



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA
DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA OESTE CON BASE EN LA NORMATIVA IEEE STD. 80**

Carlos Daniel Fuentes Orozco

Asesorado por el MBA Ing. Irwin Aron López Navarro

Guatemala, junio de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA
DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA OESTE CON BASE EN LA NORMATIVA IEEE STD. 80**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS DANIEL FUENTES OROZCO

ASESORADO POR EL MBA ING. IRWIN ARON LÓPEZ NAVARRO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JUNIO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Edgar Yanuario Laj
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Brian Enrique Chicol Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA OESTE CON BASE EN LA NORMATIVA IEEE STD. 80

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica con fecha 15 de octubre de 2022.



Carlos Daniel Fuentes Orozco



EEPFI-PP-1705-2022

Guatemala, 9 de noviembre de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA OESTE CON BASE EN LA NORMATIVA IEEE STD. 80**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Diseño de proyectos eléctricos: aspectos técnicos, sociales, legales, ambientales y financieros. - Tratados, convenios y normativa aplicada al sector eléctrico**, presentado por el estudiante **Carlos Daniel Fuentes Orozco** carné número **201801269**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Irwin Aron López Navarro
Asesor(a)

Irwin Aron López Navarro
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO No. 13468

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Alvaréz Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-1430-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA OESTE CON BASE EN LA NORMATIVA IEEE STD. 80**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Daniel Fuentes Orozco**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, followed by a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, noviembre de 2022



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.21.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA OESTE CON BASE EN LA NORMATIVA IEEE STD. 80**, presentado por: **Carlos Daniel Fuentes Orozco** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Firmado digitalmente por AURELIA ANABELA CORDOVA ESTRADA Fecha: 14/06/2023 08:23:14 p.m. Razón: Orden de impresión Ubicación: Facultad de Ingeniería, USAC.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, junio de 2023

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2023 Correlativo: 21 CUI: 2992219540101

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por bendecirme, guiarme y darme la sabiduría necesaria para alcanzar esta meta. Sin él no lo hubiese logrado.

Mis padres

Carlos Fuentes y Mayda Orozco, pilares fundamentales en mi vida, les dedico este logro, en reconocimiento a todo el apoyo y sacrificio puesto para que yo pudiera estudiar, se merecen esto y mucho más.

Mis abuelos

Rómulo Orozco, Rosa Miranda, Victoriano Fuentes y Bernarda Orozco, por sus sabias enseñanzas y consejos durante toda mi vida.

Mi familia

En general, por haberme acompañado y apoyado a lo largo de esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la alma <i>mater</i> que permitió nutrirme de conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Mis amigos	Por su apoyo incondicional a lo largo de estos años de estudio, en especial a: Esaú Can, Manuel López y Pablo Bravo.
Mi asesor	MBA Ing. Irwin López, por haberme guiado durante el desarrollo de mi trabajo de graduación.
Transportadora de Energía Centroamérica (TRECSA)	de de S.A. Por haberme abierto las puertas y permitirme llevar al cabo mi trabajo de graduación

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Subestación eléctrica	17
7.2. Voltajes soportados por un ser humano	18
7.2.1. Voltaje de paso	19
7.2.2. Voltaje de contacto	20
7.2.3. Voltaje de malla y transferido.....	21

7.3.	El suelo	21
7.3.1.	Resistividad eléctrica del suelo	22
7.3.2.	Mediciones de resistividad	23
7.3.3.	Modelo estratificado del suelo homogéneo	24
7.3.4.	Modelo biestratificado del suelo	24
7.3.5.	Efecto de una capa de material sobre el terreno	25
7.4.	Elementos de un sistema de puesta a tierra	26
7.4.1.	Conductores	26
7.4.2.	Electrodos	26
7.4.3.	Conectores y accesorios	27
7.5.	Consideraciones para el diseño de un sistema de aterramiento	27
7.5.1.	Importancia de un sistema de aterramiento	28
7.5.2.	Aspectos básicos de diseño	28
7.6.	Computación de la “I” de diseño de malla	30
7.6.1.	Factor de decremento	30
7.6.2.	Factor de división de la “I” de falla.....	30
7.6.3.	Factor X/R	31
7.6.4.	Factor de seguridad por crecimiento de la subestación	31
7.7.	Evaluación de la resistencia de aterrizaje de una subestación	32
7.8.	Normas aplicadas al diseño de sistemas de aterramiento	33
7.8.1.	IEEE Std. 80.....	33
7.8.2.	IEEE Std. 81.....	33
7.8.3.	Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDOID).....	34
7.9.	Generalidades del software CYMGRD.....	34
7.9.1.	Módulo de análisis de suelo y de seguridad.....	34
7.9.2.	Módulo de análisis de malla	35

7.9.3.	Módulo de graficado	36
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	39
9.	METODOLOGÍA.....	43
9.1.	Características del estudio	43
9.2.	Unidades de análisis	44
9.3.	Variables.....	44
9.4.	Fases del estudio	47
9.4.1.	Fase 1. Revisión bibliográfica	47
9.4.2.	Fase 2. Recolección de datos en campo.....	47
9.4.3.	Fase 3. Desarrollo del estudio en CYMGRD	48
9.4.4.	Fase 4. Análisis de resultados	48
9.5.	Resultados esperados	48
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	49
11.	CRONOGRAMA.....	51
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	53
	REFERENCIAS	55
	APÉNDICES	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Esquema de solución.....	16
Figura 2.	Tensión de contacto, paso, lazo y transferida en una subestación19
Figura 3.	Modelo equivalente del suelo.....	.22
Figura 4.	Arreglo de Wenner23
Figura 5.	Modelo biestratificado del suelo o de dos capas.....	.25

TABLAS

Tabla 1.	Valores máximos permitidos de "r" en una subestación según normativa guatemalteca.....	32
Tabla 2.	Variables.....	44
Tabla 3.	Tensión de contacto	45
Tabla 4.	Tensión de paso	46
Tabla 5.	Tensión de superficie.....	46
Tabla 6.	Resistencia de puesta a tierra	47
Tabla 7.	Proyección del tiempo de trabajo.....	51
Tabla 8.	Desglose de los recursos necesarios para la investigación.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
I	Corriente eléctrica
GPR	Elevación de potencial a tierra
C_s	Factor de disminución
kg	Kilogramos
kV	Kilovoltio
MVA	Megavoltamperio
m	Metro
Ω	Ohmios
Ω -cm	Ohmios centímetro
Ω -m	Ohmios metro
r	Resistencia eléctrica
ρ	Resistividad eléctrica
ρ_s	Resistividad eléctrica de la capa de material superficial
t_s	Tiempo de impacto de la corriente de falla
E_t	Voltaje de contacto
E_{t-50kg}	Voltaje de contacto para un individuo de 50kg
E_{t-70kg}	Voltaje de contacto para un individuo de 70kg
E_m	Voltaje de malla
E_s	Voltaje de paso
E_{s-50kg}	Voltaje de paso para un individuo de 50kg
E_{s-70kg}	Voltaje de paso para un individuo de 70kg
E_{trrd}	Voltaje transferido

GLOSARIO

CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
Electrodo de tierra	Conductor embebido en la tierra y utilizado para recolectar las corrientes de tierra o disipar corrientes hacia la tierra.
EIME	Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
EORM	Escuela Oficial Rural Mixta
GPR	Elevación de potencial de la tierra, máxima tensión que la malla de tierra de una instalación puede alcanzar relativa a un punto de tierra distante que se supone que está al potencial de tierra remoto.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
Material superficial	Material instalado sobre el suelo que consta de roca, grava, asfalto o materiales hechos por el hombre, entre otras.
PET	Proyecto Expansión Transmisión

Sistema de aterramiento	También conocido como sistema de puesta a tierra y es el conjunto de varillas y conductores de cobre enterrados a determinada profundidad en una instalación para proveer de un circuito de baja impedancia para la circulación de corrientes de falla del sistema
Tensión de paso	diferencia de tensión en la superficie, experimentada por una persona con los pies separados una distancia de un metro y sin estar en contacto con ningún objeto aterrizado.
Tensión de contacto	Diferencia de tensión entre el GPR y la tensión en la superficie en el punto en donde una persona se para, mientras al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura puesta a tierra.
Tierra	Conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por la cual un circuito eléctrico o equipo es conectado a la tierra o a un cuerpo conductor de tamaño relativamente grande que sirve en lugar de la tierra.
TRECSA	Transportadora de Energía de Centroamérica S.A.
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala

RESUMEN

Una de las partes más importantes en el diseño de una subestación es el sistema de puesta a tierra, un correcto diseño de este sistema es de vital importancia, ya que de la eficiencia de esta depende la estabilidad del sistema eléctrico, la protección de los equipos e infraestructura instalada dentro de esta, pero muy en especial, la seguridad de las personas que se encuentren dentro y en los alrededores de la subestación, al ser esta última la principal prioridad.

Por lo expuesto anteriormente, el presente diseño de investigación propone el llevar al cabo un análisis al sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste, la cual forma parte del anillo Metropacífico del Plan de Expansión de Transmisión PET-01-2009, mediante el uso de un software especializado y guiándose con base en la metodología y criterios establecidos en la normativa IEEE Std. 80-2000; para, de esa manera, garantizar que dicho sistema sea seguro y que esta llevará al cabo con éxito las funciones para las cuales ha sido diseñada.

1. INTRODUCCIÓN

La subestación Guatemala Oeste se conforma como una subestación de transformación de 230/69 kV, con una capacidad de 195 MVA. Forma parte del anillo Metropacífico del Plan de Expansión de Transmisión PET-01-2009, el cual tiene como objetivo principal el proveer de energía eléctrica a la carga más grande del país: el departamento de Guatemala. Por lo que el correcto funcionamiento de toda la infraestructura que conforma dicho anillo es de vital importancia.

Originalmente la construcción de esta instalación se tenía planificada llevarla a cabo en la aldea La Ciénega, San Raymundo, Guatemala; inmediatamente de haberse empezado a ejecutar el proyecto la población aledaña al mismo se opuso a que se continuara su construcción, los pobladores argumentaban que la ubicación de esta instalación estaba muy próxima a las viviendas, cultivos y a la escuela de la comunidad, por lo que consideraban que la misma representaba un peligro para su salud, la de sus cultivos y la de sus hijos. Dada esta problemática se tuvo que reubicar la subestación, y, por ende, los diseños originales tuvieron que readecuarse a las condiciones de la nueva ubicación.

A raíz de lo anteriormente expuesto surge la necesidad de llevar al cabo la presente investigación, en el cual se propone ejecutar un análisis del nuevo diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación en cuestión, al tomar en consideración las nuevas condiciones del lugar, con el objetivo principal de poder garantizar un diseño seguro que cumpla con lo establecido en las normativas que rigen su diseño, apoyándose en el uso de un software especializado.

Hasta el momento no se cuenta con una tesis a nivel nacional que posea las características del estudio propuesto, especialmente en lo que concierne al uso de un programa especializado para llevar al cabo este análisis, por lo que será un tema de alto interés, tanto para futuras investigaciones aplicadas a otras instalaciones, como para el personal que se desenvuelve profesionalmente en el área de diseño de sistemas de puesta a tierra de subestaciones eléctricas.

El diseño de investigación se conforma de doce capítulos, ordenados de la siguiente manera:

Como primera parte, se presentan los antecedentes relacionados con el estudio, posteriormente se expone el planteamiento del problema y se exhiben las razones que justifican la importancia de llevarlo al cabo, así como también los objetivos que se buscan alcanzar mediante el mismo. También entre el contenido del presente documento se presentan las necesidades que se buscan a cubrir con el estudio propuesto y el esquema de solución para resolver la problemática planteada, así mismo, se adjunta la teoría que fundamentará el desarrollo del trabajo, como el desglose del índice propuesto para el informe final. Finalizando, se describe la metodología que se empleará, se adjunta el cronograma de trabajo y el desglose de los recursos a emplearse durante la investigación.

2. ANTECEDENTES

En cuanto a, el AMM (2021) recuerda que, a principios de la década de 1990, Guatemala pasaba por un problema de escasez de electricidad, dada la creciente demanda de energía por parte de la industria y la población. En aquellos días esta problemática provocó que la energía eléctrica se racionara de manera horaria.

En cuanto a, Bardales, Castañón & Herrera (2019) explican que factores como la reducción en el promedio de precipitación pluvial anual, registrado entre 1991-1993, fases cálidas de El Niño provocaron que los problemas del sector eléctrico guatemalteco empeoraran.

En cuanto a, El AMM (2021) considera que a crisis de racionamiento en el suministro eléctrico no era un síntoma transitorio derivado del estado climático sino la consecuencia de la falta de inversión suficiente en la generación de energía eléctrica. Sumado esto hay que considerar que ya había pasado un gran lapso en el cual se había invertido en el sistema de transporte nacional, por lo que también era notorio la deficiencia del sistema de transporte para ese entonces.

A raíz de lo expuesto, la CNEE (2008) procedió a realizar el Plan de Expansión del Sistema de Transporte (PET) para satisfacer las necesidades urgentes del Sistema Nacional Interconectado.

El PET proponía ampliaciones en la capacidad de transformación y modificación de la configuración de diversas subestaciones ya existentes, así

como también la construcción de nuevas líneas de transmisión de tal forma lograr el tener un sistema de transporte robusto. Para ello se planteó un sistema de transporte conformado por cinco anillos, ubicados a lo largo del territorio nacional. Estos anillos son: Anillo Occidental, Anillo Oriental, Anillo Atlántico, Anillo Hidráulico y Anillo Metropacífico.

Entre las obras que conforman el Anillo Metropacífico se encuentra la subestación Guatemala Oeste, la cual se tenía planeado originalmente construirse en la aldea la Ciénaga, en el municipio de San Raymundo, Guatemala. Luego de haber iniciado la construcción de dicha instalación los pobladores de esta comunidad se opusieron a que se continuara su construcción.

En cuanto a, Waqib´ Kej, Coordinación y Convergencia Nacional Maya (2012) plantean que la razón principal por la cual los pobladores se oponían al proyecto era porque este se ubicaba exactamente en el centro de la comunidad, aledaño a sus casas y terrenos para cultivo, pero principalmente porque estaba instalada a menos de diez metros de la E.O.R.M. Manuel Martínez Búcaro.

Dada esta problemática, la EIME de la USAC llevó al cabo un estudio de la estimación de los niveles de radiaciones no ionizantes en las adyacencias de la subestación en cuestión y la escuela de la aldea.

Según la EIME (2012) los resultados obtenidos de las mediciones de las radiaciones no ionizantes en el lugar no exceden los límites establecidos en el Reglamento para el Establecimiento y control de Radiaciones no Ionizantes y sus Reformas.

Para llevar a cabo el presente estudio se consultará y revisarán diversas fuentes bibliográficas. Rodríguez (2002) realiza la revisión de la metodología

usada para el sistema de aterrizaje a tierra en subestaciones de gran capacidad, con especial enfoque en la seguridad, al desarrollar dictámenes para un diseño fehaciente.

El IEEE (2013) establece una metodología para diseño de sistemas de aterrizaje a tierra de subestaciones de CA, así como también los límites de seguridad de los potenciales que pueda haber en una subestación al presentarse una falla.

Calderón (2015) presenta un método para modelar y analizar de sistemas de aterrizaje a tierra de subestaciones de distribución, bajo las consideraciones de la norma IEEE Std. 80, al tomar como base la utilización de softwares especializados dada las limitaciones del estándar que tradicionalmente se utiliza, en especial en la utilización de modelos de suelo no homogéneos y aterrizajes a tierra con configuraciones geométricas irregulares.

Sin embargo, en Guatemala no se tiene documentado ningún análisis de un sistema de aterrizaje a tierra a nivel maestría o doctorado, por lo que este estudio resulta ser de mucho valor por la cantidad de conocimiento que aportará para futuras investigaciones en esta línea de investigación a nivel nacional.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los aspectos principales en el diseño de una subestación eléctrica de potencia es la de disponer de un sistema de puesta a tierra adecuado, ya que este suministra la adecuada protección al personal y al equipo instalado dentro de la subestación, al momento de presentarse una falla a tierra en la instalación. De no contar con un correcto diseño las consecuencias podrían ser catastróficas.

- Contexto general

La subestación Guatemala Oeste forma parte del Anillo Metropacífico del Plan de Expansión de Transmisión 2008 – 2018. Este anillo tiene como objetivo principal el abastecer de energía eléctrica al centro de carga más grande del país, el cual es el departamento de Guatemala, por lo que el correcto funcionamiento de las instalaciones que conforman este anillo es de suma importancia para garantizar de suministro de energía a la carga que alimenta.

A raíz de la reubicación del proyecto la seguridad del sistema de puesta a tierra de la subestación es incierto. Hasta el momento no se ha intentado dar solución a esta problemática, por lo que el presente trabajo es el primero en abordarlo.

- Descripción del problema

Originalmente la construcción de la subestación Guatemala Oeste se estaba construyendo en la aldea la Ciénaga, San Raymundo, Guatemala. Dada la oposición social mostrada por la población aledaña a que se continuará con el

proyecto se vio en la necesidad de reubicar este en la aldea Sajcavillá, San Juan Sacatepéquez, Guatemala.

Dada esta reubicación se tuvieron que modificar todos los diseños originales del proyecto y readecuarlos a las condiciones del nuevo terreno. Actualmente se posee la incerteza en que el sistema de puesta a tierra de la subestación sea seguro y que cumpla con lo establecido en la regulación, tanto nacional, como internacional que rige su diseño.

Las consecuencias que pueden presentarse al no verificar que la red de puesta a tierra cumpla con los aspectos de seguridad que la regulación establece se verá reflejado al momento en que ocurra una falla dentro de la subestación o en las líneas de transmisión conectadas a ella y no haya una correcta disipación de las corrientes de falla resultantes, lo que puede provocar daños a los equipos dentro de la subestación, la ocurrencia de accidentes eléctricos del personal operativo e inclusive dejar fuera de servicio a este nodo del sistema.

- Formulación del problema

Se podrá resolver la problemática aquí planteada a partir de darle respuesta a las siguientes preguntas

- Pregunta central

¿Cómo validar que el diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste cumple con los criterios de seguridad establecidos por la normativa que rige su diseño?

- Preguntas auxiliares

Para responder a la interrogante anteriormente planteada se deberán de contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es el valor de la tensión de contacto dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std? 80?
- ¿Cuál es el valor de la tensión de paso dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std? 80?
- ¿Cuál es el valor de la tensión de superficie dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std? 80?
- ¿Cuál es el valor de la resistencia de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma NTDROID?

- Delimitación del problema

Es importante destacar que esta investigación se limita a analizar que el actual diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste sea seguro, al emplear como base la metodología propuesta en la normativa IEEE Std. 80 y evaluar los resultados obtenidos a partir de las consideraciones que esta normativa establece y demás normas nacionales que rigen el diseño de un sistema de puesta a tierra en Guatemala.

Para el desarrollo del estudio propuesto se llevará al cabo la recolección de datos en campo de ciertos parámetros que deben considerarse en el diseño y

análisis de un sistema de puesta a tierra. Esta recolección de datos se realizará mediante medición directa y la misma se llevará al cabo en el área donde actualmente se construye la subestación, ubicada en la aldea Sajcavillá, San Juan Sacatepéquez, Guatemala.

4. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación se justifica en la línea de investigación de diseños de proyectos eléctricos: aspectos técnicos, sociales, legales, ambientales y financieros; del área de tratados, convenios y normativa aplicada al sector eléctrico, de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de una subestación de potencia de CA es el sistema de puesta a tierra, pues este cumple con las funciones de: proporcionar un circuito de baja impedancia para la circulación de corrientes de tierra debidas a fallas en el sistema, suministrar una adecuada protección al personal y al equipo ubicado dentro y fuera de la subestación, dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio de energía eléctrica.

La subestación Guatemala Oeste forma parte del Anillo Metropacífico del Plan de Expansión de Transmisión 2008 – 2018. Este anillo tiene como objetivo principal el abastecer de energía eléctrica al centro de carga más grande del país, el cual es el departamento de Guatemala.

Por las razones anteriormente mencionadas es de suma importancia la realización de un análisis del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste, para poder garantizar que la misma cumplirá de manera correcta las funciones para las cuáles ha sido diseñada y poder garantizar el suministro de energía eléctrica continuo al conjunto de cargas que alimentará y al sistema eléctrico en general.

Una vez finalizado el presente trabajo se podrá obtener la certeza en que el sistema de puesta a tierra de la subestación cumple con los requerimientos establecidos en la normativa IEEE Std. 80 y por ende la misma garantizará un correcto funcionamiento en el momento en que la instalación entre en operación.

Así mismo, el trabajo proporcionará a futuras investigaciones una metodología para el análisis de sistemas de puesta a tierra de subestaciones de potencia en CA al emplear como base la normativa IEEE Std. 80 y usar para el análisis un software especializado, que para este caso es el software CYMGRD.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Analizar el diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste con base en la normativa IEEE Std. 80 con el software CYMGRD.

5.2. Específicos

- Comprobar que el valor de la tensión de contacto de la subestación Guatemala Oeste se encuentre dentro de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 80.
- Validar que el valor de la tensión de paso de la subestación Guatemala Oeste se encuentre dentro de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 80.
- Verificar que el valor de la tensión de superficie de la subestación Guatemala Oeste se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 80.
- Constatar que el valor de la resistencia de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste se encuentre dentro de los límites establecidos en la norma NTDOID.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Actualmente se requiere poseer la certeza de que el sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste sea seguro y que el mismo vaya a realizar correctamente las funciones para los cuales fue diseñado, previo a la puesta en operación de esta instalación.

Para solventar esta necesidad, el presente diseño de investigación propone la siguiente solución: Primero será necesario llevar al cabo la toma de mediciones de la resistividad del suelo en el terreno donde actualmente se ubica el proyecto. Posteriormente, con base en los planos del actual diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación, realizar el modelamiento de este en el software que se empleará en el estudio.

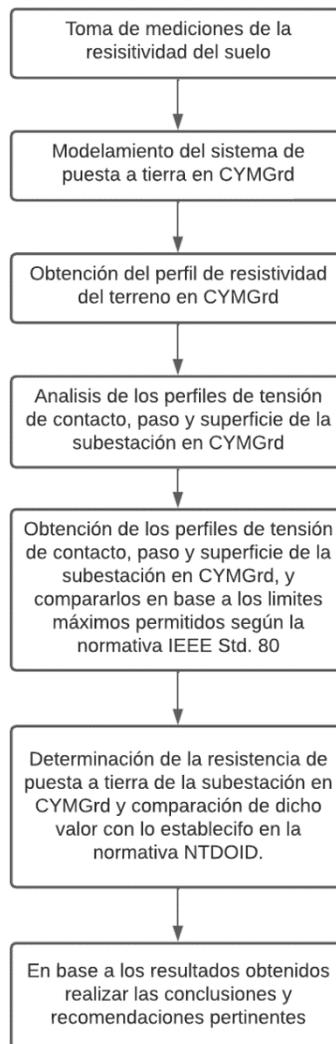
A partir de las mediciones de resistividad se procederá obtener el perfil de resistividad del suelo. Obtenido el perfil de resistividad del terreno se puede realizar el análisis del sistema de puesta a tierra a través del software. Al realizar el análisis mediante el software se deberá analizar los valores obtenidos de la resistencia de puesta a tierra, las tensiones máximas de contacto, paso y superficie.

Para evaluar las tensiones de contacto, paso y superficie en lo largo y ancho de la subestación se deberán obtener los perfiles de tensión en diferentes áreas de esta. Posteriormente con los perfiles de tensión obtenidos y la resistencia de puesta a tierra de la subestación se deberán de comparar con lo establecido por la normativa IEEE Std. 80 y la NTD0ID, respectivamente.

Finalmente, con base en el análisis de resultados realizados obtener las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

Figura 1.

Esquema de solución



Nota. En la figura se presenta el esquema de solución propuesto anteriormente, de forma gráfica. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

7. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presenta toda la teoría que fundamenta el trabajo a desarrollarse.

7.1. Subestación eléctrica

Trashorras (2015) define a una subestación eléctrica como la instalación conformada por equipos eléctricos dedicados a realizar la función de transformación de un nivel de tensión a otro, transformación de la frecuencia, rectificación, compensación reactiva o para realizar derivaciones al sistema.

Las subestaciones eléctricas pueden clasificarse de acuerdo con la función que realizan:

- Subestación de transformación de tensión se emplea para elevar/reducir la tensión.
- Subestación de maniobra se emplea para realizar derivaciones al sistema de potencia.
- En función del nivel de tensión con la que operan
- Subestación de transporte operan a un nivel por arriba de 69 Kv
- Subestación de subtransmisión de energía opera Arriba de 34.5 Kv a 69 Kv

- Subestación de distribución de energía opera de 13.8 Kv y 34.5 Kv
- Acorde al tipo de aislamiento:
- El aire es el medio de aislamiento que se usa en las conocidas subestaciones convencionales.
- El SF6 es el aislamiento que se usa en algunas subestaciones. Es un gas inodoro, incoloro y no inflamable conocido como Hexafluoruro de azufre - SF6-. Dadas las características de este gas se considera un mejor medio aislante que permite que las subestaciones sean más compactas.

Y de acuerdo con la disposición física de las barras de la subestación, en Guatemala predominan las siguientes:

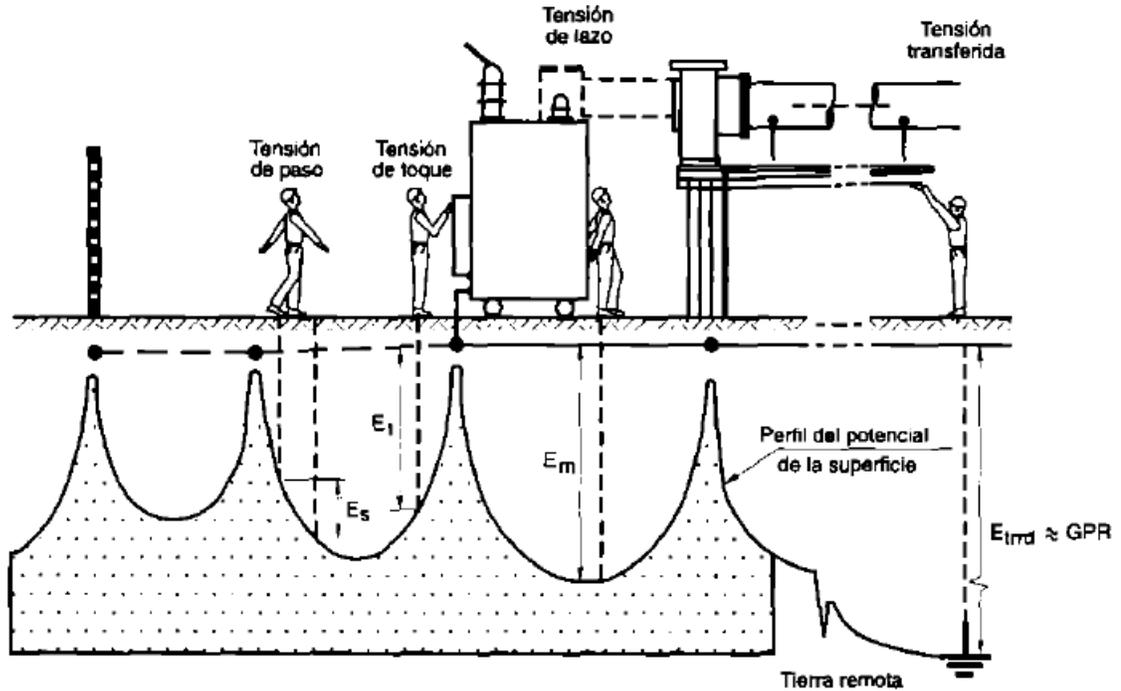
- Configuración de barra simple
- Configuración de barra principal y barra de transferencia
- Configuración de doble barra
- Configuración de interruptor y medio

7.2. Voltajes soportados por un ser humano

En las figuras 2 se ilustran los escenarios comunes de impacto eléctrico que una persona puede experimentar dentro de una subestación. El voltaje de paso E_s , voltaje de contacto E_t , voltaje de lazo E_m y voltaje transferido E_{trrd} son los escenarios que se muestran a continuación:

Figura 2.

Tensión de contacto, paso, lazo y transferida en una subestación



Nota. En las figuras se ilustran los escenarios comunes de impacto eléctrico que una persona puede experimentar dentro de una subestación. Obtenido de Villegas (2003). *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión.*

7.2.1. Voltaje de paso

Choquehuanca (2019) define el voltaje de paso como la diferencia de voltaje entre las extremidades inferiores de un individuo. Al momento de circular una "I" de falla a través del sistema de aterramiento aparecen líneas equipotenciales sobre el terreno de la subestación, si un individuo se para justamente sobre dos líneas equipotenciales distintas experimentará un voltaje de paso, si en caso la misma se ubica sobre una sola línea equipotencial no experimentará dicha tensión.

Se presentan a continuación las ecuaciones que la normativa IEEE Std. 80 – 2000 emplea para determinar el voltaje máximo de paso soportada por personas de 50Kg y 70Kg

$$E_{s-50kg} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

Y

$$E_{s-70kg} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Donde.

t_s representa el tiempo de impacto de la corriente.

C_s factor de disminución, que contempla el efecto del material superficial sobre el terreno de la subestación.

ρ_s valor de resistividad del material sobre el terreno de la subestación; valores típicos entre 2 000 Ω m y 5 000 Ω m son los que normalmente se consideran.

7.2.2. Voltaje de contacto

El IEEE (2000) define el voltaje de contacto como la resta del voltaje entre el incremento del GPR y el voltaje de la superficie donde un individuo pone su mano.

Similar al caso anterior, se presentan a continuación las ecuaciones que la normativa IEEE Std. 80-2000 emplea para determinar el voltaje máximo de contacto soportada por una persona de 50kg y uno de 70kg:

$$E_{t-50kg} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

Y

$$E_{t-70kg} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Es importante mencionar que la descripción de cada variable es la misma a la presentada en las ecuaciones de la tensión de paso.

7.2.3. Voltaje de malla y transferido

Sipaque (2019) define el voltaje de malla como el producido al momento que el voltaje de contacto aumenta al máximo y que pueda encontrarse dentro de una de las mallas de la red de aterramiento de la subestación.

Respecto a la tensión transferida, Sipaque (2019) la define como un caso especial del voltaje de tacto y aparece en el momento en que el aumento del voltaje de tierra es enviado hacia fuera o dentro de la subestación.

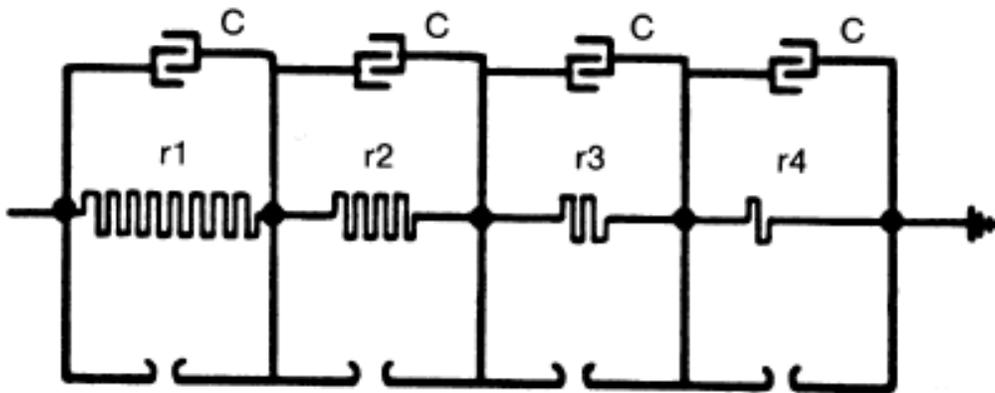
7.3. El suelo

La IEEE (2000) establece que el comportamiento de un electrodo en el suelo puede ser modelado mediante un circuito equivalente presentado en la Figura 3. El circuito equivalente muestra que el suelo se comporta como un conductor con un valor determinado de resistencia, r , y como un material aislante.

Si no se consideran ondas de altas frecuencias y frente abrupto, la corriente del circuito posee un valor casi nulo con respecto a la “I” de fuga, y la tierra puede modelarse como un circuito puramente resistivo.

Figura 3.

Modelo equivalente del suelo



Nota. La corriente del circuito posee un valor casi nulo con respecto a la “I” de fuga. Obtenido de IEEE (2000). *Guía IEEE para la seguridad en la puesta a tierra de subestaciones de CA.*

7.3.1. Resistividad eléctrica del suelo

Reyes y Cruz (2016) definen a la resistividad eléctrica (ρ) del suelo como una medida de la oposición al paso de la corriente que este componente presenta en los diferentes estratos que lo conforman; el valor de este parámetro se obtiene a partir de aproximaciones obtenidas mediante mediciones en campo. Las unidades que definen a la resistividad son el $\Omega \cdot m$ u $\Omega \cdot cm$

Es importante hacer mención que el valor de la ρ del terreno depende de varios factores que deben de considerarse al momento de ser determinado su valor y usarlo en el diseño de sistemas de aterramiento. Los factores son: el tipo

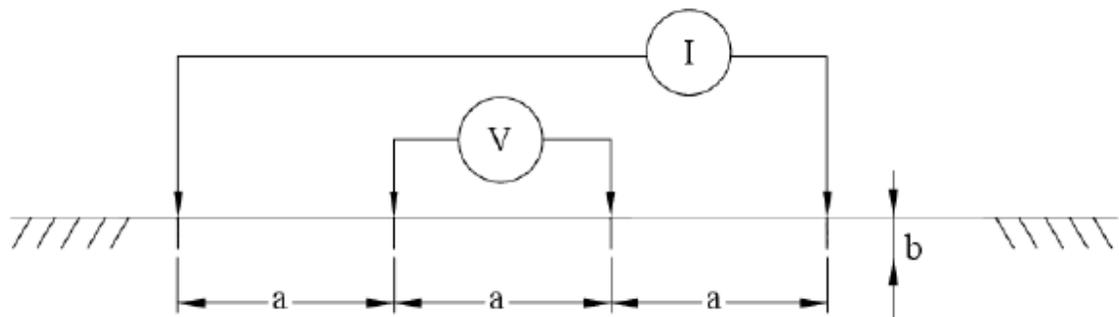
de suelo, humedad, la temperatura, salinidad, granularidad y las variaciones estacionales.

7.3.2. Mediciones de resistividad

Para medir la resistividad eléctrica del suelo existen diversos métodos, la normativa IEEE Std. 81 presenta dos metodologías: método de las tres picas y el método de cuatro picas, existen dos variaciones para esta última metodología: el arreglo de Schlumberger-Palmer y el arreglo de Wenner, este último es el más empleado.

Figura 4.

Arreglo de Wenner



Nota. Tal y como se exhibe en la Figura 4, el arreglo de Wenner consiste en introducir cuatro picas en el suelo, espaciadas equidistantemente a una determinada distancia “a” y a una hondura de “b”. Obtenido de IEEE (2012). *Guía IEEE para medir la resistividad, la impedancia y los potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de puesta a tierra.*

Villegas (2003) amplia más la información respecto al funcionamiento de este método e indica que las dos picas externas se encargan de inyectar una señal de corriente alterna a través del suelo y las dos varillas interiores se

encargan de medir el voltaje generado por el paso de corriente. A partir de las mediciones tomadas, se divide el voltaje con la corriente inyectada para cuantificar la resistencia eléctrica del suelo. Cabe destacar que al realizarse mediciones mediante el arreglo de Wenner a cierta separación de electrodos lo que en verdad se obtiene es la cuantificación a la oposición al paso de la corriente del suelo a una hondura “a”.

Villegas (2003) recomienda que al momento de computar el valor de ρ del terreno se realicen diversas mediciones en diferentes puntos, para hacerse con un modelo del suelo mucho más cercano al terreno real, dado que el suelo generalmente tiene una composición heterogénea.

7.3.3. Modelo estratificado del suelo homogéneo

En ocasiones, al realizar la toma de mediciones de ρ del terreno a diferentes honduras y analizarlas se identifican que estas no varían considerablemente entre sí, si este fuera el escenario de un conjunto de mediciones, se podría considerar el terreno en análisis como un terreno de composición homogénea o uniforme.

Debido a la simplicidad de cálculo y análisis que conlleva el considerar un modelo de suelo homogéneo, este modelo es empleado para modelar terrenos de subestaciones pequeñas, en donde no se requiere demasiada precisión en el modelamiento del suelo.

7.3.4. Modelo biestratificado del suelo

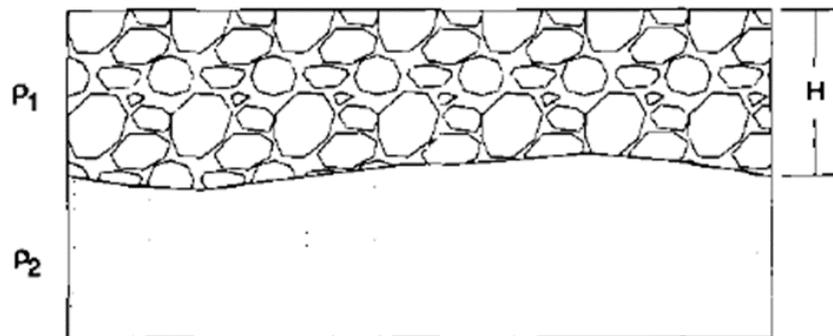
Villegas (2003) resalta que en la ejecución de sistemas de aterramiento el realizar un modelado preciso del terreno en donde se construirá la subestación

es de suma importancia, pero el uso de un modelo multicapas es económicamente injustificable y técnicamente casi imposible el poder analizarlas, es por ello por lo que en la pluralidad de casos se emplea un modelo de suelo biestratificado, el cuál proporciona al diseñador la precisión necesaria para el diseño fiable de un sistema de aterramiento.

El modelo biestratificado del suelo consiste en una capa de hondura finita "H" y resistividad ρ_1 , y una segunda capa de hondura infinita y resistividad ρ_2 .

Figura 5.

Modelo biestratificado del suelo o de dos capas



Nota. Como se visualiza en la Figura 5 dada esta característica al modelo también se le conoce como modelo de dos capas. Obtenido de Villegas (2003). *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión.*

7.3.5. Efecto de una capa de material sobre el terreno

Una práctica muy empleada en la edificación de subestaciones eléctricas es la de agregar una capa superficial de material de alta ρ encima del terreno. Generalmente se emplea una capa de grava con un grosor de hasta 0.15 metros.

El IEEE (2000) destaca que entre las funciones para la cuál es aplicada este material superficial es la de aumentar la resistencia entre los pies de una persona y el suelo de la subestación, y la de demorar la desaparición de la humedad contenida en el terreno.

7.4. Elementos de un sistema de puesta a tierra

Se exhiben a continuación los elementos que conforman un sistema de enterramiento.

7.4.1. Conductores

Martin (2003) comenta que los conductores utilizados en la construcción de sistemas de aterramiento son de conductor de cobre, dado que este material ofrece una mejor conductividad, tanto térmica como eléctrica y, así mismo, se resiste a la corrosión. El calibre mínimo es de 4/0 AWG, esto debido a factores mecánicos más que por eléctricos, ya que eléctricamente puede emplearse calibres más pequeños.

7.4.2. Electrodo

Los electrodos son varillas empleadas para alcanzar zonas más profundas y húmedas del suelo con menor resistividad. Martín (2003) señala que estas se emplean en terrenos donde no existe vegetación y que están completamente expuestas a los rayos del sol.

Este mismo autor amplía que existen tres tipos de electrodos: los fabricados con tubos, los de varillas Copperweld y los de varillas de fierro galvanizado. En el caso de estas últimas son empleadas en suelos que poseen

una constitución química que no ataque a este material. En terrenos más corrosivos se emplean las varillas Copperweld, las cuales, debido a su constitución física ofrece diversas ventajas con respecto a los otros tipos de electrodos, entre las cuales se pueden mencionar: es resistente a la corrosión, excelente resistencia mecánica, buena conductividad eléctrica, entre otros.

7.4.3. Conectores y accesorios

Martín (2003) los define como Los elementos empleados para unir el sistema de aterramiento a los diferentes electrodos, estructuras, neutros de los equipos, entre otros. Entre los tipos de conectores empleados se encuentran:

- Conectores atornillados
- Conectores a presión
- Conectores soldados

Todos los tipos de conectores deben poder soportar la corriente de la red de tierra en forma continua. (p. 199)

7.5. Consideraciones para el diseño de un sistema de aterramiento

Principalmente debemos de conocer el por qué es importante el contar con un adecuado sistema de aterramiento en una subestación, es por ello por lo que se presentarán las funciones que realiza dicho sistema.

Posteriormente se presentarán las consideraciones principales para diseñar sistemas de aterramiento eficientes, consideraciones que la bibliografía consultada presenta basado en lo estipulado en la normativa IEEE Std. 80.

7.5.1. Importancia de un sistema de aterramiento

La importancia de poseer un sistema de aterramiento en una subestación radica en las siguientes funciones que realiza:

- Proveer un circuito de impedancia baja para que las corrientes de cortocircuito puedan circular a través de este.
- Evitar que, al circular “I” de cortocircuito se produzcan diferencias de tensión entre distintas áreas dentro de la subestación y pueda poner en riesgo el bienestar del personal.
- Permitir el funcionamiento correcto de los relevadores del sistema para la eliminación de fallas.
- Proveer buena confiabilidad y continuidad al servicio eléctrico.

7.5.2. Aspectos básicos de diseño

Villegas (2003) indica que el sistema de aterramiento de una subestación debe de estar conformado por un conductor continuo que rodee toda la periferia de la subestación, se debe de procurar encerrar la mayor zona posible. Lo que nos permite esta configuración es la de evitar que se concentre la corriente en grandes cantidades y, por ende, se evitan grandes diferencias de tensión dentro de la instalación.

Recomienda que dentro del conductor continuo que rodea a la subestación se deben de colocar conductores en forma de líneas paralelas, y tratar de ubicarlas lo más cercanas posible a las estructuras y equipo de patio, para que de esa forma se tengan las conexiones a tierra más cortas posibles.

Con respecto a los electrodos, indica que los mismos pueden ser ubicados en el perímetro y aristas del sistema de aterramiento. Así mismo, pueden ser instalados próximos a las protecciones eléctricas de la subestación.

Así mismo, en lo que respecta a la extensión y alcance de la malla de aterramiento, indica que la misma debe de cubrir completamente toda la extensión de la subestación y, en ciertos casos, la misma puede extenderse por fuera del área de esta. También indica que una práctica muy recurrente es la de instalar varios conductores o conductores de mayor calibre en áreas donde la corriente pueda concentrarse bastante, como en el caso de los puntos de aterrizaje de los bancos de compensación reactiva y de los transformadores.

Adicionalmente a lo indicado, recomienda la instalación de anillos equipotenciales de tierra en lugares donde sean frecuentados por el personal operativo de la subestación, como por ejemplo en las cercanías de los seccionadores.

Como consideración final, en la creación de sistemas de aterramiento, recomienda considerar el colocar un material superficial de alta resistividad en toda la zona de la subestación, esto al considerar los beneficios que anteriormente fueron expuestos. Así mismo recomienda, que si lo que se busca es reducir la resistencia de aterrizaje de la malla, se recomienda la conexión de los hilos de guarda de las líneas a la malla aterramiento.

7.6. Computación de la “I” de diseño de malla

Martin (2003) señala que para cuantificar la “I” de diseño de la malla de aterramiento se necesita, primero: identificar la falla que genere el mayor valor de “I” en la malla de aterrizaje, esto puede determinarse mediante los estudios de cortocircuito. Segundo: se debe de calcular por medio del apoyo de equipo de computación el valor máximo de la “I” simétrica de falla a tierra en la malla de aterramiento al instante de iniciarse la falla.

Hay que considerar que al computar la “I” de diseño de la malla de aterramiento se emplean diferentes factores de corrección, estos se manifiestan a continuación:

7.6.1. Factor de decremento

Según Martin (2003), “Este factor se produce por el desplazamiento de la componente de corriente directa y por la atenuación de las componentes transitorias de corriente alterna y directa de la corriente de falla” (p. 204).

Villegas (2003) nos amplía el concepto de este factor, expone que este “Permite obtener un valor eficaz equivalente de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada t_f , al tener en cuenta el efecto del desplazamiento de la corriente directa inicial y su atenuación durante la falla, D_f ” (p. 566).

7.6.2. Factor de división de la “I” de falla

Martin (2003) expone que al momento en que los hilos guardan de las líneas de transporte se conectan al sistema de aterrizaje, se debe de considerar

el impacto que tiene esta práctica, y es que esto permite que cierta proporción de la “I” de falla se disipe mediante los hilos guarda y por ende la “I” que circularía en la malla es menor respecto al escenario de no conectarse los hilos guarda.

Este factor considera dicho efecto y representa la porción de la “I” que realmente se disipa a través de la malla de aterramiento y la “I” total de falla.

7.6.3. Factor X/R

Este factor expresa la proporción entre la parte imaginaria de la impedancia y la oposición al paso de la corriente del sistema en el punto de ocurrencia de la falla. Villegas (2003) indica que “Este factor determina el decrecimiento del componente c.c. de tal forma que, a mayor valor de X/R, mayor será el tiempo que tardará en disminuir la componente de c.c.” (p. 566).

7.6.4. Factor de seguridad por crecimiento de la subestación

La experiencia nos demuestra que, a través del tiempo, los sistemas eléctricos tienden a crecer, la demanda de energía va a aumentar y por ende la generación encargada de suplir dicha demanda lo hace proporcional y paralelamente a la demanda. Al aumentar tanto la oferta como la demanda de energía, la corriente que fluirá en el sistema aumentará.

Es por ello por lo que se recomienda en el diseño los sistemas de aterrizaje de las subestaciones, se considere un factor de crecimiento aplicado a la corriente de diseño para que este sea capaz de tolerar dichos cambios y no se viera en la obligación en el futuro de hacer cambios o readecuaciones del sistema.

7.7. Evaluación de la resistencia de aterrizaje de una subestación

Villegas (2003) nos expone que teóricamente el valor de la resistencia (r) de aterramiento debe de ser, idealmente, cero. En la vida real, la elevación de la tensión a tierra es proporcional a la "I" de falla y a la "r" de aterramiento, al incrementarse el valor de la "I", el valor de la "r" debe disminuirse. Actualmente en la regulación de cada país se tiene estandarizado los valores límites de este parámetro en función de la capacidad de la subestación.

En Guatemala, la NTDOID establece los valores de "r" que deben de tener las subestaciones en función de la capacidad que maneje.

Tabla 1.

Valores máximos permitidos de "r" en una subestación según normativa guatemalteca

Capacidad de la subestación (MVA)	Resistencia de la red de aterramiento de una subestación (ohms)
> 1	3
1 – 10	2
10 – 50	1
50 – 100	0.5
> 100	0.2

Nota. La tabla presenta la capacidad de la subestación y la resistencia de la red de aterramiento de una subestación. Obtenido de CNEEE (1999). *Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDOID).*

Una vez realizado el diseño y alcanzado teóricamente el valor de la "r" de aterramiento establecido en la regulación, es importante medir en campo de dicho parámetro, para ello la norma IEEE Std. 80 presenta las metodologías y consideraciones por seguir para la ejecución de esta verificación.

7.8. Normas aplicadas al diseño de sistemas de aterramiento

Entre las normativas que se emplearan en el desarrollo del estudio, se encuentran:

7.8.1. IEEE Std. 80

La IEEE (2015) describe esta normativa como una guía que proporciona información pertinente a las buenas prácticas del diseño de sistemas de aterrizaje para subestaciones de gran capacidad. Entre los objetivos de esta norma se encuentran el establecer los límites máximos de los potenciales que puede haber en una subestación en condiciones críticas, presentar las buenas prácticas de diseño de estos sistemas basado en criterios securitarios, proporcionar una metodología para el diseño de sistemas de aterramiento, desarrollo de métodos y criterios para la solución de problemas típicos de gradientes, entre otros.

7.8.2. IEEE Std. 81

Erick Godoy (2016) describe esta norma de la siguiente manera:

La norma incluye métodos prácticos y técnicas para la medición de características eléctricas de sistemas de puesta a tierra. También presenta indicaciones y consideraciones de seguridad, mediciones de resistividad del suelo, medición de frecuencia, voltaje e impedancia de sistemas de potencia del sistema de puesta a tierra a una tierra remota, mediciones de impedancia a la tierra remota, medición de voltaje de paso y de contacto y verificación de la integridad del sistema de puesta a tierra. Discute

métodos comunes de pruebas de aterramiento y características de instrumentación y sus limitaciones, así como factores que pueden variar las mediciones. (p. 93)

7.8.3. Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDROID)

Específicamente el título III, capítulo IV, artículo 33 resistencia a tierra, dicho artículo presenta las disposiciones que deberán cumplir los sistemas de aterrizaje de una subestación en lo que respecta al valor de la “r” de aterramiento acorde a la capacidad de la subestación.

7.9. Generalidades del software CYMGRD

CYMGRD es un software creado por CYME International T&D Inc. [CYME], desarrollado para ser una herramienta que permita a los ingenieros el diseñar sistemas de aterramiento de subestaciones y edificios de manera óptima, brindándole al desarrollador todas las herramientas y facilidades necesarias para dicha tarea.

El programa cuenta con diversos módulos que permite diseñar paso a paso un sistema de aterrizaje, los módulos que lo conforman son los que se presentan a continuación:

7.9.1. Módulo de análisis de suelo y de seguridad

Mediante el módulo de análisis de suelo y de seguridad se proceden a analizar mediciones de la ρ del terreno tomadas en campo para la obtención del

perfil de resistividad del terreno, para ello el módulo permite elegir al usuario el modelo del suelo que considere el adecuado para modelar el terreno en análisis.

Al seleccionar un modelo de suelo biestratificado, el programa determina el valor de la ρ de las dos capas que conforman el suelo, así mismo computa el valor del grosor de la primera capa del terreno, es importante recalcar que la segunda capa del suelo de este modelo es considerada infinita. En caso de que el usuario seleccione un modelo de suelo de una sola capa, el programa únicamente determinará el valor de la ρ del terreno al calcular el promedio aritmético de las mediciones de resistividad.

Otra de las funciones que nos permite realizar este módulo es la de ejecutar un análisis de seguridad mediante la determinación de las tensiones máximas de contacto y paso admisibles dentro de la subestación que esté en análisis. La metodología que emplea el software para computar estos parámetros es la recomendada en la norma IEEE Std. 80-2000.

7.9.2. Módulo de análisis de malla

CYME presenta este módulo como una herramienta que permitirá al usuario poder calcular el área transversal mínima de las varillas de tierra, el GPR, la “ r ” de aterramiento y los gradientes de voltaje en la superficie del terreno (CYME, 2006).

Para determinar el tamaño óptimo de los electrodos el módulo de análisis de malla del software lo realiza de acuerdo con lo establecido en la normativa IEEE Std. 80-2000. Tal y como la metodología de la normativa lo indica, el software solicita al diseñador que defina la información pertinente a la “ I ” de falla LG y el material que serán las varillas de enterramiento.

Entre la información que solicita el software con respecto a la “I” de falla es el valor de dicha corriente de línea a tierra en amperios; la contribución telemandada de las líneas de transporte conectadas a la instalación; la relación LG/XR, la cual expresa la relación de la parte imaginaria de la impedancia y la resistencia del sistema; así también el número de líneas de transporte y alimentadores a conectarse a la instalación.

En el caso de la información correspondiente del material que constituye los electrodos a emplearse, el programa solicita el valor de la temperatura ambiental del terreno y especificar el tipo de material en el listado de conductores que ofrece el programa, en este el usuario cuenta con una amplia gama de materiales a elegir, de los cuales cada uno trae sus parámetros térmicos y eléctricos definidos.

CYMGRD es capaz de analizar sistemas de aterramiento con configuraciones simétricas y asimétricas, así también el considerar en el análisis modelos de suelo estratificados a una o dos capas. Es importante tomar en cuenta que al diseñar el sistema de aterramiento se debe de considerar ubicar a los conductores en la capa superior, en cambio, las varillas de tierra pueden atravesar ambas capas del suelo. Para poder introducir la disposición de la malla de aterramiento diseñada se puede realizar mediante dos métodos: ingresar manualmente las coordenadas en donde ubicarán los electrodos del sistema o importar el diseño de un archivo AutoCAD al software.

7.9.3. Módulo de graficado

Mediante el módulo de graficado el diseñador será capaz de visualizar gráficamente los resultados obtenidos de los potenciales máximos de la

subestación en análisis de seguridad. El módulo ofrece la posibilidad de crear dos tipos de gráficos: los contornos de potencial y los diagramas de perfil.

En cuanto a, CYME (2006) define a los contornos de potencial como un gráfico que permite analizar una porción del diseño del sistema de aterramiento (pudiéndose también abarcar la malla completa) y que presenta las variaciones de los voltajes de superficie o de contacto. Se debe de resaltar que este análisis es posible únicamente después de haber efectuado el análisis de malla.

En el caso del diagrama de perfil los define como un gráfico que permite analizar únicamente un eje de la subestación para la evaluación de los voltajes de contacto, paso y superficie. Esta herramienta también puede emplearse para analizar un simple punto de la subestación.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL
 - 1.1. Estudios previos
 - 1.2. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO
 - 2.1. Subestación eléctrica
 - 2.2. Voltaje soportado por un ser humano
 - 2.2.1. Voltaje de paso
 - 2.2.2. Voltaje de contacto
 - 2.2.3. Voltaje de malla y transferido
 - 2.3. El suelo
 - 2.3.1. Resistividad eléctrica del suelo
 - 2.3.2. Mediciones de resistividad
 - 2.3.3. Modelo estratificado del suelo homogéneo
 - 2.3.4. Modelo biestratificado del suelo
 - 2.3.5. Efecto de una capa de material sobre el terreno
 - 2.4. Elementos de un sistema de puesta a tierra

- 2.4.1. Conductores
 - 2.4.2. Electrodo
 - 2.4.3. Conectores y accesorios
 - 2.5. Consideraciones para el diseño de un sistema de aterramiento
 - 2.5.1. Importancia de un sistema de aterramiento
 - 2.5.2. Aspectos básicos de diseño
 - 2.6. Computación de la "I" de diseño de malla
 - 2.6.1. Factor de decremento
 - 2.6.2. Factor de división de la "I" de falla
 - 2.6.3. Factor X/R
 - 2.6.4. Factor de seguridad por crecimiento de la subestación
 - 2.6.5. Efecto de una capa de material sobre el terreno
 - 2.7. Evaluación de la resistencia de aterrizaje de una subestación
 - 2.8. Normas aplicadas al diseño de sistemas de aterramiento
 - 2.8.1. IEEE Std. 80
 - 2.8.2. IEEE Std. 81
 - 2.8.3. Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDROID)
 - 2.9. Generalidades del software CYMGRD
 - 2.9.1. Módulo de análisis de suelo y de seguridad
 - 2.9.2. Módulo de análisis de malla
 - 2.9.3. Módulo de graficado
3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
- 3.1. Características del estudio
 - 3.1.1. Diseño
 - 3.1.2. Enfoque
 - 3.1.3. Alcance
 - 3.1.4. Unidad de análisis

- 3.2. Variables
- 3.3. Fases del desarrollo de la investigación
 - 3.3.1. Fase 1: Revisión bibliográfica
 - 3.3.2. Fase 2: Recolección de datos en campo
 - 3.3.3. Fase 3: Desarrollo del estudio en CYMGRD
 - 3.3.4. Fase 4: Análisis de resultados
- 3.4. Técnicas de análisis

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

9. METODOLOGÍA

A continuación, se detalla la metodología a desarrollarse en el presente trabajo de investigación

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo, ya que en el desarrollo de este se llevará al cabo la recolección de datos en campo y la cuantificación de las variables a través del modelamiento del escenario en estudio mediante el uso de un software.

Así mismo, el alcance es explicativo, dado que a partir de los resultados obtenidos mediante el software será posible determinar como el modelo del suelo escogido y la geometría del sistema de puesta a tierra de la subestación inciden en dichos resultados para el cumplimiento de los criterios establecidos en la normativa IEEE Std. 80-2000

Finalmente, el diseño adoptado será no experimental, puesto que la recopilación de la información a emplearse en el presente estudio se realizará en su estado original sin la manipulación de ninguna variable; además será transversal puesto que la recopilación de la información de cada variable se realizará en una sola instancia, dentro de un periodo de tiempo definido.

9.2. Unidades de análisis

La población en estudio será todo el equipo y la infraestructura que conforma la subestación Guatemala Oeste, dentro de la cual se evaluará la subpoblación del sistema de puesta a tierra de la subestación en cuestión, de la cual se extraerán muestras en forma de un muestro intencional, que serán estudiadas en su totalidad.

9.3. Variables

En lo que respecta a las variables en estudio, las mismas se describen a continuación:

Tabla 2.

Variables

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Tensión de contacto	Diferencia entre el GPR y la tensión en la superficie en el punto en donde una persona parada coloca al mismo tiempo tiene sus manos sobre una estructura puesta a tierra.	Número continuo, valor determinado mediante CYMGRD, voltio.
Tensión de paso	Diferencia de tensión en la superficie que una persona podría experimentar con los pies separados a un metro.	Número continuo, valor determinado mediante CYMGRD, voltio.
Tensión de superficie	Máxima tensión de contacto encontrada dentro de un lazo o retícula de una malla de puesta a tierra	Número continuo, valor determinado mediante CYMGRD, voltio.

Continuación de la tabla 2.

Resistencia de puesta a tierra	Oposición que presenta la malla de puesta a tierra al paso de las corrientes eléctricas de falla.	Número continuo, valor determinado mediante CYMGRD, voltio.
--------------------------------	---	---

Nota. En la tabla anterior se presentan las variables utilizadas en este proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

¿Cuál es el valor de la tensión de contacto dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std? 80?

Tabla 3.

Tensión de contacto

Criterio	Numérica		Manipulable	Observable	Unidad
	Discreta	Continua			
Tensión de contacto		X		X	Voltio (V)

Nota. En la tabla anterior se presentan los aspectos que deben tomarse en consideración para la tensión de contacto. Elaboración propia, realizado con Excel.

¿Cuál es el valor de la tensión de paso dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std? 80?

Tabla 4.*Tensión de paso*

Criterio	Numérica		Manipulable	Observable	Unidad
	Discreta	Continua			
Tensión de paso		X		X	Voltio (V)

Nota. En la tabla se presentan los aspectos que deben tomarse en cuenta para la tensión de paso. Elaboración propia, realizado con Excel.

¿Cuál es el valor de la tensión de superficie dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std? 80?

Tabla 5.*Tensión de superficie*

Criterio	Numérica		Manipulable	Observable	Unidad
	Discreta	Continua			
Tensión de superficie		X		X	Voltio (V)

Nota. En la tabla se presentan los elementos que deben considerarse en la tensión de superficie. Elaboración propia, realizado con Excel.

¿Cuál es el valor de la resistencia de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma NTDROID?

Tabla 6.

Resistencia de puesta a tierra

Criterio	Numérica		Manipulable	Observable	Unidad
	Discreta	Continua			
Resistencia de puesta a tierra		X		X	Ohm (Ω)

Nota. En la tabla se presentan los aspectos que deben tomarse en cuenta para la resistencia de puesta a tierra. Elaboración propia, realizado con Excel.

9.4. Fases del estudio

A continuación, se presentan las fases que se desarrollarán en el estudio del Análisis del Sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste con base en la normativa IEEE Std. 80-2000 con el software CYMGRD

9.4.1. Fase 1. Revisión bibliográfica

En esta fase se realizará una consulta de todas las fuentes bibliografías posibles relacionadas al tema, para enriquecer los conocimientos sobre sistemas de puesta a tierra de una subestación, las normativas aplicadas al diseño de sistemas de puesta a tierra e información acerca del uso del software a emplearse en el estudio.

9.4.2. Fase 2. Recolección de datos en campo

Con la revisión bibliográfica terminada, se procederá a llevar al cabo la recolección de datos necesarios para el desarrollo del estudio en el software

CYMGRD. Los datos que se recolectarán en esta fase serán los valores de la resistividad del suelo en el lugar en donde se ubica la subestación Guatemala Oeste. Para ello se tomarán mediciones en diferentes puntos dentro de la subestación, al hacer uso del método de Wenner.

9.4.3. Fase 3. Desarrollo del estudio en CYMGRD

A partir de las mediciones obtenidas en la fase anterior, se llevará al cabo el estudio mediante el software en CYMGRD. Es en esta etapa en donde se cuantificarán las variables de estudio, las cuales son: tensión de contacto, paso y superficie, así como también la resistencia de puesta a tierra.

9.4.4. Fase 4. Análisis de resultados

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos en la fase tres y a partir de estos lograr definir si el actual diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación cumple con los criterios de seguridad establecidos en las normativas que rigen su diseño.

9.5. Resultados esperados

Con el cumplimiento de la metodología anteriormente descrita se pretende cubrir el alcance propuesto para el Análisis del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste con base en la normativa IEEE Std. 80-2000 y cuyos resultados permitan garantizar que el diseño de este sistema sea seguro para el personal operativo de la instalación, los equipos ubicados dentro de la misma y la continuidad del servicio del sistema.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Las técnicas de análisis que se emplearán en el presente trabajo de investigación serán de tipo descriptivo. Para cada una de las variables a evaluarse en el estudio se realizará un análisis univariado, dado que se analizarán cada una de ellas de manera independiente. Para ello se utilizarán las siguientes herramientas:

- Gráfico del perfil de resistividad del terreno.
- Tablas de las mediciones de resistividad del terreno.
- Perfiles de tensión de paso, contacto y superficie.
- Gráficos de contorno de las tensiones de paso, contacto y superficie.

Entre las herramientas estadísticas que se emplearan se puede mencionar:

- Medidas de tendencia central: debido a que se reunirán mediciones de resistividad del terreno a diferentes separaciones entre electrodos se procederá a obtener la mediana de las mediciones en cada valor de separación para obtener un valor representativo.

En la fase dos, al haber realizado y obtenido las mediciones de la resistividad del terreno se hará uso de la estadística descriptiva para el análisis de dichos resultados. Se obtendrán las medianas de las mediciones realizadas

para cada una de las distancias de separación entre electrodos consideradas en las mediciones de resistividad, según lo establecido en el método de Wenner. Apoyándose en gráficos y tablas se obtendrá el perfil de resistividad del terreno, mediante este será posible evaluar el modelo de suelo que mejor se acople al estudio e identificar posibles mediciones dudosas que no parezcan encajar con las mediciones disponibles. Para la elaboración de los gráficos y tablas se empleará el software CYMGRD.

Así mismo en la fase tres, al haber obtenido los resultados del estudio, se hará uso de herramientas gráficas para el análisis correspondiente. En el caso de las tensiones de contacto, paso y superficie se emplearán diagramas de perfil y de contorno a lo largo de diferentes áreas de interés de la subestación, con la obtención de estos gráficos se compararán los valores obtenidos de estos parámetros con los valores máximos establecidos en la normativa IEEE Std. 80-2000. Dichos gráficos se obtendrán a partir del software CYMGRD. Para el caso de la resistencia de puesta a tierra de la subestación se realizará un análisis comparativo del valor obtenido con el valor máximo permitido, establecido en la normativa NTDROID.

11. CRONOGRAMA

En el presente capítulo se presenta la proyección del tiempo de trabajo para la ejecución del estudio propuesto, con los aspectos; descripción, año, mes y días.

Tabla 7.

Proyección del tiempo de trabajo

	2023																							
	Nov				Dic				Ene				Feb				Mar				Abr			
Descripción	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Fase 1: Revisión bibliográfica	■	■																						
Fase 2: Recolección de datos en campo			■	■																				
Fase 3: Desarrollo del estudio en CYMGRD					■	■	■	■																
Fase 4: Análisis de resultados									■	■														
Presentación de resultados											■	■												
Discusión de resultados													■	■										
Redacción de resultados														■	■									
Redacción de recomendaciones															■	■								
Redacción de informe final																			■	■				
Elaboración y preparación de defensa de tesis																					■			

Nota. En la tabla anterior se presenta el cronograma de actividades en donde se proyecta el tiempo en que se realizará el trabajo. Elaboración propia, realizado con Excel.

Como es posible apreciarse en la figura anterior, se propone un lapso de ejecución del estudio de cinco meses, comienza a partir del mes de noviembre del año 2022 con la fase uno de la investigación y finaliza con la elaboración y preparación de la defensa de tesis considera llevarse al cabo en el mes de abril del año 2023.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación es necesario considerar que se cuente con los recursos necesarios para llevarlo al cabo. En el presente capítulo se detallan los gastos que se incurrirán para el desarrollo de la investigación. Cabe mencionar que todos los costos que se describirán a continuación parte de ellos serán cubiertos por el tesista y la otra parte por la empresa.

Tabla 8.

Desglose de los recursos necesarios para la investigación

Descripción	Recurso	Fuente de financiamiento	Costo unitario	Cantidad	Total de recursos
Honorarios del asesor	Humano	Ad honorem	Q -	1	Q -
Honorarios del estudiante	Humano	Ad honorem	Q -	1	Q -
Transporte	Servicio	Empresa	Q 500.00	1	Q 500.00
Computadora	Tecnológico	Propia	Q 3,500.00	1	Q 3,500.00
Licencia del software	Tecnológico	Empresa	Q 250.00	1	Q 250.00
Alquiler de telurómetro	Material	Empresa	Q 400.00	1	Q 400.00
Equipo de protección personal	Material	Propia	Q 300.00	1	Q 300.00
Internet	Servicio	Propia	Q 250.00	1	Q 250.00
Resma de papel bond	Material	Propia	Q 500.00	1	Q 500.00
Celular	Tecnológico	Propia	Q 3,000.00	1	Q 3,000.00
Energía eléctrica	Servicio	Propia	Q 500.00	1	Q 500.00
Subtotal					Q 9,200.00
Imprevistos (10%)					Q 920.00
TOTAL					Q 10,120.00

Nota. Una vez analizados los recursos y el medio de financiamiento de la investigación, se considera que la realización de esta es factible. Elaboración propia, realizado con Excel.

REFERENCIAS

- Bardales, W. Castañon, C. y Herrera, J. (2019). *Clima de Guatemala, tendencias observadas e índices de cambio climático*. Universidad del Valle.
- Calderón, D (2015). *Metodología para la representación y análisis computacional de sistemas de puesta a tierra en los sistemas eléctricos*. [Tesis de maestría Universidad de los Andes de Colombia]. Archivo digital. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13245>
- Choquehuanca, J. E. (2019). *Optimización de la resistencia de malla a tierra de la subestación 2.0/2.5 MVA de la unidad minera el Santo, Caylloma, Arequipa* [Tesis de licenciatura de la Universidad Nacional del Centro del Perú]. Archivo digital. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5642>
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica (18 de noviembre de 1999). *Normas Técnicas de Diseño y Operación de las instalaciones de Distribución*. <https://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/06%20NTDOST.pdf>
- CYMGRD (2006). *Guía del usuario y manual de referencia CYMGRD 6.3 para Windows*. Editorial San Bruno.

Godoy, E. E. (2016). *Análisis de la red de puesta a tierra con base en la norma ieee std 80-2000 y coordinación de mantenimientos en la subestación Guatemala Sur*. [Tesis de licenciatura de la Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

IEEE Xplore. (agosto 2013) *Guide for Safety in AC Substation Grounding*.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7109078>

Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (2000). *80 – 2000 - Guía IEEE para la seguridad en la puesta a tierra de subestaciones de CA*. Editorial Universitaria.

Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (2012). *81 – 2012 - Guía IEEE para medir la resistividad de la tierra, la impedancia de la tierra y los potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de puesta a tierra*. Editorial Universitaria.

Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (2013). *80 – 2013 - Guía IEEE para la seguridad en la puesta a tierra de subestaciones de CA*. Editorial Universitaria.

Puente, G. & González, J. (2012). *Estimación de los niveles de radiaciones no ionizantes RNI en la escuela de la aldea la Ciénaga, municipio de San Raymundo, departamento de Guatemala debidos a la operación de la subestación guate oeste que actualmente está en la fase de construcción, utilizando como parámetros, los niveles medidos en puntos propuestos por el departamento de radiaciones no ionizantes del mem, en los departamentos de Escuintla y de Guatemala, los día 23 y 24 de julio de 2012*. Editorial Universitaria.

Reyes, C., & Cruz, E. (2016). *Diseño de un sistema puesta a tierra de una subestación de potencia eléctrica comparando las normas ansi / ieee std 80-2000 y cen en 50522*. [Tesis de licenciatura del Instituto Politécnico Nacional]. Archivo digital.
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/13855/>

Rodríguez, G (2002). *Sistema de red de tierras de subestaciones eléctricas de potencia*. [Tesis de maestría de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México]. Archivo digital.
<http://eprints.uanl.mx/1180/1/1020148255.PDF>

Sipaque, C. F. (2019). *Diseño de un sistema puesta a tierra de una subestación de potencia eléctrica comparando las normas ansi / ieee std 80-2000 y cen en 50522*. [Tesis de licenciatura de la Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Trashorras, J. (2015). *Subestaciones eléctricas*. Ediciones Paraninfo S.A.

Villegas, M. (2003). *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. Ediciones Mejía Villegas S.A.

Villegas, J. (2003). *Diseño de subestaciones eléctricas*. McGraw-Hill.

APÉNDICES

Apéndice 1.

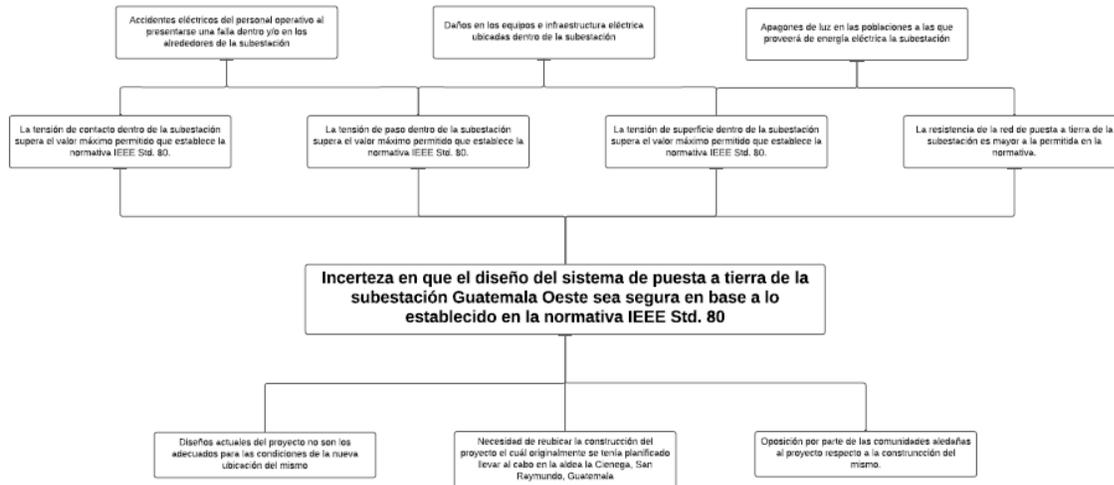
Matriz de coherencia

MATRIZ DE COHERENCIA			
Título de la investigación	Planteamiento del problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivos
Análisis del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste con base en la normativa IEEE Std. 80	Incerteza en que el diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste sea segura en base a lo establecido en la normativa IEEE Std. 80	<ul style="list-style-type: none"> ¿Cómo validar que el diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste cumple con los criterios de seguridad establecidos por la normativa que rige su diseño? 	Analizar el diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste en base a la normativa IEEE Std. 80 con el software CYMGrd.
		<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es el valor de la tensión de contacto dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std. 80? 	Comprobar que el valor de la tensión de contacto de la subestación Guatemala Oeste se encuentre dentro de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 80
		<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es el valor de la tensión de paso dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std. 80? 	Validar que el valor de la tensión de paso de la subestación Guatemala Oeste se encuentre dentro de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 80
		<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es el valor de la tensión de superficie dentro de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma IEEE Std. 80? 	Verificar que el valor de la tensión de superficie de la subestación Guatemala Oeste se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 80
		<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es el valor de la resistencia de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste en relación con la norma NTDOID? 	Constatar que el valor de la resistencia de puesta a tierra de la subestación Guatemala Oeste se encuentre dentro de los límites establecidos en la norma NTDOID.

Nota. El apéndice, los elementos que conforman la matriz de coherencia. Elaboración propia, realizado con Excel.

Apéndice 2.

Árbol de problemas



Nota. En el árbol de problemas se presenta el origen del problema, causas y efectos. Elaboración propia, realizado con Word.