



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA PROPUESTA DE UN SOFTWARE PARA LA
MEJORA Y AUTOMATIZACIÓN EN LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA DE
UNA SUBESTACION DEL SISTEMA INTERCONECTADO EN GUATEMALA**

Markos Trinidad Delgado Silvestre

Asesorado por Msc. Ing. Jhonatan Alexander Ríos Rodríguez

Guatemala, septiembre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA PROPUESTA DE UN SOFTWARE PARA LA
MEJORA Y AUTOMATIZACIÓN EN LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA DE
UNA SUBESTACION DEL SISTEMA INTERCONECTADO EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARKOS TRINIDAD DELGADO SILVESTRE

ASESORADO POR M.SC. ING. JHONATAN ALEXANDER RÍOS RODRIGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Ing. 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 Córdova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Edgar Yanuario Laj
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 LA PROPUESTA DE UN SOFTWARE PARA LA MEJORA Y AUTOMATIZACIÓN EN LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA DE UNA SUBESTACION DEL SISTEMA INTERCONECTADO EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 21 de abril de 2023.

Markos Trinidad Delgado Silvestre



EEPM-PP-0369-2023

Guatemala, 21 de abril de 2023

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica
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 LA PROPUESTA DE UN SOFTWARE PARA LA MEJORA Y AUTOMATIZACIÓN EN LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA DE UNA SUBESTACION DEL SISTEMA INTERCONECTADO EN GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Energía Aplicada - Conservación de la Energía - Transmisión de energía**, presentado por el estudiante **Markos Trinidad Delgado Silvestre** con cui **2781623121307**, 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 Energía Y Ambiente.

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. Jhonatan Alexander Ríos Rodríguez
Asesor(a)

Jhonatan Alexander Ríos Rodríguez
Ingeniero Químico
Colegiado Activo No.1699

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



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





EEP-EIME-0368-2023

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 LA PROPUESTA DE UN SOFTWARE PARA LA MEJORA Y AUTOMATIZACIÓN EN LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA DE UNA SUBESTACION DEL SISTEMA INTERCONECTADO EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Markos Trinidad Delgado Silvestre**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

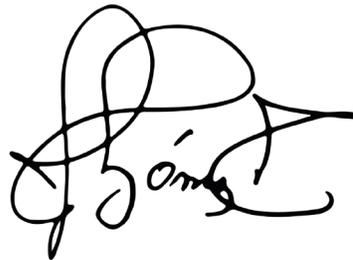
ID Y ENSEÑAD A TODOS

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

Guatemala, abril de 2023

El Decano 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 Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA PROPUESTA DE UN SOFTWARE PARA LA MEJORA Y AUTOMATIZACIÓN EN LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA DE UNA SUBESTACION DEL SISTEMA INTERCONECTADO EN GUATEMALA**, presentado por: **Markos Trinidad Delgado Silvestre** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Firmado electrónicamente por: José Francisco Gómez Rivera
Motivo: Orden de impresión
Fecha: 18/09/2023 13:42:16
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, septiembre 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: 75 CUI: 2781623121307

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 darme la fuerza para lograr una más de mis metas.

A mi madre

Basilia Silvestre, por el simple hecho de darme la vida y su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el <i>alma mater</i> que me permitió el desarrollo de forma intelectual y profesional en la vida.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionar los conocimientos y herramientas que me permitieron realizar este trabajo de graduación.
Escuela de Estudios de Postgrados	Por haberme dado la oportunidad de culminar mis estudios mediante sus programas de estudios.
Mi revisora	M.A. Inga. Karen Michelle Martínez Figueroa, por haber sido mi guía en cada etapa de esta investigación.
Asesor	Msc. Ing. Jonathan Rios, por su tiempo, ayuda y comprensión en la elaboración del trabajo de graduación.
Mis amigos	Por haberme acompañado durante mi vida estudiantil y el apoyo y responsabilidad en cada trabajo que realizamos.

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 A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15
7. HIPOTESIS	17
8. MARCO TEÓRICO.....	19
8.1. Sistema de transporte.....	19
8.2. Sistema de transmisión en Guatemala.....	19
8.3. Topología de la red.....	20

8.4.	Líneas de transmisión	22
8.4.1.	Conductores	22
8.4.2.	Hilo de guarda	23
8.4.3.	Aisladores.....	23
8.4.4.	Estructuras de soportes.....	23
8.4.5.	Apantallamiento.....	24
8.4.6.	Sistema de tierra	25
8.5.	Subestaciones eléctricas.....	26
8.5.1.	Equipos de potencia	26
8.5.2.	Transformador.....	27
8.5.3.	Interruptor de potencia	27
8.5.4.	Equipos de medición	27
8.5.5.	Transformadores de potencial.....	28
8.5.6.	Transformadores de corriente	28
8.5.7.	Medidores de energía	28
8.5.8.	Calidad de la energía	28
8.5.9.	Punto de medición.....	29
8.6.	Perdidas de energía.....	29
8.6.1.	Perdidas en los conductores	29
8.6.2.	Perdidas en los aisladores	30
8.6.3.	Perdidas en la torre	30
8.6.4.	Perdidas en los transformadores.....	30
8.7.	Protecciones	31
8.7.1.	Protecciones sobre corriente.....	31
8.7.2.	Protecciones de distancia.....	31
8.7.3.	Protecciones diferenciales.....	32
8.8.	Marco Legal en Guatemala	32
8.9.	Normativa Nacional	33
8.10.	Normativa internacional.....	34

8.10.1.	IEEE	34
8.10.2.	IEEE 519-2014	34
8.10.3.	IEEE 1159-2019	35
8.10.4.	IEC.....	35
8.11.	Software	35
8.11.1.	Lenguaje de programación	35
8.11.2.	Python	36
8.11.3.	Librerías.....	36
8.11.4.	Variables.....	36
8.11.5.	Ciencia de los datos	36
9.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	37
10.	METODOLOGIA.....	41
10.1.	Enfoque	41
10.2.	Diseño	41
10.3.	Alcance.....	42
10.4.	Unidad de análisis	42
10.5.	Variables.....	42
10.6.	Fases de estudio	44
11.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	51
11.1.	Herramientas de recolección de la información.....	51
11.2.	Herramientas para el estudio.....	52
11.3.	Herramientas para el análisis	52
12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	53
13.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	55

REFERENCIAS 57
APÉNDICES.....61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

1.	Kilómetros de líneas de transmisión eléctrica	20
2.	Topología de la red	21
3.	Soportes.....	24
4.	Apantallamiento	25
5.	Cronograma de actividades	53

TABLAS

I.	Variables e indicadores.....	43
II.	Proceso de programación	46
III.	Presupuesto	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
GW	Giga watt
GWh	Giga watt hora
°	Grado
°C	Grado centígrado
h	Hora
kg	Kilogramo
kW	Kilo watt
kWh	Kilo watt hora
MW	Mega watt
MWh	Mega watt hora
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
N	Newton
%	Porcentaje
Q	Quetzal
s	Segundo

GLOSARIO

Aislador	Se aplica a cuerpos, que no permiten el paso de corriente eléctrica
Altitud del sol	Es la posición en grados del sol a partir del este y medidos en sentido contrario a las agujas del reloj.
Campo eléctrico	Magnitud vectorial definida como el cociente de la fuerza eléctrica entre la carga
Conductor	Material, generalmente en la forma de alambre, cable o barra, capaz de conducir una corriente eléctrica.
Corriente alterna	Es la corriente eléctrica que cambia periódica y rápidamente de dirección.
Energía	Es la capacidad de la materia de efectuar trabajo
Energía activa	Es la energía que se convierte en un trabajo útil
Energía reactiva	Es la energía que no se convierte en un trabajo útil
Estructura	Es la unidad principal de soporte, que generalmente se aplica al poste o torre adaptado para ser usado como medio de suspensión de líneas aéreas de energía eléctrica.

Flecha	Es la distancia vertical medida de un conductor a la línea recta imaginaria, que une los dos puntos de soporte del conductor en las estructuras.
Intervalo de medición	Intervalo de medición en minutos que exige la CNEE para medir al día.
<i>Matplotlib</i>	Librería para visualización de datos en Python.
Pandas	Librería para manipulación y análisis de datos en Python.
Periodo de medición	Tiempo de medición en días que establece la CNEE para medir durante un mes.
Punto de fluencia	Es aquel en el que aparece un considerable alargamiento del material sin el correspondiente aumento de carga.
Python	Lenguaje de programación de alto nivel orientado a objetos
Tensión o voltaje	Es la cantidad de energía eléctrica acumulada en un conductor que se mide en voltios.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación busca mejorar el sistema de medición de calidad de energía en el sistema de energía eléctrica, a través del uso de un software, para mejorar la eficiencia energética en el sistema de transmisión y reducir el riesgo de indisponibilidades forzadas en las de transmisión de 69 kV.

Considerando la ampliación prevista de la red de transmisión, actualmente no se cuenta con un software para medir la calidad de la energía eléctrica según lineamientos de la CNEE, se requiere realizar la medición y evaluación del desbalance de corriente en la línea entre fases y de fase a tierra, regulación de tensión, factor de potencia y distorsión armónica total.

La evaluación de los resultados obtenidos se realizará de acuerdo con las disposiciones reglamentarias vigentes, observando los estándares establecidos por las normas técnicas nacionales e internacionales, incluyendo IEEE e IEC.

Por lo tanto, el software se desarrollará en un lenguaje de programación que permita un análisis y procesamiento claro y conciso de la calidad de la electricidad.

El software permite un análisis rápido y eficiente, lo cual es muy útil para identificar problemas potenciales en el sistema de transmisión de energía y tomar las acciones preventivas o correctivas necesarias.

Por lo tanto, es muy importante aplicar las medidas preventivas y correctivas adecuadas para detectar y resolver los problemas del sistema de transmisión; de esta manera, hará una contribución significativa a la optimización y operación segura y eficiente de los equipos eléctricos.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de transmisión eléctrica es uno de los más importantes entre ellos, pero también enfrenta diversos problemas y fallas, lo que lo convierte en uno de los sistemas con mayor siniestralidad. Las líneas de transmisión son muy importantes en los sistemas eléctricos porque son el vínculo entre la generación de energía y los consumidores.

Se desarrollará un mecanismo para la medición y automatización de la calidad de energía eléctrica en el sistema de transmisión 69 kV, por medio de la recopilación, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos, con el objetivo de encontrar patrones, tendencias y relaciones que puedan ser utilizados para tomar decisiones.

Este trabajo de investigación proporcionará un mecanismo para evaluar la calidad de la energía de las líneas eléctricas para evitar problemas potenciales y garantizar una calidad de energía adecuada, considerando medidas preventivas y correctivas para mantener la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico.

Para el desarrollo del mecanismo medición y automatización se considerará específicamente el impacto de la corriente, el voltaje, el factor de potencia, y los armónicos en la operación del sistema de transmisión de energía.

Para el proceso de recopilación de datos se tomará en cuenta las especificaciones técnicas que establecen las normas técnicas, considerando los equipos de medición y los periodos e intervalos de medición, para la cálculo y evaluación de los parámetros se utilizarán las directrices, que establece la CNEE.

La información generada proporcionara indicadores para el análisis de la calidad de energía y del estado de los equipos que conforman la operación la línea de transmisión. Es importante mencionar que para el desarrollo de esta investigación se ha estimado la necesidad de contar con un mecanismo que nos permita evaluar estándares de calidad de la energía de forma eficiente.

En el capítulo uno se exponen los conceptos teóricos que permiten la comprensión del funcionamiento de la red de transmisión de energía eléctrica, la topología existente, los equipos para la transmisión, los equipos para la medición, los tipos de protecciones, las pérdidas en la transmisión de energía eléctrica y la regulación vigente del subsector eléctrico del país; también se explica los aspectos a considerar para el desarrollo del software.

En el capítulo dos se desarrolla el mecanismo para el procesamiento de la calidad de la energía, para ello se diseña un formato para la recolección de datos medidos y se establece la metodología para el cálculo.

En el capítulo tres se desarrolla el análisis técnico de los resultados obtenidos cuantitativa y gráficamente, para así discutir los mismo para la determinación de consideraciones que se deben aplicar.

2. ANTECEDENTES

En Guatemala, no hay investigaciones sobre la medición de la calidad de la energía de las líneas de transmisión centradas en la automatización, y se presenta en orden cronológico de la siguiente manera.

Según Aguilera (2018):

El uso de Python y Pandas para analizar los datos de calidad de energía de una red de distribución en Chile. Resolvió que el uso de estas herramientas permitió una gestión más eficiente de los datos de medición y facilitó el análisis de los patrones de calidad de energía en la red.

La evaluación de la calidad de la electricidad es fundamental para el buen funcionamiento del sector eléctrico, lo que requiere mediciones precisas, los parámetros eléctricos como tensión, corriente, potencia, energía, armónicos, entre otros. Una variable importante relacionada con calidad que requiere equipo especial. Además, el control de calidad de la energía significa la implementación de medidas preventivas y correctivas para prevenir y resolver problemas relacionados con la calidad de la energía. (p. 22)

Según Carcamo y Meléndez (2019):

Un método de detección de caídas y sobretensiones de voltaje en sistemas de distribución. Utilizo la técnica de preprocesamiento de datos para limpiar la señal de medida y un método basado en análisis de

componentes principales y regresión logística para detectar caídas de tensión y sobretensiones.

Los resultados de utilizar la técnica propuesta en una red de distribución muestran su efectividad en la detección de fallas y sobretensiones con una precisión del 99,9 % y una tasa de falsas alarmas del 0,01 %. Este trabajo destaca la importancia de aplicar técnicas de análisis de datos para detectar y prevenir eventos de calidad de energía en los sistemas de distribución. (p. 42)

Según León y Mejía (2019):

La metodología para la clasificación de eventos de calidad de energía eléctrica se basa en el uso de algoritmos de aprendizaje automático y en la extracción de características de los datos de calidad de energía eléctrica. Los autores aplicaron esta metodología a una base de datos de eventos de calidad de energía eléctrica y demostraron su eficacia en la clasificación de diferentes tipos de eventos de calidad de energía eléctrica. (p. 52)

Según Gears (2020):

Es de suma importancia controlar los armónicos ya que estos causan de problemas en sistemas de potencia. Los armónicos son señales eléctricas de frecuencia múltiple de la frecuencia fundamental, que se generan cuando la corriente eléctrica fluye a través de cargas no lineales, como rectificadores y variadores de frecuencia. (p. 19)

Dado que en Guatemala existe una metodología establecida por CNEE, no obstante, no coexiste un software que ayude a mejorar e interpretar la calidad de la energía, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en el año 2022 promovió la implementación de medidas para mejorar la calidad del suministro eléctrico, como la supervisión y monitoreo de las redes de distribución y transmisión para prevenir fallas y apagones.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento promedio anual de la demanda de energía eléctrica en Guatemala es del 3.8 % según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. El Ministerio de Energía y Minas en el año 2022 impulsó la expansión en infraestructura del sistema de transporte de energía eléctrica. Con la construcción de subestaciones eléctricas y líneas de transmisión, la red se ha vuelto más compleja y se aumenta el riesgo de la presencia de fallas y problemas relacionados con la calidad de la energía. Si bien la medición está presente para monitorear los estándares de energía no existe un mecanismo como un software de libre acceso para evaluar la calidad de energía que involucran los parámetros de tensión, corriente, factor de potencia y la incidencia de armónicos.

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados a partir de 2020, el transporte de energía eléctrica en Guatemala aún enfrenta grandes desafíos, como es la necesidad de ampliar y mejorar la infraestructura de transmisión para poder llevar energía eléctrica a zonas remotas y escasamente pobladas del país. Además, la falta de mantenimiento y modernización de las líneas de transmisión existentes ha provocado problemas de calidad de energía e interrupciones en el suministro eléctrico en algunas partes del país.

Las líneas de transmisión, debido a su extensión, están expuestas a diferentes perturbaciones, como fenómenos electromagnéticos, condiciones climáticas y factores externos, lo que aumenta el riesgo de la calidad de la energía y del servicio. Por lo anterior las líneas de transmisión presentan pérdidas que afectan la calidad de energía y la eficiencia en la operación.

La calidad de la energía eléctrica mide los parámetros de la corriente, la corriente es el flujo de carga que transporta la energía eléctrica a través de un conductor, el voltaje es la fuerza que impulsa la corriente a través de un conductor, el factor de potencia es un valor que representa la eficiencia energética y los armónicos, que son señales eléctricas que afectan voltaje y corriente, debido a la falta de mecanismos para evaluar estas mediciones, los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica pueden resultar severamente dañados, la calidad de la energía ineficiente y sujetos a sanciones por parte de los reguladores por las razones anteriores. Puede hacer cumplir la indisponibilidad en los servicios de energía eléctrica.

El alcance de tiempo del estudio se enmarca en el periodo de febrero a diciembre 2023, el espacio de trabajo será en el área de sistemas de transmisión.

El alcance método del estudio se desarrollará un alcance descriptivo, dado que se desarrollará un software que ayude a determinar la situación actual de las líneas de transmisión por medio del análisis de la calidad de la energía. Aplicabilidad de los resultados: son válidos para el área generación, distribución y transmisión.

Lo expuesto anteriormente conduce a plantear la siguiente pregunta principal: ¿Cuál es el mecanismo más eficiente a desarrollar para la mejora y automatización de la medición de la calidad de energía en una línea de transmisión de 69 kV de una subestación eléctrica de Guatemala?

Así mismo se plantean las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son las directrices que establece la CNEE para evaluar la calidad de la energía en el sistema de transporte de energía eléctrica?
- ¿Cuál es el mecanismo apropiado para detectar problemas en el sistema de transmisión de energía eléctrica de alta tensión con base a la regulación de tensión y el desbalance de corriente?
- ¿Qué diseño de software me permitirá identificar la variación del factor de potencia en el sistema de transmisión de alta tensión?
- ¿Cuál es el beneficio del uso del Software para establecer la calidad de la energía en la línea de transmisión de energía eléctrica para el servicio en una subestación eléctrica del SNI?

4. JUSTIFICACIÓN

El presente diseño de investigación obedece a la línea de investigación del área energética, específicamente en la gestión y uso eficiente de la energía enfocándose en el uso eficiente en sistemas de transporte, de la maestría en Energía y Ambiente, la investigación plantea un Software para la evaluación de la calidad de energía en el sistema de transmisión y distribución.

El sistema de transporte de Guatemala no tiene un mercado libre debido al monopolio natural, y para proteger a los consumidores, el sistema de transporte y distribución está regulado por la Comisión Nacional de Electricidad. Por ello, la CNEE exige que se mida la calidad de la energía del transportista para asegurar el cumplimiento de las normas técnicas establecidas. Sin embargo, no existe un software de acceso abierto que evalúe las medidas de calidad de energía en las subestaciones, recurso que puede ser utilizado para evaluar el estado del sistema de transmisión y planificar el mantenimiento preventivo para asegurar la continuidad del servicio y mejorar el suministro eléctrico.

Para medir la calidad de la energía, tres factores importantes afectan el voltaje, la corriente y el factor de potencia.

El voltaje es el efecto que impulsa la corriente a través de un conductor, y la corriente es el flujo de carga a través de un conductor.

El factor de potencia es una medida de la eficiencia eléctrica que muestra cuánta electricidad se convierte en energía utilizable para el equipo.

La corriente en una línea de transmisión a menudo varía con la demanda y debe medirse dentro de un ciclo e intervalo de medición y el valor actual durante ese período debe registrarse y recopilarse.

Luego se estima el desequilibrio actual para compararlo con parámetros aceptables para las regulaciones nacionales e internacionales.

La corriente y la tensión eléctrica también contiene armónicos, los cuales son componentes múltiplos de frecuencia fundamental, cada componente tiene un efecto sobre la onda fundamental por eso es importante determinar la incidencia en la corriente y la tensión eléctrica ya que pueden ser indicadores de problemas dentro de la línea de transmisión.

Se procesará un Software para analizar las mediciones del factor de potencia, los resultados obtenidos en el cálculo, en el cual se comparará los valores obtenidos con los límites establecidos por las Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones, con el objetivo de identificar tendencias y determinar el estado del sistema de transmisión.

La investigación tiene una gran importancia, ya que ayudara a identificar posibles causas del desbalance de corriente eléctrica y prevenir problemas en la calidad de la energía, perdida de energía y desgaste los equipos del sistema de transmisión.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Desarrollar un Software con la finalidad de mejorar y automatizar la medición en la calidad de la energía en una subestación eléctrica del sistema interconectado en Guatemala

5.2. Específicos

- Desarrollar una propuesta de software para calcular la calidad de la energía utilizando los lineamientos de la CNEE.
- Evalúe la regulación de voltaje y el desequilibrio de corriente con recomendaciones de software para detectar problemas en el sistema de transmisión de energía en la red.
- Analizar la variación del factor de potencia en el sistema de transmisión de una línea de transmisión de 69 kV mediante la propuesta de un Software.
- Evaluar la aplicación del Software en la medición de la calidad de energía para una línea de transmisión de 69 kV de una subestación eléctrica en Guatemala.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

En Guatemala todas las subestaciones en operación cuentan con un sistema de medición, sin embargo se utilizan más para liquidar las transacciones comerciales y cumplir con los estándares que establecen las normas de servicio, con el sistema de medición ya implementado y siendo este robusto es bueno aprovechar el recurso y buscarle funciones que ayuden a prevenir problemas en las líneas de transmisión, evitando mantenimientos correctivos que incrementan costos de operación, pérdidas por indisponibilidades forzadas y desgaste en los equipos.

A través de la evaluación de la medición de calidad de la energía en el sistema de transmisión se espera estimar el estado del sistema de transmisión comparando valores obtenidos con valores ideales que establece la normativa. Se elaborará un Software que pueda calcular los porcentajes de desbalance de corriente, regulación de tensión, factor de potencia e incidencia de armónicos, por un tiempo máximo de 31 días como lo establece la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, se formulará un modelo que presente el tiempo de incumplimientos a lo largo del periodo de medición.

Con los resultados obtenidos se realizará un análisis utilizando estadística descriptiva y la metodología que establecen las normas técnicas, también se realizará un análisis gráfico para identificar tendencias para determinar las pérdidas en el sistema y la condición de la línea de transmisión.

7. HIPÓTESIS

Derivado de que el estudio es de carácter descriptivo cuantitativo, no se aplica la formulación de hipótesis.

8. MARCO TEÓRICO

Para la elaboración del presente trabajo de investigación existen conceptos teóricos que permitan una mejor comprensión del tema, por lo tanto, en este apartado se muestran diferentes conceptos.

8.1. Sistema de transporte

“El sistema de transmisión es la red de transporte de energía eléctrica que conecta los centros de producción con los puntos de consumo, asegurando la continuidad del suministro y la calidad de este” (Unesa, 2017, p. 9).

8.2. Sistema de transmisión en Guatemala

El sistema de transmisión eléctrica en Guatemala está compuesto por más de 5000 kilómetros de líneas de transmisión y más de 50 subestaciones eléctricas. También nos dice que los niveles de tensión, actualmente en el Sistema de Transporte de energía son de 69, 138, 230 y 400 kV.

Figura 1. **Kilómetros de líneas de transmisión eléctrica**



Fuente: CNEE (2022). Consultado el 4 de abril de 2023. Recuperado de https://www.cnee.gob.gt/PlanesExpansion/2022-2052/Plan_de_Expansion_del_Sistema_de_Transporte_2022%20%E2%80%93202052.pdf

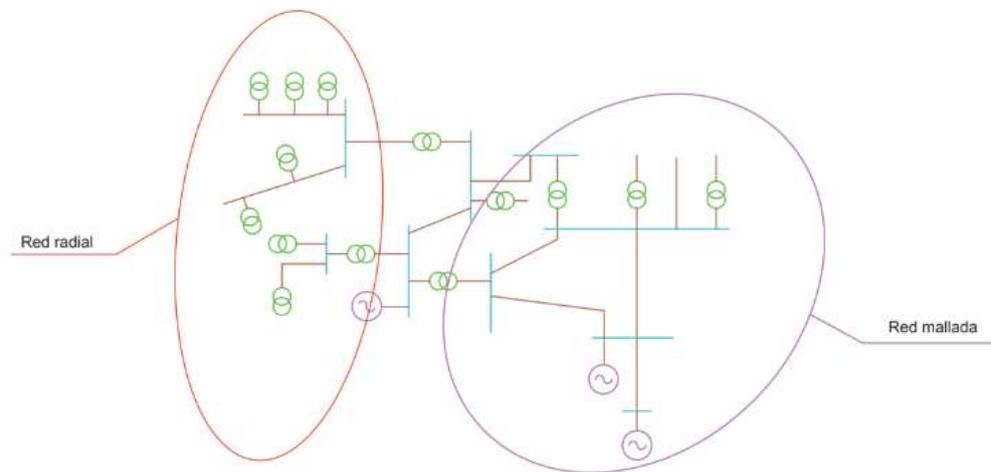
8.3. Topología de la red

“Las líneas de transmisión de energía eléctrica en Guatemala poseen una topología de red radial, existen dos topologías de red importantes” (Girón, E. 2016, p. 23).

En cuanto a, Radial es el tipo de red es aquel que la fuente de alimentación es por un extremo, aunque los equipos de protección tienen simplicidad y facilidad para la actuación y detección de fallas, al solo tener un único extremo con alimentación presentan una falta de garantía al servicio. (Montecelos,2015)

“Anillada es el tipo de red tiene la peculiaridad de tener dos o más fuentes de alimentación conectadas lo que da seguridad de servicio y facilita el mantenimiento, sin embargo, para las protecciones requieren mayor complejidad para detectar fallas” (Montecelos, 2015).

Figura 2. **Topología de la red**



Fuente: Montecelos (2015). *Subestaciones eléctricas*. p. 45.

Durante el 2021 la CNEE promovió la construcción de redes eléctricas en anillo en lugar de redes radiales, ya que considera que las redes en anillo son más seguras y confiables, y permiten una mejor calidad de suministro de energía eléctrica para los clientes finales.

8.4. Líneas de transmisión

En cuanto a, la línea de transmisión se compone de estructuras de soportes, conductores, aisladores, sistemas de red de tierra y otros elementos, diseñados para el transporte a largas distancias de electricidad desde las generadoras hasta la distribución. (Gears,2020)

8.4.1. Conductores

En cuanto a, los conductores son los elementos que transportan la energía eléctrica a lo largo de la línea de transmisión. Estos son de materiales que permiten el paso de la corriente, con materiales como el cobre o aluminio, y pueden tener diferentes diámetros y configuraciones según la línea de transmisión. (ASME, 2019)

En Guatemala existe una preferencia por el uso de conductores eléctricos desnudos, los cuales están compuestos por hilos metálicos que se organizan en forma helicoidal alrededor de un hilo central. Los materiales más utilizados para la fabricación de conductores en líneas de transmisión aéreas son el aluminio, las aleaciones de aluminio y, en casos muy raros, el cobre. Una tabla que se presenta en el artículo muestra las ventajas y desventajas de utilizar cobre y aluminio en conductores (Boj, 2004).

8.4.2. Hilo de guarda

Es un conductor que se sitúa en la parte alta de la línea y va conectado a tierra, la función principal es disminuir los niveles de potencia en los equipos cercanos a la línea, reduciendo el riesgo de descargas eléctricas y daños a los equipos. (Stevenson, 2016)

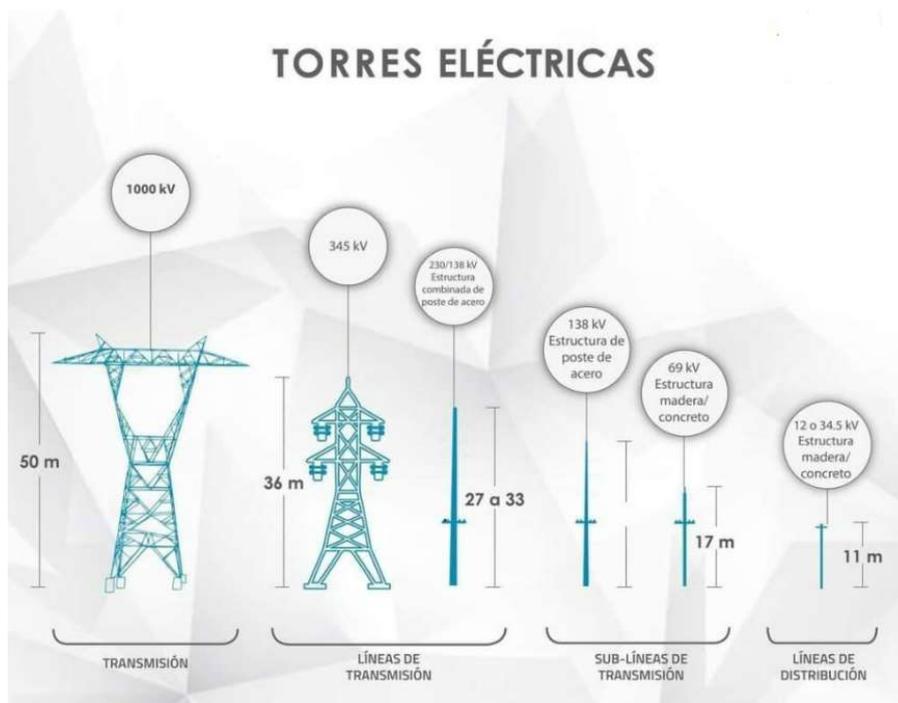
8.4.3. Aisladores

Son los elementos que separan eléctricamente los conductores de la línea de transmisión de las estructuras que los sostienen. Estos aisladores pueden estar fabricados con materiales cerámicos, vidrio o polímeros, y deben ser capaces de soportar las cargas mecánicas y ambientales a las que están expuestos. (ASME, 2019)

8.4.4. Estructuras de soportes

Los soportes se encargan de sostener los conductores y los aisladores en su posición. Estas estructuras pueden ser torres de acero, postes de madera o estructuras de hormigón, y deben ser capaces de soportar las cargas mecánicas y ambientales a las que están expuestas. (ASME, 2019)

Figura 3. Soportes

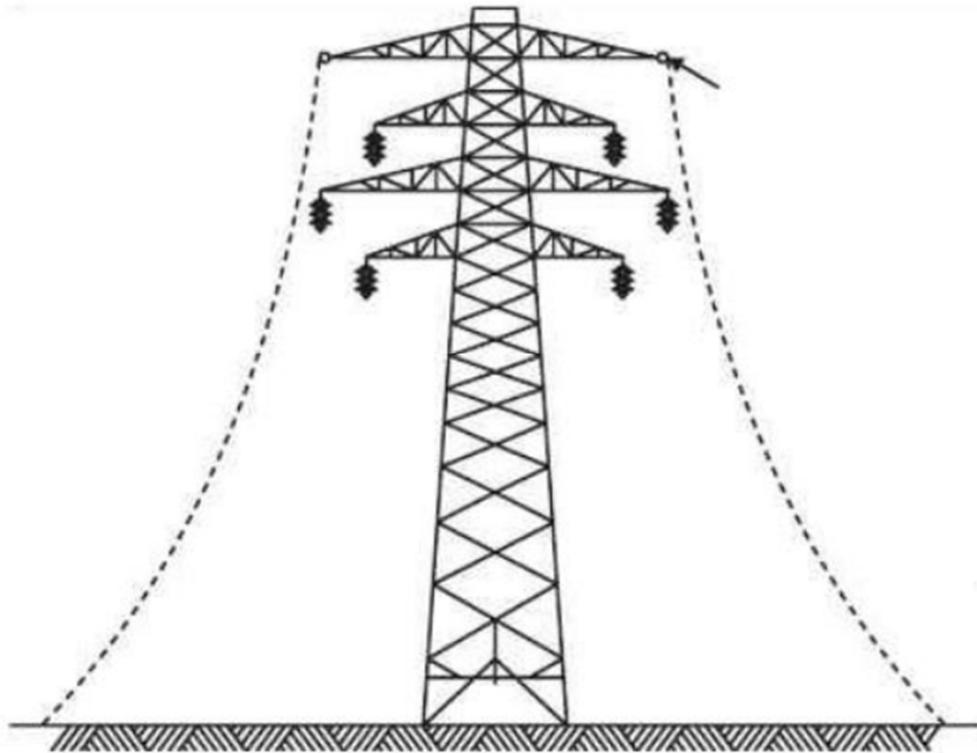


Fuente: Rivera (2013). *Energía. La Electricidad en un Mundo que Avanza*. p 56.

8.4.5. Apantallamiento

El apantallamiento en una línea de transmisión se refiere a la protección de los campos electromagnéticos generados por los conductores de la línea para evitar que interfieran con otros sistemas de comunicación o electrónicos cercanos. El apantallamiento de los conductores es importante para evitar la interferencia electromagnética en los sistemas de comunicación y electrónicos cercanos. (Wadhwa, 2007)

Figura 4. **Apantallamiento**



Fuente: Wadhwa (2007). *High Voltage Engineering*. p 262.

8.4.6. Sistema de tierra

La tierra en las líneas se define como es el conjunto de elementos eléctricos diseñados para empalmar la línea de transmisión y su estructura a la tierra, la conexión a tierra se realiza para garantizar la seguridad de las personas y proteger los equipos de las sobretensiones y descargas atmosféricas.

La puesta a tierra permite una conexión eficaz gracias a los elementos cómo electrodos de puesta a tierra, varilla de tierra, cables de tierra, conductores de guarda y dispositivos de protección y contra sobretensiones. (Pérez, 2016)

8.5. Subestaciones eléctricas

Se trata de un conjunto de elementos eléctricos que se emplean para aumentar o reducir los niveles de voltaje y corriente, con el fin de distribuir o transportar la energía eléctrica. Estos elementos son fundamentales para el transporte de la energía eléctrica y están formados por equipos eléctricos específicamente diseñados para el control y la manipulación.

Las subestaciones eléctricas desempeñan diversas funciones según su ubicación. Si se encuentran cerca de una planta generadora, elevan los niveles de voltaje para transportar la energía. Por otro lado, si están cerca de una población, reducen los niveles de voltaje para distribuir la energía a los usuarios. Además, estas subestaciones suelen conectarse entre sí para llevar a cabo maniobras y asegurar el suministro de energía eléctrica. (Villegas, 2003)

8.5.1. Equipos de potencia

“Son equipos diseñados para manejar grandes cantidades de energía eléctrica y garantizar la confiabilidad y estabilidad del sistema” (Stevenson, 2016, p. 34).

8.5.2. Transformador

Es aparato que emplea la inducción electromagnética tiene la capacidad de convertir la energía eléctrica de alta tensión y baja corriente en energía eléctrica de baja tensión y alta corriente, o viceversa. Este dispositivo es crucial en la distribución y transmisión de energía eléctrica, ya que facilita el control de los voltajes y la disminución de la pérdida de energía en las líneas de transmisión. (Stevenson, 2016),

8.5.3. Interruptor de potencia

Es un dispositivo eléctrico diseñado para interrumpir el flujo de corriente en un sistema, y que suele instalarse en las entradas y salidas de líneas de transmisión en subestaciones eléctricas, es conocido como interruptor. Su función principal es proteger la subestación de posibles fallos, y su capacidad para abrir circuitos eléctricos bajo carga y disipar el arco eléctrico en periodos muy breves se considera su principal ventaja. (Hidalgo, 2013)

8.5.4. Equipos de medición

“Es el conjunto de instrumentos y dispositivos para medir variables eléctricas en un sistema eléctrico de potencia, como pueden ser la corriente, el voltaje, la potencia, energía, la frecuencia, armónicos, entre otros” (Hidalgo,2013, p. 78).

8.5.5. Transformadores de potencial

Son transformadores que reducen la tensión del primario a niveles de voltaje proporcionalmente bajos, al igual que los transformadores de corriente los transformadores de tensión también se utilizan para medición y protección del campo al que se conecta, este va conectado en paralelo al campo que se quiere controlar. (Marti,2000).

8.5.6. Transformadores de corriente

Este tipo de transformador se caracteriza por disminuir proporcionalmente los niveles de corriente primaria, en el secundario tienen varios devanados que se utilizan para protección y medición, cabe destacar que va conectado en serie al campo del cual se requiere tener control. (Marti,2000).

8.5.7. Medidores de energía

“Es un medidor de energía es un dispositivo utilizado para cuantificar la cantidad de energía eléctrica que fluye en un circuito en un período de tiempo específico” (Cruz, 2019, p. 101).

8.5.8. Calidad de la energía

En cuanto a, la calidad de la energía eléctrica es un aspecto crítico ya que los equipos eléctricos dependen de una fuente de energía eléctrica de alta calidad para un funcionamiento eficiente y confiable. Una alimentación eléctrica de baja calidad puede ocasionar problemas tales como mal funcionamiento, disminución del ciclo de vida, y fallas tempranas de los equipos.

Asimismo, una alimentación de energía eléctrica de baja calidad puede generar emisiones de armónicos y otros problemas de interferencia electromagnética que pueden afectar a otros equipos eléctricos y electrónicos conectados en la misma red eléctrica. (Kothari y Nagrath,2015)

8.5.9. Punto de medición

La evaluación de la calidad de la energía en la transmisión debe ser realizada en lugares estratégicos, como los puntos de interconexión entre sistemas y los nodos de la red que tienen un alto consumo de energía. Además, se recomienda realizar mediciones en las instalaciones de los clientes que tienen cargas críticas y sensibles a las variaciones en la calidad de la energía. La recopilación de esta información es crucial para obtener una visión detallada del comportamiento de la red eléctrica y la calidad de la energía que se entrega a los usuarios finales. (Kothari y Nagrath, 2015)

8.6. Perdidas de energía

“Es un el sistema de transmisión se presentan por diversos aspectos, las más importantes a considerar son relacionadas a los conductores, aisladores, transformador y soportes” (Stevenson, 2016, p.103).

8.6.1. Perdidas en los conductores

Las pérdidas en los conductores se originan por la resistencia eléctrica del material del conductor, que aumenta proporcionalmente a la longitud del conductor, lo que resulta en mayores pérdidas.

Asimismo, a medida que aumenta la corriente eléctrica que fluye a través del conductor, se genera una mayor cantidad de calor, lo que también conlleva a un aumento en las pérdidas. Para reducir las pérdidas en los conductores, se pueden utilizar materiales conductores con menor resistividad y conductores de mayor sección transversal. (Wadhwa, 2010)

8.6.2. Pérdidas en los aisladores

Las pérdidas en los aisladores se originan por la corriente de fuga que fluye a través del material aislante que cubre el conductor, y esto depende de factores como la humedad, la temperatura y la calidad del aislamiento. Las pérdidas pueden disminuirse mediante el uso de aisladores de alta calidad y manteniendo las torres de transmisión limpias y secas. (Wadhwa, 2010)

8.6.3. Pérdidas en la torre

“Las torres de transmisión presentan pérdidas por los materiales que los componen y por la corriente de fuga. Las pérdidas pueden reducirse usando materiales con baja resistividad y mejorando el diseño para reducir la corriente de fuga” (Stevenson, 2016, p. 23).

8.6.4. Pérdidas en los transformadores

En cuanto a, los transformadores tienen pérdidas debido a la resistencia eléctrica del material del núcleo y del devanado, tales como Foucault que se genera debido a los campos magnéticos cambiantes. El uso de materiales conductores con menor resistividad y un diseño de transformadores que minimice la corriente de Foucault puede ayudar a reducir estas pérdidas. (Stevenson, 2016)

8.7. Protecciones

En cuanto a, las protecciones son un sistema diseñado para detectar y eliminar fallas en la línea de transmisión, estas deben de tener la capacidad de detectar diferentes tipos de fallas, como cortocircuitos, sobrecargas, sobretensiones, entre otros. La detección de estas fallas es a través del control de diferentes variables eléctricas y la tensión en la línea. (Wadhwa, 2010)

8.7.1. Protecciones sobre corriente

Las protecciones de sobre corriente son empleadas en el sistema de transmisión para evitar daños en el sistema eléctrico. Su principal función es detectar y desconectar rápidamente una sección de la red cuando la corriente eléctrica excede un nivel seguro.

En cuanto a, esta protección se consigue utilizando relés de protección, los cuales pueden detectar variación de corriente y enviar una señal de disparo para abrir el interruptor correspondiente y desconectar la sección afectada. (Stevenson, 2016)

8.7.2. Protecciones de distancia

En cuanto a, las protecciones son un sistema diseñado para detectar y eliminar fallas en la línea de transmisión, estas deben de tener la capacidad de detectar diferentes tipos de fallas, como cortocircuitos, sobrecargas, sobretensiones, entre otros. La detección de estas fallas es a través del control de diferentes variables eléctricas y la tensión en la línea. (Wadhwa, 2010)

8.7.3. Protecciones diferenciales

En cuanto a, las protecciones diferenciales son una clase común de protecciones empleadas en las líneas de transmisión. El objetivo de estas protecciones es detectar la presencia de una falla en la línea de transmisión mediante la comparación de las corrientes de entrada y salida en la sección protegida de la línea. Si se registra una diferencia significativa en las corrientes de entrada y salida, el relé de protección enviará una señal de disparo para desconectar la sección de la línea de transmisión afectada. Las protecciones diferenciales son usadas especialmente en líneas de transmisión de alta tensión y son altamente efectivas para detectar y desconectar rápidamente fallas de cortocircuito. (Stevenson, 2016)

8.8. Marco Legal en Guatemala

La definición del marco legal del subsector eléctrico en Guatemala se explica como un conjunto de regulaciones, normativas y leyes que fijan los lineamientos, objetivos y directrices para la generación, transmisión, distribución y venta de energía eléctrica con base a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) es el ente regulador del sector eléctrico en Guatemala y es la encargada de planificar, supervisar y regular el sistema de transmisión eléctrica del país. Según la comisión, el sistema de transmisión eléctrica en Guatemala se divide en tres niveles: la transmisión nacional, la transmisión regional y la transmisión local.

El Ministerio de Energía y Minas (MEM), es el encargado de elaborar y coordinar las políticas del sector eléctrico y minero del país. También tiene funciones en la promoción y supervisión del cumplimiento de las normas y regulaciones del sector eléctrico.

El Administrador del Mercado Mayorista, es una organización sin fines de lucro que se encarga de la administración y gestión del mercado mayorista de electricidad en Guatemala. Tiene como objetivo principal la administración del mercado mayorista de electricidad en Guatemala.

8.9. Normativa Nacional

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica define normas técnicas, comerciales y operativas que rigen dentro del subsector eléctrico. Para efecto de este estudio únicamente abordaremos las siguientes normas.

Las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, es el conjunto de normas que establece la regulación técnica, criterios y procedimientos para el diseño, construcción, operación y mantenimiento en la distribución de energía. Tiene como objetivo garantizar la calidad y confiabilidad del servicio eléctrico.

Las Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones NTCSTS, son un conjunto de regulaciones técnicas emitidas por la CNEE, que establecen los criterios y procedimientos para evaluar la calidad del servicio de transporte de energía eléctrica y las sanciones a aplicar en caso de incumplimiento de norma. Aporta la metodología para medir el desbalance de corriente.

Las Normas de Coordinación Comercial 14 NCC-14, esta normativa establece los requisitos técnicos y operativos para la medición de la calidad de energía en el Sistema Nacional de Interconectado.

8.10. Normativa internacional

Existen dos organizaciones internacionales que estandarizan y que trabajan en conjunto para desarrollar normas y estándares técnicos relacionados con la electrónica y la electricidad. Dichas organizaciones trabajan de manera colaborativa para desarrollar estándares técnicos que promuevan la interoperabilidad y la calidad en los productos y servicios relacionados con la electrónica y la electricidad a nivel mundial. (Hidalgo,2013)

8.10.1. IEEE

Es organización profesional internacional sin fines de lucro que se dedica a promover el avance de la tecnología en las áreas de la electrónica, la informática y la ingeniería eléctrica, entre otras disciplinas relacionadas. Dentro de sus actividades importantes elabora normas técnicas y estándares en diferentes áreas de la ingeniería eléctrica y electrónica. (Hidalgo, 2013)

8.10.2. IEEE 519-2014

Esta normativa establece los límites de distorsión armónica, y la metodología para la medición y el análisis necesarios para minimizar la distorsión armónica.

8.10.3. IEEE 1159-2019

Esta normativa establece los criterios para la interpretación de las mediciones de energía eléctrica que involucra los parámetros de corriente, voltaje y el factor de potencia.

8.10.4. IEC

La IEC abarca un amplio rango de temas, incluyendo la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, la seguridad eléctrica y la compatibilidad electromagnética.

8.11. Software

“Es un programa de computadora se usa para ejecutar diversas tareas” (Sommerville, 2016, p 45).

8.11.1. Lenguaje de programación

Se refiere al conjunto de instrucciones para que la computadora realice una tarea, se utilizan para la ejecución de aplicaciones y otros programas informáticos.

Se caracterizan por tener diferentes niveles, los cuales pueden ser primera generación lenguaje es el que entiende el ordenador, segunda generación ejerce un control directo sobre el ordenador y la tercera generación o nivel alto y su característica que se asemeja al lenguaje humano y permite mayor abstracción en la programación. (Sommerville, 2016)

8.11.2. Python

“Es un lenguaje de alto nivel de fácil uso con sintaxis clara, posee una variedad de bibliotecas y módulos disponibles y se utiliza para la ciencia de datos, desarrollo web y automatización de tareas” (Van Rossum, 2009, p. 89).

8.11.3. Librerías

Son herramientas específicas que permiten simplificar la programación del Software.

8.11.4. Variables

“Son elementos que ayudan en el desarrollo de un programa para el almacenamiento y manipulación de datos” (Harris,2019, p 76).

8.11.5. Ciencia de los datos

“Es una disciplina que combina estadísticas, matemáticas, programación, habilidades de comunicación y negocio para extraer valor de los datos” (Harris, 2019, p.12).

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

JUSTIFICACION

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

1. Sistema de transporte
 - 1.1. Topología de la red
 - 1.1.1. Sistema de transmisión en Guatemala
 - 1.1.2. Red Radial
 - 1.1.3. Red Anillada
 - 1.2. Líneas de transmisión
 - 1.2.1. Conductores
 - 1.2.2. Hilo de guarda
 - 1.2.3. Aisladores
 - 1.2.4. Estructuras de soportes
 - 1.2.5. Apantallamiento
 - 1.2.6. Sistema de puesta a tierra
 - 1.3. Subestaciones eléctricas
 - 1.3.1. Equipos de potencia
 - 1.3.1.1. Transformador
 - 1.3.1.2. Interruptor de potencia

1.3.1.3. Seccionador

- 1.4. Equipos de medición
 - 1.4.1. Transformadores de potencial
 - 1.4.2. Transformadores de corriente
 - 1.4.3. Medidores de energía
 - 1.4.4. Calidad de la energía
 - 1.4.5. Puntos de medición
 - 1.5. Perdidas en el sistema de transmisión
 - 1.5.1. Perdidas en los conductores
 - 1.5.2. Perdidas en los aisladores
 - 1.5.3. Perdidas en la torre
 - 1.5.4. Perdidas en los transformadores
 - 1.6. Protecciones
 - 1.6.1. Protección sobre corriente
 - 1.6.2. Protección diferencial
 - 1.6.3. Protección en los transformadores
 - 1.7. Normativa nacional e internacional
 - 1.7.1. Marco Legal en Guatemala
 - 1.7.2. Normativa Nacional
 - 1.7.3. Normativa Internacional
 - 1.8. Introducción al Software
 - 1.8.1. Lenguaje de programación
 - 1.8.2. Python
 - 1.8.3. Librerías
 - 1.8.4. Variables
 - 1.8.5. Ciencia de los datos
-
- 2. Análisis de resultados
 - 2.1.1. Metodología de medición

2.1.2. Metodología de calculo

3. Resultados

3.1.1. Análisis de los datos calculados

3.1.2. Análisis grafico

3.1.3. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

10. METODOLOGIA

10.1. Enfoque

El enfoque de la investigación es mixto debido a que se aplican técnicas características de la investigación cuantitativa, como también se hace uso de las bondades de la investigación cualitativa.

De la parte cuantitativa, se usarán mediciones que permitirán analizar un conjunto de datos para obtener índices estadísticos. Mientras tanto, por la parte cualitativa se hará una revisión documental que será interpretada para enriquecer el presente trabajo.

10.2. Diseño

El presente diseño de investigación será del tipo no experimental, debido a que las mediciones de la condición de operación serán en sitio.

Se aplicarán ensayos no destructivos con herramientas y equipos especializados durante el funcionamiento normal de operación, con el objetivo analizar los resultados obtenidos y plasmar un panorama situacional bastante acertado que servirá como base para el planteamiento de un modelo de mantenimiento predictivo más adecuado.

10.3. Alcance

La investigación de este tema propuesto se llevará a cabo mediante la comparación de los efectos de las líneas de transmisión.

10.4. Unidad de análisis

Las variables que se medirán son relacionadas a la calidad de la energía las cuales involucran el desbalance de corriente, la regulación de tensión, el factor de potencia y la incidencia de armónicos.

10.5. Variables

A continuación, se presenta en la Tabla la descripción de las variables a evaluar en el presente estudio.

Tabla I. **VARIABLES e INDICADORES**

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADORES
Corriente	Es la cantidad de carga que atraviesa una sección transversal de un conductor por unidad de tiempo. La unidad de medida de la corriente eléctrica es el amperio (A).	Se mide el desbalance de corriente como un porcentaje, la CNEE exige que este sea menor al 10 % en un intervalo de medición y un 5 % en un periodo de medición. Estadística descriptiva.
Voltaje	Es la fuerza que impulsa la corriente eléctrica a través del conductor.	Se considera una mala regulación exceder por un 5 % del correspondiente periodo de medición. Estadística descriptiva.
Factor de potencia	Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.	Para usuarios con consumo mayor a 11 kW se estipula un factor de potencia entre (0.9-1). Estadística descriptiva.
THD en la corriente y en la tensión	Es una medida que nos indica la cantidad de armónicos presente en la corriente y en la tensión eléctrica.	Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad cuando, en un lapso mayor al cinco por ciento del correspondiente al Período de Medición, las mediciones muestran que la Distorsión Armónica de Tensión ha excedido el rango de tolerancias establecidas. Estadística descriptiva.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

10.6. Fases de estudio

La investigación realizada es de tipo descriptivo, dado a que describe y analiza una muestra, en este caso puntos de la red de transporte de Guatemala con los que se calcularon los índices de calidad de servicio y se evaluó la confiabilidad del sistema.

Para el desarrollo del estudio, se trabajará principalmente con variables cuantitativas, en donde se cuantificaron los parámetros técnicos y económicos de la red de transporte para así calcular la energía no suministrada en la red de 69 kV de Estor-Panzós

Con las bases de datos recolectados se calculará los indicadores de confiabilidad anuales para las redes de 69 kV del Estor- Panzós durante el período de estudio; se calculará la energía no suministrada por área de incidencia y las pérdidas del sistema, cuantificando el impacto de los planes de expansión del sistema de transporte.

- Fase 1: investigación preliminar
 - Se espera evaluar la regulación de tensión, el desbalance de corriente, el factor de potencia y la presencia de armónicos para detectar posibles problemas en el sistema eléctrico y tomar medidas preventivas y correctivas adecuadas, siendo entonces un aporte importante para la detección de fallas en los sistemas de transmisión de energía eléctrica.

- Fase 2: diseño de investigación
 - Por medio de un software se evaluará la calidad de la energía y el origen de armónicos en la corriente eléctrica, comparándolos por fase para determinar su impacto en la calidad de energía eléctrica del sistema.
 - La presencia de armónicos en la tensión y corriente eléctrica puede tener efectos negativos sobre la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico, afectando tanto la calidad del suministro eléctrico como la vida útil de los equipos.
 - También se estudiará las herramientas a utilizar para la elaboración del software.

- Fase 3: parte experimental
 - Se realizará una evaluación por medio de un software, para comprobar la calidad de la energía eléctrica, de igual forma identificando problemas que afectan la disponibilidad y confiabilidad de una línea de transmisión de 69 típica y de estos se segmentarán aquellos que están relacionados a los armónicos.
 - Para elaborar el software se presenta el SCRIPT el cual es un conjunto de instrucciones en un lenguaje de programación que se ejecutan en una secuencia lógica para analizar una tarea específica.

Tabla II. **Proceso de programación**

Etapas	Acción
Entrada de datos	Recopilar los datos obtenidos de las mediciones, almacenarlos.
Preprocesamiento	Preparar los datos para el análisis mediante la eliminación de datos no válidos, conversión de unidades y la normalización.
Análisis de calidad	Se realizan cálculos y análisis de los datos para evaluar la calidad de la energía.
Presentación de resultados	Se presentan los resultados del análisis en un formato legible para el usuario, como gráficos, tablas o informes de texto.

Fuente: elaboración propia.

Es importante destacar el uso de las librerías *Pandas* que nos permite analizar y manipular los datos, la librería *Numpy* que permite realizar cálculos matemáticos y trabajar con matrices de datos, *Matplotlib* que nos permite visualizar datos en forma de gráfica y diagramas y *Scipy* que realiza cálculos avanzados y ayudara para el análisis de armónicos,

El cálculo las variables se realizará para cada intervalo de medición utilizando la metodología de las normas técnicas de la CNEE.

Para el desbalance de la corriente se multiplicará por tres la máxima desviación de corriente de cualquiera de las fases respecto al promedio de la corriente de las tres fases, dividido entre la suma de las tres corrientes. Al resultado de la división se le multiplicara por cien.

$$\Delta\text{DIP (\%)} = \left[\frac{3(\text{Imp})}{(I_a + I_b + I_c)} \right] * 100 \quad (1)$$

Donde:

$\Delta\text{DIP (\%)} =$ Desbalance de corriente.

Imp= Máxima desviación de corriente de cualquiera de las fases, respecto al promedio.

Ia= Corriente Fase A

Ib = Corriente fase B

Ic= Corriente Fase C

Para determinar la regulación de tensión será el valor absoluto de la diferencia entre la media de los valores eficaces y el valor nominal de la tensión, dividido el valor nominal, al resultado de la división se le multiplicará por cien.

$$\Delta v_k(\%) = \left[\frac{|V_k - V_n|}{(V_n)} \right] * 100 \quad (2)$$

Donde:

$\Delta v_k =$ Regulación de tensión

$V_k =$ Media de los valores eficaces de la tensión.

$V_n =$ Tensión nominal.

Para determinar el factor de potencia, se realizará una división entre la energía activa y la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de la energía activa y energía reactiva.

$$F_{pot} = \frac{E_a}{\sqrt{E_a^2 + E_r^2}} \quad (3)$$

Donde:

F_{pot}= Factor de potencia

E_a= Energía activa

E_r= Energía reactiva

Para el análisis de armónicos se utilizará el método de evaluación del THD donde nos indica la cantidad de armónicos presentes en una señal eléctrica. Este análisis nos permite medir los armónicos como porcentajes.

Se expresa como un porcentaje y se calcula dividiendo la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores eficaces de los armónicos por el valor eficaz de la frecuencia fundamental, y luego multiplicando por 100.

$$THD (I) = \frac{\sqrt{\sum_2^{40} I_{nrms}^2}}{I_{1rms}} * 100 \quad (4)$$

Donde:

I_{nrms} = Valor eficaz de la corriente.

I_{1rms} = Valor eficaz de la corriente de la fundamental.

Se expresa como un porcentaje y se calcula dividiendo la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores eficaces de los armónicos por el valor eficaz de la frecuencia fundamental, y luego multiplicando por 100.

$$THD (V) = \frac{\sqrt{\sum_2^{40} V_{nrms}^2}}{V_{1rms}} * 100 \quad (5)$$

Donde:

V_{nrms} = Valor eficaz de la tensión.

V_{1rms} = Valor eficaz de la tensión fundamental.

- Fase 4: presentación de resultados

Se pretende establecer los fundamentos teóricos que enmarcaran el desarrollo y desenvolvimiento del trabajo de investigación.

Así mismo se pretende obtener una tabla donde se identifiquen los parámetros de la calidad de la línea de transmisión de 69 kV de El Estor – Panzós, para presentar de manera sencilla los parámetros de la línea y cuáles son los parámetros más afectan en el desempeño y operación en una línea de transmisión de 69 kV.

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La técnica de análisis de información se hará desarrollando software que nos permita manipular fácilmente los datos obtenidos de la medición, antes de la ejecución del proyecto y los datos obtenidos después de la ejecución de este.

Para el desarrollo de esta investigación se presentan las herramientas para la recolección de datos, análisis y desarrollo del software:

11.1. Herramientas de recolección de la información

- Tabla con los valores nominales de la línea de transmisión.
- Tabla con la medición de los valores de corriente de las tres fases en el periodo de medición.
- Tabla con la medición de los valores de voltaje de las tres fases en el periodo de medición.
- Tabla con la medición de los valores de factor de potencia de la línea en el periodo de medición.
- Tabla con la medición de los armónicos del 2 al 40 en cada fase de la corriente en el periodo de medición.

- Tabla con la medición de los armónicos del 2 al 40 en cada fase de la tensión en el periodo de medición.

11.2. Herramientas para el estudio

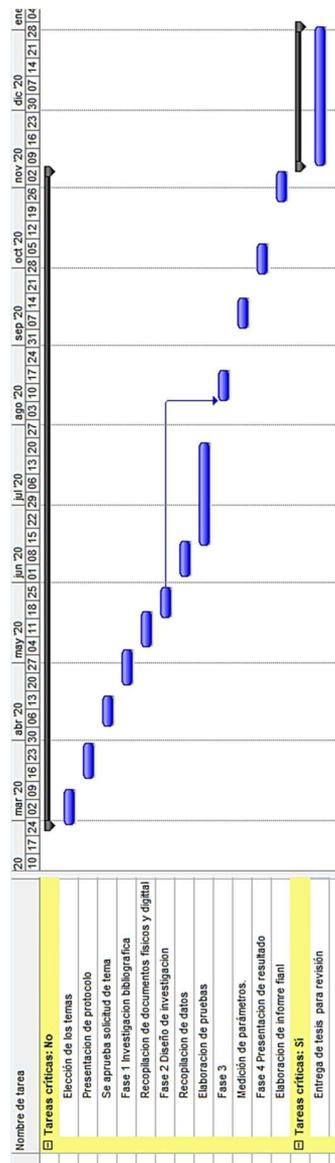
- IDE
- Lenguajes de programación de alto nivel
- SCRIPT
- Librería Matplotlib
- Librería Pandas
- Importación de datos
- Procesamiento de datos
- Presentación de reportes.

11.3. Herramientas para el análisis

- Análisis del desbalance de datos
- Análisis de la regulación de tensión
- Análisis del factor de potencia
- Análisis de THD de armónicos
- Análisis de THD de armónicos
- Histograma del voltaje y corriente
- Gráfica de dispersión de corriente
- Gráfica de dispersión de voltaje
- Gráfica de barras del factor de potencia
- Gráfica de barras de THD de la corriente
- Gráfica de barras de THD de la tensión.

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Figura 5. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Project.

13. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La medición de la calidad de la energía se llevará a cabo en una subestación eléctrica elevadora de 230/69 kV del sistema nacional interconectado.

La elaboración del software se realizará en Python, esto debido a que es un software de acceso libre, de sintaxis simple, y con amplia variedad de bibliotecas.

La interpretación de resultados se realizará mensualmente para determinar la calidad de la energía.

Para realizar este trabajo de investigación las disponibilidades de los recursos económicos son necesarios, y para llevar a cabo los objetivos y metas señaladas en esta investigación, se contará con los recursos financieros del estudiante. Entre los gastos se estipula el tiempo de estudio, costo de tiempo de desarrollo, y costo de recurso humano que participe durante la ejecución de la investigación.

Tabla III. Presupuesto

Actividad	Costo
Personal técnico y tiempo propio	Q 2 000.00
Estudiante	Q 100,00
Materiales insumos, equipos de medición y servicios técnicos para el desarrollo de la investigación.	Q 1 000.00
Transporte a Panzós	Q1,000.00
Material bibliográfico	Q 500.00
Otros (papel, impresiones, material, varios)	Q 500.00
	Q 6 500,00
Total-horas hombre	

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

REFERENCIAS

1. American National Standards Institute. (2012). *ANSI/NEMA C29.11-2012 Composite Insulators - Test Methods*. ANSI. Washington D.C.: ANSI. Recuperado de <https://webstore.ansi.org>.
2. American National Standards Institute. (2013). *ANSI/NEMA C29.12-2013 Composite Insulators - Transmission Suspension Type*. Washington D.C.: ANSI. Recuperado de <https://webstore.ansi.org>.
3. American National Standards Institute. (2013). *ANSI/NEMA C29.17-2013 Composite Insulators - Transmission Line Post Type*. ANSI. Washington D.C.: ANSI. Recuperado de <https://webstore.ansi.org>.
4. American Society of Mechanical Engineers. (2019). *ASME Y14.100-2017, Engineering Drawing Practices*. ASME International. Recuperado de <https://doi.org/10.1115/1.861-Y14.100-2017>
5. Boj, E. (2004). *Evaluación técnico-económica del diseño de líneas de transmisión de 69 kV utilizando estructuras compactas*. (tesis de maestría) Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>.
6. Bustillos, A., y Pérez, V. (2015). *Introducción a las líneas de transmisión de energía eléctrica*. Recuperado del <http://www.sectorelectricidad.com>

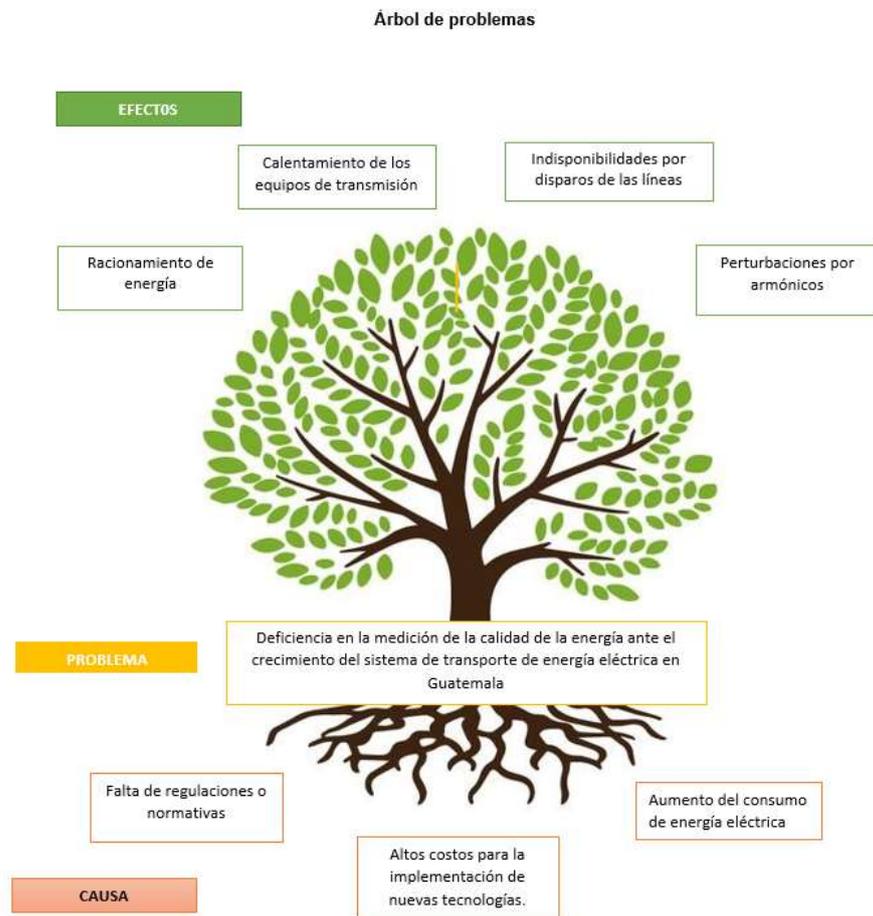
7. Cárcamo, J., & Meléndez, J. (2019). A predictive data-driven method for detecting voltage sags and swells in distribution systems. Estados Unidos, Limusa.
8. Cárdenas-García, J. F., & Castillo-Castañeda, E. (2018). Diseño de un sistema de monitoreo y control de la calidad de energía eléctrica en una subestación de distribución. (Tesis de maestría) Universidad de La Sabana. Colombia.
9. Cárdenas, M., y Garzón, M. (2012). Diagnóstico de redes de distribución aéreas de 11.4 hasta 34.5 kV con la técnica de ultrasonido. Recuperado de <http://www.mundoelectrico.com>.
10. Colíndres, W. (2019). Diseño de un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite con aplicación de la Norma ISO 4406:17 en la planta de pastas de una mina extractora de plata en Guatemala. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
11. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2015). Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones (NTCSTS). Guatemala: Autor.
12. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2018). Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD). Guatemala: Autor.
13. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2021). Planificación y expansión del sistema de transmisión eléctrica de Guatemala. Guatemala: Autor.

14. Decreto 93-1996. Ley General de Electricidad. 13 de noviembre de 1996.
15. Hernández, R. & Ortiz, J. (2019). Uso de las tecnologías de la información y la comunicación en la medición y monitoreo de la calidad de la energía eléctrica. México. McGraw-Hill Education.
16. Hidalgo, R. (2018). Control y mejora de la calidad de la energía eléctrica en sistemas de potencia. México: McGraw-Hill Education.
17. Hidalgo, A. (2013). Importancia de las normas técnicas en el campo de la ingeniería eléctrica. México: McGraw-Hill Education.
18. IEEE. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (IEEE Std 519-2014). Estados Unidos: Autor.
19. Girón, E. (2016). Calidad de potencia energética de la línea de transmisión Escuintla – Guate Sur Circuito I de 230 Kilovoltios (Tesis de maestría,) Universidad de San Carlos. Guatemala.
20. León, C., & Mejía, O. (2019). A new data-driven approach for classification of power quality events. *Energies*
21. Martín, J. (2000). “Diseño de subestaciones eléctricas (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de México. México.
22. Mejías Villegas, Carlos, (2003). Subestaciones de alta y extra alta tensión Colombia, Mejía Villegas S.A.

23. Sommerville, I. (2016). Ingeniería del software. México. Pearson.
24. Stevenson, W. D. (2016). Análisis de sistemas eléctricos de potencia. México. McGraw-Hill Education.
25. Montecelos (2015). Subestaciones eléctricas. España: Ediciones Paraninfo, S.A.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Árbol de problema**



Fuente: elaboración propia, realizado con Adobe Acrobat.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

Preguntas de investigación	Objetivos	Metodología	Plan de acción
¿Cuáles son las directrices que establece la CNEE para evaluar la calidad de la energía en el sistema de transporte de energía eléctrica?	<p>General</p> <p>Desarrollar un Software con la finalidad de mejorar y automatizar la medición en la calidad de la energía en una subestación eléctrica del sistema interconectado en Guatemala</p>		
¿Cuáles son las directrices que establece la CNEE para evaluar la calidad de la energía en el sistema de transporte de energía eléctrica?	<p>Específicos</p> <p>Desarrollar una propuesta de software para calcular la calidad de la energía utilizando los lineamientos de la CNEE.</p>	<p>Fase 1</p> <p>Investigación preliminar.</p>	<p>Recopilación bibliográfica.</p>
¿Cuál es el mecanismo apropiado para detectar problemas en el sistema de transmisión de energía eléctrica de alta tensión con base a la regulación de tensión y el desbalance de corriente?	<p>Evalúe la regulación de voltaje y el desequilibrio de corriente con recomendaciones de software para detectar problemas en el sistema de transmisión de energía en la red.</p>	<p>Fase 2</p> <p>Diseño de investigación</p>	<p>Adquisición de datos y visitas de campo.</p>

Continuación del apéndice 2.

Preguntas de investigación	Objetivos	Metodología	Plan de acción
¿Qué diseño de software me permitirá identificar la variación del factor de potencia en el sistema de transmisión de alta tensión?	Analizar la variación del factor de potencia en el sistema de transmisión de una línea de transmisión de 69 kV mediante la propuesta de un Software.	Fase 3: Parte experimental	Desarrollo de software y pruebas para la implementación de la metodología de cálculo.
¿Cuál es el beneficio del uso del Software para establecer la calidad de la energía en la línea de transmisión de energía eléctrica para el servicio en una subestación eléctrica del SNI?	Evaluar la aplicación del Software en la medición de la calidad de energía para una línea de transmisión de 69 kV de una subestación eléctrica en Guatemala.	Fase 4: Presentación de resultados	Análisis de los resultados obtenidos.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.