

**DISEÑO DE UN LABORATORIO PARA PRÁCTICAS DE
MEDICIÓN DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA EN LA
UIS**

Erika Yuliana Ortiz Joya

Andrés Felipe Pedrozo Cruz

Daniel Santiago Ortiz Ortiz

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista

Director:

Ph.D. Gabriel Ordóñez Plata

Codirector:

Ph.D. Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a Dios, por ser nuestra guía y darnos la fortaleza para llegar hasta aquí. A nuestras familias, por su amor incondicional y sus sacrificios; sin su apoyo este logro no sería posible. A nuestros amigos, por acompañarnos en el proceso y darnos aliento cuando más lo necesitábamos. Finalmente, a nosotros mismos, por el esfuerzo, la resiliencia y la dedicación conjunta que nos permitieron superar cada obstáculo y alcanzar la meta.

Erika, Andrés y Daniel

Agradecimientos

Erika Ortiz

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, fuente infinita de fortaleza, por brindarme la vida, la salud y la claridad necesaria para culminar este proceso.

A mis padres, Janeth Joya y Juan Ortiz, por su amor y apoyo incondicional, y por el esfuerzo diario que realizaron para hacer este logro posible; su paciencia y comprensión han sido mi mayor respaldo. A mi pareja, Joan Torres, por su amor infinito, por enseñarme que siempre hay otra manera de ver las cosas y por creer en mí y ser mi compañía constante en este largo camino.

A mis hermanos, Laura Ortiz y Jesús Ortiz, por sus palabras de aliento cuando más las necesité. A mis compañeros y amigos, Daniel Ortiz y Andrés Pedrozo, por soportar conmigo los constantes trasnochos y por no rendirse en las jornadas más pesadas de este proceso.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a mis directores por la guía, los conocimientos y el apoyo recibido para llevar a cabo este trabajo.

Andrés Pedrozo

Primeramente, agradezco a Dios por su infinita gracia, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional. Sin su guía y propósito, este logro no habría sido posible.

A mi madre, Maira Cruz, mi mayor ejemplo de amor, entrega y perseverancia. Gracias por cada sacrificio silencioso, por cada esfuerzo que hiciste para que yo pudiera avanzar, por tu paciencia infinita y por sostenerme cuando las fuerzas parecían acabarse. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por tus consejos, tus oraciones y tu apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Este logro también te pertenece, porque es el reflejo de tu dedicación, tu fe y tu amor constante.

A mi padre, José Pedrozo, por su respaldo, sus palabras de ánimo y por estar presente en los momentos en que he necesitado su fuerza. Gracias por tu apoyo, por motivarme a seguir adelante y por ser parte esencial en mi formación como persona y como profesional.

A mi familia, por ser mi base y mi refugio. Gracias por el acompañamiento permanente, por cada palabra de aliento, por la confianza depositada en mí y por celebrar conmigo cada pequeño avance. Dios me ha bendecido con una familia incondicional y amorosa, que siempre me ha respaldado en cada decisión, brindándome la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

Asimismo, agradezco a mi familia en la fe, mis hermanos, por sus oraciones, su apoyo espiritual y su compañía constante, que fortalecieron mi carácter y renovaron mi ánimo durante este proceso.

A mis compañeros de proyecto y amigos, Erika Ortiz y Daniel Ortiz, por su compromiso, trabajo en equipo y dedicación en el desarrollo de este proyecto. Gracias por la paciencia, la colaboración y la amistad que hicieron de esta experiencia un proceso enriquecedor.

A mi primo y compañero de carrera, Cristian Pedrozo, gracias por brindarme tu apoyo desde el inicio de mi vida universitaria y por ser para mí un ejemplo de perseverancia y trabajo duro.

Finalmente, a mis demás amigos de la universidad, quienes hicieron de esta etapa académica un camino más llevadero, lleno de aprendizajes, crecimiento y gratos recuerdos.

Daniel Ortiz

Quiero expresar mi gratitud, en primer lugar, a la vida, por brindarme la oportunidad de alcanzar una meta tan significativa en mi formación personal y profesional. Este proceso representó un camino de exigencia y crecimiento, en el que cada desafío académico y cada momento de presión contribuyeron a fortalecer mi carácter, mi disciplina y mi convicción de que siempre es posible aportar cosas buenas al mundo.

A mis padres, Luisa Ortiz y Manuel Ortiz, les expreso mi más profundo agradecimiento. A ellos les debo no solo su apoyo constante, sino también la base humana y personal que me permitió avanzar hasta este punto. Su acompañamiento, sus consejos, su respaldo emocional y económico, y su presencia permanente a lo largo de este proceso fueron fundamentales. De manera especial, reconozco en mi padre una fuente de inspiración, al igual que en mi abuelo Carlos Ortiz, pues su ejemplo como ingenieros electricistas representó para mí un referente de vocación, esfuerzo y compromiso profesional.

A mi hermano, David Ortiz; a mis abuelos, Gladys Flórez, Guillermo Ortiz, Carlos Ortiz y Lucila Rangel; a mi bisabuela, Graciela Nariño; y a mis tíos, Manuel S. Ortiz, Sergio Ortiz y Miguel Ortiz, gracias por su apoyo, su cercanía y por estar presentes de distintas maneras durante este camino. En cada consejo, en cada gesto de acompañamiento y en cada muestra de confianza encontré un respaldo valioso para continuar.

También quiero agradecer a mis compañeros de trabajo de grado, Erika Ortiz y Andrés Pedrozo, por compartir este proceso académico conmigo y por su compromiso durante el desarrollo de este proyecto. De igual manera, agradezco a Juliana Pérez y Marcela Peña, por su amistad incondicional, así como a Iván Vázquez, Daniel Morales, Sebastián Ordóñez y Gabriel Romero, por su amistad de toda la vida, su ánimo y su presencia constante en los momentos que más lo requerí.

Extiendo igualmente mi agradecimiento a mi director, Gabriel Ordóñez Plata, y a mi codirector, Oscar Arnulfo Quiroga, por su acompañamiento, su tiempo y su orientación durante el desarrollo de este trabajo de grado. Su disposición y apoyo fueron esenciales en la consolidación de este proceso académico. Asimismo, agradezco a mi universidad y a la Escuela E3T, por brindarme el espacio de formación académica y humana que hizo posible este logro.

Finalmente, reconozco que este resultado no es únicamente mío, sino también de todas las personas que hicieron parte del camino. Este trabajo representa no solo la culminación de una etapa, sino también la certeza de que, con esfuerzo, guía y propósito, es posible transformar las dificultades en aportes valiosos para los demás. A todos, mi más sincero agradecimiento.

Tabla de Contenido

Lista de Apéndices	10
Introducción	13
1. Planteamiento del problema	14
2. Alcance y limitaciones	15
3. Objetivos	16
3.1 Objetivo general	17
3.2 Objetivos específicos	17
4. Justificación e impacto	17
5. Marco normativo	19
6. Marco teórico	22
6.1 Introducción a la ingeniería de sistemas de puesta a tierra	22
6.2 Fundamentos de metrología geoelectrica e instrumentación	23
6.3 Caracterización geoelectrica y modelado matemático del terreno	26
6.4 Criterios de seguridad humana	27
6.5 Dimensionamiento térmico y mecánico de conductores	28
6.6 Diseño de mallas: ecuaciones de Sverak y seguridad	29
6.7 Materiales de mejora de suelos (GEM)	30
6.8 Simulación computacional y métodos numéricos (FEM)	30
6.9 Técnicas avanzadas de medición en campo	30
7. Estudios previos	31
7.1 Diagnóstico y análisis de necesidades	31
7.2 Identificación y clasificación de la información	33

DISEÑO DE UN LABORATORIO DE PUESTA A TIERRA	7
7.3 Evaluación de las condiciones del terreno	34
8. Ingeniería y diseño del laboratorio	35
8.1 Modelado matemático del suelo (zonas 1 y 3)	36
8.2 Criterios de diseño y parámetros constructivos	37
8.3 Diseño de topologías para la zona 1 (mallas regulares)	37
8.4 Diseño de topologías para la zona 3 (geometrías irregulares)	38
8.5 Validación por simulación	39
8.6 Análisis de costos y presupuesto de inversión	39
9. Desarrollo del manual de prácticas: diseño curricular, metodológico y justificación técnica	42
9.1 Introducción y filosofía pedagógica del manual	42
9.2 Bloque I: caracterización y modelado del entorno físico (guías 1, 2 y 3) . . .	44
9.3 Bloque II: criterios de seguridad y dimensionamiento (guías 4 y 5)	46
9.4 Bloque III: diseño, simulación y optimización (guías 6, 7 y 8)	47
9.5 Bloque IV: validación experimental y avanzada (guías 9, 10, 11 y 12)	47
9.6 Bloque V: guías complementarias (guías 0 y 13)	49
9.7 Resumen estructural y cumplimiento normativo	49
10. Conclusiones	51
11. Recomendaciones y posibles futuros desarrollos	52
Referencias	55

Lista de Figuras

1	Resumen presupuestal para el laboratorio de mallas de puesta a tierra	41
2	Estructura de las guías de laboratorio.	43

Lista de Tablas

1	Parámetros de modelado de suelo para diseño (resumen del apéndice C) . . .	36
2	Estructura curricular y alineación normativa del manual	50

Lista de Apéndices

Apéndice A: Soporte conceptual del marco teórico	56
Apéndice B: Caracterización geoelectrica de terrenos y validación	56
Apéndice C: Modelado de suelos con software ETAP y método de Sunde	56
Apéndice D: Configuraciones geométricas y reportes de simulación ETAP	56
Apéndice E: Guías prácticas y material didáctico del laboratorio	56
Apéndice F: Análisis financiero y desglose presupuestal del sistema	56
Apéndice G: Plano Autocad con ubicación espacial de las mallas	57
Apéndice H: Corriente de cortocircuito para diseño de mallas	57
Apéndice I: Plantilla presupuestal para gestión de proyectos	57
Apéndice J: Plano Autocad de infraestructura y espacios de la UIS	57

Resumen

Título: Diseño de un Laboratorio para Prácticas de Medición de Mallas de Puesta a Tierra en la UIS. *

Autores: Erika Yuliana Ortiz Joya, Andrés Felipe Pedrozo Cruz, Daniel Santiago Ortiz Ortiz. **

Palabras Clave: Sistemas de puesta a tierra (SPT), Laboratorio de docencia, Resistividad del suelo, Seguridad eléctrica, RETIE, IEEE Std 80, IEEE Std 81.

Descripción: Este trabajo de grado aborda la carencia de formación práctica en Sistemas de Puesta a Tierra (SPT) dentro del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Para solucionar esta deficiencia, se presenta el diseño integral de un laboratorio especializado, proyectado en las inmediaciones del Laboratorio de Alta Tensión y de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), complementado con un manual detallado de guías prácticas. La metodología empleada inicia con un diagnóstico curricular y la consolidación de un marco normativo riguroso basado en el RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024), la NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020) y los estándares internacionales IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013) e IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012). Posteriormente, la fase de diseño define la adecuación del espacio físico mediante topologías de mallas abiertas, la selección técnica de instrumentos de medición y la estimación presupuestal para su implementación. El resultado es una propuesta de ingeniería conceptual factible que dota a la universidad de un recurso pedagógico estructurado, permitiendo a los futuros ingenieros adquirir competencias prácticas esenciales para el diseño, medición y evaluación de sistemas de puesta a tierra seguros y eficientes.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Gabriel Ordóñez Plata. Codirector Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Abstract

Title: Design of a Laboratory for Grounding Grid Measurement Practices at UIS. *

Authors: Erika Yuliana Ortiz Joya, Andrés Felipe Pedrozo Cruz, Daniel Santiago Ortiz Ortiz. **

Keywords: Grounding Systems (SPT), Teaching Laboratory, Soil Resistivity, Electrical Safety, RETIE, IEEE Std 80, IEEE Std 81.

Description: This undergraduate project addresses the lack of practical training in Grounding Systems (SPT) within the Electrical Engineering program at the Industrial University of Santander (UIS). To solve this deficiency, the comprehensive design of a specialized laboratory is presented, projected in the vicinity of the High Voltage Laboratory and the School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering (E3T), complemented by a detailed manual of practical guides. The methodology employed begins with a curricular diagnosis and the consolidation of a rigorous regulatory framework based on RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024) , NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020) , and international standards IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013) and IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012) . Subsequently, the design phase defines the physical space adaptation using open-mesh topologies, the technical selection of measurement instruments, and the budget estimation for its implementation. The result is a feasible conceptual engineering proposal that provides the university with a structured pedagogical resource, allowing future engineers to acquire essential practical skills for the design, measurement, and evaluation of safe and efficient grounding systems.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Gabriel Ordóñez Plata. Codirector Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Introducción

En el ámbito de la Ingeniería Eléctrica, el diseño adecuado de los sistemas de puesta a tierra (SPT) constituye un elemento fundamental para garantizar la seguridad de las instalaciones, reducir los riesgos asociados a fallas a tierra y asegurar el correcto funcionamiento de los dispositivos de protección. En este sentido, normativas nacionales e internacionales como el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas —RETIE— (Ministerio de Minas y Energía, 2024), la NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020), la norma IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013) y la norma IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012), establecen criterios técnicos y metodológicos que deben ser comprendidos antes de ser aplicados rigurosamente.

A pesar de su relevancia, el diseño de los SPT continúa representando un desafío en los procesos de formación profesional, particularmente en lo referente a la apropiación práctica de los conceptos teóricos. En este contexto, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) carece actualmente de un laboratorio especializado que permita a los estudiantes integrar de manera experimental estos fundamentos normativos y técnicos, lo cual evidencia una oportunidad de fortalecimiento académico en un área crítica para el ejercicio profesional.

Como respuesta a esta necesidad, este trabajo de grado desarrolla el diseño integral de un laboratorio de sistemas de puesta a tierra para la UIS, proyectado para ubicarse en las inmediaciones del nuevo Laboratorio de Alta Tensión de la E3T. El alcance del proyecto se centra en la ingeniería conceptual, técnica y normativa, sin contemplar la construcción física, entregando como producto central un manual compuesto por 14 guías prácticas distribuidas en un total de 18 bloques de clase y los diseños de las mallas de tierra necesarias para la implementación de las guías.

La metodología empleada parte de un diagnóstico curricular y la consolidación de un marco normativo basado en los estándares previamente citados. Posteriormente, la fase de diseño detalla la adecuación del espacio físico, la selección de equipos y la estimación presu-

puestal para su implementación. La propuesta pedagógica se estructura con una secuencia progresiva que abarca desde la medición de resistividad del terreno y resistencia de mallas, hasta la simulación de diferentes configuraciones de SPT y el mantenimiento, articulándose con asignaturas fundamentales como Instalaciones Eléctricas, Subestaciones, Líneas de Transmisión y Sistemas de Distribución.

En definitiva, este trabajo proporciona una herramienta académica y un recurso didáctico factible que busca fortalecer las competencias de los futuros ingenieros. Se espera que el diseño y las guías propuestas sienten las bases para que los estudiantes adquieran las habilidades prácticas necesarias para diseñar y evaluar sistemas de puesta a tierra seguros y eficientes, alineados con las exigencias del sector eléctrico nacional y la normativa vigente.

1. Planteamiento del problema

La ingeniería de los sistemas de puesta a tierra (SPT) es una disciplina fundamental que sustenta la seguridad y la confiabilidad de toda infraestructura eléctrica moderna. Su correcta aplicación es un requisito no negociable para la protección de la vida humana y la prevención de daños en equipos, tal como establecen el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Ministerio de Minas y Energía, 2024) y estándares internacionales como la IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013). En consecuencia, se espera que un ingeniero electricista adquiera competencias prácticas sólidas para diseñar, medir, diagnosticar y mantener estos sistemas en campo bajo criterios de seguridad y eficiencia.

Sin embargo, en el actual plan de estudios del programa de Ingeniería Eléctrica de la UIS se evidencia una oportunidad de mejora notable entre la formación teórica impartida y la experiencia práctica requerida por la industria. El aprendizaje de los SPT suele limitarse al análisis de modelos matemáticos y al uso de software de simulación; si bien estas son herramientas valiosas, resultan insuficientes para replicar las complejidades estocásticas del mundo real. Fenómenos como la estratificación no homogénea del suelo, la resistencia de contacto variable, las interferencias electromagnéticas o los desafíos instrumentales propios de una medición en sitio (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012), difícilmente

pueden ser internalizados por el estudiante únicamente a través de un monitor.

Esta limitación pedagógica genera una brecha técnica: los estudiantes comprenden el “por qué” teórico, pero carecen del “cómo” procedimental. La ausencia de confrontación experimental priva al futuro ingeniero de desarrollar la sensibilidad necesaria para identificar errores de medición, interpretar lecturas atípicas o validar la seguridad de una instalación existente. Sin un entorno controlado donde equivocarse y corregir, el tránsito hacia la práctica profesional se vuelve más riesgoso en una disciplina donde los errores pueden tener consecuencias fatales.

El problema central radica, por tanto, en la carencia de un laboratorio especializado y de un manual de prácticas estructurado que permita a los estudiantes materializar el conocimiento teórico. Esta ausencia impide desarrollar destrezas críticas como la medición precisa de resistividad del terreno, la verificación experimental de configuraciones de electrodos y la comprensión tangible de las tensiones de paso y de contacto. En consecuencia, el problema de investigación que servirá de guía para este trabajo se formula así: *¿Cuál diseño de laboratorio y cuál conjunto de guías prácticas son necesarios para dotar a la E3T de la UIS de una herramienta pedagógica eficaz que cierre la brecha de competencias existente en la formación sobre SPT?*

2. Alcance y limitaciones

El alcance de este trabajo de grado está enfocado en la entrega de una solución de ingeniería conceptual completa y un recurso pedagógico funcional, listos para una futura fase de implementación. Los entregables que delimitan el proyecto son los siguientes:

1. **Ingeniería conceptual del laboratorio:** Se desarrollará el diseño detallado del laboratorio de SPT, lo que incluye la distribución del espacio físico, la especificación técnica de los equipos de medición y prueba requeridos, el diseño de los módulos de práctica y mallas de referencia, y un presupuesto documentado que estime los costos de materiales y equipos clave. Este diseño se fundamentará en los requerimientos del marco normativo nacional e internacional aplicable, dentro del cual se destaca el RE-

TIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024), la NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020), la IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013), la IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012) y la IEC 60364-64-5-54 (International Electrotechnical Commission, 2011).

2. **Manual de prácticas de laboratorio:** Se elaborará un manual completo que contendrá catorce guías prácticas originales y estructuradas. Cada guía incluirá sus objetivos de aprendizaje, el fundamento teórico indispensable, los equipos necesarios, el procedimiento experimental paso a paso y los criterios de evaluación, asegurando que el conjunto constituya un programa de formación coherente y progresivo (Arango Noguera & San Juan Vanegas, 2013; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

Por otro lado, es fundamental establecer las limitaciones del proyecto para gestionar las expectativas. Este trabajo se concentra exclusivamente en las etapas de diagnóstico, fundamentación y diseño. En consecuencia, el alcance no contempla las siguientes actividades:

- La adquisición de equipos o materiales.
- La construcción, el montaje físico o la puesta en marcha del laboratorio.
- La ejecución de pruebas experimentales reales, ya que el laboratorio es, en esta fase, un diseño; por tanto, solo se realizarán las mediciones y pruebas necesarias para este fin.

3. Objetivos

Con el fin de atender los requerimientos técnicos y pedagógicos identificados para la enseñanza de sistemas de puesta a tierra en la E3T, se proponen los siguientes objetivos que guiarán el diseño del laboratorio y el desarrollo de su material didáctico

3.1. Objetivo general

Diseñar un laboratorio de sistemas de puesta a tierra para la Universidad Industrial de Santander, acompañado de guías prácticas para la medición de resistividades del terreno y resistencias de mallas de tierra.

3.2. Objetivos específicos

Diseñar topologías típicas de mallas de puesta a tierra teniendo en cuenta criterios de electrodos verticales y horizontales, así como el uso de mejoradores de tierras.

Formular los presupuestos de inversión de las diferentes topologías diseñadas y los instrumentos de laboratorio requeridos.

Elaborar las guías de laboratorio aplicadas a la medición de resistividades de terreno y resistencia de mallas de puesta a tierra para las diversas configuraciones y topologías.

4. Justificación e impacto

La ejecución de este proyecto se justifica por la necesidad imperiosa de fortalecer la formación práctica en el diseño, implementación y evaluación de sistemas de puesta a tierra (SPT) durante el pregrado de Ingeniería Eléctrica de la UIS. Dado que estos sistemas constituyen un elemento crítico para la seguridad de las instalaciones, la protección de la vida humana y la integridad de los equipos, esta enseñanza no puede limitarse a la teoría.

A pesar de su relevancia técnica y normativa, la formación en SPT ha carecido tradicionalmente de un componente experimental robusto que permita al estudiante confrontar los modelos matemáticos con la realidad física. Para subsanar esta brecha, este proyecto entrega el diseño de un laboratorio especializado acompañado de un manual pedagógico integral, compuesto por catorce guías prácticas distribuidas en dieciocho bloques de clase. Esta estructura garantiza la coherencia entre los contenidos curriculares, las exigencias del RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024) y las competencias profesionales que demanda el ejercicio moderno de la ingeniería.

La relevancia de este trabajo se evidencia a través de su impacto directo y multifacé-

tico en los siguientes ejes:

- **Impacto académico y pedagógico:** La implementación de un manual con catorce guías prácticas fomenta un modelo de aprendizaje activo y experimental que tiende un puente necesario entre la teoría y la práctica. Siendo la energía eléctrica un recurso vital y riesgoso, la seguridad de las instalaciones depende en gran medida de la correcta ejecución de los SPT, tal como lo establece el marco normativo. De esta manera, se transforma el rol del estudiante: deja de ser un receptor pasivo de fórmulas para convertirse en un agente activo que mide, analiza, simula y valida la seguridad eléctrica mediante la experimentación directa a lo largo de los dieciocho bloques de clase propuestos.
- **Impacto en el desarrollo de competencias profesionales:** El laboratorio dotará a los futuros ingenieros de la UIS con destrezas técnicas de alta demanda en el mercado laboral. La experiencia práctica con instrumentación especializada —como telurómetros de alta gama— y la aplicación rigurosa de metodologías de medición estandarizadas por la IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012), incrementan significativamente la empleabilidad de los egresados. El proyecto asegura que los nuevos profesionales no solo conozcan el marco de referencia, sino que tengan la pericia técnica para ejecutar diagnósticos en campo y tomar decisiones de diseño seguras y eficientes.
- **Impacto institucional:** Para la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), este proyecto fortalece sustancialmente la infraestructura docente e investigativa. La disponibilidad de un espacio dedicado y una metodología estandarizada eleva la calidad del programa académico y sirve como plataforma para la generación de nuevo conocimiento. Asimismo, esta capacidad instalada abre oportunidades para la educación continua y la prestación de servicios especializados a la industria local —como mediciones certificadas y auditorías de SPT—, dinamizando la

relación entre la universidad y el sector productivo.

- **Impacto social y de seguridad:** El beneficio más trascendente radica en la protección de la comunidad. Al formar profesionales con una base práctica sólida y verificable en SPT, la universidad contribuye directamente a mejorar la seguridad de las instalaciones eléctricas a nivel regional y nacional. Esto se alinea con la finalidad primordial de preservación de la vida establecida en el RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024) y con el enfoque de seguridad humana presente en la literatura técnica, donde se prioriza limitar los gradientes de potencial para no poner en peligro a las personas ni a los equipos bajo condiciones de falla.

5. Marco normativo

El diseño, la construcción y el mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra (SPT) no responden a criterios arbitrarios, sino que están rigurosamente regulados por un conjunto de normativas y estándares técnicos. Estos documentos establecen los requisitos mínimos de seguridad, los procedimientos de cálculo y las metodologías de medición para garantizar la protección de las personas y la correcta operación de las instalaciones eléctricas, como lo son el RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024), la NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020), la IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013) y la IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012). Para este proyecto, el marco normativo se estructura en dos niveles complementarios: el nacional, de obligatorio cumplimiento en Colombia, y el internacional, que establece las mejores prácticas y el estándar a nivel global.

5.0.1. *Ámbito nacional: RETIE y NTC 2050*

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE): Este reglamento constituye el marco legal principal para las instalaciones eléctricas en Colombia, siendo de cumplimiento obligatorio en todo el territorio nacional (Ministerio de Minas y Energía, 2024). Su objetivo central es fijar los parámetros necesarios para garantizar la seguridad de las

personas y prevenir riesgos de origen eléctrico.

De manera específica, el **Título 12 del Libro 3** del reglamento está dedicado exclusivamente a los sistemas de puesta a tierra (SPT). Este apartado establece los requisitos fundamentales que rigen el diseño y construcción, destacando:

- **Funciones del SPT:** Garantizar la seguridad de los seres vivos, permitir la correcta operación de las protecciones y controlar tensiones electrostáticas y transitorias (Ministerio de Minas y Energía, 2024).
- **Requisitos de diseño:** Definición de materiales certificados para electrodos, dimensiones mínimas y criterios para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra objetivo.
- **Mantenimiento y conformidad:** Exigencia de mediciones periódicas y criterios de inspección para asegurar la vigencia de los parámetros de seguridad.

Por consiguiente, la estricta observancia de los artículos contenidos en dicho Título es el requisito primario sobre el cual se estructuran las prácticas de laboratorio propuestas.

Norma Técnica Colombiana (NTC 2050): Esta norma establece los requisitos mínimos de seguridad para las instalaciones eléctricas, adaptando los lineamientos del Código Eléctrico Nacional (NEC) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020). Junto con el RETIE, conforma el marco regulatorio que define los umbrales de aceptación, refiriendo a normas técnicas específicas y prácticas de ingeniería para el detalle de la ejecución.

En particular, la **Sección 250** estipula los criterios mínimos para la *puesta a tierra y conexión equipotencial*, abarcando:

- Los tipos de electrodos permitidos y sus métodos de instalación.
- Las reglas para el dimensionamiento de conductores de puesta a tierra y puentes de unión equipotencial.
- Los métodos de conexión y puntos obligatorios en sistemas de baja tensión.

Dado que esta normativa establece los requerimientos de diseño pero no detalla los procedimientos pedagógicos paso a paso, las guías prácticas se han diseñado como herramientas metodológicas para instrumentar el cumplimiento de dichos estándares (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020).

5.0.2. *Ámbito internacional: IEEE Std 80 y IEEE Std 81*

IEEE Std 80: Esta guía metodológica es la referencia global para el diseño de seguridad en sistemas de puesta a tierra de subestaciones de corriente alterna. Su enfoque principal es la seguridad humana, proporcionando una metodología integral que abarca:

- El establecimiento de criterios fisiológicos para determinar los umbrales de corriente tolerable por el cuerpo humano (límites de fibrilación ventricular).
- El dimensionamiento del conductor basado en su capacidad térmica para soportar la magnitud y duración de la corriente de falla.
- El desarrollo de ecuaciones analíticas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra (R_g), la elevación de potencial de tierra (GPR) y los gradientes de tensión en la superficie (tensiones de paso, contacto y malla), considerando factores geométricos y la resistividad del suelo (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

Estos conceptos constituyen el marco teórico para las prácticas de laboratorio enfocadas en el diseño, la simulación y la verificación de criterios de seguridad.

IEEE Std 81: Esta guía metodológica se centra en la medición y validación en campo, proporcionando directrices técnicas para la ejecución de pruebas y el análisis de datos. Describe procedimientos estandarizados para:

- La medición de la resistividad aparente del terreno mediante el método de Wenner y la interpretación de estos registros para la estimación de modelos de suelo (uniforme o de múltiples capas) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).

- La medición de la resistencia o impedancia de puesta a tierra de un sistema construido, utilizando métodos como la caída de potencial (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).
- La evaluación de la integridad y continuidad de los conductores del sistema de puesta a tierra.
- La medición de potenciales en superficie para la verificación experimental de los límites seguros de tensión de paso y contacto
(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).
- La selección de instrumentación adecuada y la aplicación de normas de seguridad para el personal durante las mediciones de campo.

Esta norma será la base metodológica fundamental para el desarrollo de las guías prácticas de mediciones del laboratorio.

6. Marco teórico

Este capítulo expone los fundamentos teóricos y normativos que sirven de base para el diseño de las mallas de puesta a tierra y la estructuración de las prácticas experimentales propuestas.

6.1. Introducción a la ingeniería de sistemas de puesta a tierra

El diseño de un sistema de puesta a tierra (SPT) constituye uno de los pilares fundamentales en la ingeniería de sistemas de potencia, trascendiendo la simple instalación de electrodos para convertirse en una disciplina que abarca la geofísica, la electrodinámica y la seguridad biológica. El presente marco teórico, desarrollado como sustento para el diseño de prácticas de laboratorio, compila y profundiza en los principios físicos, modelos matemáticos y normativas vigentes que rigen el comportamiento de las corrientes de falla en la corteza terrestre (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012, 2013; Ministerio de Minas y Energía, 2024).

El SPT tiene como funciones primordiales garantizar la seguridad de las personas limitando las tensiones de paso y contacto, asegurar la operación correcta de las protecciones al proporcionar un camino de baja impedancia para las corrientes de falla, y disipar cargas electrostáticas y descargas atmosféricas (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020; Ministerio de Minas y Energía, 2024). La complejidad de este diseño radica en la variabilidad estocástica del medio conductor —el suelo— y en la respuesta no lineal del cuerpo humano ante el choque eléctrico ¹. Con el fin de mantener la fluidez de la lectura, se han incluido únicamente las definiciones importantes para el desarrollo del trabajo de grado. Para consultar la terminología técnica complementaria y definiciones adicionales, se sugiere remitirse al apéndice A.

6.2. Fundamentos de metrología geohélica e instrumentación

La evaluación rigurosa de un SPT comienza con la caracterización precisa del medio en el que se insertará. Este capítulo establece las bases fenomenológicas y operativas para la medición de la resistividad del suelo, integrando los principios físicos del telurómetro con las metodologías estandarizadas.

6.2.1. *El Telurómetro: principios físicos de operación y arquitectura*

El telurómetro, técnicamente denominado medidor de resistencia de tierra (*earth tester*), es el instrumento angular en la ingeniería de puesta a tierra. Su función primordial no es medir una resistencia óhmica convencional, sino evaluar la impedancia de dispersión que presenta el volumen de suelo circundante ante la inyección de corrientes de prueba (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).

El principio operativo fundamental del telurómetro se basa en la inyección de una corriente alterna (I) de frecuencia controlada a través del suelo y la medición simultánea de la diferencia de potencial resultante (V). Es importante destacar que la frecuencia de prueba suele ser distinta a la frecuencia industrial (50/60 Hz) y sus armónicos para evitar

¹ Choque eléctrico: Es el efecto fisiológico resultante del paso de una corriente eléctrica a través del cuerpo de una persona o animal, causado por el contacto directo o indirecto con partes energizadas que se encuentran a diferente potencial.

la interferencia de corrientes parásitas (*stray currents*) presentes en el terreno, las cuales podrían falsear las lecturas (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Torres, 2011).

Desde una perspectiva electrodinámica, el telurómetro resuelve la ecuación de impedancia de transferencia:

$$Z_g = \frac{V(x, y, z)}{I_{inj}} \quad (1)$$

En estudios de resistividad, el instrumento conmuta su topología interna para operar con arreglos tetra-electródicos (cuatro terminales), separando el circuito de inyección de corriente (electrodos externos) del circuito de medición de potencial (electrodos internos). Esta separación es fundamental para eliminar el error introducido por la resistencia de contacto de las picas de prueba y la resistencia de los cables de conexión (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

6.2.2. Fenomenología de la resistividad del suelo (ρ)

La resistividad eléctrica del suelo (ρ), expresada en $\Omega \cdot m$, es una propiedad intrínseca del material geológico que cuantifica su oposición al flujo de portadores de carga. A diferencia de un conductor metálico donde la conducción es electrónica, en el suelo la conducción es predominantemente electrolítica, dependiendo del movimiento de iones disueltos en el agua. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

La estimación precisa de ρ es crítica por dos razones de orden superior en el diseño de ingeniería:

1. **Determinación de la resistencia óhmica (R_g):** Existe una correlación lineal directa entre la resistividad del medio y la resistencia final de la malla. Un error en la caracterización de ρ se propaga linealmente al cálculo de R_g , afectando directamente la elevación de potencial de tierra (GPR) (Al-Ammar et al., 2017; Institute of Electrical

and Electronics Engineers, 2013).

2. **Distribución de gradientes de potencial:** La estructura resistiva del suelo modula la forma en que el campo eléctrico se disipa en la superficie. Variaciones verticales en ρ afectan la magnitud de las tensiones de paso y contacto (Jiménez Lozano, 2013).

Factores como la humedad, la temperatura y la compactación introducen una variabilidad temporal y espacial significativa. Por ello, ρ debe tratarse como una variable estocástica dependiente de las condiciones ambientales estacionales (Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

6.2.3. Metodología de Wenner para la medición de resistividad aparente

El método de Wenner, estandarizado por la IEEE Std 81, se ha consolidado como el estándar para la prospección geoelectrica debido a su robustez frente a resistencias de contacto elevadas en las picas auxiliares (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Ministerio de Minas y Energía, 2024).

La configuración del sistema de medición emplea cuatro electrodos alineados y equiespaciados una distancia a . La resistividad aparente ρ_a se deriva analíticamente asumiendo la condición $b \ll a$ (profundidad de penetración de los electrodos despreciable frente a la separación):

$$\rho_a \approx 2\pi a R \quad (2)$$

Donde $R = V/I$ es la lectura de resistencia proporcionada por el instrumento. Una interpretación física crucial es que la separación a determina la profundidad de exploración efectiva; empíricamente, la resistividad medida refleja el promedio hasta una profundidad aproximada desde $0,75a$ hasta a (Arango Noguera & San Juan Vanegas, 2013; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).

6.2.4. Medición de resistencia de puesta a tierra: método de caída de potencial

La cuantificación de la resistencia de puesta a tierra R_g se realiza típicamente mediante el método de caída de potencial (*Fall-of-Potential*), descrito en la IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).

El método busca ubicar el electrodo de corriente auxiliar C lo suficientemente lejos del electrodo bajo prueba E para alcanzar la “tierra remota”. Bajo la hipótesis de suelo homogéneo, la teoría electromagnética demuestra que el potencial medido a una distancia $x_{medicion}$ del 61,8% de la separación total $E - C$ corresponde al valor verdadero de la resistencia de puesta a tierra para (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Torres, 2011).

$$x_{medicion} = 0,618 \cdot D_{EC} \quad (3)$$

6.3. Caracterización geoelectrica y modelado matemático del terreno

El diseño de un SPT requiere la abstracción de los datos de campo en un modelo matemático manejable, en donde los modelos y métodos detallados a continuación son los más relevantes.

6.3.1. El modelo de suelo uniforme y el índice de uniformidad

Aunque geológicamente el suelo es heterogéneo, la norma IEEE Std 80 permite el uso del Modelo de Suelo Uniforme si la variabilidad es baja. Esto se evalúa mediante el Índice de Uniformidad (μ):

$$\mu = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{\rho_{avg}} \times 100\% \quad (4)$$

Si $\mu \leq 30\%$, el terreno puede considerarse uniformemente resistivo para efectos de diseño (Cano M et al., 2004; Empresas Públicas de Medellín, 2019).

6.3.2. Modelado de dos capas y el método de imágenes

Cuando $\mu > 30\%$, se debe adoptar un Modelo de Dos Capas, definido por ρ_1 (capa superior), ρ_2 (capa inferior) y h (espesor). El comportamiento electromagnético se resuelve mediante el Principio de Imágenes Electromagnéticas y el Coeficiente de Reflexión K :

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

Un K negativo indica una capa inferior más conductora, favorable para varillas profundas, mientras que un K positivo indica un sustrato resistivo que concentra la corriente en la superficie (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Jiménez Lozano, 2013).

6.3.3. Método gráfico de Sunde

Para resolver el problema inverso (hallar el modelo a partir de mediciones) sin software, se utiliza el método gráfico de Sunde. Este se basa en la técnica de coincidencia de curvas (*curve matching*) sobre nomogramas logarítmicos para determinar el espesor h (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

6.4. Criterios de seguridad humana

El diseño debe garantizar que las corrientes de choque no excedan los umbrales de fibrilación ventricular. Para esto se mencionan los siguientes conceptos:

6.4.1. Fenomenología de la fibrilación y modelo de Dalziel

Basándose en los estudios de Charles Dalziel, la norma IEEE Std 80 establece que la corriente límite I_B soportable por el cuerpo humano (99,5 % de probabilidad de no fibrilación) para tiempos cortos es:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

Donde t_s es la duración del choque y k depende de la masa corporal ($k_{50} = 0,116$ para 50 kg, $k_{70} = 0,157$ para 70 kg) (Dalziel, 1961; Institute of Electrical and Electronics

Engineers, 2013; Ministerio de Minas y Energía, 2024).

6.4.2. Tensiones de paso y contacto tolerables

Para el diseño, estos límites de corriente se traducen en límites de tensión considerando el modelo del circuito accidental y el Factor de Reducción de la Capa Superficial (C_s):

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (7)$$

Las ecuaciones de tensión tolerable según IEEE Std 80 son (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Ministerio de Minas y Energía, 2024):

Tensión de contacto tolerable:

$$E_{toque} = (1000 + 1,5C_s\rho_s) \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

Tensión de paso tolerable:

$$E_{paso} = (1000 + 6,0C_s\rho_s) \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (9)$$

6.5. Dimensionamiento térmico y mecánico de conductores

El conductor de la malla debe soportar la energía térmica de la falla (I^2t) sin fundirse.

6.5.1. Corriente asimétrica y factor de decremento (D_f)

La corriente de diseño debe incluir la componente DC transitoria mediante el Factor de Decremento (D_f):

$$I_F = I_{sym} \cdot D_f \quad (10)$$

Ignorar este factor en sistemas con alta relación X/R puede llevar a un subdimensionamiento peligroso (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

6.5.2. Ecuación de Ondes-Sverak (modelo adiabático)

El RETIE adopta la fórmula simplificada de la IEEE Std 80 para calcular la sección transversal requerida A_{mm^2} :

$$A_{mm^2} = \frac{I_F \cdot K_f \cdot \sqrt{t_c}}{1,9737} \quad (11)$$

Donde K_f es la constante del material (ej. 7,06 para cobre duro) y t_c el tiempo de despeje (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Ministerio de Minas y Energía, 2024). Mecánicamente, el RETIE y normas de operadores exigen calibres mínimos (típicamente 2/0 AWG en mallas principales) para contrarrestar la corrosión y esfuerzos mecánicos (Empresas Públicas de Medellín, 2019; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020; Ministerio de Minas y Energía, 2024).

6.6. Diseño de mallas: ecuaciones de Sverak y seguridad

El diseño geométrico busca controlar el GPR y los gradientes de superficie y su modelo matemático involucra las siguientes definiciones:

6.6.1. Resistencia de dispersión (R_g)

La ecuación de Sverak estima la resistencia de una malla con varillas en suelo uniforme (R_g) relacionando la resistividad del suelo (ρ) con la geometría del diseño, donde L_T es la longitud total del conductor enterrado (incluyendo varillas), A representa el área superficial que ocupa la retícula y h indica la profundidad a la que se entierra el sistema (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010):

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (12)$$

6.6.2. Tensiones de malla (E_m) y paso (E_s)

Se calculan las tensiones esperadas máximas en la geometría diseñada:

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (13)$$

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (14)$$

El diseño es seguro solo si $E_m < E_{toque_tol}$ y $E_s < E_{paso_tol}$ (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Viloría Molinares & Escorcía De La Hoz, 2019).

6.7. Materiales de mejora de suelos (GEM)

En suelos de alta resistividad, se emplean materiales de mejora de tierra (GEM) para reducir la resistencia de contacto. Estos materiales, como los cementos conductivos a base de carbono, no dependen de la humedad constante (a diferencia de la bentonita) y aumentan el radio efectivo del electrodo, reduciendo R_g según lo validado en la cláusula 14.5 de la IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

6.8. Simulación computacional y métodos numéricos (FEM)

Para geometrías complejas, las ecuaciones analíticas de IEEE Std 80 son insuficientes. El método de elementos finitos (FEM), implementado en software como ETAP, resuelve la ecuación de Poisson en 3D:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = -I_v \quad (15)$$

Esto permite visualizar mapas de contorno de potencial y detectar puntos calientes en las esquinas de la malla que los métodos simplificados podrían omitir (Gomez & Pardo, 2011; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

6.9. Técnicas avanzadas de medición en campo

Cuando el método de caída de potencial no es viable por falta de espacio para alcanzar la tierra remota, la IEEE Std 81 prescribe técnicas alternativas:

- **Método de la pendiente:** Analiza la derivada de la curva de resistencia para extrapolar el valor asintótico (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).
- **Método de los tres puntos:** Calcula la resistencia mediante la medición de impedancias mutuas entre electrodos en configuración triangular, útil para validaciones cruzadas (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Torres, 2011).

7. Estudios previos

En este capítulo se presentan los antecedentes y las fases diagnósticas que sustentan el desarrollo del proyecto. Se detalla la revisión de la normativa técnica aplicable y la identificación de las necesidades académicas de la Escuela, estableciendo los criterios que definieron la selección de la alternativa de diseño. Asimismo, se expone la caracterización inicial y la evaluación física de los terrenos seleccionados, etapa indispensable para garantizar que el diseño del laboratorio sea técnicamente viable y se ajuste a las condiciones reales del entorno universitario

7.1. Diagnóstico y análisis de necesidades

Durante la etapa inicial de planeación, se realizó un análisis detallado de la problemática a abordar con el fin de plantear una solución coherente con las necesidades de la universidad. La Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones se ha caracterizado por ofrecer una formación de alta calidad, orientada a la preparación de profesionales competentes para enfrentar los desafíos técnicos y sociales del país y del entorno global. En este contexto, el laboratorio de sistemas de puesta a tierra se concibe como un espacio complementario, mediante el cual los estudiantes del programa de Ingeniería Eléctrica podrán consolidar y aplicar los conocimientos adquiridos en esta área a lo largo del plan de estudios.

Un aspecto fundamental en la fase diagnóstica correspondió a la ubicación y organización del laboratorio. Para ello, se consideraron tres alternativas:

1. Aprovechar el laboratorio de alta tensión existente, adaptando parte de sus instalacio-

- nes y equipos para la realización de prácticas relacionadas con sistemas de puesta a tierra, verificando previamente el estado y la calibración de los instrumentos de medida disponibles.
2. Diseñar un laboratorio de puesta a tierra móvil, tomando como referencia modelos empleados en procesos de formación técnica en zonas rurales. Estos laboratorios portátiles incorporan kits de medición, electrodos enterrables y sistemas de conexión temporales, lo que facilita la enseñanza de principios básicos sin requerir instalaciones permanentes.
 3. Implementar un laboratorio al aire libre, basado en topologías de mallas de puesta a tierra definidas a partir de referencias como guías de laboratorio, proyectos de investigación y artículos especializados. Esta alternativa contemplaría además un análisis presupuestal y el desarrollo de guías prácticas para respaldar su implementación futura.

Tras evaluar las opciones, se seleccionó la alternativa 3, al ser la que mejor se ajusta a los objetivos y al enfoque del proyecto. Su carácter abierto permite la recreación de escenarios cercanos a la realidad, fortaleciendo en los estudiantes competencias técnicas y profesionales para su futuro desempeño.

Como método de validación de la viabilidad de esta propuesta, se llevó a cabo la caracterización inicial del terreno profundizada en el apéndice B, mediante mediciones de resistividad eléctrica del suelo en el espacio al aire libre destinado al laboratorio, el cual corresponde a la zona boscosa detrás del laboratorio de alta tensión y sus inmediaciones conocidas como «El Bosque», . Dicho procedimiento permitió verificar la factibilidad del diseño en relación con las normativas aplicables. Aunque el alcance del trabajo de grado se limitó al diseño conceptual, esta etapa constituyó un paso fundamental para garantizar que, en un futuro, la implementación del laboratorio sea factible, segura y eficiente, sin haber requerido en esta etapa compromisos de construcción o adquisición de materiales. La descripción detallada de tal proceso se encuentra en la sección 7.3.

7.2. Identificación y clasificación de la información

El propósito de esta etapa consistió en alcanzar un nivel adecuado de comprensión y dominio en el diseño de sistemas de puesta a tierra, a partir del estudio de diversas fuentes documentales. Dicho proceso de revisión permitió consolidar los fundamentos teóricos y normativos necesarios para el desarrollo del trabajo de grado. La información recopilada se organizó en las siguientes categorías:

- **Documentos normativos:** Esta revisión constituyó uno de los elementos relevantes de esta etapa, dado que proporcionó el conjunto de regulaciones que sustentan el diseño seguro y eficiente de sistemas de puesta a tierra. Entre los principales documentos consultados se encuentran: la norma IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013), la norma IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012), el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Ministerio de Minas y Energía, 2024) y la Norma Técnica Colombiana NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020).
- **Documentos de empresas y/o operadores de red en Colombia:** El análisis de estas fuentes buscó identificar guías metodológicas elaboradas por entidades con experiencia en el diseño e implementación de sistemas de puesta a tierra en el contexto colombiano. Asimismo, se pretendió verificar la concordancia de tales recomendaciones con las normativas vigentes y examinar las diferencias entre enfoques, considerando factores como condiciones ambientales, funciones específicas, practicidad y contexto de aplicación.
- **Libros guía:** La consulta bibliográfica permitió profundizar en los principios fundamentales de los sistemas de puesta a tierra, su funcionamiento y su importancia en la industria eléctrica. Estos textos resultaron importantes para la construcción del marco teórico y la definición de conceptos y fenómenos técnicos relacionados con los SPT.
- **Artículos científicos:** Con la revisión de artículos científicos se obtuvieron referentes

de diseños de mallas de puesta a tierra que cumplieran con las normativas estudiadas. Algunos de estos trabajos propusieron configuraciones no convencionales que, de acuerdo con los estudios realizados, demostraron ser eficientes en escenarios específicos; otros artículos propusieron el uso de herramientas de software o metodologías alternativas al algoritmo de la norma IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013), contribuyendo a enriquecer la visión metodológica del diseño.

- **Trabajos de investigación de universidades:** Estas fuentes sirvieron como referentes para la elaboración de las guías de laboratorio, al proporcionar ejemplos de experiencias académicas similares. Su consulta permitió reconocer la dinámica de funcionamiento de un laboratorio universitario y la importancia de garantizar, en el manual correspondiente, un equilibrio entre claridad pedagógica y rigor técnico.

7.3. Evaluación de las condiciones del terreno

Antes de proceder con el diseño de las topologías de las mallas de puesta a tierra, es necesario realizar un diagnóstico de las condiciones físicas de las zonas propuestas para la futura implementación del laboratorio. Dicho proceso se divide en dos etapas fundamentales: la estimación de las dimensiones físicas del terreno y la medición de la resistividad mediante el método de Wenner, las cuales se describen a continuación.

7.3.1. *Estimación de las dimensiones físicas del terreno*

Como primer acercamiento al sector denominado *El Bosque* y en base a los planos de la Universidad Industrial de Santander que se detallan en el apéndice J, el área de estudio se dividió en tres zonas de geometría aproximadamente rectangular, de las cuales posteriormente se descartó una por motivos de construcciones civiles recientes. De dichas zonas, se realizó la medición de las distancias perimétricas de cada una, utilizando un distanciómetro láser. Las especificaciones de esta etapa se encuentran resumidas en el apéndice B y la ubicación espacial de las zonas seleccionadas para la construcción de las mallas se encuentra especificada en el apéndice G.

7.3.2. Medición de la resistividad: método de Wenner

Una vez identificadas las zonas disponibles para la instalación de las mallas de puesta a tierra, se procedió a la estimación de la resistividad del terreno en cada una de las tres zonas, mediante el uso de un telurómetro de cuatro puntas. Este equipo permite realizar la medición de la resistividad del suelo empleando el método de Wenner, el cual se describe en el marco teórico de este documento.

La metodología de medición aplicada a cada zona fue la siguiente:

1. Delimitación de la línea de enterramiento mediante una cinta métrica de 20 m.
2. Enterramiento de dos varillas de potencial (ubicadas en el centro) y dos varillas de corriente (ubicadas en los extremos), con una separación inicial de 1 m.
3. Conexión de los cables de medición a las cuatro varillas.
4. Medición de la resistividad del terreno con el telurómetro.
5. Medición de la resistencia del terreno con el telurómetro para verificación matemática de la ecuación (2).
6. Repetición de los pasos anteriores para separaciones de 2 m, 4 m, 5 m y 6 m.

Cabe resaltar que, con el fin de abarcar una mayor extensión del terreno y obtener resultados más representativos, el procedimiento descrito se repitió siguiendo una trayectoria perpendicular a la inicialmente trazada.

Al igual que en la Subsección 9.1, los resultados obtenidos y las evidencias fotográficas de la medición de la resistividad del terreno, se encuentran consignados en el apéndice B.

8. Ingeniería y diseño del laboratorio

A partir de la caracterización física del terreno presentada en la sección anterior, se procedió a desarrollar la ingeniería de detalle para la configuración del laboratorio. Esta fase comprende el modelado matemático del suelo, la definición de los parámetros constructivos

y el diseño de cinco topologías de mallas de puesta a tierra diferenciadas. Estas configuraciones han sido diseñadas para cubrir escenarios pedagógicos que van desde mallas básicas hasta sistemas complejos interconectados y tratados químicamente, cuyos detalles técnicos completos y reportes de simulación se encuentran consolidados en los apéndices C y D, respectivamente.

8.1. Modelado matemático del suelo (zonas 1 y 3)

Como se mencionó en el diagnóstico preliminar, la caracterización del terreno se dividió originalmente en tres zonas. Debido a la intervención constructiva del nuevo edificio de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, el área correspondiente a la zona 2 fue descartada, centrando el diseño de ingeniería exclusivamente en las áreas vigentes: zona 1 y zona 3.

Para el procesamiento de los datos obtenidos mediante el método de Wenner, se utilizó el motor de cálculo del software ETAP, el cual realiza la inversión de la curva de resistividad aparente para determinar los parámetros óptimos de un modelo de dos capas. Adicionalmente, y con fines pedagógicos para el desarrollo de las guías, se aplicó el método gráfico de Sunde para estimar una resistividad aparente de diseño (ρ_a) unificada.

El análisis de homogeneidad en ambas zonas arrojó variaciones superiores al 30 %, lo que obligó a descartar el modelo de suelo uniforme y adoptar un perfil estratificado definido por la resistividad de la capa superior (ρ_1), la resistividad de la capa inferior (ρ_2) y la profundidad de la primera capa (h). Los resultados que rigen el diseño se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Parámetros de modelado de suelo para diseño (resumen del apéndice C)

Parámetro	Símbolo	Zona 1	Zona 3
Resistividad capa superior	ρ_1	121,13 $\Omega \cdot m$	1222,91 $\Omega \cdot m$
Resistividad capa inferior	ρ_2	1144,52 $\Omega \cdot m$	4895,92 $\Omega \cdot m$
Espesor capa superior	h	1,15 m	1,12 m
Resistividad aparente (Sunde)	ρ_a	605 $\Omega \cdot m$	2446 $\Omega \cdot m$

Como se observa en el apéndice C, la zona 3 presenta condiciones de alta resistividad,

lo que plantea el desafío técnico de diseñar sistemas seguros en suelos con alta resistividad y comportamiento no homogéneo, un escenario común en la práctica profesional.

8.2. Criterios de diseño y parámetros constructivos

Para garantizar la coherencia en las prácticas de laboratorio y la seguridad de los estudiantes, se establecieron parámetros constructivos comunes para todas las topologías propuestas, basados en los módulos de *Ground Grid Systems* de ETAP y alineados con la normativa IEEE Std 80, los cuales son los siguientes:

- **Profundidad de enterramiento:** 0,75 m para la retícula principal.
- **Criterio de seguridad:** Peso corporal de 70 kg para el cálculo de tensiones tolerables.
- **Corriente de corto circuito (I_{cc}):** 3,06 kA (Suministrada por el operador de red tal como se observa en el apéndice H).
- **Material del conductor:** Cobre comercial (*Hard-Drawn*) con sección de $67,42 \text{ mm}^2$ (calibre 2/0 AWG), seleccionado por criterios de estabilidad térmica y mecánica.
- **Electrodos (Varillas):** Cobre tipo *Hard-Drawn* de 2,44 m de longitud y 5/8" de diámetro.

8.3. Diseño de topologías para la zona 1 (mallas regulares)

En la zona 1, caracterizada por una resistividad moderada, se diseñaron tres topologías sobre una misma área base rectangular de 6×12 metros. El objetivo es permitir al estudiante comparar empíricamente cómo la adición de electrodos y el tratamiento del suelo afectan la resistencia final.

1. **Topología A (malla rectangular simple):** Corresponde a una retícula básica sin varillas, con conductores espaciados cada 3 metros. Esta configuración sirve como referencia base para visualizar el comportamiento de una puesta a tierra puramente horizontal.

2. **Topología B (malla reforzada):** Utilizando la misma retícula de la topología A, se incorporan 15 electrodos verticales distribuidos uniformemente en el área. El propósito de este diseño es demostrar la reducción de la resistencia mediante la penetración en capas profundas del suelo.
3. **Topología C (malla con tratamiento químico):** Debido a que la reducción de resistencia en la topología B alcanza un punto de saturación geométrica, esta configuración introduce el uso de mejoradores de suelo (cemento conductor) en los pozos de los electrodos, con el objetivo de cumplir los criterios establecidos por el RETIE para la resistencia de puesta a tierra de cierto tipo de instalaciones (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

Como se detalla en el apéndice D, se realizó un recálculo de la resistividad equivalente del modelo, logrando reducir la resistividad de diseño de $605 \Omega \cdot m$ a $348,38 \Omega \cdot m$. Esto permite validar pedagógicamente la efectividad del tratamiento químico según la cláusula 14.5 de la IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

8.4. Diseño de topologías para la zona 3 (geometrías irregulares)

La Zona 3 presenta desafíos mayores debido a su alta resistividad ($\rho_2 \approx 4896 \Omega \cdot m$) y restricciones de espacio. Para esta área se desarrollaron diseños que requieren análisis avanzados, como el método de elementos finitos (FEM).

1. **Topología D (sistema interconectado):** Esta configuración une dos áreas físicamente separadas mediante conductores de enlace, simulando condiciones donde la infraestructura impide una malla continua. El diseño consta de una sub-malla de $3,0 \times 6,0$ m y otra de $3,0 \times 12,0$ m equipotencializadas, permitiendo estudiar fenómenos de transferencia de potencial.
2. **Topología E (malla en forma de “L”):** Diseñada para adaptarse a un perímetro irregular con lados mayores de 6,0 y 9,0 metros. Incluye siete varillas de refuerzo y

su geometría permite el estudio de la concentración de gradientes de potencial en las esquinas exteriores e interiores, validando las limitaciones de las fórmulas simplificadas para formas no rectangulares.

8.5. Validación por simulación

Todas las topologías descritas fueron simuladas en ETAP 20.6.0C para verificar el cumplimiento de los umbrales de seguridad. Los reportes generados, presentados en el apéndice D, confirman que los diseños propuestos mantienen las tensiones de paso y contacto por debajo de los límites tolerables calculados para un cuerpo de 70 kg, validando la viabilidad técnica de la construcción del laboratorio bajo los parámetros de la IEEE Std 80. Sin embargo, por limitaciones de área disponible para la construcción del laboratorio, solo la malla C cumple con los criterios establecidos por el RETIE para la resistencia de puesta a tierra de algunos tipos de instalaciones (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

8.6. Análisis de costos y presupuesto de inversión

En este apartado se expone la estimación económica requerida para la implementación del laboratorio de mallas de puesta a tierra. Este análisis se desarrolló como una herramienta de planificación institucional y académica, utilizando como recurso una plantilla de excel suministrada en la asignatura de Gestión de Proyectos que se puede ver en el apéndice I, cuyo desglose detallado de cantidades, precios unitarios y costos asociados se encuentra consignado en su totalidad en el apéndice F: Resumen presupuestal para un laboratorio de mallas de puesta a tierra en la UIS.

La elaboración del presupuesto se fundamentó en criterios de eficiencia económica y excelencia técnica, alineados con los estándares de diseño establecidos en la norma IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013) y en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024). El proceso de estimación se desarrolló de manera sistemática, asegurando la coherencia entre el diseño eléctrico de las mallas de puesta a tierra y los costos asociados a su construcción y verificación. Las etapas ejecutadas durante este proceso se describen a continuación:

- **Análisis de Precios Unitarios (APU):** En esta etapa se identificaron y caracterizaron los recursos necesarios para la ejecución del proyecto, incluyendo materiales, equipos, herramientas, mano de obra e insumos auxiliares. Para cada recurso se estableció su precio unitario con base en referencias de mercado y cotizaciones disponibles, permitiendo construir una base económica consistente para el cálculo de costos. Los detalles específicos de este análisis se presentan en el apéndice F, mientras que los cálculos de soporte se desarrollaron mediante hojas de cálculo del apéndice I.
- **Determinación del costo unitario del proyecto:** A partir del listado de recursos y sus respectivos precios unitarios, se procedió a calcular el costo unitario asociado al conjunto de actividades requeridas para la construcción de las mallas de puesta a tierra. Estas actividades incluyeron, entre otras, el suministro e instalación de conductores de cobre, electrodos de puesta a tierra, cajas de inspección, la ejecución de uniones mediante soldadura exotérmica y la aplicación de materiales mejoradores del suelo. El cálculo se realizó considerando las necesidades específicas de cada topología de malla definida en el diseño, de manera que los costos reflejaran fielmente las diferencias geométricas, constructivas y funcionales entre las configuraciones propuestas.

Este procedimiento permitió obtener una estimación económica estructurada y trazable, en la que cada componente del presupuesto se encuentra directamente asociado a una decisión de diseño técnico, garantizando así la consistencia entre los objetivos del proyecto y el alcance económico evaluado.

El balance general del presupuesto para cada uno de estos componentes se presenta en la Figura 1.

Cabe resaltar que, las cifras presentadas en el apéndice F no constituyen una orden de ejecución inmediata, sino una proyección de inversión para dimensionar el esfuerzo económico necesario, permitiendo la implementación progresiva de la infraestructura académica y asegurando la trazabilidad entre el diseño técnico y los costos asociados.

Figura 1

Resumen presupuestal para el laboratorio de mallas de puesta a tierra

FORMULARIO DE CANTIDADES Y PRECIOS UNITARIOS						19 de enero de 2026
LABORATORIO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA						
ITEM	TIPO	DESCRIPCION	UNIDAD	VALOR UNITARIO	CANT	SUBTOTAL
1.00		MALLA DE PUESTA A TIERRA A				
1.01	C	Suministro e instalación de cable de Cu desnudo 2/0 AWG	ml	80,686.00	66	5,325,276.00
1.02	C	Caja de inspección para malla de puesta a tierra	un	152,750.00	3	458,250.00
1.03	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en X	un	63,330.00	3	189,990.00
1.04	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en T	un	63,330.00	12	759,960.00
1.05	C	Suministro e instalación de capa superficial de material altamente resistivo	un	230,150.00	7.2	1,657,080.00
1-ST		Subtotal				8,390,556.00
2.00		MALLA DE PUESTA A TIERRA B				
2.01	C	Suministro e instalación de cable de Cu desnudo 2/0 AWG	ml	80,686.00	66	5,325,276.00
2.02	C	Caja de inspección para malla de puesta a tierra	un	152,750.00	3	458,250.00
2.03	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en X con electrodo	un	63,330.00	3	189,990.00
2.04	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en T con electrodo	un	63,330.00	12	759,960.00
2.05	C	Suministro e instalación electrodo de puesta a tierra sin cemento conductivo	un	338,490.00	15	5,077,350.00
2.06	C	Suministro e instalación de capa superficial de material altamente resistivo	m3	230,150.00	7.2	1,657,080.00
2-ST		Subtotal				13,467,906.00
3.00		MALLA DE PUESTA A TIERRA C				
3.01	C	Suministro e instalación de cable de Cu desnudo 2/0 AWG	ml	80,686.00	66	5,325,276.00
3.02	C	Caja de inspección para malla de puesta a tierra	un	152,750.00	3	458,250.00
3.03	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en X con electrodo	un	63,330.00	3	189,990.00
3.04	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en T con electrodo	un	63,330.00	12	759,960.00
3.05	C	Suministro e instalación electrodo de puesta a tierra con cemento conductivo	un	490,390.00	15	7,355,850.00
3.06	C	Suministro e instalación de capa superficial de material altamente resistivo	m3	230,150.00	7.2	1,657,080.00
3-ST		Subtotal				15,746,406.00
4.00		MALLA DE PUESTA A TIERRA D				
4.01	C	Suministro e instalación de cable de Cu desnudo 2/0 AWG	ml	80,686.00	70	5,648,020.00
4.02	C	Caja de inspección para malla de puesta a tierra	un	152,750.00	6	916,500.00
4.03	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en T con electrodo	un	63,330.00	16	1,013,280.00
4.04	C	Suministro e instalación electrodo de puesta a tierra con cemento conductivo	un	490,390.00	16	7,846,240.00
4.05	C	Suministro e instalación de capa superficial de material altamente resistivo	un	230,150.00	6.9	1,588,035.00
4-ST		Subtotal				17,012,075.00
5.00		MALLA DE PUESTA A TIERRA E				
5.01	C	Suministro e instalación de cable de Cu desnudo 2/0 AWG	ml	80,686.00	39	3,146,754.00
5.02	C	Caja de inspección para malla de puesta a tierra	un	152,750.00	3	458,250.00
5.03	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en X con electrodo	un	63,330.00	1	63,330.00
5.04	C	Suministro e instalación de soldadura exotermica en T con electrodo	un	63,330.00	9	569,970.00
5.05	C	Suministro e instalación electrodo de puesta a tierra con cemento conductivo	un	490,390.00	7	3,432,730.00
5.06	C	Suministro e instalación de capa superficial de material altamente resistivo	m3	230,150.00	3.6	828,540.00
5-ST		Subtotal				8,499,574.00
6.00		MEDIDAS DE RESISTENCIA				
6.01	C	Medida de resistencia de malla de puesta a tierra	un	391,515.00	10	3,915,150.00
6-ST		Subtotal				3,915,150.00
7.00		HERRAMIENTAS Y SOFTWARE				
7.01	C	Equipos de laboratorio por grupo de trabajo	iqo	5,720,000.00	4	22,880,000.00
7.02	C	Hardware y software	qlb	55,720,000.00	1	55,720,000.00
7-ST		Subtotal				78,600,000.00
TOTAL COSTO DIRECTO						145,631,667.00
A.I.U (20%)						29,126,333.00
VALOR TOTAL						174,758,000.00
IVA (19% SOBRE UTILIDAD)						1,383,501.00
SUBTOTAL						176,141,501.00

9. Desarrollo del manual de prácticas: diseño curricular, metodológico y justificación técnica

En este capítulo se describe la estructuración del manual de prácticas, fundamentado en un modelo de aprendizaje progresivo que integra la teoría analítica con la experimentación en campo. Se presenta el diseño curricular de las catorce guías, justificando la secuencia metodológica que lleva al estudiante desde la metrología básica hasta la simulación avanzada y la validación experimental.

9.1. Introducción y filosofía pedagógica del manual

La ingeniería de sistemas de potencia, y de manera crítica el subsistema de puesta a tierra, representa una intersección compleja entre la geofísica, la seguridad humana, la termodinámica de materiales y el análisis de circuitos bajo condiciones transitorias. Tradicionalmente, la enseñanza de esta disciplina en los programas de pregrado se ha visto afectada por una dicotomía pedagógica: existe una distinción marcada entre la teoría analítica y una práctica de campo que, si bien es efectiva en lo instrumental, se beneficiaría de una mayor integración con los fundamentos conceptuales. El desarrollo de la sección “Manual de Prácticas” para este trabajo de grado surge como una respuesta estructurada a esta brecha formativa, proponiendo un itinerario curricular que complementa la experiencia de diseño de los estudiantes. Este manual de prácticas se encuentra detallado en el apéndice E junto con su respectivo material didáctico y cada una de las guías de laboratorio se estructura en siete secciones (Introducción, Objetivo general, Objetivos específicos, Marco teórico, Hipótesis, Metodología y Preguntas y análisis) como se ilustra en la Figura 2 (Arango Noguera & San Juan Vanegas, 2013; Bailon Tomala & Chele Vera, 2016).

Figura 2

Estructura de las guías de laboratorio.



PRÁCTICA 3: MODELAMIENTO DEL SUELO PARA SUELOS NO UNIFORMES

1

I. INTRODUCCIÓN

El diseño seguro y eficiente de los sistemas de puesta a tierra (SPT) requiere una caracterización adecuada de las propiedades eléctricas del suelo, siendo la resistividad uno de los parámetros más relevantes para garantizar la seguridad de las personas y equipos. En la práctica ingenieril básica, se acostumbra asumir un suelo homogéneo equivalente para simplificar los cálculos; sin embargo, esta aproximación suele ser insuficiente y peligrosa debido a la naturaleza estratificada del subsuelo, resultado de procesos geológicos, variaciones en la humedad, composición mineralógica y actividad humana [1].

Diversos estudios y normativas técnicas, como las establecidas en IEEE Std 80 e IEEE Std 81, reconocen que la estratificación del suelo influye de manera significativa en la distribución de corrientes de falla, los potenciales de paso y de contacto, y en la impedancia global del sistema de puesta a tierra. En este contexto, el modelo eléctrico de dos capas se ha consolidado como un estándar de ingeniería, al ofrecer un balance adecuado entre realismo físico y complejidad matemática. [2], [3].

La determinación de los parámetros característicos del modelo de dos capas—resistividad de la capa superior (ρ_1), resistividad de la capa inferior (ρ_2) y espesor de la capa superficial (h)—a partir de mediciones de resistividad aparente realizadas en superficie constituye un problema matemático complejo. Dicho problema consiste en inferir la estructura interna del suelo a partir de respuestas observables (mediciones Wenner o Schlumberger), lo cual no admite una solución única analítica simple y requiere la combinación de métodos gráficos, analíticos y numéricos [4].

3

III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diferenciar entre un perfil de suelo homogéneo y uno estratificado mediante el análisis de la curva de resistividad aparente versus espaciamiento.
- Comparar teóricamente los distintos métodos de inversión de datos (computacionales vs. gráficos), justificando la elección del método de Sunde por su valor didáctico y normativo.
- Ejecutar sistemáticamente el algoritmo gráfico de Sunde para determinar las resistividades (ρ_1, ρ_2) y la profundidad de la primera capa (h).
- Validar la coherencia del modelo obtenido analizando la relación de resistividades (K) y su impacto en la distribución de corrientes de falla.

2

II. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la resistividad eléctrica del suelo mediante la construcción de un modelo equivalente de dos capas, aplicando el método gráfico de Sunde según los estándares de la norma IEEE Std 80.

4

IV. MARCO TEÓRICO

El diseño de sistemas de puesta a tierra requiere interpretar correctamente la estructura eléctrica del terreno. Esta sección fundamenta el paso de las mediciones de campo a un modelo matemático equivalente, describiendo el modelo de dos capas, el principio físico de imágenes electromagnéticas y la base teórica del método gráfico de Sunde para la determinación de los parámetros del suelo.

IV.A. Necesidad del Modelo de Dos Capas

La resistividad del suelo rara vez es constante. Típicamente, presenta variaciones horizontales y verticales. Para propósitos de diseño de mallas de puesta a tierra, la norma IEEE Std 80 considera aceptable simplificar estas variaciones mediante un modelo de dos capas horizontales, el cual tiene diferentes resistividades como se puede observar en la Fig. 1 [2].

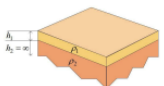


Fig. 1: Ilustración del modelo de dos capas [5]

5

Este método utiliza un **nomograma** (Fig. 3) que representa también la solución analítica de la ecuación de Laplace para un medio estratificado. La base teórica del método radica en que, en una escala logarítmica, la forma de la curva de campo ($\log \rho_a$ vs $\log a$) es idéntica a la forma de la curva teórica normalizada, pero desplazada. El método de Sunde sistematiza este hallazgo de equivalencia de formas para despejar el valor desconocido h mediante lecturas directas sobre los ejes, evitando la necesidad de resolver series infinitas manualmente.

V. HIPÓTESIS

Basados en la teoría de imágenes electromagnéticas y los lineamientos de la norma IEEE Std 80, se plantean las siguientes hipótesis de trabajo para la caracterización del suelo:

- Fidelidad del Modelo:** El modelo de suelo de dos capas representará con mayor fidelidad el comportamiento eléctrico del terreno en comparación con el modelo homogéneo, evidenciado por una reducción en la divergencia entre los valores de resistividad medidos en campo y los calculados teóricamente, especialmente en suelos con variaciones geológicas marcadas.
- Validación del Método Gráfico:** La aplicación del método gráfico de Sunde permite determinar los parámetros constitutivos del suelo (ρ_1, ρ_2, h) con una precisión aceptable para la ingeniería, convergiendo a valores similares a los obtenidos mediante algoritmos de optimización computacional, siempre y cuando las curvas de campo presenten tendencias asimptóticas definidas.
- Comportamiento Asintótico y Extrapolación:** La precisión en la determinación de la resistividad de la capa profunda (ρ_2) es dependiente de la longitud del espaciamiento de los electrodos; por tanto, en terrenos limitados donde la curva no alcanza su asintota horizontal, la extrapolación manual es una condición necesaria y suficiente para aplicar el método de Sunde con éxito.
- Relación de Resistividades:** La pendiente de la curva de resistividad aparente vs. espaciamiento en escala logarítmica predice directamente el signo del coeficiente de reflexión (K); una pendiente positiva indica una capa inferior más resistiva (suelo rocoso o seco), mientras que una pendiente negativa sugiere una capa inferior más conductiva (suelo fríasco o suelo arcilloso), determinando así la profundidad efectiva para el enterramiento de los electrodos.

VI. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el procedimiento sistemático para determinar los parámetros constitutivos del

Este modelo se define por tres parámetros:

- ρ_1 : Resistividad de la capa superior ($\Omega \cdot m$).
- ρ_2 : Resistividad de la capa inferior ($\Omega \cdot m$).
- h : Espesor de la capa superior [m].

El contraste entre capas se cuantifica con el coeficiente de reflexión K :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1)$$

IV.B. Fundamento Físico: El Principio de Imágenes

Aunque el método de Sunde es una herramienta gráfica, su origen es analítico. Cuando una corriente eléctrica se inyecta en un medio estratificado, esta no fluye uniformemente; sufre múltiples reflexiones en las interfaces de cambio de medio (la frontera suelo-aire y la frontera entre la capa 1 y la capa 2).

Para modelar matemáticamente este fenómeno, se utiliza el Método de las Imágenes Electromagnéticas. Como se observa en la Fig. 2, la fuente de corriente real (A) genera una serie infinita de "fuentes virtuales" imágenes (A_1, A_2, \dots) debido a las reflexiones sucesivas.

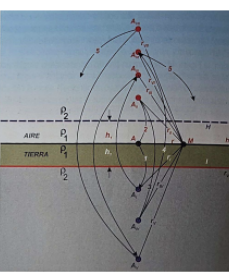


Fig. 2: Representación del método de imágenes en un suelo de dos capas. La fuente real A genera múltiples imágenes (A_1, A_2, \dots) debido a las reflexiones en las fronteras, creando una serie infinita que define el potencial en la superficie [6].

Las curvas del nomograma de Sunde que utilizaremos en esta práctica son, en esencia, la solución gráfica de la suma de las contribuciones de todas estas imágenes infinitas. El método de Sunde nos ahorra tener que calcular esta serie compleja manualmente.

IV.C. Clasificación de Métodos de Modelado

El problema de encontrar ρ_1, ρ_2 y h a partir de datos medidos se conoce como "problema inverso". Existen dos enfoques principales para resolverlo:

- Métodos Computacionales:** Se basan en algoritmos numéricos de optimización (como mínimos cuadrados no lineales, algoritmo de Levenberg-Marquardt o algoritmos genéticos). Estos programas iteran los valores de los parámetros hasta minimizar el error entre la curva teórica y la medida. Aunque son muy precisos, pueden ocultar al ingeniero la comprensión física del fenómeno o converger a mínimos locales crónicos si no se dan valores iniciales adecuados [1].
- Métodos Gráficos:** Antes de la masificación de los ordenadores, se desarrollaron métodos basados en el análisis visual de curvas patrón. Autores como Blattner, Dawahbi, Roman, Tegg y Sunde propusieron diversas técnicas con las siguientes características [2]:
 - Estos métodos aprovechan las propiedades geométricas de las curvas de resistividad.
 - Permiten una inspección directa de la calidad de los datos.
 - Son ideales para verificaciones rápidas y para entender la tendencia del suelo.

Uno de los métodos gráficos más conocidos es el Método de Sunde mencionado en la norma IEEE Std 80, en su cláusula 13.4.2.2, así como la aproximación gráfica estándar:

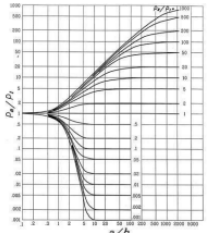


Fig. 3: Curvas patrón de Sunde para el modelado de dos capas [2]

sus datos experimentales si dispone de la función de Sunde digitalizada.

d) Lectura de Coordenadas: Seleccione un punto en la región de mayor pendiente de la curva de Sunde que permita:

- Anote la coordenada Y del nomograma: $Y_{Sunde} = \rho_a \rho_1$.
- Anote la coordenada X del nomograma: $X_{Sunde} = a/h$.

e) Cálculo de la Resistividad Objetivo: Determine el valor físico de resistividad que corresponde al punto seleccionado:

$$\rho_{objetivo} = Y_{Sunde} \cdot \rho_1 \quad (2)$$

f) Intersección con Datos de Campo: Utilice la herramienta de Data Cursor o Data Tip en su gráfica de MATLAB/Excel:

- Ubique el cursor sobre la línea de tendencia de sus datos de campo.
- Mueva el cursor hasta que el valor de resistividad (Eje Y) sea igual a $\rho_{objetivo}$.
- Lea el valor correspondiente del espaciamiento (Eje X). Este será $a_{cálculo}$.

g) Cálculo de h : Despeje el espesor de la capa superior:

$$h = \frac{a_{cálculo}}{X_{Sunde}} \quad (3)$$

VI.D. Fase 3: Validación del Modelo

Utilizando los parámetros obtenidos (ρ_1, ρ_2, h), grafique en MATLAB la curva teórica de Sunde completa y superpóngala con sus datos medidos para validar visualmente la calidad del ajuste.

VII. PREGUNTAS Y ANÁLISIS

El informe deberá responder de manera técnica y debidamente justificada las siguientes preguntas:

- Analice la relación ρ_2/ρ_1 obtenida. ¿Es el suelo subyacente más conductor o más resistivo? ¿Cómo afecta esto teóricamente al diseño de la malla (necesidad de varillas profundas vs. malla horizontal)?
- Si tuviera que repetir la práctica utilizando un método computacional, ¿qué ventaja tendría sobre el método manual que acaba de realizar? ¿Y qué desventaja?
- Según la norma IEEE 80, ¿es aceptable diseñar la malla con el modelo de dos capas obteniendo si el error respecto a los datos medidos es muy alto? ¿Qué sugiere la norma en casos de suelos altamente no uniformes?

El proceso creativo para la concepción de este manual no es la agregación de experimentos aislados, sino el diseño de una narrativa técnica coherente fundamentada en el modelo de aprendizaje progresivo. El objetivo central es transformar al estudiante desde un rol de observador pasivo o técnico instrumentista, hacia un rol de ingeniero diseñador con capacidad crítica para validar modelos computacionales frente a la realidad física. Para ello, se estructuraron las guías de laboratorio secuenciales, agrupadas en bloques temáticos que reflejan las etapas normativas de un diseño según la guía IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013) y el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

La justificación de este enfoque radica en la necesidad de desmitificar el uso de software de ingeniería. En la práctica contemporánea, el uso de herramientas de simulación sin una comprensión profunda de los fenómenos físicos subyacentes conduce a diseños peligrosos o ineficientes (Gomez & Pardo, 2011). Por tanto, el manual orienta al estudiante a realizar cálculos manuales y mediciones físicas antes de enfrentarse a la simulación, asegurando que adquiera la sensibilidad numérica para juzgar la validez de los resultados automáticos.

9.2. Bloque I: caracterización y modelado del entorno físico (guías 1, 2 y 3)

El primer bloque aborda la incertidumbre fundamental de cualquier sistema de puesta a tierra: el suelo. La agrupación de estas primeras guías tiene como propósito enseñar al estudiante a cuantificar esta incertidumbre y convertir datos crudos de campo en modelos matemáticos procesables.

9.2.1. Guía 1: metrología de puesta a tierra y resistividad

Esta guía constituye la base empírica del curso. Se centra en la ejecución normativa del método de Wenner y el método de caída de potencial, fundamentales para cualquier estudio preliminar según la norma IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).

Justificación y contenido: La elección del método tetraelectródico de Wenner se justifica por su robustez frente a interferencias y su aceptación en el RETIE. Pedagógicamen-

te, permite visualizar el concepto de “profundidad de exploración”; al variar la separación a entre electrodos, el estudiante comprende que la corriente penetra más profundo, revelando la estructura del subsuelo (Ministerio de Minas y Energía, 2024). Simultáneamente, se instruye en la medición de resistencia (R_g) aplicando la “Regla del 62%”, orientando al estudiante a validar la estabilidad de la medición moviendo el electrodo de potencial (P) a posiciones adyacentes ($0,52D$ y $0,72D$) para evitar errores por solapamiento de zonas de influencia (Torres, 2011).

9.2.2. Guía 2: validación estadística del modelo de suelo uniforme

Una vez obtenidos los datos, se aborda la decisión de modelado: ¿Es adecuado asumir un suelo homogéneo? Esta guía utiliza el análisis estadístico para validar esta simplificación común pero a menudo errónea (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

Metodología analítica: El estudiante ejecuta un pre-procesamiento para depurar valores atípicos (*outliers*) y calcula indicadores estadísticos (ρ_{avg} , ρ_{max} , ρ_{min}). Se aplica un criterio de uniformidad porcentual (típicamente $< 30\%$). Si el suelo falla esta prueba, se concluye que se requiere un modelo estratificado, justificando la necesidad de la siguiente práctica (Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

9.2.3. Guía 3: modelado avanzado de dos capas (Método de Sunde)

Ante la insuficiencia del modelo uniforme, esta guía introduce el modelo de dos capas (ρ_1, ρ_2, h) utilizando el método gráfico de Sunde (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

Justificación del método gráfico: Aunque el software realiza la inversión automáticamente, el método manual de Sunde tiene una justificación pedagógica profunda: evita el efecto “caja negra”. Al superponer datos de campo sobre las curvas normalizadas, el estudiante visualiza la física del problema inverso, entendiendo cómo la tendencia ascendente o descendente de la resistividad aparente dicta la necesidad de varillas profundas o mallas extendidas (Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

9.3. Bloque II: criterios de seguridad y dimensionamiento (guías 4 y 5)

Este bloque establece las restricciones de diseño (*constraints*) que garantizan la preservación de la vida y la integridad del sistema, antes de definir la geometría.

9.3.1. *Guía 4: modelado del circuito accidental y tensiones de contacto*

Esta práctica se enfoca en la ingeniería del circuito equivalente de Thévenin durante una falla a tierra, manteniendo el enfoque en el modelo eléctrico y derivando los aspectos biofísicos detallados a la Guía 13.

Metodología: Se utiliza simulación de circuitos para visualizar los escenarios de tensión de contacto (V_{touch}) y tensión de paso (V_{step}). El estudiante modela las resistencias equivalentes de los pies y la resistencia del cuerpo como componentes del circuito. Se introduce la variable crítica de la resistividad de la capa superficial (ρ_s). Las simulaciones demuestran cuantitativamente cómo una capa de alta resistividad (gravilla) actúa como una resistencia serie adicional, reduciendo la corriente que circula por la rama del cuerpo humano, validando las estrategias de mitigación de la IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Ministerio de Minas y Energía, 2024).

9.3.2. *Guía 5: dimensionamiento térmico y mecánico de conductores*

Se enfoca en el comportamiento termodinámico de los materiales bajo corrientes de falla adiabáticas.

Enfoque comparativo: La guía contrasta uniones mecánicas frente a soldadas. Se demuestra que las uniones exotérmicas permiten aprovechar la capacidad térmica del cobre hasta $1083^{\circ}C$, resultando en conductores más económicos frente a las uniones mecánicas limitadas a $250^{\circ}C$ (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013). Además, se valida el cumplimiento de requisitos de robustez mecánica mínimos exigidos por el RETIE y operadores de red (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

9.4. Bloque III: diseño, simulación y optimización (guías 6, 7 y 8)

Representa el núcleo de la ingeniería de detalle, donde convergen los modelos de suelo y los criterios de seguridad.

9.4.1. Guía 6: algoritmo de diseño IEEE 80 (cálculo manual)

El estudiante ejecuta el algoritmo de diseño paso a paso. La justificación del cálculo manual es desarrollar la sensibilidad paramétrica: Al resolver las ecuaciones de Sverak y los factores geométricos (K_m, K_i), el estudiante internaliza cómo variables como el espaciamiento D o la longitud L_T impactan directamente en la seguridad y el costo (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013; Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

9.4.2. Guía 7: validación computacional con ETAP

Se introduce el software profesional para modelar el diseño previo. Un aporte clave de esta guía es el análisis del Factor de División de Corriente (S_f). Mientras el cálculo manual es conservador ($S_f = 1$), la simulación permite modelar el retorno de corriente por cables de guarda, optimizando el diseño al evitar el sobredimensionamiento, conforme a las recomendaciones de la IEEE Std 80 (Gomez & Pardo, 2011; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

9.4.3. Guía 8: optimización y tratamiento de suelos

Explora la ingeniería de mejoramiento en terrenos de alta resistividad. Se simula el uso de materiales de baja resistividad (bentonita/cementos) alrededor de los electrodos. El estudiante analiza el efecto del “diámetro virtual” en la reducción de R_g y realiza un análisis técnico-económico comparando el tratamiento químico frente a la ampliación de obra civil (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

9.5. Bloque IV: validación experimental y avanzada (guías 9, 10, 11 y 12)

Cierra el ciclo de aprendizaje contrastando la teoría con la realidad y herramientas avanzadas.

9.5.1. Guía 9: validación en campo (realidad vs. simulación)

Constituye la auditoría final. Se miden en campo mallas reales (sin electrodos, con electrodos y con mejoradores de terreno) y se comparan tres conjuntos de datos: teórico (guía 6), simulado (guía 7) y real. El análisis de errores relativos permite discutir factores no modelados como la compactación o la corrosión, validando la metodología de inspección (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Torres, 2011).

9.5.2. Guía 10: integración CAD-CAE

Enseña el flujo de trabajo profesional de interoperabilidad. El estudiante resuelve diseños con restricciones civiles (obstáculos) diseñando en AutoCAD e importando a ETAP, desarrollando competencias digitales esenciales para la ingeniería moderna que sirven de apoyo para los diseños de FEM introducidos en (guía 11).

9.5.3. Guía 11: introducción al Método de Elementos Finitos (FEM)

Para geometrías irregulares donde las fórmulas de IEEE Std 80 pierden precisión, se introduce el FEM. Esta guía permite visualizar mapas de contorno de potencial en 3D, identificando “puntos calientes” en esquinas de mallas complejas, justificando el uso de herramientas numéricas avanzadas para garantizar la seguridad (Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010).

9.5.4. Guía 12: diseño de mallas irregulares (geometría en L)

Esta práctica aborda la realidad de las subestaciones con limitaciones de espacio que obligan a geometrías no rectangulares, específicamente la topología en forma de L.

Consideraciones especiales: Se estudia el fenómeno de concentración de campo eléctrico en las esquinas interiores (esquinas entrantes) y exteriores. El estudiante debe validar si las fórmulas simplificadas de la IEEE Std 80 (basadas en áreas rectangulares equivalentes) son conservadoras o riesgosas para esta geometría, justificando la necesidad de correcciones o simulación detallada (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

9.6. Bloque V: guías complementarias (guías 0 y 13)

Este bloque transversal agrupa las prácticas que proporcionan el marco organizativo y la profundización teórica en aspectos biomédicos, elementos esenciales que preceden y fundamentan el diseño técnico.

9.6.1. *Guía 0: introducción, metodología y seguridad en laboratorio*

Esta guía precede a la ejecución técnica de todo el manual. Su inclusión se justifica por la necesidad de estandarizar la organización de los grupos de trabajo, explicar la estructura modular del curso y definir los protocolos de seguridad industrial (EPP y distancias de seguridad) exigidos por el RETIE para el trabajo experimental en patios de media tensión. Establece la cultura de seguridad que permeará las trece prácticas siguientes (Arango Noguera & San Juan Vanegas, 2013; Ministerio de Minas y Energía, 2024).

9.6.2. *Guía 13: efectos fisiológicos de la corriente (estudios de Dalziel)*

Mientras que la guía 4 modela el circuito eléctrico equivalente, esta guía complementaria profundiza exclusivamente en la biofísica del choque eléctrico, constituyendo el eje ético del manual. Se analizan los estudios clásicos de **Charles Dalziel** sobre los umbrales de percepción, reacción y fibrilación ventricular. **Objetivo:** El estudiante debe calcular y graficar las curvas de seguridad I vs t para cuerpos de 50 kg y 70 kg, comprendiendo el origen estadístico de la constante k (116 y 157) utilizada en la norma IEEE Std 80. Esto permite al estudiante entender que los límites de tensión no son arbitrarios, sino que buscan preservar la vida humana (Dalziel, 1961; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).

9.7. Resumen estructural y cumplimiento normativo

La estructura del manual asegura que el estudiante recorra todas las competencias exigidas por la normativa vigente. La Tabla 2 resume la alineación pedagógica actualizada, mostrando cómo el Bloque V sirve de soporte fundamental al resto del diseño curricular.

Tabla 2

Estructura curricular y alineación normativa del manual

Bloque	Guía	Foco temático	Estándar clave
V. Complementarias	0	Introducción y metodología del laboratorio	(Ministerio de Minas y Energía, 2024)
	13	Efectos fisiológicos (Dalziel)	(Dalziel, 1961)
I. Caracterización	1	Metrología (Wenner y caída de potencial)	(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012), (Ministerio de Minas y Energía, 2024)
	2	Validación modelo uniforme	(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013)
	3	Modelado de dos capas (Sunde)	(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013)
II. Seguridad	4	Circuito accidental (modelo eléctrico)	(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013)
	5	Dimensionamiento de conductores	(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013), (Ministerio de Minas y Energía, 2024)
III. Diseño	6	Algoritmo de diseño (manual)	(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013)
	7	Simulación y validación (ETAP)	(Gomez & Pardo, 2011)
	8	Tratamiento y optimización	(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013)
IV. Avanzado	9	Validación de campo	(Torres, 2011)
	10	Elementos finitos (FEM)	(Ramírez Castaño & Cano Plata, 2010)
	11	Integración CAD-CAE	-
	12	Diseño en L (mallas irregulares)	(Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013)

10. Conclusiones

A partir del desarrollo metodológico de esta investigación, se determina el cumplimiento satisfactorio del objetivo general y de los objetivos específicos propuestos para este trabajo de grado. Mediante el diseño de diversas topologías de mallas de puesta a tierra, la formulación de un presupuesto detallado de inversión y la elaboración de un manual de catorce guías prácticas, se entrega una solución técnica y pedagógica que atiende de forma integral las necesidades de la Escuela. En consecuencia, se presentan las conclusiones que sintetizan los resultados de ingeniería y el impacto académico del proyecto.

- Se desarrolló una propuesta pedagógica robusta materializada en un manual de catorce guías prácticas que articula coherentemente la normativa nacional, incluyendo el RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024) y la NTC 2050 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2020), con los estándares internacionales tales como la IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013) y la IEEE Std 81 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012). Esta estructura curricular cierra la brecha existente entre la teoría y la práctica, llevando al estudiante desde la medición básica y el cálculo manual hasta el uso de herramientas de simulación y elementos finitos, lo que permite formar ingenieros con criterio para validar modelos matemáticos frente a la realidad física.
- La caracterización geoelectrica del terreno validó la viabilidad técnica del laboratorio a pesar de la alta resistividad y heterogeneidad encontradas, lo que exigió el uso de modelos de dos capas y diseños avanzados. Las simulaciones en ETAP confirmaron que las cinco topologías propuestas garantizan la seguridad humana al mantener las tensiones de paso y contacto por debajo de los límites tolerables de la IEEE Std 80 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013); no obstante, se demostró que, dadas las condiciones del suelo, únicamente una de las configuraciones con tratamiento químico logra reducir la resistencia de puesta a tierra a los niveles exigidos por el

RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2024), ofreciendo un escenario valioso para el análisis comparativo.

- Se formuló un presupuesto de inversión detallado que estima un costo total de ejecución aproximado de \$176 millones de pesos, integrando los costos directos de obra civil para las cinco topologías, la adquisición de instrumentación especializada y el licenciamiento de software. Este análisis económico, confirma la viabilidad financiera del proyecto y ofrece a la universidad una herramienta de planificación escalable, permitiendo una implementación progresiva de la infraestructura sin comprometer el rigor técnico ni normativo del diseño.
- El diseño conceptual de las mallas de tierra y las guías de laboratorio establece una sólida cultura de seguridad eléctrica, fundamentando las decisiones de ingeniería en la preservación de la vida humana según los estudios fundamentales sobre efectos fisiológicos (Dalziel, 1961) y los modelos de circuito accidental. De esta manera, el proyecto no solo fortalece la infraestructura docente de la universidad, sino que asegura el desarrollo de competencias profesionales críticas para diseñar, auditar y mantener sistemas seguros, respondiendo a las necesidades de protección del sector eléctrico actual.

11. Recomendaciones y posibles futuros desarrollos

A partir de los resultados obtenidos en el diseño del laboratorio y la estructuración del manual de prácticas, se proponen las siguientes recomendaciones para la implementación física del proyecto y el desarrollo de futuras líneas de investigación:

- **Fase de construcción y montaje:** Se recomienda iniciar la ejecución física del laboratorio siguiendo el presupuesto de inversión detallado en este trabajo, priorizando la adecuación de la Zona 1 para las prácticas básicas.
- **Verificación de instrumentación:** Al momento de adquirir los equipos de laboratorio, se sugiere seleccionar telurómetros con alta inmunidad al ruido y frecuencias de

prueba ajustables, siguiendo las directrices técnicas para la medición de impedancia de tierra y potenciales de superficie (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012).

- **Actualización normativa continua:** Debido a que la ingeniería de sistemas de puesta a tierra está sujeta a cambios regulatorios, se recomienda revisar periódicamente las actualizaciones del RETIE y los estándares internacionales de seguridad en subestaciones (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013).
- **Estudios de corrosión y mantenimiento:** Como trabajo futuro, se propone el desarrollo de un módulo de investigación dedicado al estudio del deterioro de los electrodos por corrosión galvánica, fundamentado en los modelos de seguridad.
- **Ampliación del software de simulación:** Se recomienda explorar la integración del manual de prácticas con herramientas de simulación adicionales, permitiendo a los estudiantes contrastar los resultados de ETAP con métodos numéricos.
- **Evaluación de materiales mejoradores de suelo:** Se propone como desarrollo futuro el diseño y construcción de una topología adicional que emplee materiales mejoradores de tierra distintos al cemento conductor. Esto permitirá realizar un análisis comparativo experimental sobre la eficiencia en la reducción de la resistencia de puesta a tierra y la estabilidad térmica de los electrodos frente a las soluciones implementadas en este proyecto.

Referencias

- Al-Ammar, E. A., Al-Othman, A. K., & Hakami, M. A. (2017). Grounding grid design for high voltage substations: An assessment of effectiveness for lightning currents. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(12), 3120-3125.
- Arango Noguera, E., & San Juan Vanegas, J. (2013). *Diseño metodológico y guía de laboratorio para el estudio de los principios básicos en la implementación de sistemas de puesta a tierra* [Tesis de pregrado (Ingeniería Eléctrica)]. Universidad de la Costa (CUC).
- Bailon Tomala, J. W., & Chele Vera, B. J. (2016). *Diseño del manual de procedimientos de prácticas para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil* [Trabajo de titulación (Ingeniería Eléctrica)]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Cano M, F. A., Grijalba, C. J., & Hincapié, D. (2004). *Guía metodológica para el diseño de sistemas de SPT y apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión de un SD* (Guía técnica). Universidad del Valle.
- Dalziel, C. F. (1961). *Deleterious effects of electric shock* (inf. téc.) (Documento clásico; la fecha puede variar según versión). University of California, Berkeley.
- Empresas Públicas de Medellín. (2019). *Guía metodológica para el cálculo del sistema de puesta a tierra* (Guía Técnica N.º RA6-014) (Norma de Construcción de Redes Aéreas y Subterráneas de Distribución de Energía). Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Medellín, Colombia.
- Gomez, D. S., & Pardo, F. A. O. (2011). *Diseño de una herramienta de simulación que permita seleccionar sistemas de puesta a tierra* [Trabajo de grado (Ingeniería Eléctrica)]. Universidad de La Salle.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system (IEEE Std 81-2012)*. IEEE.

- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2013). *IEEE guide for safety in AC substation grounding (IEEE Std 80-2013)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6575781>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). *Norma Técnica Colombiana NTC 2050: Código eléctrico colombiano*. ICONTEC. <https://www.icontec.org/>
- International Electrotechnical Commission. (2011). *Low-voltage electrical installations – part 5-54: Selection and erection of electrical equipment – earthing arrangements and protective conductors (iec 60364-5-54)* [Edición consultada; incluye enmiendas si aplica]. IEC. <https://www.iec.ch/>
- Jiménez Lozano, G. (2013). *Dinámica y optimización de los sistemas de puesta a tierra* [Tesis doctoral (Ingeniería Eléctrica)]. Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RE-TIE)*. <https://www.minenergia.gov.co/>
- Ramírez Castaño, J. S., & Cano Plata, E. A. (2010). *Sistemas de puesta a tierra: diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Torres, G. G. (2011). *Metodología para la inspección de sistemas de puesta a tierra* (Presentación técnica) (VI Congreso Nacional de Mantenimiento Eléctrico Industrial). IEEE PES Colombia.
- Viloria Molinares, J. A., & Escorcía De La Hoz, K. (2019). *Diseño del sistema de puesta a tierra de la Universidad de la Costa, CUC, aplicada a las reglamentaciones vigentes* [Trabajo de grado (Ingeniería Eléctrica)]. Universidad de la Costa.

Apéndices

A continuación se presentan los apéndices del proyecto, donde los links de acceso a los mismos son hipervínculos del texto que describe a cada apéndice, haga clic en la descripción para acceder a ellos.

Apéndice A

Este apéndice amplía el marco teórico mediante definiciones adicionales y términos técnicos no incluidos en el cuerpo principal, proporcionando soporte conceptual y clarificando terminología específica utilizada en la investigación

Apéndice B

Este apéndice documenta la caracterización geoelectrica, selección de terrenos (Zonas 1, 2 y 3) y validación espacial.

Apéndice C

Este apéndice presenta el modelado de suelos no uniformes (Zonas 1 y 3), determinando parámetros de resistividad y estratificación mediante el software ETAP y el método gráfico de Sunde.

Apéndice D

Este apéndice detalla las configuraciones geométricas, parámetros constructivos y reportes de simulación en ETAP de las topologías diseñadas para las Zonas 1 y 3

Apéndice E

Compila las guías prácticas desarrolladas y sus respectivos anexos técnicos, proporcionando el material didáctico y procedimental necesario para la correcta ejecución de las actividades experimentales propuestas en el laboratorio.

Apéndice F

Este apéndice detalla el análisis financiero y presupuesto requerido para la implementación del laboratorio, desglosando los costos de materiales, equipos y recursos necesarios para la construcción del sistema.

Apéndice G

Este apéndice presenta el plano de Autocad de la universidad con la ubicación espacial de las mallas a construir en el area el *bosque*.

Apéndice H

ing Corriente de cortocircuito suministrada por el operador de red para el diseño de las mallas de puesta a tierra

Apéndice I

Plantilla de presupuestos suministrada en la asignatura de Gestión de Proyectos de Ingeniería

Apéndice J

Plano de Autocad con la infraestructura y espacios de la Universidad Industrial de Santander