

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Sistema de protección contra descargas atmosféricas
empleando los principios de Jaula de Faraday en una
empresa minera de la región Cusco - 2022**

Eliseo Chavez Vergara

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Cusco, 2025

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Joel Contreras Núñez
 Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 22 de Mayo de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Sistema de protección contra descargas atmosféricas empleando los principios de Jaula de Faraday en una empresa minera de la región Cusco- 2022"

Autor:

1. ELISEO CHAVEZ VERGARA – EAP. Ingeniería Eléctrica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 20 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- | | | |
|---|--|--|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI ☐ | NO ☒ |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores | SI ☒ | NO ☐ |
| Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI") : 28 | | |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI ☐ | NO ☒ |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

RESUMEN

Las características climáticas y geográficas del Perú contribuyen a que la intensidad de las tormentas eléctricas sea de alto riesgo en ciertas zonas como en la región del Cusco. Las descargas atmosféricas conllevan a que se produzcan horas hombre muertas durante el procedimiento de cambio de guardia entre operarios de los camiones mineros. Este estudio propone utilizar los principios de la jaula de Faraday para desarrollar un mecanismo de defensa contra descargas atmosféricas. Este sistema a ser instalado en dicha unidad minera de Antapaccay, situada a una altura geográfica de 4100 m.s.n.m. en la provincia de Espinar, departamento del Cusco. Para cumplir dicho objetivo se emplea el Código Nacional de Electricidad (CNE), la norma IEC 62305 y la norma NFPA 780. Se llevó a cabo un diseño detallado del sistema de protección utilizando modelado electro geométrico (esfera rodante) y se realizaron simulaciones mediante software especializado como Archicad y ETAP. Se integraron subsistemas de fotovoltaico, pararrayos, componentes eléctricos y estructuras metálicas en el diseño de jaula de Faraday. El sistema diseñado demostró un alto nivel de eficacia en la protección contra fallas o perturbaciones eléctricas, reduciendo significativamente la resistividad del terreno. Se logró una resistividad de 4.76 ohms, muy por debajo de lo establecido por la norma IEEE, lo que confirma la efectividad del sistema. El proyecto desarrolló un sistema de protección frente a las tormentas eléctricas viable y efectivo para la compañía minera Antapaccay, mitigando así el riesgo durante el cambio de guardia de los operarios de camiones mineros. La integración de tecnologías como la jaula de Faraday, el sistema fotovoltaico y los pararrayos ha demostrado ser una estrategia eficiente para garantizar la seguridad y la continuidad operativa en entornos mineros expuestos a tormentas eléctricas de alta intensidad.

PALABRAS CLAVES: descargas eléctricas, protección, jaula de Faraday, diseño.

ABSTRACT

Peru's climatic and geographic characteristics contribute to the high-risk intensity of thunderstorms in certain areas such as the Cusco region. Atmospheric discharges lead to dead man-hours during the change of guard procedure between operators of mining trucks. This study proposes to use the Faraday cage principles to develop a defense mechanism against atmospheric discharges. This system to be installed in the mining unit of Antapaccay, located at a geographical altitude of 4100 m.a.s.l. in the province of Espinar, department of Cusco. A detailed design of the protection system was carried out using electro-geometric modeling (rolling sphere) and simulations were performed using specialized software such as Archicad and ETAP. Photovoltaic subsystems, lightning arresters, electrical components and metallic structures were integrated into the Faraday cage design. The designed system demonstrated a high level of efficiency in protection against electrical faults or disturbances, significantly reducing the ground resistivity. A resistivity of 4.76 ohms was achieved, well below the IEEE standard, confirming the system's effectiveness. The project developed a viable and effective thunderstorm protection system for the Antapaccay mining company, thus mitigating the risk during shift changes for mining truck operators. The integration of technologies such as the Faraday cage, the photovoltaic system, and lightning rods has proven to be an efficient strategy for ensuring safety and operational continuity in mining environments exposed to high-intensity thunderstorms.

KEYWORDS: Electric shocks, protection, Faraday cage, design

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
CAPÍTULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1. Formulación y planteamiento del estudio	1
1.2. Planteamiento y formulación del problema	2
1.2.1. Problema general	2
1.2.2. Problemas específicos.....	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Justificación de la investigación	3
1.4.1 Justificación práctica.....	3
1.4.2 Justificación teórica	4
1.4.3 Relevancia social	4
1.5. Importancia del trabajo de investigación	5
1.6. Operacionalización de variables	5
1.6.1. Variable dependiente	5
1.6.2. Variable independiente	5
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO.....	6

2.1. Antecedentes de la investigación	6
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	6
2.1.2. Antecedentes nacionales	8
2.1.3. Antecedentes locales.....	9
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1. Descargas atmosféricas.....	10
2.2.2. Jaula de Faraday.....	19
2.2.3. Criterios Sobre la jaula de Faraday	22
2.2.4. Esfera rodante	25
2.2.3. Generación fotovoltaica para jaula de ardilla	27
2.2.4. Sistema a puesta a tierra.....	29
2.2.5. Mallas de puesta a tierra	37
2.2.6. Resistencia de mallas de tierra.....	40
2.3. Definición de términos básicos.....	42
2.3.1. Rayo.....	42
2.3.2. Cumulonimbos.....	43
2.3.3. Puesta a tierra.....	43
2.3.4. Tierra.....	43
2.3.5. Conductor de puesta a tierra	43
2.3.6. Puestas a tierra tipo malla o interconectado:	44
2.3.7. Tensión de paso	44
2.3.8. Tensión de toque o contacto	45
2.3.9. Jaula de Faraday.....	45
2.3.10. Nivel isoceraúnico	45

CAPÍTULO III.....	47
METODOLOGÍA.....	47
3.1. METODOLOGÍA I+P+D3.....	47
3.1.1. Tipo y diseño de la investigación	47
3.1.2. Metodología investigativa.....	48
3.2. FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	48
3.2.1 Investigación.....	48
3.2.2. Planificación	49
3.2.3 Definición de producto.....	50
3.2.4 Diseño del producto	51
3.2.5 Desarrollo del proyecto	51
CAPITULO IV.....	52
ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN	52
4.1. Investigación.....	52
4.1.1. Entrevista a los expertos del tema.....	53
4.1.2. Criterios técnicos para las evaluaciones	53
4.1.3. Mediciones de resistividad del terreno.	55
4.1.4. Encuesta	55
4.1.5 Requerimientos funcionales.....	58
4.1.6. Requerimientos no funcionales.....	58
4.2. Planificación	59
4.2.1. Subsistema 1: Estructura metálica	59
4.2.2 Subsistema 2: Pararrayos	61
4.2.3 Subsistema 3: Puesta a tierra	63

4.2.4. Subsistema 4: componentes electrónicos, actuadores y sensores	65
4.2.5 Subsistema 5: Generación fotovoltaica.....	65
4.3. Definición del producto	67
4.3.1. Requerimientos mínimos	67
4.4 Diseño del producto	69
4.4.1. Diseño de estructura metálica	69
4.4.2. Diseño de pararrayos	72
4.4.3. Diseño de puesto a tierra.....	74
4.4.4. Cálculos	75
4.4.5 Electrónicos, actuadores y sensores.....	82
4.4.6 Generación fotovoltaica.....	83
CAPÍTULO V.....	84
SIMULACIÓN... ..	84
5.1. desarrollo del proyecto.....	84
5.2 Simulación en Archicad	85
5.2.1 Condiciones del medio en la zona	85
5.2.2. Mediciones de resistividad del suelo método Wenner.....	86
5.3. Simulación de la puesta a tierra	86
5.4. Criterios técnicos para las evaluaciones	87
5.4.1. Sistema de puestas a tierra interconectadas	87
5.5. Condiciones del suelo en la zona	90
5.6. Pruebas y resultados.....	92
CONCLUSIONES	97
TRABAJOS FUTUROS	98

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXOS.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1.	Rayo en el campamento minero Antapaccay	12
Figura N°2.	Mapa de nivel Isoceraunico del Perú	15
Figura N°3.	Mapa isoceraunico del Perú	16
Figura N°4.	Esquema de método esfera rodante.....	26
Figura N°5.	Aplicación del método de la esfera rodante según la norma NFPA 780 a una estructura compuesta.....	27
Figura N°6.	Pozo a tierra con varilla de cobre.....	30
Figura N°7.	Resistividad aparente	36
Figura N°8.	Pozo a tierra tipo malla	38
Figura N°9.	Malla de pozo a tierra	64
Figura N°10.	Dimensiones de jaula de Faraday	70
Figura N°11.	Pasadizo de Jaula	71
Figura N°12.	Pasadizo de la jaula	71
Figura N°13.	Pararrayo tipo Franklin	73
Figura N°14.	Pozo a tierra tipo convencional.....	74
Figura N°15.	Instalación de picas para la medición 1	76
Figura N°16.	Medición con telurómetro 1.....	77
Figura N°17.	Instalación de picas para la medición 2	79
Figura N°18.	Medición con telurómetro 2.....	79
Figura N°19.	Los dos tipos de puesta a tierra (Convencional y malla)	82
Figura N°20.	Panel Fotovoltaico	83
Figura N°21.	Diseño de oficinas y cambio de guardia	84

Figura N°22.	Diseño de jaula.....	85
Figura N°23.	Lugar In situ de la construcción.....	86
Figura N°24.	Resultados de la medición del sistema a puesta a tierra 639 Ω	88
Figura N°25.	Resultados de medición del sistema a puesta a tierra 545 Ω	89
Figura N°26.	Resultados de medición del sistema a puesta a tierra 439 Ω	90
Figura N°27.	Terreno donde se desarrolla el proyecto	91
Figura N°28.	Vista en planta de la construcción	92
Figura N°29.	Estacionamiento de los Camiones Mineros	92
Figura N°30.	Ingreso del operador a los camiones mineros	93
Figura N°31.	Tránsito del personal por la jaula.....	94
Figura N°32.	Salida de los operadores de la oficina hacia al otro lado	94
Figura N°33.	Estacionamiento de buses para el ingreso de personal.	95
Figura N°34.	Resistencia final obtenida 4.76 ohmios	95
Figura N°35.	Costo y presupuesto en la construcción	96

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1.	Operacionalización de variables	5
CUADRO 2.	Operacionalización de variables	5
CUADRO 3.	Aplicación de jaula de Faraday	21
CUADRO 4.	Resistividad en OHM/m	36
CUADRO 5.	Resistividad promedio OHM.cm	40
CUADRO 6.	Cuadro de Estatura de Personas	56
CUADRO 7.	Cuadro de Peso de Operadores	56
CUADRO 8.	Diagrama de flujo de actividades de investigación.....	57
CUADRO 9.	Requerimientos de tipo de conductor según el material a utilizar clase I....	60
CUADRO 10.	Requerimientos de tipo de conductor según el material a utilizar clase II. .	61
CUADRO 11.	Características físicas Franklin	63
CUADRO 12.	Características técnicas Franklin.....	63
CUADRO 13.	Diagrama de flujo de actividades de investigación.....	67