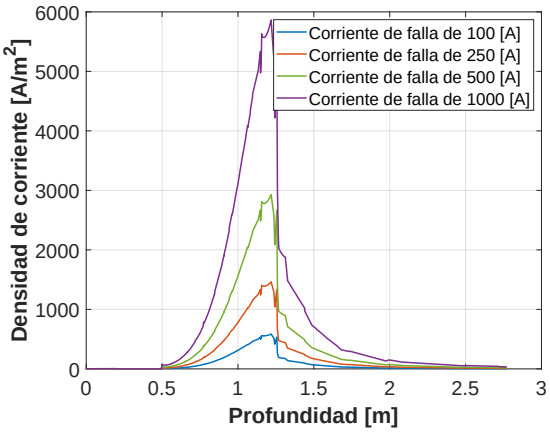


Figura A.21: Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.

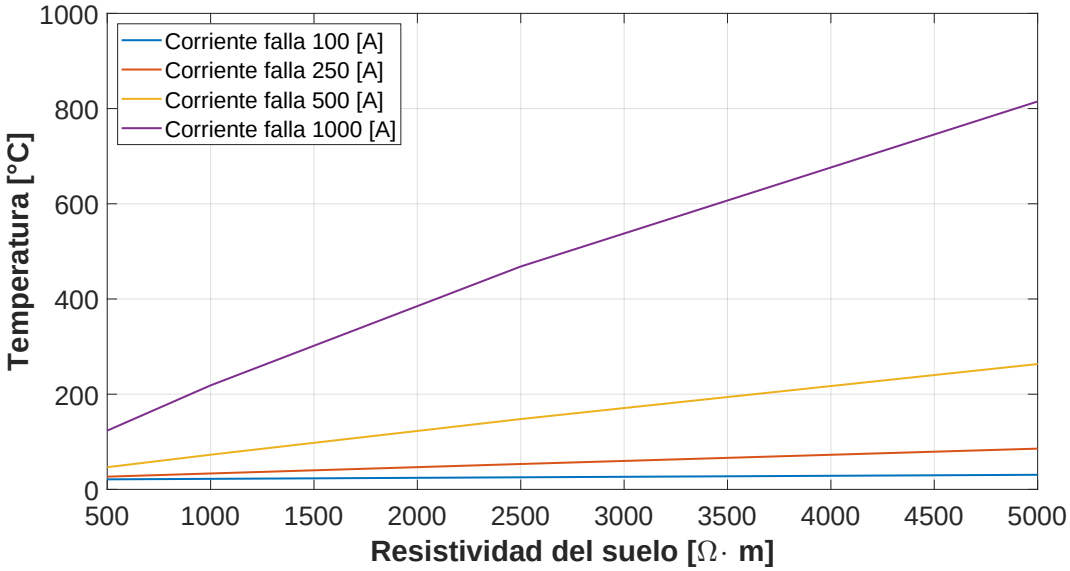


Figura A.22: Comportamiento de la máxima elevación de temperatura electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.

A.3.3. Comportamiento del aumento del potencial de tierra.

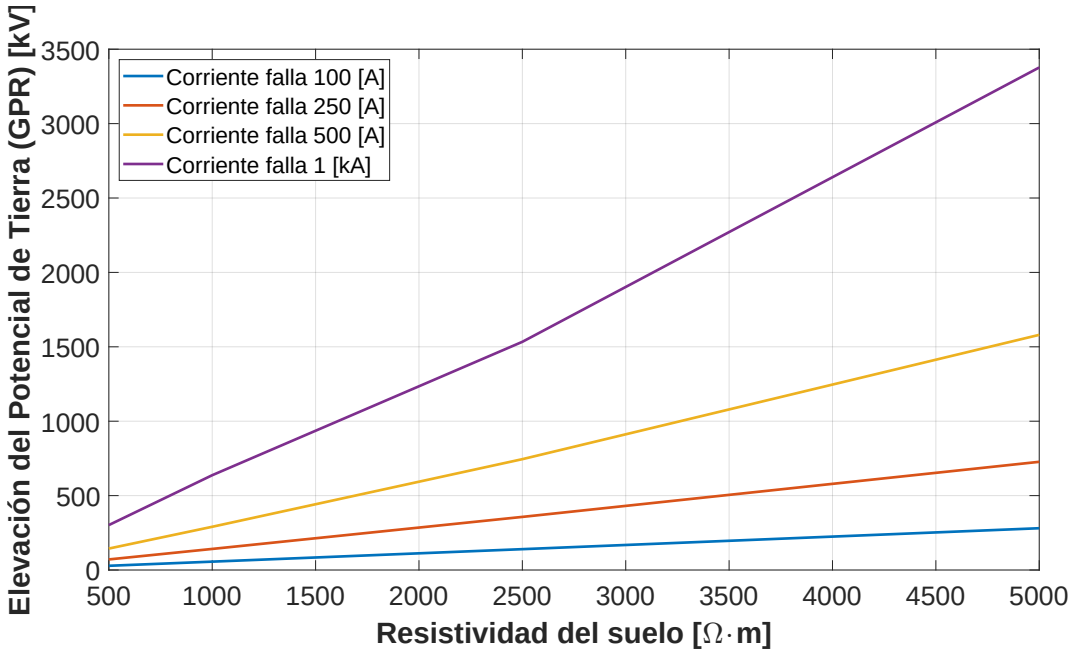


Figura A.23: Comportamiento del GPR encontrado para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.

A.3.4. Comportamiento de la resistencia puesta a tierra.

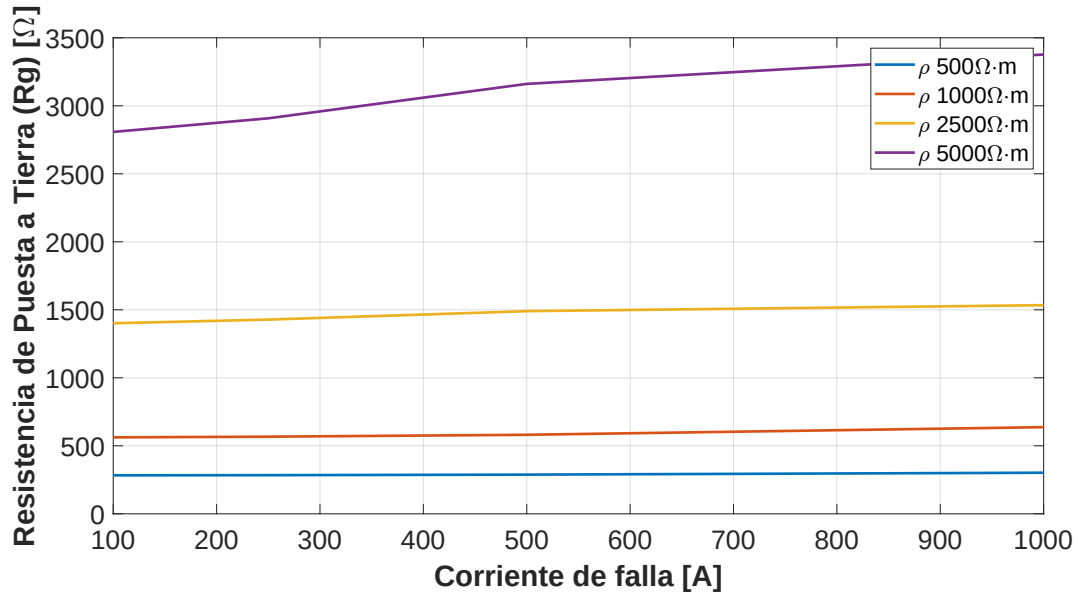
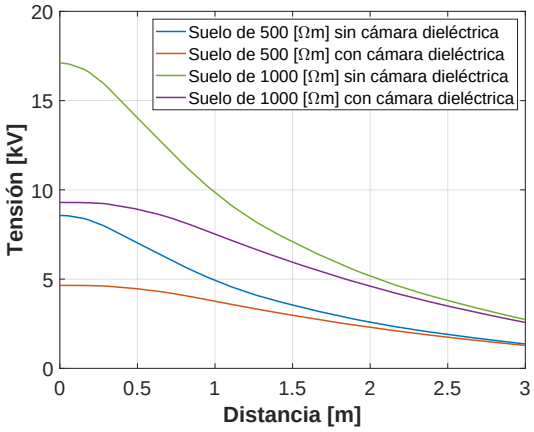
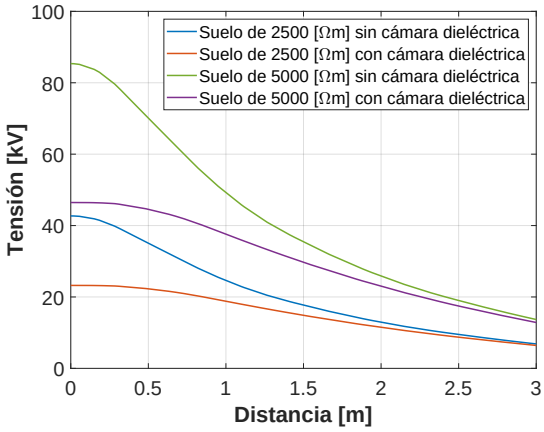


Figura A.24: Comportamiento de la resistencia puesta a tierra para modelo electrodo cónico con cemento conductor y cámara dieléctrica.

A.4. Tensiones en superficie entre configuración sin y con cámara dieléctrica del electrodo cónico.

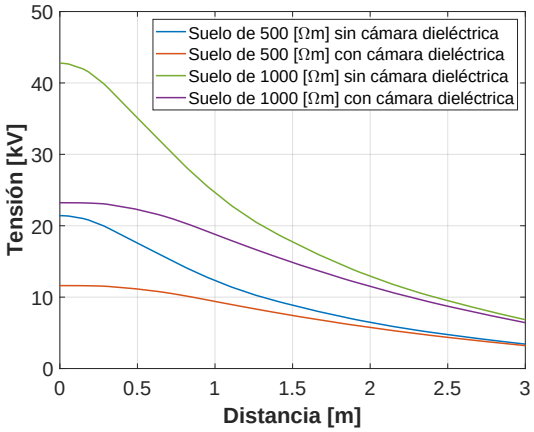


[1]

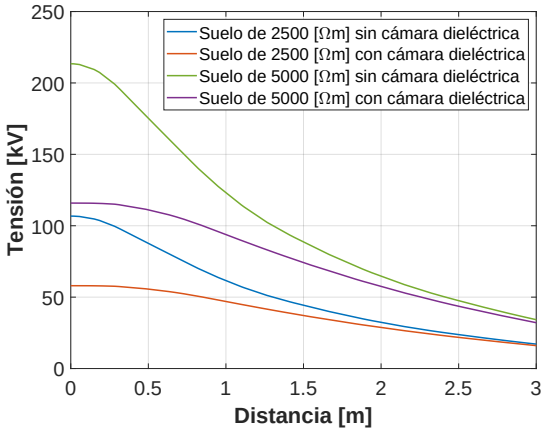


[2]

Figura A.25: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 100 [A].

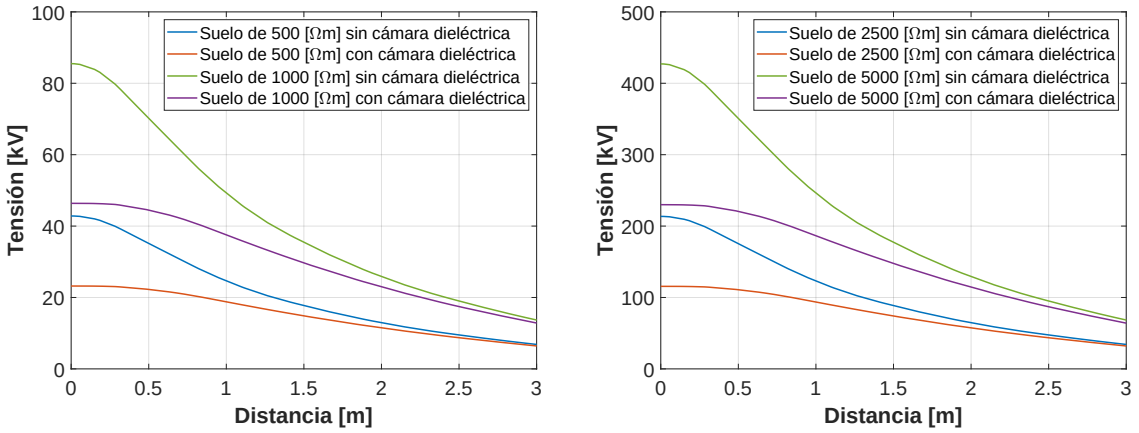


[1]



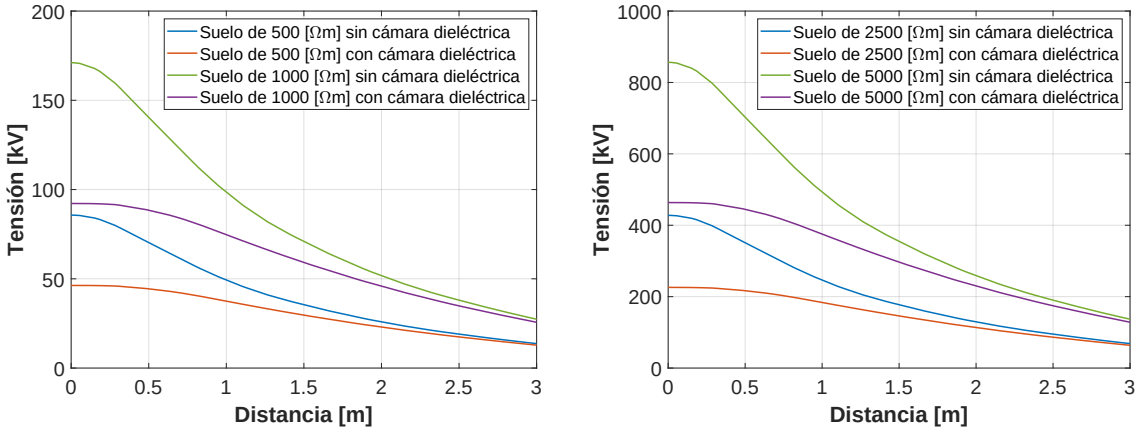
[2]

Figura A.26: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 250 [A].



[1] [2]

Figura A.27: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 500 [A].



[1] [2]

Figura A.28: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos cónicos. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 1000 [A].

A.5. Electrodo péndulo con cemento conductor.

A.5.1. Comportamiento de tensiones en superficie.

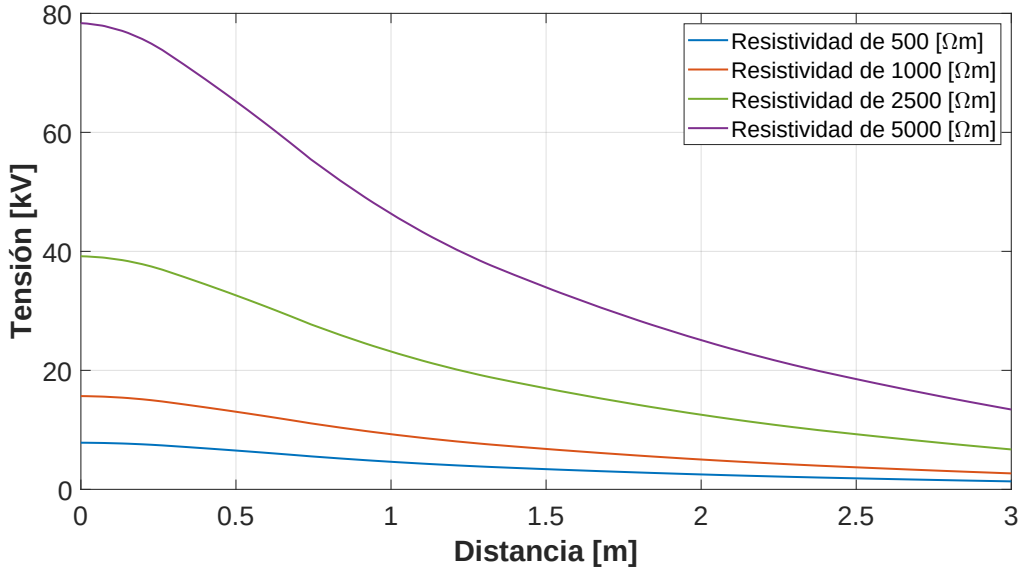


Figura A.29: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 100 [A].

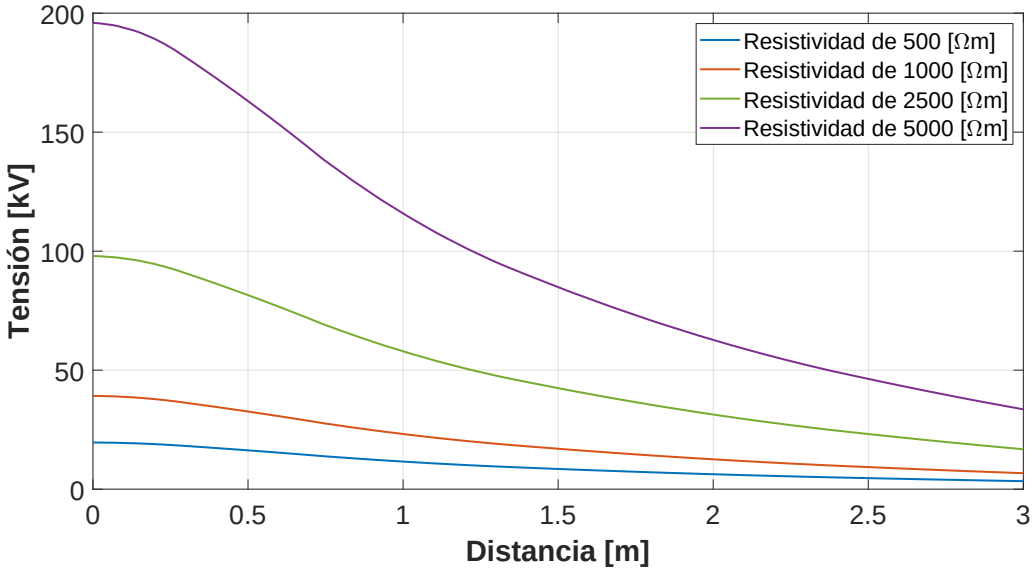


Figura A.30: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 250 [A].

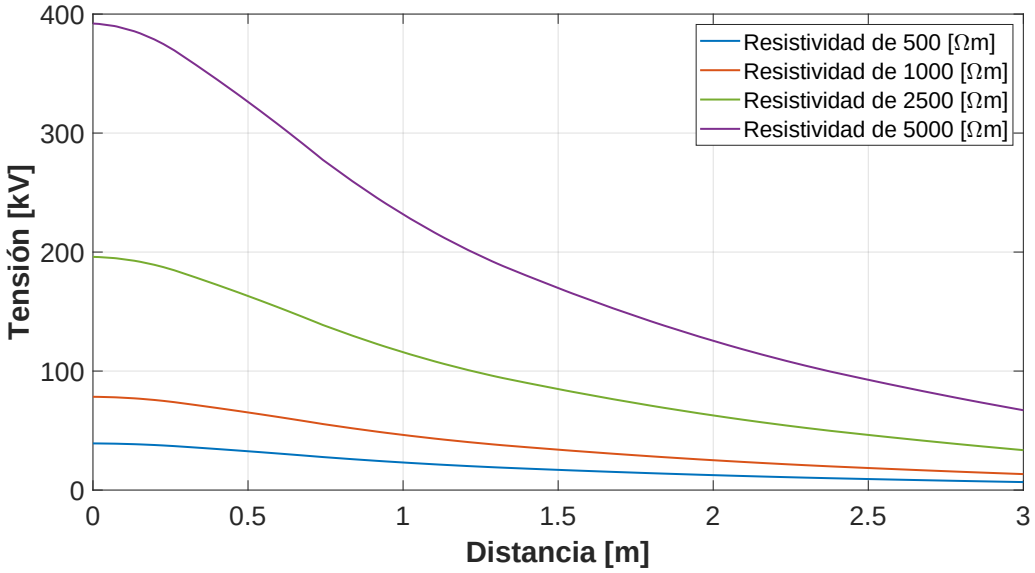


Figura A.31: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 500 [A].

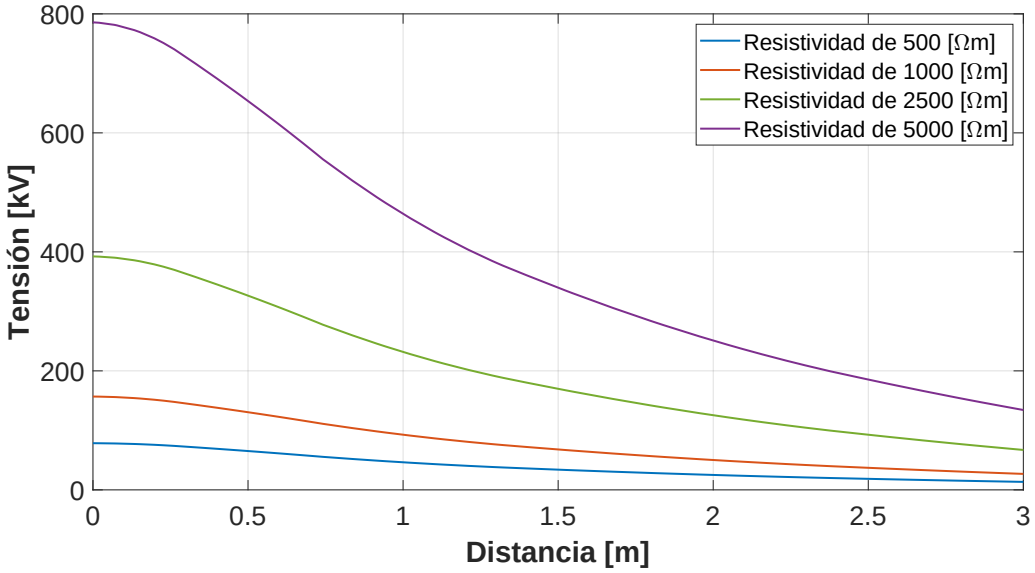


Figura A.32: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A].

A.5.2. Comportamiento de la temperatura y densidad de corriente.

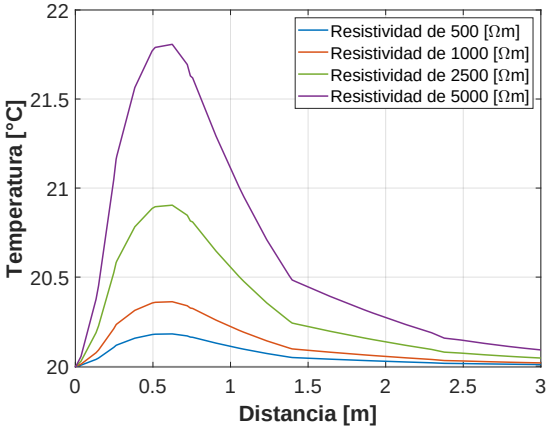


Figura A.33: Comportamiento de la temperatura encontrada en superficie para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla 1000 [A].

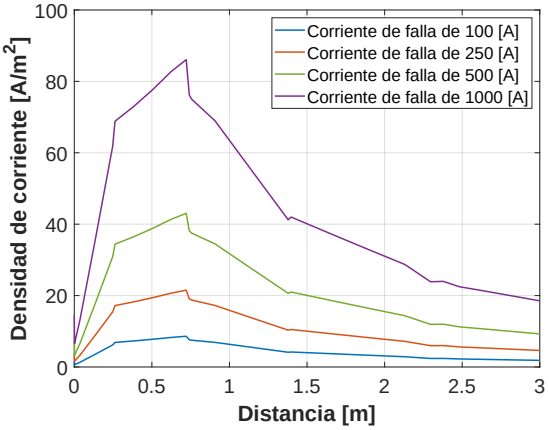


Figura A.34: Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en la superficie para modelo electrodo péndulo con cemento conductor.

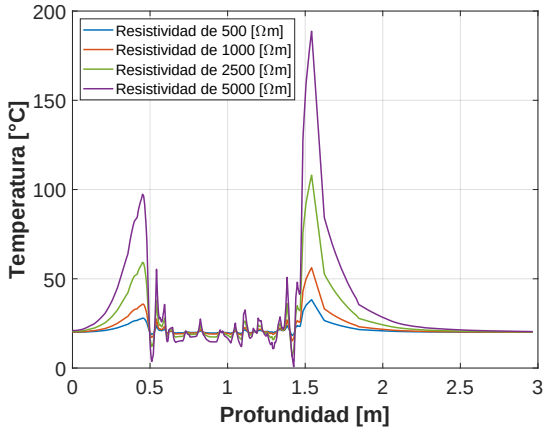


Figura A.35: Comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo péndulo con cemento conductor y corriente de falla de 1000 [A].

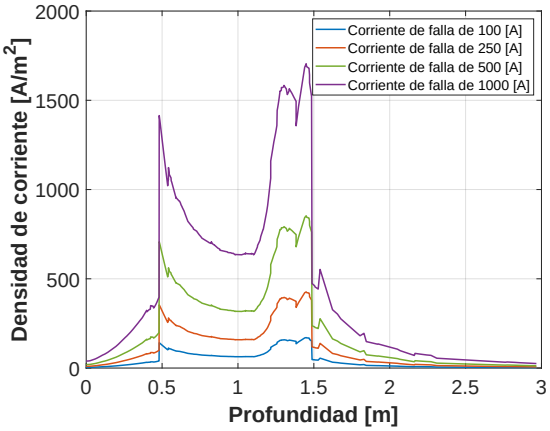


Figura A.36: Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo péndulo con cemento conductor.

A.5.3. Comportamiento del aumento del potencial de tierra.

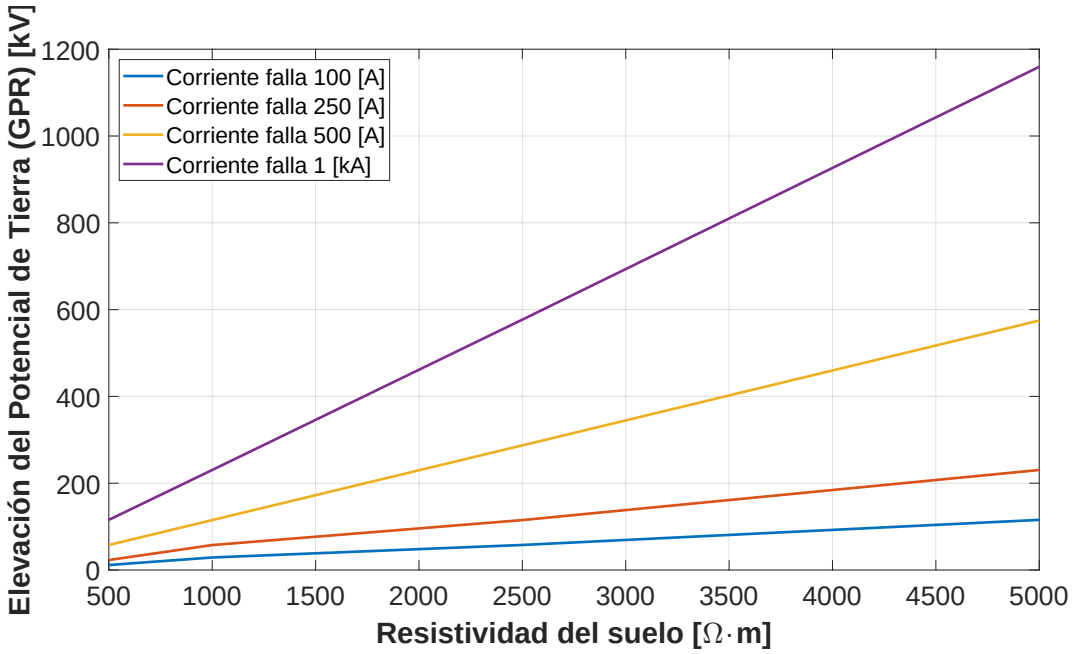


Figura A.37: Comportamiento del GPR encontrado para modelo electrodo péndulo con cemento conductor.

A.5.4. Comportamiento de la resistencia puesta a tierra.

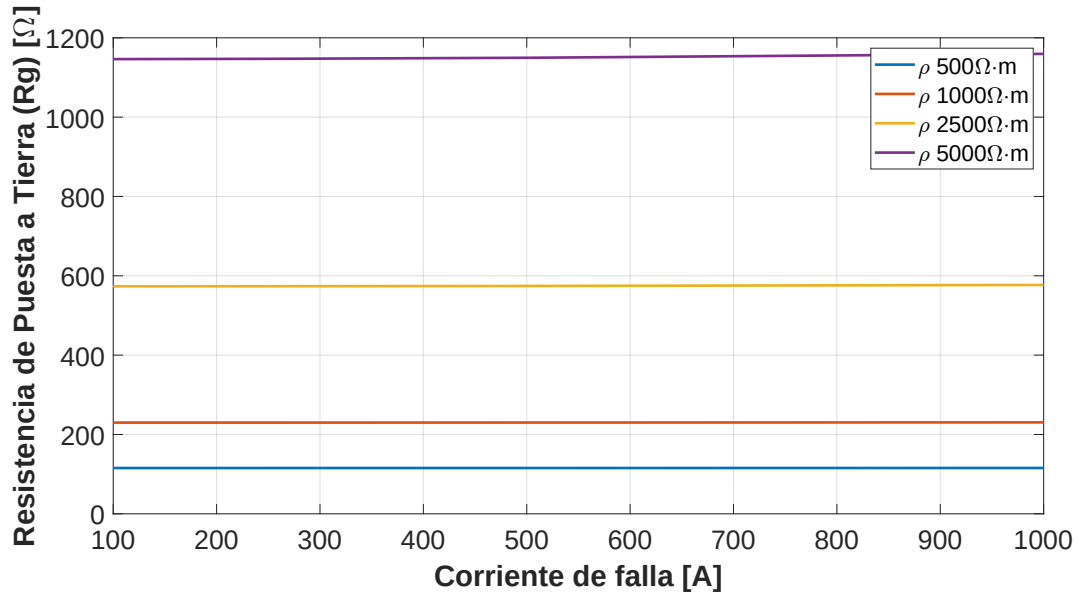


Figura A.38: Comportamiento de la resistencia puesta a tierra para modelo electrodo péndulo con cemento conductor.

A.6. Electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica.

A.6.1. Comportamiento de tensiones en superficie.

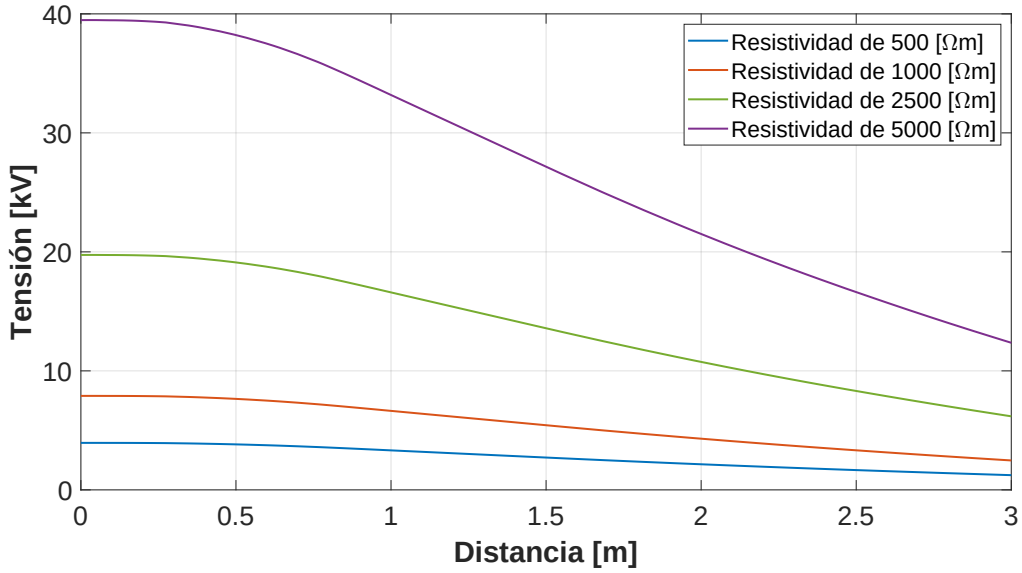


Figura A.39: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 100 [A].

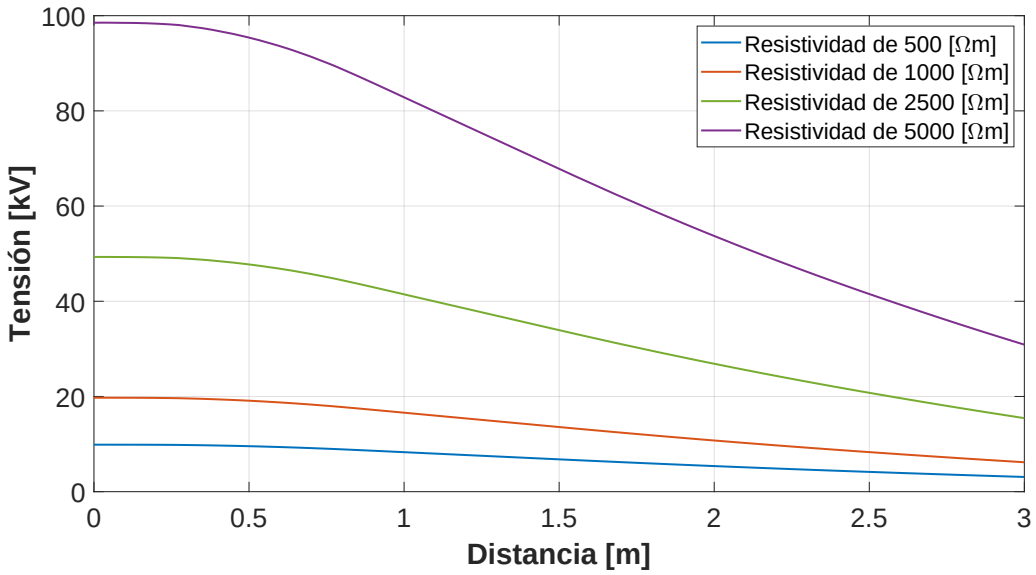


Figura A.40: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 250 [A].

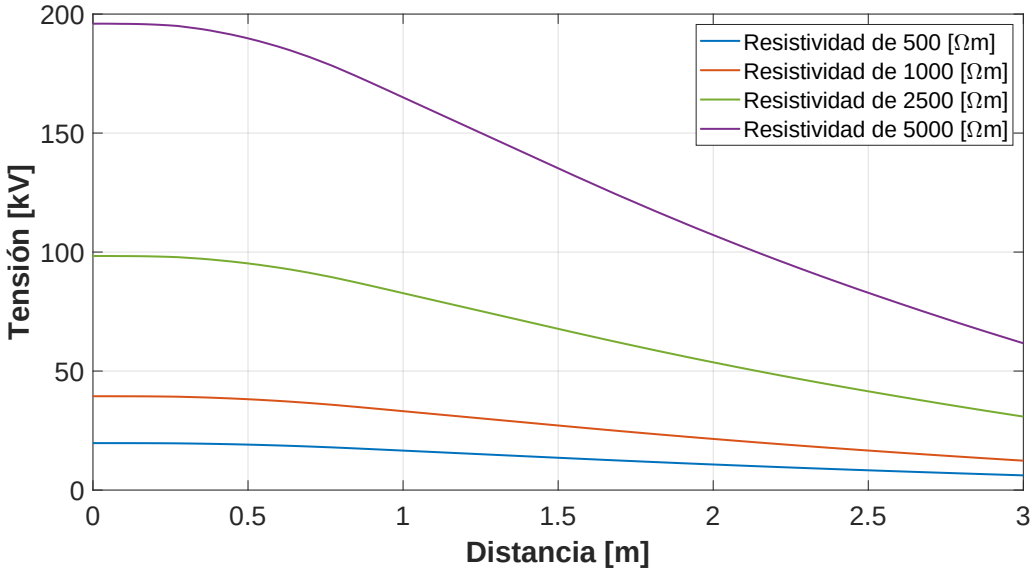


Figura A.41: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 500 [A].

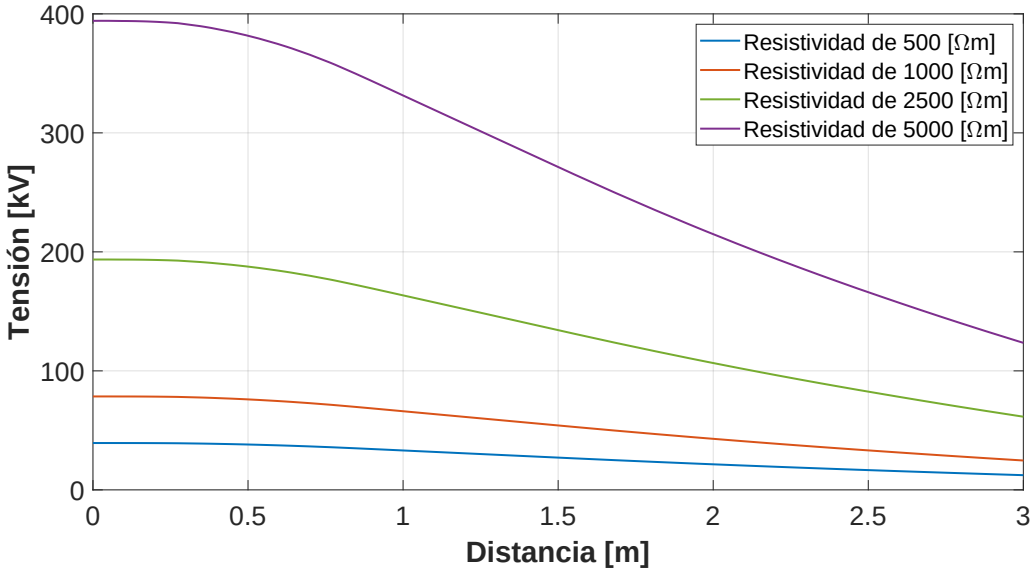


Figura A.42: Comportamiento de tensiones en superficie para electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A].

A.6.2. Comportamiento de la temperatura y densidad de corriente.

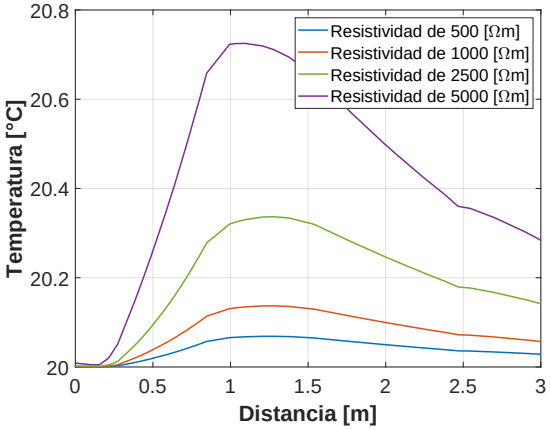


Figura A.43: Comportamiento de la temperatura encontrada en superficie para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla 1000 [A].

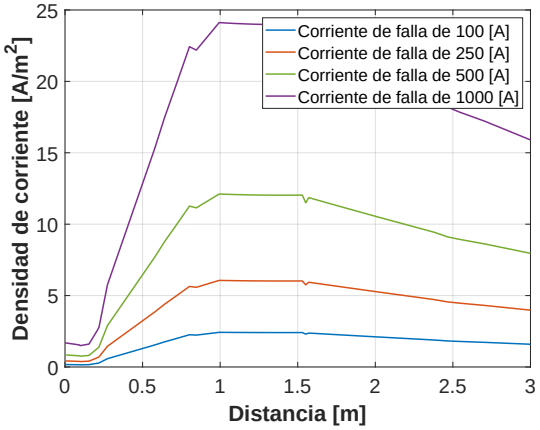


Figura A.44: Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en la superficie para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica.

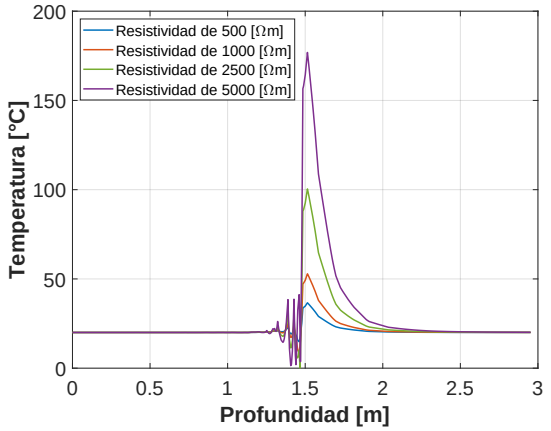


Figura A.45: Comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica con corriente de falla de 1000 [A].

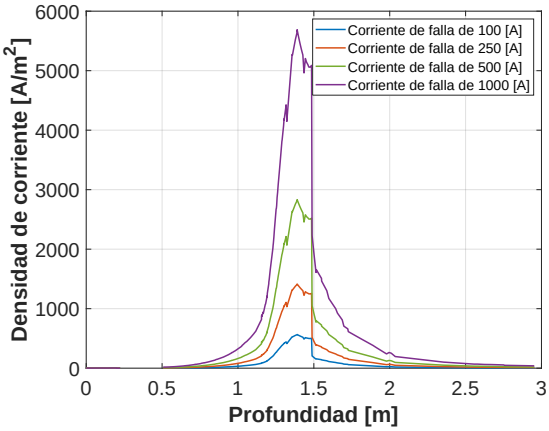


Figura A.46: Comportamiento de la densidad de corriente encontrada en profundidad a una distancia paralela de 15 [cm] del centro del electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica.

A.6.3. Comportamiento del aumento del potencial de tierra.

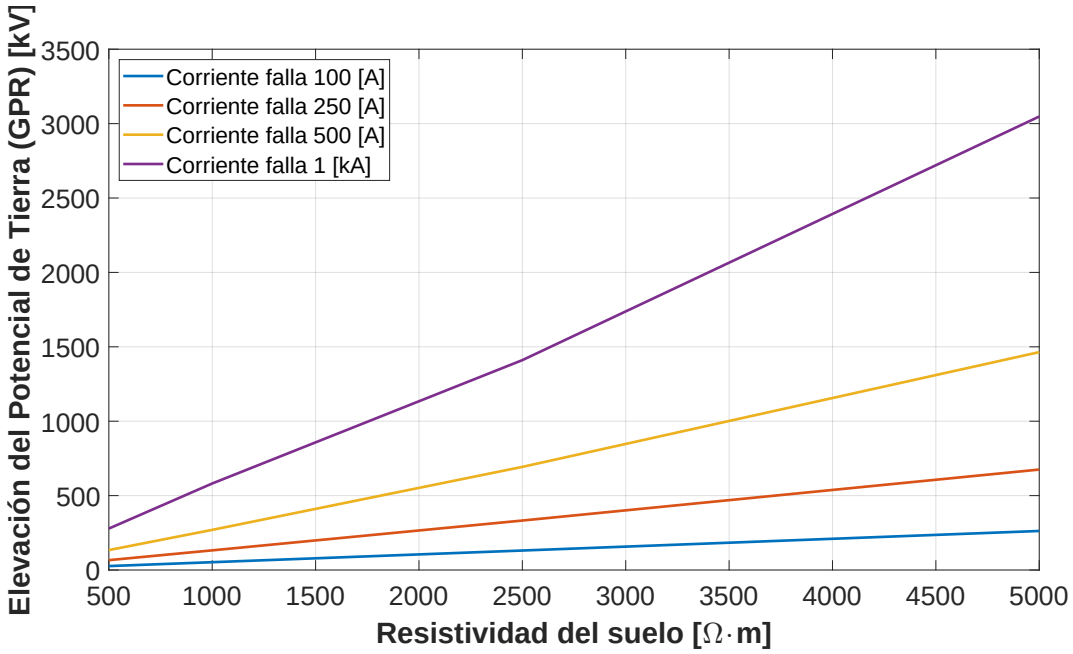


Figura A.47: Comportamiento del GPR encontrado para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica.

A.6.4. Comportamiento de la resistencia puesta a tierra.

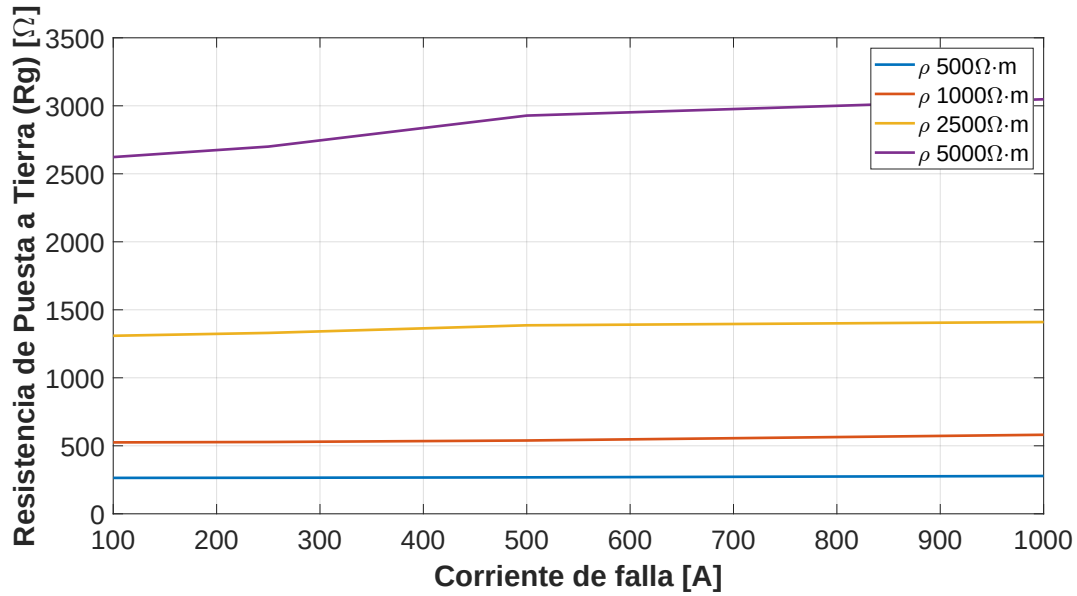
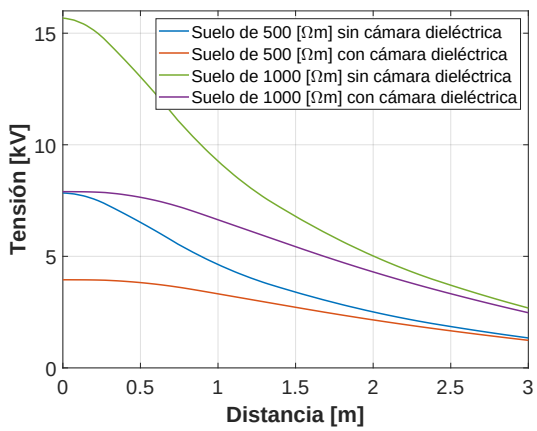
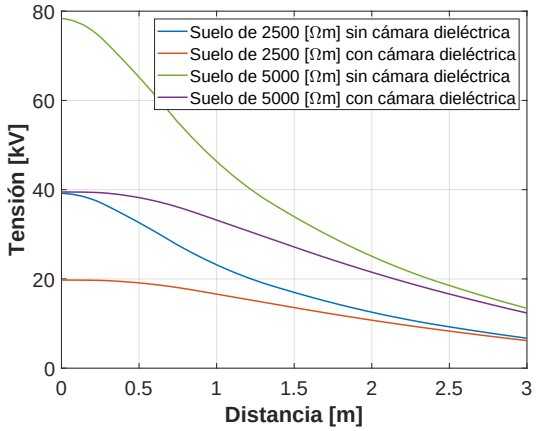


Figura A.48: Comportamiento de la resistencia puesta a tierra para modelo electrodo péndulo con cemento conductor y cámara dieléctrica.

A.7. Tensiones en superficie entre configuración sin y con cámara dieléctrica del electrodo péndulo.

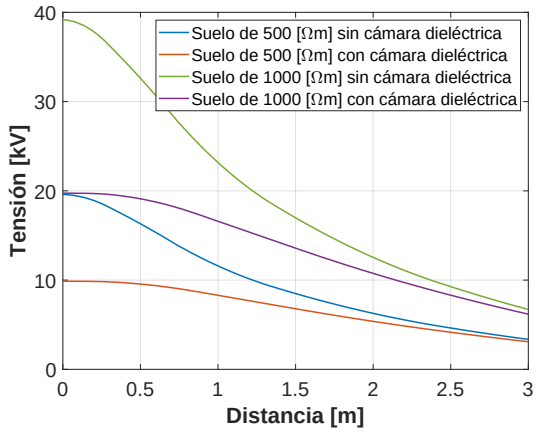


[1]

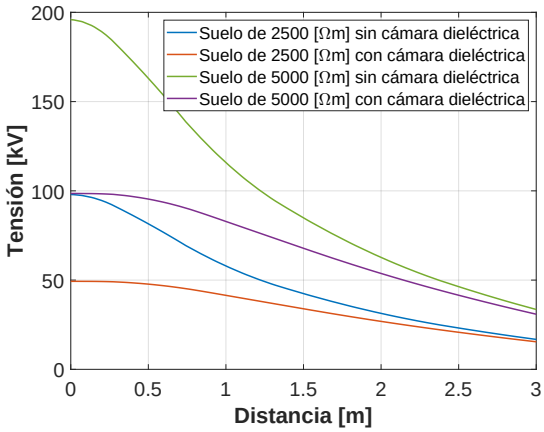


[2]

Figura A.49: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 100 [A].

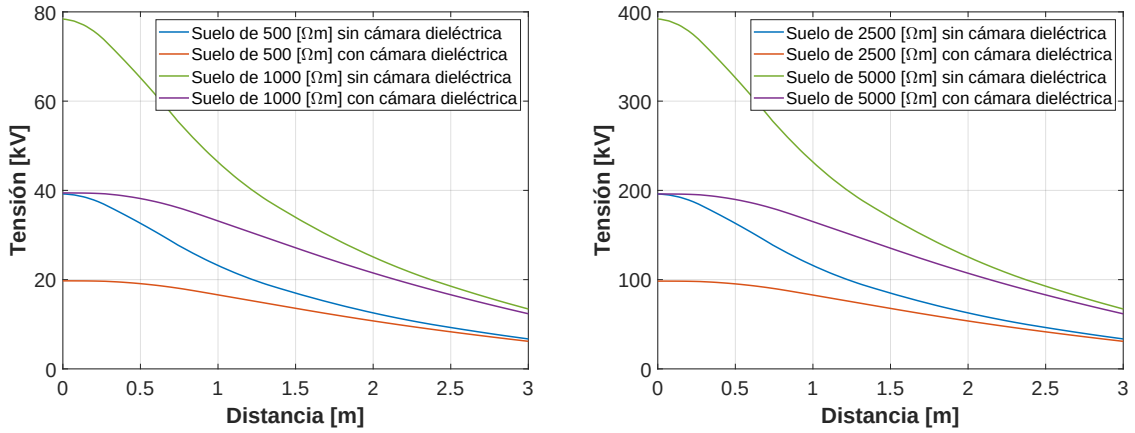


[1]



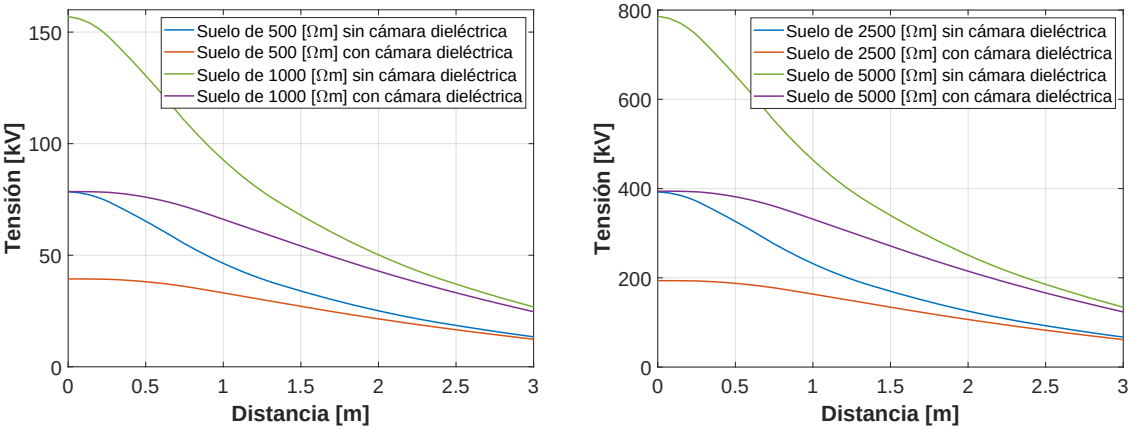
[2]

Figura A.50: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 250 [A].



[1] [2]

Figura A.51: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 500 [A].



[1] [2]

Figura A.52: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para electrodos tipo péndulo. [1] Resistividades de 500 y 1000 $[\Omega \cdot m]$. [2] Resistividades de 2500 y 5000 $[\Omega \cdot m]$. Ambos con corriente de falla de 1000 [A].

A.8. Mallas puesta a tierra.

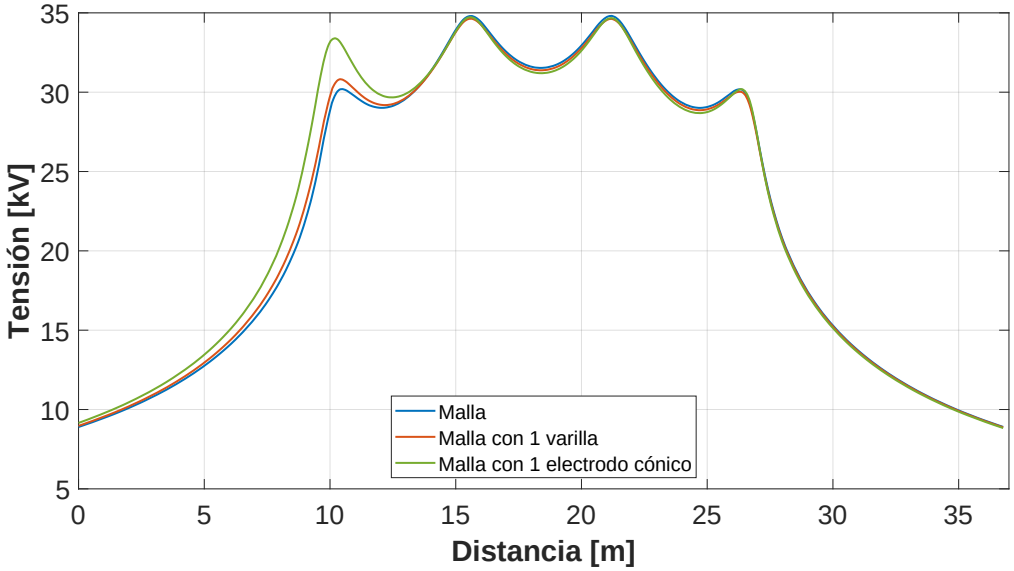


Figura A.53: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para los casos de 1 varilla tradicional y 1 electrodo cónico.

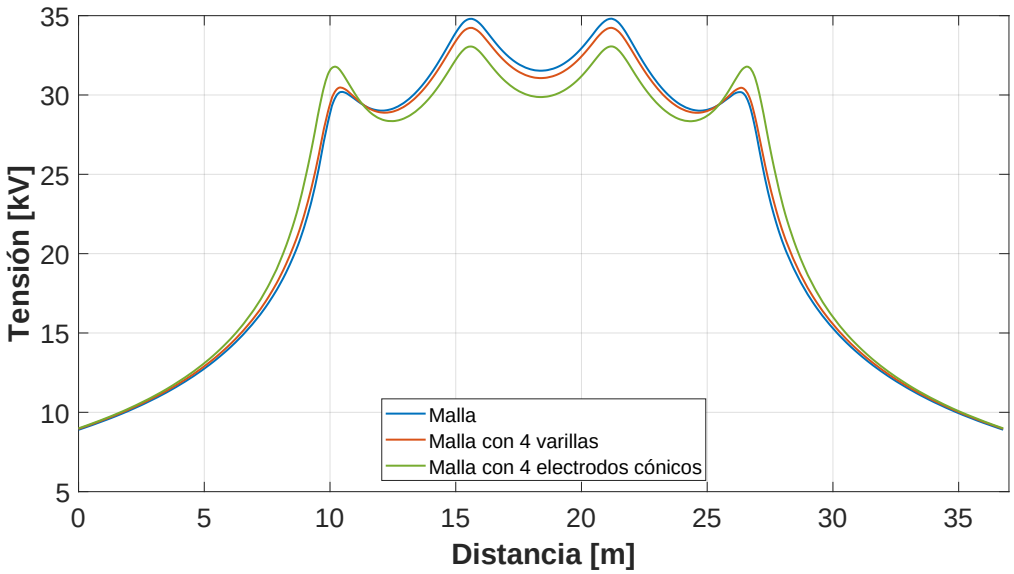


Figura A.54: Comparativa del comportamiento de tensiones en superficie para los casos de 4 varillas tradicionales y 4 electrodos cónicos.

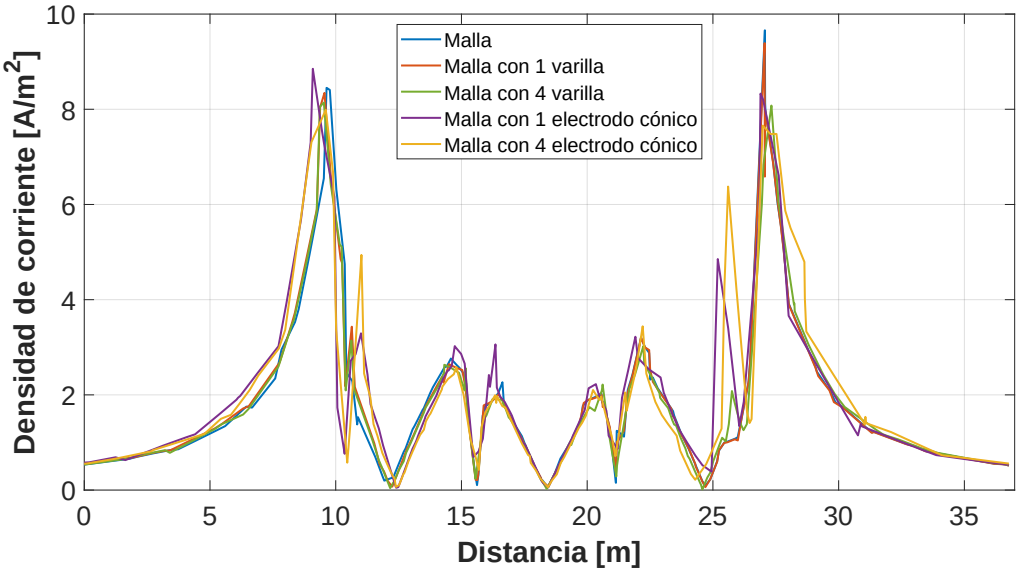


Figura A.55: Comparativa del comportamiento de la densidad de corriente en la superficie para los distintos escenarios de mallas de puesta a tierra.

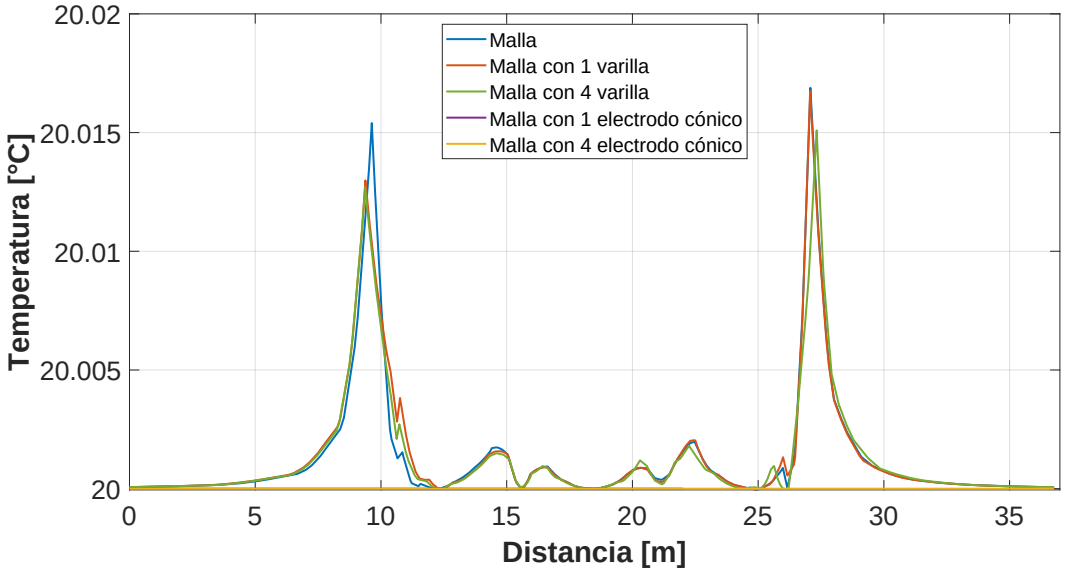


Figura A.56: Comparativa del comportamiento de la temperatura en la superficie para los distintos escenarios de mallas de puesta a tierra.

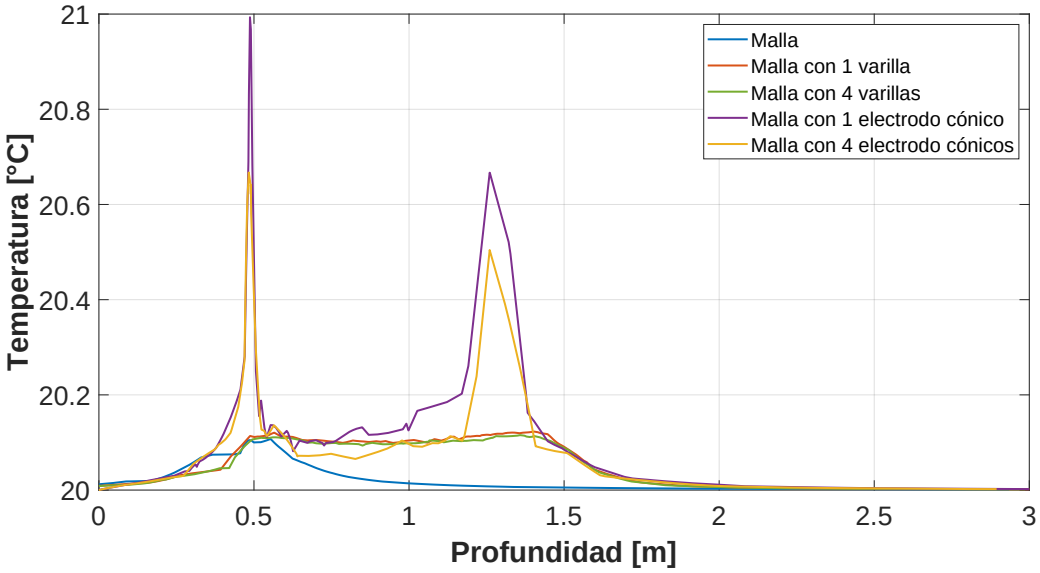


Figura A.57: Comparativa del comportamiento de la temperatura encontrada en profundidad a una distancia paralela de 20 [cm] del centro del electrodo en la esquina inferior izquierda de la malla para los distintos escenarios de mallas de puesta a tierra.

	Distancia 1		Distancia 2		Distancia 3		Distancia 4	
Tipo de malla	0 [m]	1[m]	0 [m]	1[m]	0 [m]	1[m]	0 [m]	1[m]
Base	29 204	22 606	30 195	23 915	29 216	22 788	30 180	23 712
1 Varilla	30 036	24 610	30 818	25 440	30 029	24 162	30 025	24 593
1 electr. cónico	33 099	27 562	33 395	28 177	33 087	27 080	30 192	24 752
4 Varillas	29 691	24 570	30 473	25 506	29 704	24 846	30 456	25 374
4 electr. cónicos	31 505	28 013	31 784	28 055	31 498	27 939	31 787	28 299

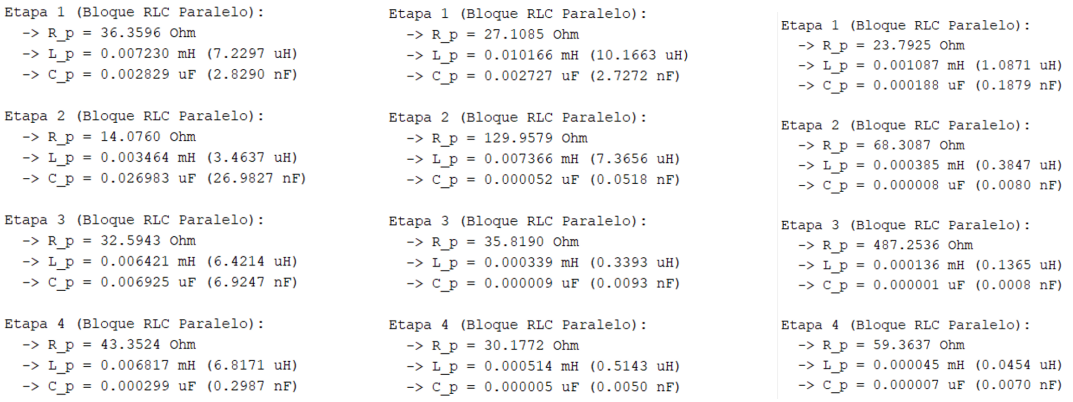
Tabla A.1: Tensiones [V] extraídas de COMSOL Multiphysics para el calculo de tensiones de paso y contacto según las distancias descritas en figura 4.14.

Malla Base	1 Varilla	1 electr. cónico	4 Varillas	4 electr. cónicos
37 807	37 590	37 195	36 987	35 119

Tabla A.2: GPR [V] encontrado en COMSOL Multiphysics para las distintas mallas de puesta a tierra analizadas.

Apéndice B

Figuras y gráficas sobre modelo de ferritas



[A] [B] [C]

Figura B.1: Valores de elementos del modelo Foster modificado para las ferritas: [A] Ferrita MnZn tipo 75. [B] Ferrita MnZn tipo 73. [C] Ferrita NiZn tipo 43.

B.1. Gráficas de comportamiento de la impedancia en ferritas.

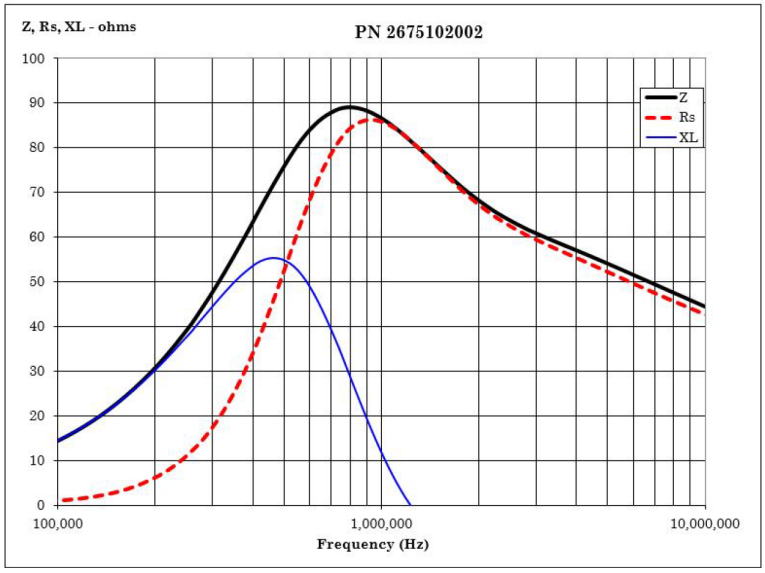


Figura B.2: Curva de impedancia dependiente de la frecuencia para ferrita MnZn tipo 75.

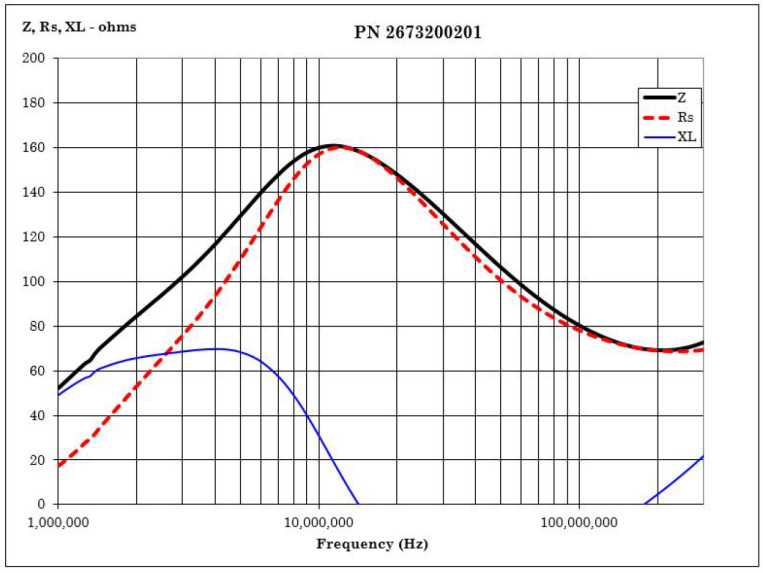


Figura B.3: Curva de impedancia dependiente de la frecuencia para ferrita MnZn tipo 73.

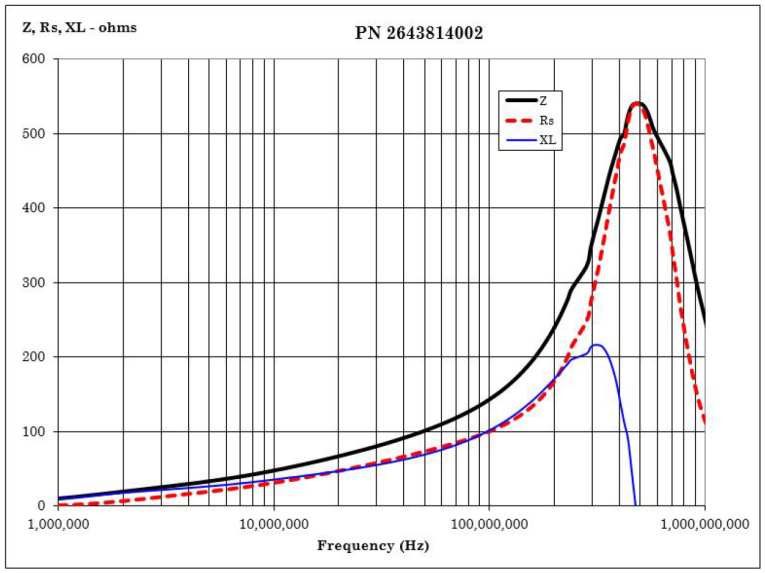


Figura B.4: Curva de impedancia dependiente de la frecuencia para ferrita NiZn tipo 43.

B.2. comparativa de la impedancia obtenida frente a la curva original y respuesta en frecuencia.

B.3. Señales de entrada a frecuencia industrial.

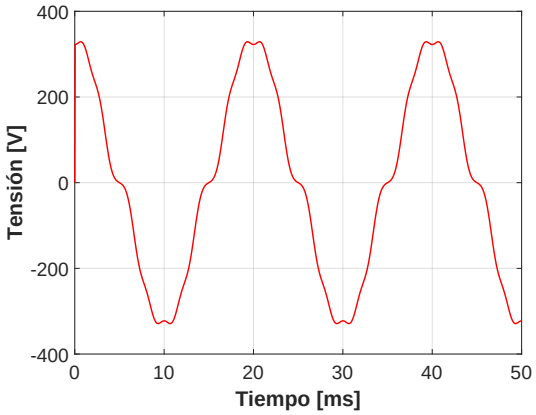


Figura B.5: Señal de tensión industrial de la fuente.

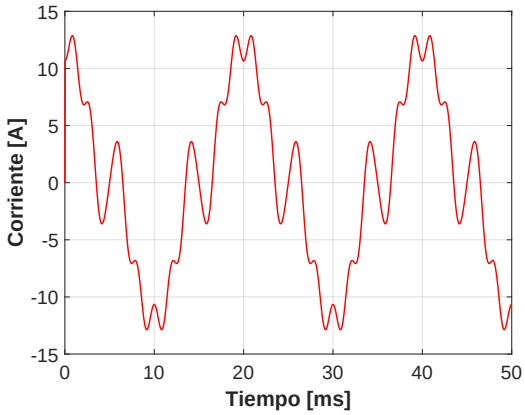


Figura B.6: Señal de corriente industrial de la fuente.

B.3.1. Señales de entrada a altas frecuencias.

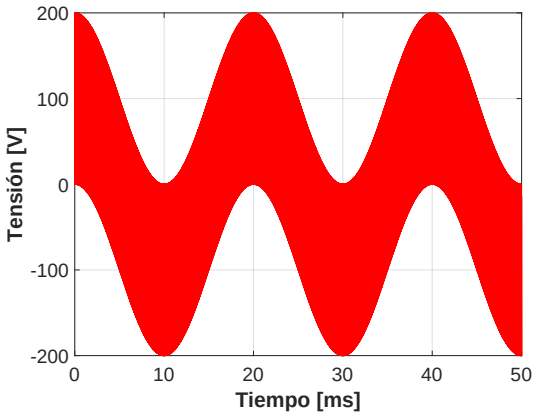


Figura B.7: Señal de tensión de la fuente para casos de alta frecuencia.

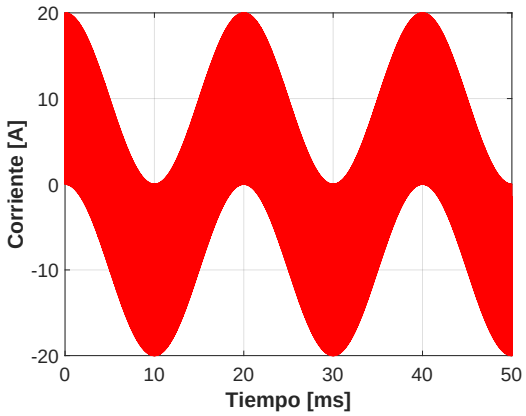


Figura B.8: Señal de corriente de la fuente para casos de alta frecuencia.

Apéndice C

Códigos MATLAB

Código C.1: Algoritmo de ajuste Foster para ferrita tipo 75.

```
clc; clear; close all;
% 1. Cargar archivos de texto
archivo_R = 'Curva_Rs.txt';
archivo_L = 'Curva_XL.txt';
opts = detectImportOptions(archivo_R); opts.Delimiter = ',';
datos_R = readmatrix(archivo_R, opts);
opts = detectImportOptions(archivo_L); opts.Delimiter = ',';
datos_L = readmatrix(archivo_L, opts);
freq_R = datos_R(:, 1); R_val = datos_R(:, 2);
freq_L = datos_L(:, 1); XL_val = datos_L(:, 2); % Se debe ingresar XL
    directamente

% Sincronización e interpolación matemática
freq_m = freq_R;
w = 2 * pi * freq_m;
XL_interp = interp1(freq_L, XL_val, freq_m, 'linear', 'extrap');
XL_minimo = min(XL_val) * 0.5; XL_interp(XL_interp < XL_minimo) = XL_minimo;

% Calcular Impedancia Compleja de Referencia (Z = R + jX)
X_val = XL_interp;
X_val(freq_m > 1200000) = -abs(X_val(freq_m > 1200000)); % Efecto capacitivo
    post-resonancia
Z_target = R_val + 1i*X_val;

% 2. ALGORITMO DE AJUSTE (Vector Fitting)
f_picos = [250e3, 550e3, 850e3, 3.5e6]; % Frecuencias estratégicas de
    sintonización
% Valores iniciales (x0) escalados numéricamente a [Ohm, uH, pF]
x0 = [ 15, 45,  8000, ... % Etapa 1: Baja frecuencia (8e-9 F = 8000 pF)
       30, 25,  2500, ... % Etapa 2: Pre-resonancia
       45, 12,  1100, ... % Etapa 3: Resonancia principal (850 kHz)
       35,  4,  120 ];    % Etapa 4: Alta frecuencia / decaimiento

% Función objetivo con desescalado interno (multiplica L por 1e-6 y C por 1e
    -12)
Z_model_fun = @(x, freq) ...
    ( (1i*2*pi*freq./(x(3)*1e-12))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)./(x
        (1).*(x(3)*1e-12)) + 1./((x(2)*1e-6).*(x(3)*1e-12))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq./(x(6)*1e-12))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)./(x
```

```
        (4).*(x(6)*1e-12)) + 1./((x(5)*1e-6).*(x(6)*1e-12))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq./(x(9)*1e-12))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)./(x
        (7).*(x(9)*1e-12)) + 1./((x(8)*1e-6).*(x(9)*1e-12))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq./(x(12)*1e-12)) ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)./(x
        (10).*(x(12)*1e-12)) + 1./((x(11)*1e-6).*(x(12)*1e-12))) );

options = optimset('MaxFunEvals', 50000, 'MaxIter', 10000, 'Display', 'off');
lb = zeros(1, 12);

% Optimización de la curva original
[x_opt, ~] = lsqcurvefit(@(x, f) abs(Z_model_fun(x, f)), x0, freq_m, abs(
    Z_target), lb, [], options);

% 3. IMPRIMIR LOS VALORES SINTETIZADOS PARA ATPDRAW
fprintf('\n═══════════════════════════════════════════\n');
fprintf('     VALORES SINTETIZADOS PARA ATPDRAW (ORDEN 4)   \n');
fprintf('═══════════════════════════════════════════\n');
for e = 1:4
    idx = (e-1)*3 + 1;
    fprintf('Etapa %d (Bloque RLC Paralelo):\n', e);
    fprintf('  -> R_p = %.4f Ohm\n', abs(x_opt(idx)));
    fprintf('  -> L_p = %.6f mH (%.4f uH)\n', abs(x_opt(idx+1))*1e-3, abs(x_opt
        (idx+1)));
    fprintf('  -> C_p = %.6f uF (%.4f nF)\n\n', abs(x_opt(idx+2))*1e-6, abs(
        x_opt(idx+2))*1e-3);
end

% 4. Graficar Comparación de Validación Original
Z_sintetizado = Z_model_fun(x_opt, freq_m);
figure('Name', 'Validación del Ajuste Original', 'NumberTitle', 'off', 'Color',
     'w');
semilogx(freq_m, abs(Z_target), 'k-', 'LineWidth', 2.5); hold on;
semilogx(freq_m, abs(Z_sintetizado), 'r--', 'LineWidth', 2);
xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Impedancia |\Omega|');
legend('Datos Originales', 'Modelo Foster RLC');
grid on;
```

Código C.2: Algoritmo de ajuste Foster para ferrita tipo 73.

```
clc; clear; close all;

% 1. Cargar archivos de texto
archivo_R = 'Curva_Rs_medio.txt';
archivo_L = 'Curva_XL_medio.txt';

opts = detectImportOptions(archivo_R); opts.Delimiter = ',';
datos_R = readmatrix(archivo_R, opts);
opts = detectImportOptions(archivo_L); opts.Delimiter = ',';
datos_L = readmatrix(archivo_L, opts);

freq_R = datos_R(:, 1); R_val = datos_R(:, 2);
freq_L = datos_L(:, 1); XL_val = datos_L(:, 2); % Se debe ingresar XL
    directamente

idx_valid = XL_val > -70;
freq_L = freq_L(idx_valid);
XL_val = XL_val(idx_valid);

% Sincronización e interpolación matemática
```

```
freq_m = freq_R;
w = 2 * pi * freq_m;

% Interpolar directamente la Reactancia (XL)
X_interp = interp1(freq_L, XL_val, freq_m, 'linear', 'extrap');

% Aplicar el efecto capacitivo basándose en el comportamiento de la gráfica del
    PDF
% XL cruza a valores negativos entre 14,5 MHz y 179 MHz
X_val = abs(X_interp); % Asegurar magnitud positiva por defecto
idx_cap = (freq_m > 14.5e6) & (freq_m < 179e6);
X_val(idx_cap) = -abs(X_val(idx_cap)); % Forzar el signo negativo en la zona
    capacitiva

% Calcular Impedancia Compleja de Referencia (Z = R + jX)
Z_target = R_val + 1i*X_val;

% 2. ALGORITMO DE AJUSTE (Vector Fitting por Mínimos Cuadrados No Lineales)
% Frecuencias estratégicas
f_picos = [1e6, 15e6, 50e6, 150e6];

% Valores iniciales estimados ajustados al pico de impedancia (160 ohms)
% [R1,L1,C1, R2,L2,C2, ...]
x0 = [ 30, 10e-6,  2.5e-9, ...  % Etapa 1: Baja frecuencia
       60,  2e-6,  50e-12, ...  % Etapa 2: Resonancia principal (~15 MHz)
       40,  1e-6,  10e-12, ...  % Etapa 3: Zona de decaimiento (~50 MHz)
       30,  0.1e-6, 5e-12 ];    % Etapa 4: Alta frecuencia / recuperación (~150
           MHz)

% Función objetivo: Minimizar el error entre el modelo de Foster y los datos
    reales
Z_model_fun = @(x, freq) ...
    ( (1i*2*pi*freq/x(3))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)/(x(1)*x(3)) +
        1/(x(2)*x(3))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq/x(6))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)/(x(4)*x(6)) +
        1/(x(5)*x(6))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq/x(9))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)/(x(7)*x(9)) +
        1/(x(8)*x(9))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq/x(12)) ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)/(x(10)*x(12))
        + 1/(x(11)*x(12))) );

options = optimset('MaxFunEvals', 50000, 'MaxIter', 10000, 'Display', 'off');

lb = zeros(1, 12);
[x_opt, ~] = lsqcurvefit(@(x, f) abs(Z_model_fun(x, f)), x0, freq_m, abs(
    Z_target), lb, [], options);

% 3. IMPRIMIR LOS VALORES SINTETIZADOS PARA ATPDRAW
fprintf('\n==========================================================\n');
fprintf('      VALORES SINTETIZADOS PARA ATPDRAW (ORDEN 4)    \n');
fprintf('==========================================================\n');
for e = 1:4
    idx = (e-1)*3 + 1;
    fprintf('Etapa %d (Bloque RLC Paralelo):\n', e);
    fprintf('  -> R_p = %.4f Ohm\n', abs(x_opt(idx)));
    fprintf('  -> L_p = %.6f mH (%.4f uH)\n', (abs(x_opt(idx+1)))*1e3, (abs(
        x_opt(idx+1)))*1e6);
    fprintf('  -> C_p = %.6f uF (%.4f nF)\n\n', (abs(x_opt(idx+2)))*1e6, (abs(
        x_opt(idx+2)))*1e9);
```

```
end

% 4. Graficar Comparación de Validación
Z_sintetizado = Z_model_fun(x_opt, freq_m);

figure('Name', 'Validación del Ajuste por Síntesis de Foster', 'NumberTitle', '
    off', 'Color', 'w');
semilogx(freq_m, abs(Z_target), 'k-', 'LineWidth', 2.5); hold on;
semilogx(freq_m, abs(Z_sintetizado), 'r--', 'LineWidth', 2);
xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Impedancia |\Omega|');
legend('Datos Originales (PDF)', 'Modelo Foster RLC');
grid on;
```

Código C.3: Algoritmo de ajuste Foster para ferrita tipo 43.

```
clc; clear; close all;

% 1. Cargar el archivo de texto unificado
archivo_datos = 'resp_ferrita_higth.txt';
opts = detectImportOptions(archivo_datos);
opts.Delimiter = ',';
datos = readmatrix(archivo_datos, opts);

% Extraer las columnas: 1 (Frecuencia), 4 (Resistencia), 5 (Reactancia XL)
freq_m = datos(:, 1);
R_val  = datos(:, 4);
XL_val = datos(:, 5);

% Asignación directa de la reactancia
X_val = XL_val;

% Calcular Impedancia Compleja de Referencia (Z = R + jX)
Z_target = R_val + 1i*X_val;

% 2. ALGORITMO DE AJUSTE (Vector Fitting Escaldo)
x0 = [ 50,   2.0,   1000, ... % Etapa 1: R(Ohm), L(uH), C(pF)
       150,  0.5,   10,  ...   % Etapa 2
       540,  0.2,   1,   ...   % Etapa 3
       100,  0.05,  0.5 ];     % Etapa 4

% Función objetivo: Desescala internamente (multiplica L por 1e-6 y C por 1e
    -12)
Z_model_fun = @(x, freq) ...
    ( (1i*2*pi*freq./(x(3)*1e-12))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)./(x
        (1).*(x(3)*1e-12)) + 1./((x(2)*1e-6).*(x(3)*1e-12))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq./(x(6)*1e-12))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)./(x
        (4).*(x(6)*1e-12)) + 1./((x(5)*1e-6).*(x(6)*1e-12))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq./(x(9)*1e-12))  ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)./(x
        (7).*(x(9)*1e-12)) + 1./((x(8)*1e-6).*(x(9)*1e-12))) ) + ...
    ( (1i*2*pi*freq./(x(12)*1e-12)) ./ ((1i*2*pi*freq).^2 + (1i*2*pi*freq)./(x
        (10).*(x(12)*1e-12)) + 1./((x(11)*1e-6).*(x(12)*1e-12))) );

options = optimset('MaxFunEvals', 50000, 'MaxIter', 10000, 'Display', 'iter');
lb = zeros(1, 12);

% Ejecutar optimización
[x_opt, ~] = lsqcurvefit(@(x, f) abs(Z_model_fun(x, f)), x0, freq_m, abs(
    Z_target), lb, [], options);
```

```
% 3. IMPRIMIR LOS VALORES SINTETIZADOS PARA ATPDRAW
fprintf('\n═══════════════════════════════════════════\n');
fprintf('      VALORES SINTETIZADOS PARA ATPDRAW (ORDEN 4)    \n');
fprintf('═══════════════════════════════════════════\n');
for e = 1:4
    idx = (e-1)*3 + 1;
    % Como x_opt sale en uH y pF, reajustamos la impresión a mH, uH, uF y nF
    fprintf('Etapa %d (Bloque RLC Paralelo):\n', e);
    fprintf('  -> R_p = %.4f Ohm\n', abs(x_opt(idx)));
    fprintf('  -> L_p = %.6f mH (%.4f uH)\n', abs(x_opt(idx+1))*1e-3, abs(x_opt
        (idx+1)));
    fprintf('  -> C_p = %.6f uF (%.4f nF)\n\n', abs(x_opt(idx+2))*1e-6, abs(
        x_opt(idx+2))*1e-3);
end

% 4. Graficar Comparación
Z_sintetizado = Z_model_fun(x_opt, freq_m);
figure('Name', 'Validación del Ajuste por Síntesis', 'NumberTitle', 'off', '
    Color', 'w');
semilogx(freq_m, abs(Z_target), 'k-', 'LineWidth', 2.5); hold on;
semilogx(freq_m, abs(Z_sintetizado), 'r--', 'LineWidth', 2);
xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Impedancia |\Omega|');
legend('Datos Originales', 'Modelo Foster RLC');
grid on;
```

Bibliografía

[1] "Ieee guide for safety in ac substation grounding," *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, pp. 1–226, 2015.

[2] Lightning protection system components (LPSC) - Part 1: Requirements for connection components. IEC Standard 62561-1, 2018.

[3] Lightning protection system components (LPSC) - Part 2: Requirements for conductors and earth electrodes, IEC Standard 62561-2, 2018.

[4] Lightning protection system components (LPSC) - Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds, IEC Standard 62561-7, 2024.

[5] Chile, Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), Pliego Técnico Normativo RIC N°06: Puesta a Tierra y Enlace Equipotencial. Resolución Exenta N° 33.877, 2020.

[6] Chile, Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), Pliego Técnico Normativo RPTD N°06: Puesta a Tierra. Resolución Exenta N° 33.277, 2020.

[7] "Ieee guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system," *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)*, pp. 1–86, 2012.

[8] M. Payne, "Análisis de los sistemas de tierra en instalaciones industriales, bajo norma ANSI-80 de la IEEE", Tesis de Grado. Facultad de estudios superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de Mexico. 2010, pp. 102-126.

[9] Baselli Ingeniería Chile, "Protocolo de pruebas de medición de resistencia de puesta a tierra de electrodos magnetoactivos", Santiago, Chile, Protocolo Técnico, 2023.

[10] Faragauss System, "Catálogo 2024 Faragauss System VR", Catálogo de productos, México, 2024.

[11] ElectroTierra Chile, "Información técnica de sistemas de puesta a tierra", Folleto técnico, Santiago, Chile.

[12] Low-voltage electrical installations - Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment - Earthing arrangements and protective conductors, IEC Standard 60364-5-54, 2011.

[13] H. B. Dwight, "Calculation of resistances to ground," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 55, no. 12, pp. 1319–1328, 1936.

[14] J. Sverak, "Optimized grounding grid design using variable spacing technique," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, no. 1, pp. 362–374, 1976.

[15] S. J. Schwarz, "Analytical expressions for the resistance of grounding systems [includes discussion]," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 73, no. 2, pp. 1011–1016, 1954.

[16] E. J. Fagan and R. H. Lee, "The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes," *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, vol. IGA-6, no. 4, pp. 337–348, 1970.

[17] C. F. Dalziel, "Dangerous electric currents," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 65, no. 8, pp. 579–585, 1946.

[18] L. Grcev, "Computer analysis of transient voltages in large grounding systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 815–823, 1996.

[19] S. Visacro, M. Murta Vale, M. B. Guimarães N., R. A. Araújo, W. L. Pinto, and R. S. Alípio, "The response grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent resistivity and permittivity of soil," in *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2010, pp. 1–4.

[20] D. Cavka, N. Mora, and F. Rachidi, "A comparison of frequency-dependent soil models: Application to the analysis of grounding systems," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 1, pp. 177–187, 2014.

[21] S. Visacro and R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, 2012.

[22] R. Alipio and S. Visacro, "Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171, 2014.

[23] L. Grcev, "Impulse efficiency of ground electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 441–451, 2009.

[24] J.-M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2014.

[25] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, 1999.

[26] W. H. Hayt and J. A. Buck, Engineering Electromagnetics, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011, pp. 384–387.

[27] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones, 6ª ed. Ciudad de México, México: McGraw-Hill Interamericana, 2020.

[28] J. Cadick, M. Capelli-Schellpfeffer, D. K. Neitzel y A. Winfield, Electrical Safety Handbook, 4ª ed. Nueva York, NY, EE. UU.: McGraw-Hill, 2012.

[29] B. Blanco-Arrúe et al., “Exploration of sedimentary deposits in the Atacama Desert, Chile, using integrated geophysical techniques”, Journal of South American Earth Sciences, vol. 115, p. 103746, 2022.

[30] J. Tapia et al., “Geology and geochemistry of the Atacama Desert”, Antonie van Leeuwenhoek, vol. 111, pp. 1273-1291, 2018.

[31] S. A. Ewing et al., “A threshold in soil formation at Earth’s arid–hyperarid transition”, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 70, pp. 5293-5322, 2006.

[32] F. Wang, “The Mechanism and Timescales of Soil Formation in the Hyper-arid Atacama Desert, Chile”, Ph.D. dissertation, Dept. Earth, Atmos., Planet. Sci., Purdue Univ., West Lafayette, IN, USA, 2013.

[33] F. Wang, G. Michalski, J. Seo, and W. Ge, “Geochemical, isotopic, and mineralogical constraints on atmospheric deposition in the hyper-arid Atacama Desert, Chile”, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 135, pp. 29-48, 2014.

[34] C. Voigt, S. Klipsch, D. Herwartz, G. Chong, and M. Staubwasser, “The spatial distribution of soluble salts in the surface soil of the Atacama Desert and their relationship to hyperaridity”, Global and Planetary Change, vol. 184, p. 103077, 2020.

[35] Z. R. Radakovic, M. V. Jovanovic, V. M. Milosevic, and N. M. Ilic, “Application of Earthing Backfill Materials in Desert Soil Conditions”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 5288-5297, Nov./Dec. 2015.

[36] E. D. Sunde, “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”. New York, NY, USA: Dover Publications, 1968.

[37] ASHRAE, ASHRAE Handbook—Fundamentals. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[38] Empresa Comercial Electrotierra SpA, “Ficha Técnica - Acondicionador de Terreno Conductivo en Polvo (ELECTROVOLT-80)”, Doc. FTCCE-01, Nov. 2025.

[39] Dictuc S.A., “Informe de Ensayos N° 1.660.880”, Comercial Electrotierra SpA, Macul, Chile, Rep. 1.660.880, feb. 2026.

[40] Chung, D.D.L. “Electrical conduction behavior of cement-matrix composites”. J. of Materi Eng and Perform 11, 194–204 (2002).

[41] Warp Factory SpA, “Certificado de Calidad y Origen: Tablero Biosintético Warp”, Departamento Control de Calidad, Santiago, Chile, 2024.

[42] S-POLYTEC GmbH, “Technical Data Sheet: PE-HD sheets (black and natural)”, Goch, Germany, 2016.

[43] COMSOL AB, *COMSOL Multiphysics Reference Manual*, Version 5.4, Stockholm, Sweden, 2018.

[44] COMSOL AB, “A Geoelectrical Forward Problem,” *COMSOL Multiphysics Application Library*, Version 6.3.

[45] C. R. Paul, “Ferromagnetic Materials—Saturation and Frequency Response”, en Introduction to Electromagnetic Compatibility, 2da ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley Sons, 2006, pp. 340-345.

[46] A. Suarez et al., “Characterization of Different Cable Ferrite Materials to Reduce the Electromagnetic Noise in the 2–150 kHz Frequency Range”, Materials, vol. 11, no. 2, p. 174, Ene. 2018.

[47] Fair-Rite Products Corp., “Certificate of Compliance - 75 Round Cable Core (Part Number: 2675102002)”, Wallkill, NY, USA.

[48] Fair-Rite Products Corp., “Certificate of Compliance - 73 Shield Bead (Part Number: 2673200201)”, Wallkill, NY, USA.

[49] Fair-Rite Products Corp., “Certificate of Compliance - 43 Round Cable Core (Part Number: 2643814002)”, Wallkill, NY, USA.