



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA
IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO EN EL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN
DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA COMPACTA CON BARRA SIMPLE Y BARRA DE
TRANSFERENCIA CONSIDERANDO LAS LIMITACIONES DEL MARCO REGULATORIO DE
GUATEMALA**

Florencio Alfredo Carrillo Tello

Asesorado por el Maestro Ing. Edgar Estuardo Chaj Ramírez

Guatemala, mayo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA
IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO EN EL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN
DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA COMPACTA CON BARRA SIMPLE Y BARRA DE
TRANSFERENCIA CONSIDERANDO LAS LIMITACIONES DEL MARCO REGULATORIO DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FLORENCIO ALFREDO CARRILLO TELLO
ASESORADO POR EL MAESTRO. ING. EDGAR ESTUARDO CHAJ RAMÍREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2021

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. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Romeo Nefalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez
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 TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO EN EL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA COMPACTA CON BARRA SIMPLE Y BARRA DE TRANSFERENCIA CONSIDERANDO LAS LIMITACIONES DEL MARCO REGULATORIO DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 12 de noviembre de 2020.

Florencio Alfredo Carrillo Tello

Ref. EEPFI-1451-2020
Guatemala, 12 de noviembre de 2020

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. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO EN EL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA COMPACTA CON BARRA SIMPLE Y BARRA DE TRANSFERENCIA CONSIDERANDO LAS LIMITACIONES DEL MARCO REGULATORIO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante **Florencio Alfredo Carrillo Tello** carné número **200313092**, 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 Gestión de Mercados Eléctricos 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"



Edgar Estuardo Chaj Ramirez
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO No. 9134

Mtro. Edgar Estuardo Chaj Ramírez
Asesor

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EEP-EIME-030-2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería 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: **ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO EN EL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA COMPACTA CON BARRA SIMPLE Y BARRA DE TRANSFERENCIA CONSIDERANDO LAS LIMITACIONES DEL MARCO REGULATORIO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario Florencio Alfredo Carrillo Tello, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director

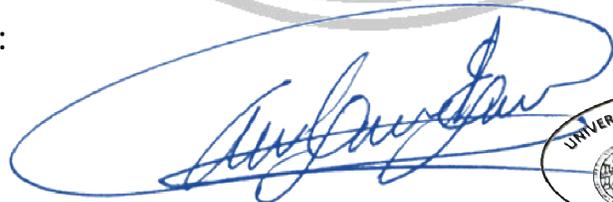
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



DTG. 204-2021

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 Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO EN EL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA COMPACTA CON BARRA SIMPLE Y BARRA DE TRANSFERENCIA CONSIDERANDO LAS LIMITACIONES DEL MARCO REGULATORIO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Florencio Alfredo Carrillo Tello**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, mayo de 2021

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por bendecirme y guiarme para realizar una más de mis metas.
Mis padres	Por haberme traído al mundo y guiado donde quiera que estuve, Dios los bendiga por su apoyo para hacer realidad este sueño.
Mi esposa	Marlen Villatoro. Por ser un apoyo tan importante en el camino de mi carrera profesional.
Mis hijos	Luz María y Javier Carrillo, y Gabriela Villatoro. Por ser fuente de inspiración en mi vida.
Mis hermanos	Maribel, Gustavo y Elizabeth Carrillo, por su apoyo durante todo este tiempo.
Mi abuelo	Baltazar Hernández (q. d. e. p.), por sus sabias enseñanzas y consejos en mi vida.
Familia y amigos	Por demostrar siempre su apoyo y motivarme en cualquier situación.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por la formación que me ha brindado hasta el momento.
Facultad de Ingeniería	Por beneficiarme con el conocimiento para desarrollar mi carrera.
Mis padres	Por su arduo esfuerzo para contar con los medios para apoyarme en todo momento.
Mis amigos	Por haberme acompañado durante la carrera y en mi trabajo.
Mi asesor	Maestro Ing. Edgar Estuardo Chaj Ramírez por guiarme en este proceso.
Compañeros de trabajo	Por su valiosa amistad y apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Contexto general	17
3.2. Descripción del problema	8
3.3. Formulación del problema	9
3.3.1. Pregunta central	9
3.3.2. Preguntas auxiliares	9
3.4. Delimitación del problema	10
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN	15

7.	MARCO TEÓRICO	17
7.1.	Sistema Eléctrico Nacional.....	17
7.1.1.	Subestaciones Eléctricas en Guatemala.....	17
7.1.2.	Tipos de subestaciones eléctricas de 69 kV.....	19
7.1.2.1.	Por su operación	20
7.1.2.1.1.	De corriente alterna.....	201
7.1.2.1.2.	De corriente continua. ...	22
7.1.2.2.	Por su servicio.....	23
7.1.2.2.1.	Primarias	23
7.1.2.2.2.	Secundarias	24
7.1.2.3.	Por su construcción	25
7.1.2.3.1.	Tipo intemperie	25
7.1.2.3.2.	Tipo interior.	25
7.1.2.3.3.	Tipo blindado.....	26
7.1.3.	Elementos de una subestación	26
7.1.4.	Subestaciones aisladas en gas.	28
7.1.5.	Configuración de subestaciones	28
7.1.5.1.	Con barra sencilla.	28
7.1.5.2.	Con doble barra.....	29
7.1.5.3.	Con barra principal y barra de transferencia.....	29
7.2.	Sistemas de Control y protección.....	29
7.2.1.	Requerimientos de los sistemas de control y protección en subestaciones eléctricas.....	29
7.2.2.	Tipos de sistemas de control y protección.....	30
7.2.3.	Elementos de un sistema de control y protección ...	31
7.2.4.	Mantenimiento de sistemas de control y protección.	32
7.3.	Normas de subestaciones eléctricas.....	33

7.3.1.	Normas técnicas del sistema de control y protección	33
7.3.2.	Normas operativas aplicables en el sistema de control y protección.	34
7.3.3.	Normas comerciales aplicables al sistema de control y protección.	34
7.3.4.	Normas aplicables al mantenimiento del sistema de control y protección.....	34
7.4.	Fallas en subestaciones eléctricas de 69 kV.	35
7.4.1.	Duración de las fallas de subestación eléctrica compacta de barra simple y barra de transferencia..	35
7.4.2.	Frecuencia de las fallas en una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia.	35
7.4.3.	Costo asociado al mantenimiento en el sistema de control y protección de una subestación compacta con barra simple y barra de transferencia	35
7.5.	Tipos de mantenimiento.	36
7.5.1.	Mantenimiento correctivo.....	37
7.5.2.	Mantenimiento preventivo.....	37
7.5.3.	Mantenimiento predictivo.	37
7.5.4.	Mantenimiento centrado en confiabilidad.	37
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	39
9.	METODOLOGÍA.....	41
9.1.	Tipo de estudio	41
9.2.	Fases del estudio	41
9.2.1.	Fase 1: recopilación de la información.	42

9.2.2.	Fase 2: caracterización de la información.	42
9.2.3.	Fase 3: análisis del marco regulatorio.	42
9.2.4.	Fase 4: análisis de la información.	42
9.2.5.	Fase 5: determinación del impacto técnico - económico	43
9.3.	Unidades de análisis	43
9.4.	Variables	43
9.5.	Resultados esperados.....	46
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	47
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	49
12.	CRONOGRAMA.....	51
13.	REFERENCIAS.....	53
14.	APÉNDICES	57
15.	ANEXOS	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

1.	Árbol de problema	8
2.	Plan de expansión PET-1-2009	18
3.	Plan de expansión PETNAC - 2014	19
4.	Corriente alterna	21
5.	Corriente continua	22
6.	Elementos primarios de subestación.....	27
7.	Cronograma	51

TABLAS

I.	Variables pregunta 1	44
II.	Variables pregunta 2	44
III.	Variables pregunta 3	45
IV.	Variables pregunta 4	45
V.	Detalle de costos.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
US\$	Dólar de Estados Unidos de América
h	Hertz
kV	Kilovoltio
m	Metro
34.5 kV	Tensión utilizada en el sistema de distribución rural de energía eléctrica
13.8 kV	Tensión utilizada en el sistema de distribución urbana y generación de energía eléctrica
138 kV, 230 kV y 400kV	Tensión utilizada en el sistema de transmisión de energía eléctrica
69 kV	Tensión utilizada en el sistema de transmisión de energía eléctrica y algunos grandes usuarios en Guatemala
MW	Un Mega Watt es igual a 6 millones de Watts
MWh	Un Mega Watt hora es igual a 6 millones de Watts hora
W	Watt es la unidad de potencia eléctrica

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
ANSI	American National Standards Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares).
Barra de transferencia	Usada juntamente con una barra simple para mantenimiento del interruptor principal a través de un interruptor de reserva.
Barra simple	Configuración de subestación más sencilla y económica donde solo existe una sola barra.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Cogeneración	Producción simultanea de energía térmica y energía mecánica a partir de un solo combustible para la producción de electricidad y otros procesos.
Confiabilidad	Es la capacidad de un equipo de desempeñar una función requerida en condiciones establecidas por un periodo de tiempo determinado.
Convencional	Subestación compuesta por equipos eléctricos de interperie y sistemas cuya finalidad es transportar energía.

Distribución	Se refiere al suministro de energía desde la subestación eléctrica hasta el usuario final.
EEGSA	Empresa Eléctrica de Guatemala Sociedad Anónima.
GIS	Gas Insulated Switchgear (Subestación Aislada en Gas).
HMI	Human Machine Interface (Interfaz Humano Máquina).
HVDC	Por sus siglas en inglés Corriente Directa de Alta Tensión
IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional).
INDE	Instituto Nacional De Electrificación.
Kilovoltio	Medida de potencial eléctrico igual a 1,000 voltios.
Mantenimiento	Conservación de los equipos eléctricos en buen estado en una situación determinada para evitar su degradación.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
NTDOST	Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transmisión.

PDH	Procuraduría de los Derechos Humanos.
RCM	Por sus siglas en inglés Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.
SF6	Hexafluoruro de azufre, gas utilizado para el corte y asilamiento eléctrico en alta tensión.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
Subestación eléctrica	Instalación que forma parte de un sistema eléctrico para el transporte y distribución de energía eléctrica
Transmisión eléctrica	Es el proceso que transfiere la energía eléctrica desde las plantas generadoras hasta el sistema de distribución para los usuarios finales.

RESUMEN

El concepto del impacto técnico y económico del mantenimiento de subestaciones eléctricas está aumentando en el país poco a poco, así como su aplicación específica en los sistemas de control y protección de estas.

Para poner en práctica un plan de mantenimiento de una subestación eléctrica es necesario conocer el impacto técnico que tendrá la empresa que invierta en recursos como equipo o capacidad instalada, además, de hacerlo rentable, éste debe ir acompañado también por el análisis que puede implicar el impacto económico y el marco regulatorio del país, con lo que se hace evidente que debe mantenerse un equilibrio entre estos tres aspectos.

El presente diseño de investigación resalta la importancia del análisis de costo – eficiencia que es necesaria en la actualidad para conservar los equipos de control y protección de una subestación eléctrica a través del análisis de información obtenida de los registros de fallas y mantenimiento en general de una subestación eléctrica compacta tomando en cuenta las limitaciones del marco regulatorio guatemalteco.

1. INTRODUCCIÓN

Guatemala inició un proceso de fortalecimiento de la infraestructura de transmisión y distribución en tensiones de 230 kV, 138 kV, 69 kV y 13.8 kV enfocado en el centro del país comparado con otros países del área centroamericana debido al excedente de producción de energía con que se cuenta, con objeto de trasladar desde las plantas generadoras la energía que los usuarios residenciales e industriales utilizan diariamente.

El presente diseño de investigación pretende obtener datos sobre el impacto técnico – económico de la implementación del mantenimiento del sistema de control y protección en una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia con la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad aplicado para mejorar la confiabilidad, seguridad y desempeño tomando en cuenta las limitaciones del marco regulatorio de Guatemala.

Hasta el momento las subestaciones eléctricas compactas con barra simple y barra de transferencia en estudio tiene programas de mantenimiento con un impacto económico que puede optimizarse y servir de base para subestaciones de similar configuración. A través de la función que cumple cada equipo del sistema de control y protección se determinarán las causas probables de falla y a la vez también se clasificará su nivel de importancia para respaldar la continuidad del servicio eléctrico y desarrollar un plan de conservación adecuado a las necesidades de cada equipo y con ello mejorar el tiempo y costo de este.

Dentro de la línea de proyectos de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en un mercado eléctrico regulado se debe

manejar la confiabilidad, seguridad y desempeño de las instalaciones y equipos según se establece en la normativa vigente de Guatemala plasmado por los entes regulador y operador del SNI.

Es importante resaltar que la tecnología de subestaciones eléctricas compactas está en auge en el país y al tomar en cuenta que la inversión para la instalación de los equipos primarios es superior que una subestación convencional, denota importancia el mantenimiento de su sistema de control y protección a través de la implementación de metodologías innovadoras para optimización de recursos dentro de un plan de mantenimiento para garantizar la confiabilidad, continuidad y seguridad de las instalaciones.

2. ANTECEDENTES

La evolución del Sistema Nacional Interconectado deja claro que debe tomarse en cuenta la mejora de los planes de mantenimiento para evitar accidentes del personal que realiza las tareas diarias y aumentando la confiabilidad determinada en la normativa vigente.

El desarrollo del subsector eléctrico de Guatemala inició en el año de 1870, según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2002) se construyeron las primeras plantas generadoras que en su mayoría eran Hidroeléctricas, y para transportar la energía hasta los centros de consumo surgen las empresas de distribución con subestaciones eléctricas, todas privadas, estas operaban bajo concesiones para vender energía, para 1932 se creó la Empresa Eléctrica de Guatemala para proporcionar energía eléctrica a los departamentos de Guatemala y Sacatepéquez por 50 años, construyendo entre otras, la planta termoeléctrica La Laguna.

En 1959 se crea el Instituto Nacional De Electrificación (INDE) otorgándole el monopolio del sector eléctrico. En los años 60's se crea el sistema interconectado INDE - EEGSA y se inicia la modernización en generación – distribución y EEGSA deja de invertir en generación ya que termina la concesión de 50 años para 1972.

Con la crisis del petróleo a partir de 1970, EEGSA pierde su posición financiera, las tarifas son fijadas por el gobierno y el INDE regula y compete en el mercado eléctrico, ejerce un monopolio de generación y distribución. Para 1980 el Estado como generador de energía inicia con las tarifas subsidiadas y la puesta

en operación de las grandes hidroeléctricas Aguacapa y Chixoy, pero para 1983, se terminan las grandes inversiones y empieza la crisis de credibilidad técnica con la falla de las 2 hidroeléctricas recién iniciando a funcionar y con señalamientos de corrupción en estos proyectos se dan varios apagones. El sistema basado en energía hidráulica para este momento no tiene capacidad de inversión debido a las condiciones económicas externas adversas al sector como la devaluación del quetzal, la crisis fiscal recurrente, el déficit de las empresas públicas y el manejo deficiente de la crisis.

Para 1990 se dan los primeros intentos de cambio de política con la cogeneración privada, se inicia el sistema interconectado con la República de El Salvador y a nivel técnico se inicia la capacitación y el estudio de nuevos modelos sectoriales y experiencia internacionales. Para 1993 se da el crecimiento de la demanda y estancamiento de la oferta por lo que se reconoce que el modelo estatal no es el adecuado para el desarrollo del subsector. La crisis financiera estatal limita las inversiones por lo que la oferta se hará mediante generación privada por lo que aparecen en el mercado las plantas generadoras térmicas. EEGSA establece la necesidad de un subsidio debido a que los costos de producción son más altos que la tarifa no ajustada por un amparo de la PDH.

En 1997 se inicia la transición del sector, se mantiene el crecimiento privado de la oferta de energía, la demanda sigue creciendo, se adelanta la preparación del marco regulatorio del sector, el crecimiento del sistema es mixto con incremento de plantas térmicas e hidráulicas pequeñas y se desregula y desmonopoliza el sector. Con la entrada en vigor de la Ley General de Electricidad en noviembre de 1996 se crea la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y se consolida la apertura de la Generación, Distribución y Comercialización de la energía eléctrica, esto incrementa la participación privada, disminuye la intervención del Estado en el sector, los contratos existentes se

respetan fielmente, la calidad del servicio mejora y se estabiliza, se atiende la demanda insatisfecha. La reglamentación se inicia para hacer operativa la ley surgiendo también el Administrador del Mercado Mayorista, lo que lleva a la estabilización de los precios de la energía de acuerdo con las tendencias económicas del sector. El mercado muestra hasta la fecha eficiencia económica, una consolidación de la institucionalidad, se ha creado la Tarifa Social para el suministro de la energía eléctrica, al mismo tiempo incluye una modernización tomada en cuenta en el plan de expansión del sistema proyectado por el Ministerio de Energía y Minas.

Como parte de la evolución en el subsector eléctrico la normativa fue adecuada para cumplir con los requisitos de calidad que todo participante del mercado debe respetar para garantizar dichos preceptos, a través del mantenimiento en la operación diaria del sistema y la modernización de las subestaciones eléctricas instaladas.

Las referencias citadas ejemplifican el esfuerzo por mejorar las prácticas de mantenimiento que actualmente se utilizan alrededor del mundo tal como la proactividad que ofrece el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad donde se combinan los diferentes tipos de mantenimiento; Correctivo, Preventivo y Predictivo, tomando la función del equipo como principal objetivo y siendo referente el nivel de confiabilidad que un sistema debe presentar para satisfacer las necesidades que actualmente se le exigen al suministro de la energía eléctrica como servicio básico, vital para las personas y la industria generando un ahorro de tiempo y dinero sostenible debido a la continuidad ininterrumpida del servicio en beneficio directo del usuario.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

Debido a la importancia que representa una subestación para la transmisión y suministro de la energía eléctrica, se debe realizar un mantenimiento acorde a las necesidades de sus componentes a través del análisis de la eficiencia y costos de este para garantizar el funcionamiento adecuado repercutiendo en el ahorro de recursos económicos y logísticos.

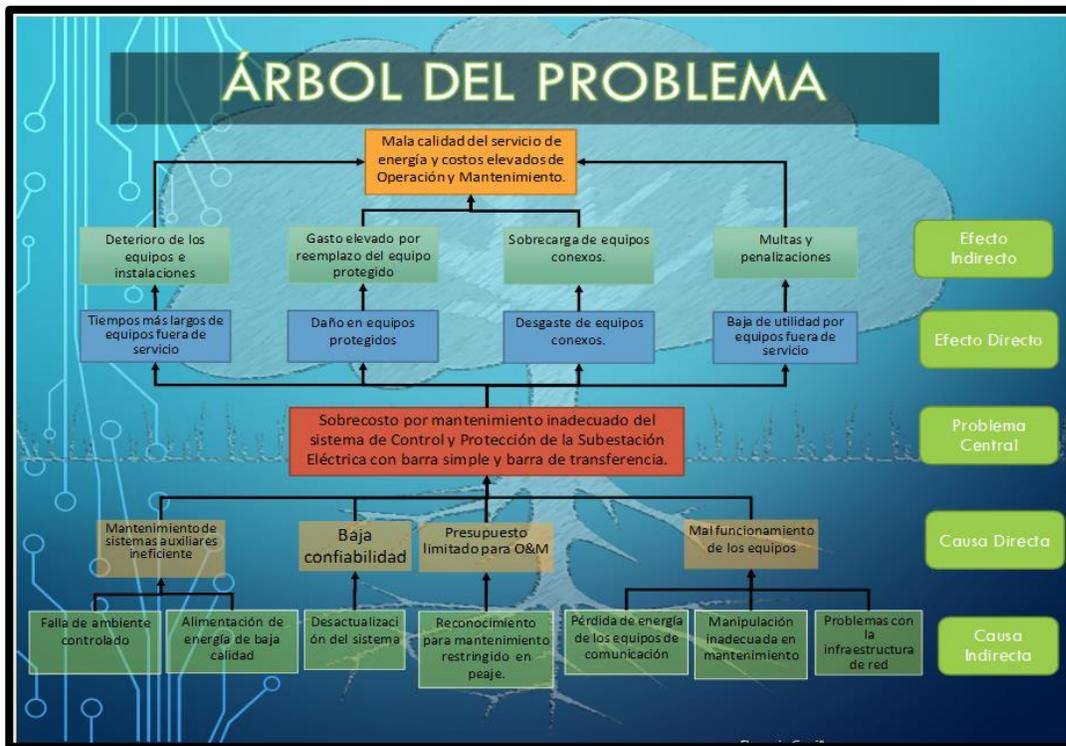
Según el libro Administración Moderna de Mantenimiento, desde la década de 1980, el mantenimiento ha evolucionado en el sector eléctrico alineándose a las necesidades actuales que presenta el sistema nacional interconectado para satisfacer los niveles de confiabilidad y continuidad del servicio de energía eléctrica y “con las exigencias de incremento de la calidad de los productos y servicios, hechas por los consumidores, el mantenimiento pasó a ser un elemento importante en el desempeño de los equipos” (Tavares, 2000, p. 3).

Hace falta además complementar la normativa actual para el mantenimiento general y del sistema de control y protección de subestaciones eléctricas del SNI, dentro de dichas limitaciones no se cuenta, por ejemplo, con la referencia específica a normas internacionales como IEC o ANSI, sino que más bien pide de manera general alinearse a estas dejando a criterio de quien las interpreta la aplicación de estas.

3.2. Descripción del problema

Actualmente el Sistema Nacional Interconectado está conformado por subestaciones eléctricas en diferentes ubicaciones, por lo que la falla de una de ellas ocasiona la pérdida del caudal de energía eléctrica hacia los usuarios finales, lo que conlleva un costo no solo para los clientes, sino que también a la empresa que provee el servicio al darse pérdidas económicas por la energía no suministrada. Parte de este problema es el plan actual de mantenimiento que cada empresa que compone el sistema tiene para darle confiabilidad a las subestaciones eléctricas donde se diferencia entre la planificación hasta la ejecución de estos ya que la normativa no lo especifica.

Figura 1. **Árbol de problema**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Formulación del problema

Para la formulación del problema se hará en base a la pregunta central del problema compuesta por sus preguntas auxiliares.

3.3.1. Pregunta central

¿Cuál es el impacto técnico - económico del mantenimiento en el sistema de control y protección de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio?

3.3.2. Preguntas auxiliares

- ¿Cómo se realizan las actividades actuales de mantenimiento de los equipos del sistema de control y protección para garantizar la adecuada administración de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia?
- ¿Cómo analizar el marco regulatorio de acuerdo con el reconocimiento de gastos de operación y mantenimiento para una subestación compacta con barra simple y barra de transferencia?
- ¿Cómo analizar las condiciones de mantenimiento de los equipos de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia de acuerdo con el establecimiento de las caracterizaciones y modos de falla del mantenimiento centrado en confiabilidad?

- ¿Cuál es el impacto técnico - económico al adoptar el mantenimiento centrado en confiabilidad en comparación con el plan de mantenimiento actual del sistema de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio?

3.4. Delimitación del problema

El tiempo necesario para la elaboración del estudio de impacto técnico económico de la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad en el sistema de protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia debe llevarse a cabo en el marco de las normas nacionales vigentes dadas por los entes rectores del sector eléctrico. Las que se pueden mencionar son las Normas de Coordinación Operativa y las Normas Técnicas de Diseño y Operación del Sistema de Transporte, así como, el Reglamento de la Ley General de electricidad del cual vela el ente regulador que es la Comisión Nacional de Energía Eléctrica de conformidad con el Decreto 93-96 del Congreso de la República del 15 de noviembre de 1996, Ley General de Electricidad.

4. JUSTIFICACIÓN

Los proyectos de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía en un mercado eléctrico regulado deben ser sujetos a evaluación de confiabilidad y riesgo, debido a que a través de estos se suministra a los usuarios a energía necesaria para desarrollar sus actividades diarias fomentando el progreso del país y la calidad de vida de los guatemaltecos.

Debido a que cada interrupción del suministro de energía eléctrica implica pérdidas e impacta en la economía de las personas e industrias que lo utilizan hasta alcanzar cifras millonarias a nivel nacional por la baja confiabilidad que puede presentar, al mejorar la gestión del mantenimiento se pretende aumentar la confiabilidad de estos sistemas a través de la valuación de los costos que conlleva realizarlo

Al mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico de la subestación se dará una mayor utilidad a la empresa dueña de la subestación por los activos que deben estar en operación, se evitan penalizaciones que pueda imponer La Comisión Nacional de Energía Eléctrica bajo el marco jurídico de la Ley General de Electricidad a través de sus Normas de Calidad, dichas penalizaciones pueden generar multas económicas de acuerdo al valor del activo declarado anualmente proporcional al tiempo que ha estado fuera de servicio en minutos y horas. Los usuarios son los más beneficiados al evitar en algunos casos fallas del sistema que pueden provocar desde el paro de actividades del hogar, pérdida del fluido eléctrico en hospitales o actividades que pueden costar a la industria millones de quetzales.

El sistema de transmisión y distribución está integrado por subestaciones de varios niveles de tensión, varias configuraciones, tipo convencionales (funcionamiento al aire libre más usadas) o aisladas en gas (sus componentes de conducción eléctrica están aislados en gas hexafluoruro de azufre), entre otros.

Los sistemas de control y protección al operar erróneamente o fallar pueden ocasionar falta de suministro de energía a los usuarios de la subestación o causar eventos en cadena afectando varias subestaciones, por tiempos prolongados, y, si incluimos el daño a los equipos que no protegieron, el costo operativo por las penalizaciones puede ser muy elevado.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el impacto técnico - económico de la implementación del mantenimiento en el sistema de control y protección de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio.

5.2. Específicos

- Recopilar las actividades actuales de mantenimiento de los equipos del sistema de control y protección para garantizar su adecuada administración en la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia.
- Analizar el marco regulatorio de acuerdo con el reconocimiento de gastos de operación y mantenimiento para una subestación compacta con barra simple y barra de transferencia.
- Analizar las condiciones de mantenimiento de los equipos de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia de acuerdo con el establecimiento de las caracterizaciones y modos de falla del mantenimiento centrado en confiabilidad.

- Determinar el impacto técnico - económico al adoptar el mantenimiento centrado en confiabilidad en comparación con el plan de mantenimiento actual del sistema de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

Es primordial contar con un plan de mantenimiento óptimo del sistema de control y protección de las subestaciones para garantizar la confiabilidad, selectividad y rapidez del servicio de energía eléctrica. Esto requiere de un análisis de los parámetros que actualmente se presentan en una subestación y así compararlos con la nueva propuesta de mantenimiento de estos sistemas centrado en confiabilidad. Además, es necesario cuantificar los costos del plan de mantenimiento actualmente utilizado para identificar la valoración actual y el ahorro que se obtendrá con la nueva metodología para cumplir al mismo tiempo con la normativa vigente.

Para llevar a cabo la investigación es necesario contar con fuentes confiables de información sobre el concepto de mantenimiento centrado en la confiabilidad para luego implementar el nuevo plan de mantenimiento de acuerdo con las necesidades que se presentan en la subestación a estudiar.

Mediante la formulación del mantenimiento centrado en la confiabilidad se pretende lo expuesto, aunque, previamente se describirán los sistemas con que cuenta la subestación eléctrica en estudio para posteriormente comparar el costo actual del mantenimiento y su contraste respecto a la nueva metodología.

Como soporte, no debe faltar la revisión del detalle de las normas que describen los alcances del mantenimiento de los sistemas de control y protección de subestaciones eléctricas que un transportista debe cumplir en el marco regulatorio de Guatemala.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Sistema Eléctrico Nacional

Para el consumo de energía de los usuarios se utiliza el sistema eléctrico nacional, en él, la energía es transportada por líneas eléctricas de alta tensión de diferentes niveles de tensión (400 kV, 230 kV, 138 kV y 69 kV), desde las plantas de generación hasta las subestaciones donde se distribuye por la red eléctrica de baja tensión (34.5 kV y 13.8 kV) hasta el usuario final.

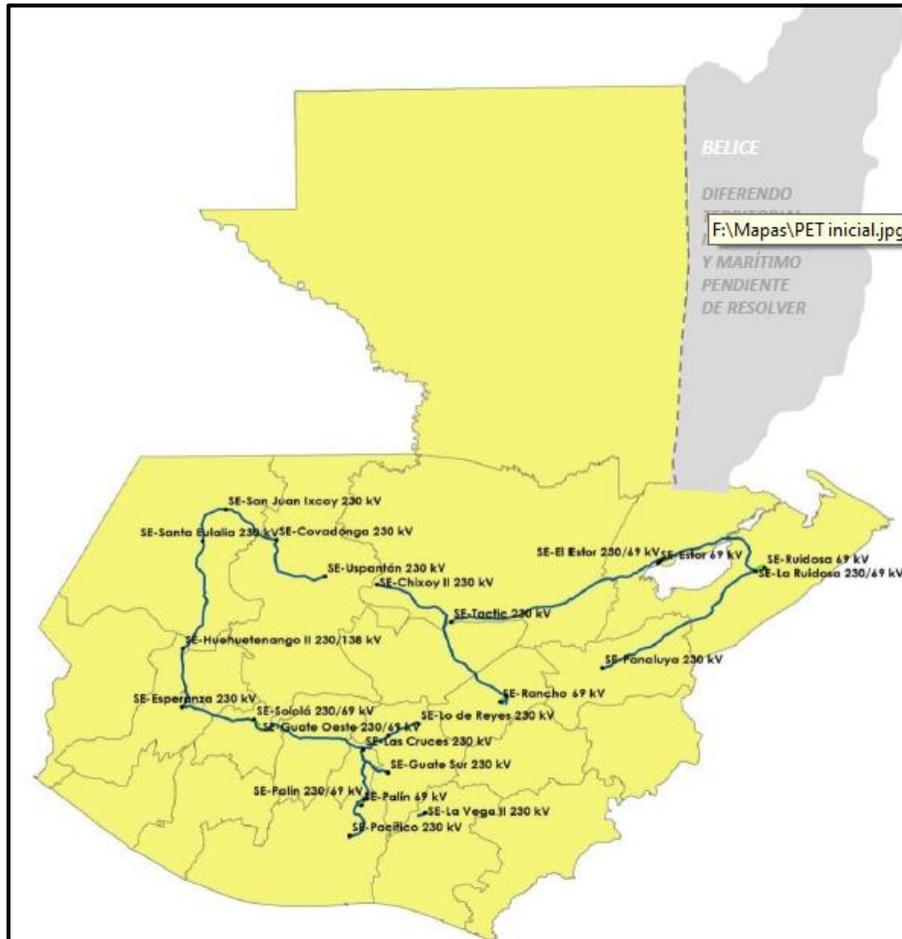
7.1.1. Subestaciones Eléctricas en Guatemala

“Una subestación eléctrica es un conjunto de elementos o dispositivos que nos permiten cambiar las características de energía eléctrica (voltaje, corriente, frecuencia, entre otros), de corriente alterna a corriente continua, o bien, conservarle dentro de ciertas características” (Hárper, 2000, p. 17).

Desde el año 1870 la energía ha jugado un papel muy importante en el desarrollo del país, el Gobierno de Guatemala a través del Ministerio de Energía y Minas ha implementado un plan para expandir el transporte y generación de la energía que ha permitido instalar nuevas subestaciones y líneas, y así transportar esta desde las plantas generadoras a las subestaciones transformadoras dónde se distribuye a los usuarios y a las plantas industriales del país.

“El Plan de Expansión PET-1-2009 consiste en la adición de red en 230 kV, en sus inicios contemplaba la adición de 12 subestaciones y más de 850 kilómetros de línea” (Ministerio de Energía y Minas, 2020, p. 35).

Figura 2. Plan de expansión PET-1-2009



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2020 - 2050*. (2020) Consultado el 6 de abril de 2021. Recuperado de https://www.cnee.gob.gt/PlanesExpansion/2020-2050/PlanExpansionSistemaTransporte2020-2050_1.pdf.

El Plan de Expansión "PETNAC-2014 contempla la inclusión de nueva infraestructura al Sistema Nacional Interconectado, mayormente se pretende construir infraestructura de 69 kV. Este proyecto es importante porque pretende mejorar la calidad de aquellos puntos en los que el servicio posee ciertas deficiencias" (Ministerio de Energía y Minas, 2020, p. 38).

Figura 3. Plan de expansión PETNAC - 2014



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2020 - 2050*. (2020). Consultado el 6 de abril de 2021. Recuperado de https://www.cnee.gob.gt/PlanesExpansion/2020-2050/PlanExpansionSistemaTransporte2020-2050_1.pdf.

7.1.2. Tipos de subestaciones eléctricas de 69 kV

Harper (2000) realiza una clasificación de los tipos de subestaciones de acuerdo con los siguientes agrupamientos.

Por su operación:

- Corriente alterna
- Corriente continua

Por su servicio:

- Primarias elevadoras
- Primarias receptoras reductoras
- Primarias de enlace o distribución
- Primarias de switcheo o de maniobra
- Primarias convertidoras o rectificadoras
- Secundarias receptoras reductoras
- Secundarias receptoras elevadoras
- Secundarias distribuidoras
- Secundarias de enlace
- Secundarias convertidoras o rectificadoras

Por su construcción:

- Tipo intemperie
- Tipo inferior
- Tipo blindado

Con esta clasificación, se puede detallar a continuación la descripción de estas.

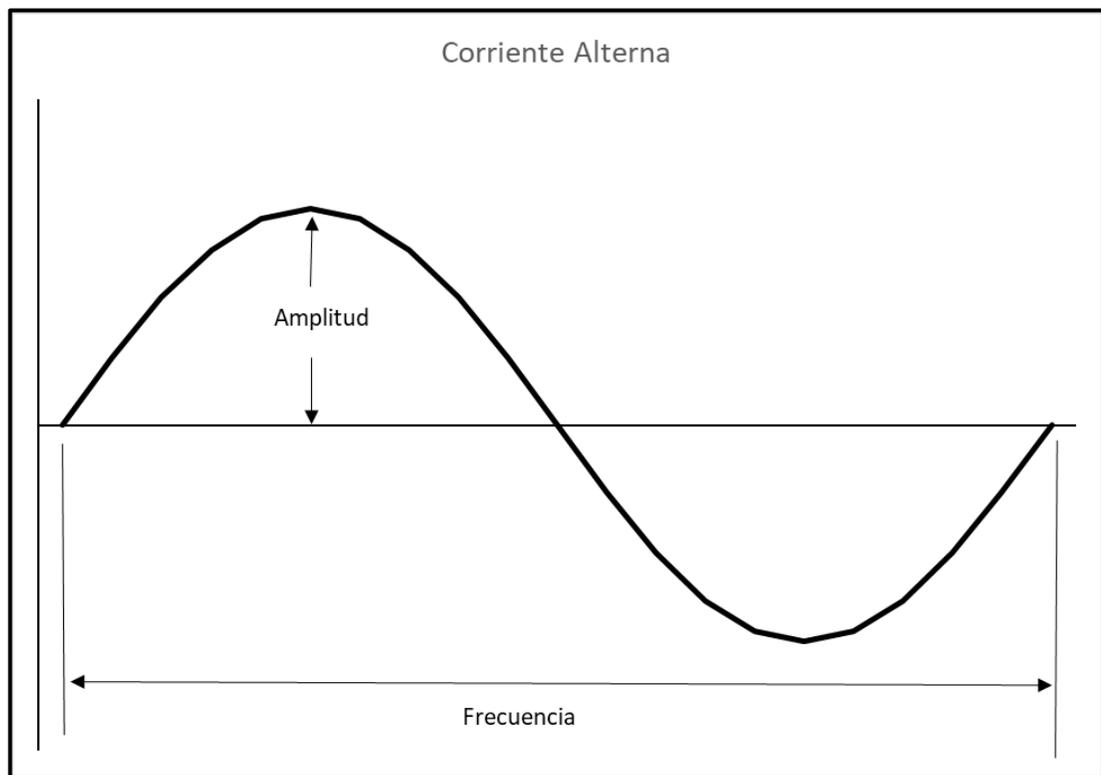
7.1.2.1. Por su operación

Para esta clasificación se toma en cuenta el tipo de energía utilizada para el transporte de esta, la cual modifica la forma en que se opera debido a las condiciones particulares de cada tipo de energía.

7.1.2.1.1. De corriente alterna

La corriente alterna es un tipo energía eléctrica que tiene como característica principal una onda sinusoidal que alterna entre flanco positivo y negativo que posee una amplitud y también una frecuencia, en Guatemala la frecuencia es de 60 Hertz. Actualmente es la tecnología más utilizada en el mundo ya que se ha desarrollado mejor con el paso del tiempo y por ello es más económica.

Figura 4. **Corriente alterna**

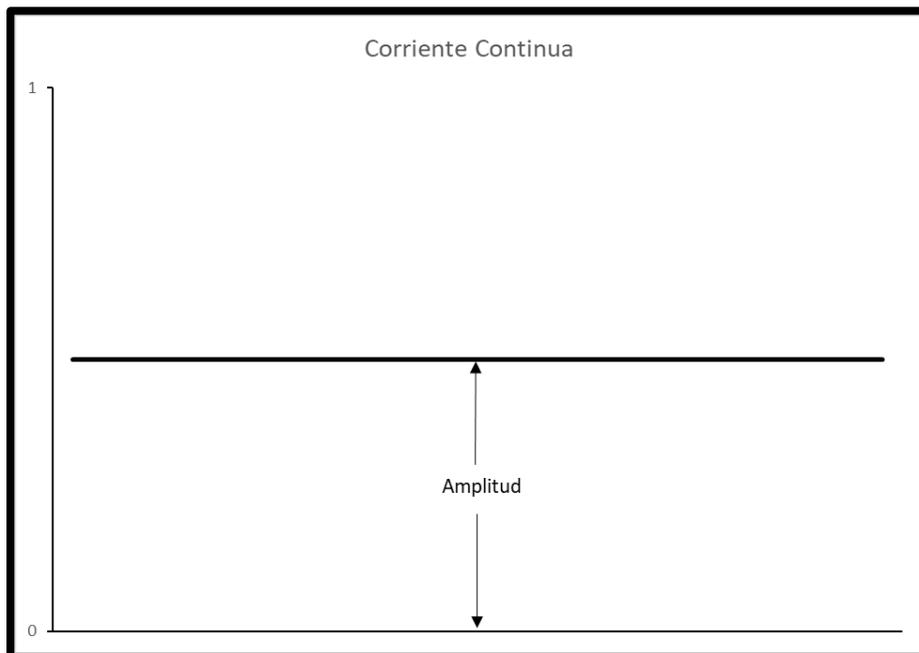


Fuente: elaboración propia.

7.1.2.1.2. De corriente continua

Es un tipo energía eléctrica que tiene como característica que se mantiene constante a una magnitud de tensión y corriente. Actualmente es la tecnología que está en inicios de utilización en el mundo ya que se ha desarrollado mejor la corriente alterna, aunque también se caracteriza por tener menos pérdidas al transportarla ya que no fluctúa el voltaje y la corriente en el tiempo y evitando pérdidas por calor y corrientes parásitas. Actualmente en Guatemala no existen subestaciones con este tipo de tecnología ya que es muy costosa porque el alto precio de sus componentes empieza a ser rentable cuando se trata de transporte de energía a distancias largas y tampoco se tiene contemplado dentro de la normativa vigente del país.

Figura 5. **Corriente continua**



Fuente: elaboración propia.

7.1.2.2. Por su servicio

Por su servicio se clasifican en subestaciones primarias y subestaciones secundarias.

7.1.2.2.1. Primarias

Las subestaciones elevadoras normalmente realizan una conversión de la magnitud de la tensión de un nivel inferior hacia un nivel superior a través de un transformador de potencia, en Guatemala un ejemplo sería una planta de generación de 13.8 kV a 69 kV.

Las Subestaciones receptoras reductoras contrario a las elevadoras, realizan una conversión de la magnitud de la tensión de un nivel superior hacia un nivel inferior a través de un transformador de potencia. En Guatemala un ejemplo sería una subestación que recibe por una línea de transmisión una tensión de 230 kV que se reduce a 69 kV como la subestación Santa Isabel ubicada en Escuintla.

Las subestaciones de enlace o distribución tienen como función conectar 2 subestaciones del mismo nivel de tensión o distribuir la energía al colocar en su salida líneas de distribución de energía.

Las subestaciones de switcheo o de maniobra normalmente se utilizan únicamente para cambiar el flujo de la energía desde la fuente de alimentación hacia los centros de consumo de acuerdo con las necesidades al operar interruptores de potencia como se necesiten.

Las subestaciones convertidoras o rectificadoras se utilizan para convertir la energía ya sea de corriente alterna a corriente continua o viceversa para realizar un ahorro en el transporte de energía de un lugar a otro.

7.1.2.2.2. Secundarias

Las subestaciones receptoras reductoras realizan una conversión de la magnitud de la tensión de un nivel superior hacia un nivel inferior a través de un transformador de potencia, en Guatemala un ejemplo sería una subestación que recibe por una línea de transmisión una tensión de 69 kV que se reduce a 13.8 kV.

Las subestaciones receptoras, contrario a las reductoras, normalmente realizan una conversión de la magnitud de la tensión de un nivel inferior hacia un nivel superior a través de un transformador de potencia, en Guatemala un ejemplo sería una planta generadora renovable de 5.0 kV a 13.8 kV.

Las subestaciones distribuidoras tienen como función distribuir la energía al colocar en su salida líneas de distribución de energía para enviar energía a los usuarios finales.

Las Subestaciones de enlace tienen como función conectar 2 subestaciones del mismo nivel de tensión en líneas de distribución para dar versatilidad al sistema.

Las Subestaciones convertidoras o rectificadoras se utilizan para transformar la energía de corriente alterna a corriente continua o viceversa en sistemas de distribución de energía o en instalaciones del usuario final. Actualmente se tiene en construcción una línea de interconexión de 614 km en

corriente directa (HVDC) entre Panamá y Colombia con capacidad de 600 MW que pronto entrará en funcionamiento y donde se utilizarán este tipo de subestaciones.

7.1.2.3. Por su construcción

Esta categoría comprende las subestaciones de acuerdo con el diseño de su construcción para la aplicación o lugar donde serán instaladas.

7.1.2.3.1. Tipo intemperie

Por su construcción están diseñadas para operar al aire libre y soportar las condiciones climáticas imperantes del área al tomar en cuenta condiciones de viento, temperatura, altura sobre el nivel del mar y otros factores. Los elementos que componen estas subestaciones deben resistir estas condiciones. Se encuentran por ejemplo las subestaciones Guate Sur y Guate Norte en la ciudad de Guatemala.

7.1.2.3.2. Tipo interior

Están construidas con elementos diseñados para ubicarse bajo techo por condiciones requeridas por su construcción, se incluyen dentro de estas las ubicadas en sótanos de edificios o por condiciones especiales de las grandes ciudades donde ya no hay espacio para la instalación de subestaciones tipo intemperie realizando la optimización con un tamaño compacto adecuado al lugar. Se puede citar por ejemplo la subestación eléctrica Incienso ubicada en la ciudad de Guatemala.

7.1.2.3.3. Tipo blindado

Dentro de esta categoría podemos incluir las subestaciones que poseen celdas donde se alojan todos los elementos que la conforman y que debido a condiciones de diseño del proyecto fueron solicitadas de esta manera. Dentro de las que se tiene conocimiento están la subestación Kaminal, Mayan Golf y San Juan Sacatepéquez que tienen celdas de 13.8 kV.

7.1.3. Elementos de una subestación

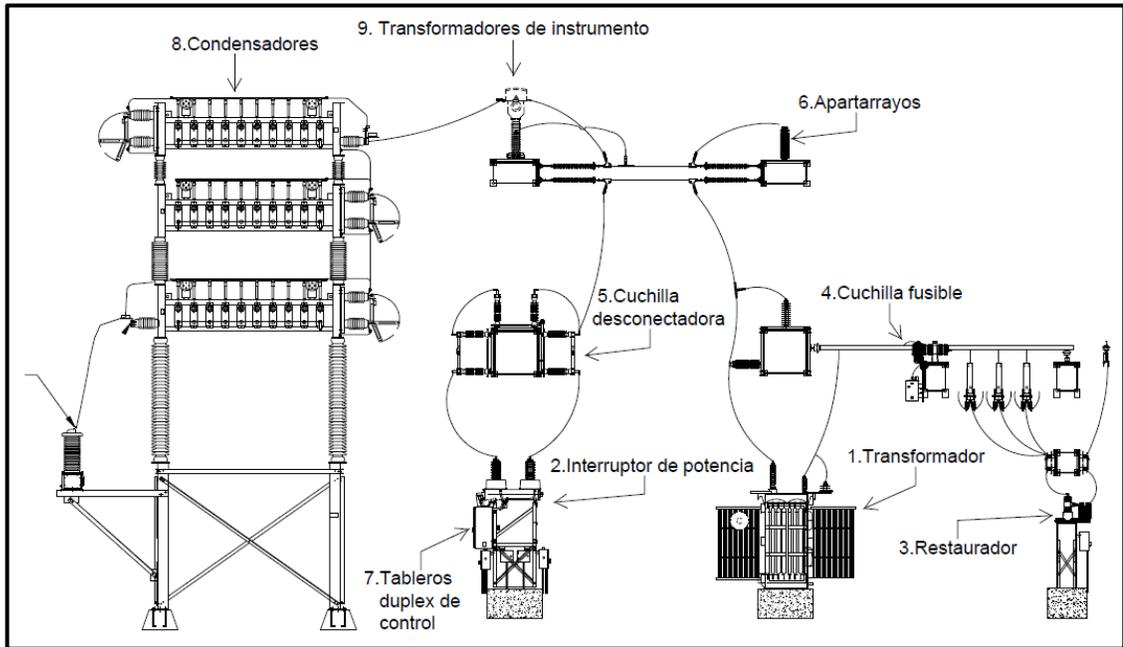
Al referenciar de nuevo a Harper (2000) los dispositivos que conforman una subestación se pueden agrupar en elementos principales o primarios y elementos secundarios.

Elementos principales o primarios

Se caracterizan por ser los elementos más importantes y utilizados para transportar la energía eléctrica.

- Transformador.
- interruptor de potencia.
- Restaurador.
- Cuchillas fusible.
- Cuchillas desconectoras y cuchillas de prueba.
- Apartarrayos.
- Tableros dúplex de control.
- Condensadores.
- Transformadores de instrumento.

Figura 6. Elementos primarios de subestación



Fuente: elaboración propia, empleando software AutoCAD Electrical 2021.

Elementos secundarios

Se utilizan para complementar el funcionamiento de los elementos primarios.

- Cables de potencia.
- Cables de control.
- Alumbrado.
- Estructura.
- Herrajes.
- Equipo contra incendio.
- Equipos de filtrado de aceite.

- Sistema de tierras.
- Carrier.
- Intercomunicación.
- Trincheras, ductos, conducto, drenajes.
- Cercas.

7.1.4. Subestaciones aisladas en gas

Las subestaciones aisladas en gas son en si un diseño compacto de subestación eléctrica, comparativamente con aquellas de diseño convencional con aire como aislamiento. Se incluyen “en las estaciones típicas de SF6, las barras y cierto equipo primario, cómo son los transformadores de instrumento (potencial y corriente), los apartarrayos (en ciertos casos) y los interruptores” (Harper, 2000, p. 196). En la ciudad de Guatemala se pueden citar las subestaciones Incienso, Minerva, Tinco, Montserrat y Ciudad Vieja.

7.1.5. Configuración de subestaciones

Otra clasificación que se maneja en las subestaciones es por su configuración, es decir, de acuerdo con su diseño de maniobrabilidad, dentro de esta, como se describen a continuación.

7.1.5.1. Con barra sencilla

En esta configuración solamente se tiene una barra donde se conectan, ya sea bahías de línea o bahías de transformador. La desventaja es que para realizar el mantenimiento a los interruptores se debe sacar de servicio cada bahía o la subestación en total. Se pueden mencionar entre estas las subestaciones San Juan de Dios, Gerona, La Flores, ubicadas en la ciudad de Guatemala.

7.1.5.2. Con doble barra

Esta configuración es más versátil ya que puede albergar varias bahías en ambas barras y cuando ocurra una falla en una de las barras puede sacarse de servicio y trasladar las bahías en buen estado hacia la barra que no está fallada para mantener la continuidad del servicio. Ejemplos de estas subestaciones pueden ser las subestaciones Carlos Dorión, Santa Mónica, Guate Sur, ubicadas en ciudad de Guatemala.

7.1.5.3. Con barra principal y barra de transferencia

Esta configuración es también bastante versátil, pero a diferencia de la configuración de doble barra se puede dar mantenimiento al interruptor de cualquier bahía (uno a la vez) al utilizar el interruptor ubicado en la bahía de transferencia. En la ciudad de Guatemala podemos encontrar las subestaciones Minerva, Montserrat, Tinco, Ciudad Vieja, entre otras.

7.2. Sistemas de Control y protección

Los sistemas de control y protección se utilizan para evitar daños a equipos o instalaciones eléctricas evitando que una falla se extienda de forma puntual o encadenada por todo el sistema eléctrico.

7.2.1. Requerimientos de los sistemas de control y protección en subestaciones eléctricas

Para el mantenimiento de subestaciones la Comisión Nacional de Energía confirma que “las normas serán de aplicación obligatoria, en la República de

Guatemala, para todas las personas individuales o jurídicas, que tengan relación con el diseño, construcción, supervisión, operación y mantenimiento de las instalaciones de servicio de transporte de energía eléctrica” (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 1999, p. 4).

Por la seguridad de las personas y las instalaciones de una subestación se necesitan los sistemas de control y protección.

En el diseño de sistemas eléctricos, se han desarrollado varias técnicas para minimizar los efectos de las anomalías que ocurren en el mismo, de tal forma que se diseña el sistema para que sea capaz de:

Aislar rápidamente la porción afectada del sistema, de manera que se minimice el efecto y se mantenga el servicio tan normal como sea posible. Reducir el valor de la corriente de cortocircuito, para reducir los daños potenciales al equipo o partes de la instalación. Proveer al sistema, siempre que sea posible, de medio de recierre automático, para minimizar la duración de fallas de tipo transitorio. De acuerdo con lo anterior, la función del sistema de protección se puede definir como: la detección y pronto aislamiento de la porción afectada del sistema, ya sea que ocurra en cortocircuito, o bien, en otra condición anormal que puede producir daño a la parte afectada o a la carga que alimenta. (Harper, 2002, p. 18).

7.2.2. Tipos de sistemas de control y protección

Los sistemas de control y protección en las subestaciones para este estudio se pueden catalogar de la siguiente manera:

- Protección de transformadores

- Protección de líneas de transmisión
- Protección de generadores
- Protección de barras

7.2.3. Elementos de un sistema de control y protección

Entre los elementos del sistema de control y protección de una subestación eléctrica compacta de barra simple y barra de transferencia se pueden mencionar los siguientes:

- Unidad terminal remota
- Interfaz humano Máquina (HMI) si aplica
- Relés de protección
- Controladores de bahías.
- Circuitos de cableado de control
- Circuito de cableado de corrientes
- Circuito de cableado de voltajes
- Unidad terminal remota
- Seccionadores
- Circuito de control de seccionadores
- Interruptores
- Circuito de control de interruptores
- Circuito de disparo de interruptores 1
- Circuito de disparo de interruptores 2
- Circuito de alimentación de equipos
- Servicios auxiliares de corriente continua
- Servicios auxiliares de corriente alterna
- Dispositivos de alarma de seccionadores

- Dispositivos de alarmas mecánicas de interruptores
- Dispositivos de alarmas mecánicas de transformadores
- Dispositivos de disparos mecánicos de transformadores

7.2.4. Mantenimiento de sistemas de control y protección

Debido a la importancia de los sistemas de control y protección de una subestación que de acuerdo con el tamaño por el número de bahías que posee, el nivel de tensión, ubicación, importancia o el tipo de construcción, es necesario contar con el nivel de confiabilidad, seguridad y selectividad que solo un correcto manejo del mantenimiento a estos sistemas puede dar. La búsqueda del mantenimiento en cualquier elemento que comprende una subestación radica en el costo que este puede generar al fallar, ya que al salir de servicio cualquier equipo que realicé el transporte o suministro de energía hacia o desde el sistema implica una pérdida económica o incluso una penalización de parte de las autoridades de acuerdo con la normativa vigente.

Cuando se ha realizado el mantenimiento basado en una metodología ha brindado mejores resultados. Según Moubray (2004), “si el mantenimiento centrado en confiabilidad es aplicado correctamente a los sistemas de mantenimiento ya existentes, reduce la cantidad de trabajo de rutina de cada período habitualmente en un 40 % y un 70 %” (p. 20). Por otro lado, Méndez (2019), “propone una metodología para desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento, que busca a través de la intervención de los equipos más críticos de la subestación, mejorar la confiabilidad de estos, repercutiendo sobre la subestación que los compone” (p. 83). De nuevo al citar a Moubray (2004), “si RCM se utiliza para desarrollar un programa de mantenimiento nuevo, la carga de trabajo resultante es mucho más baja que si el programa es desarrollado con los métodos tradicionales” (p. 20).

Dentro del mantenimiento también surge que el objetivo de probar todo el sistema de protección y control es validar el rendimiento de todo el sistema, desde los componentes individuales hasta los componentes de respaldo, redundantes y auxiliares, y si la interacción entre estos componentes funciona correctamente en términos de mantener la confiabilidad y seguridad del esquema a un nivel deseable de desempeño (Instituto de Ingeniero Eléctricos y Electrónicos, 2009, p. 30).

7.3. Normas de subestaciones eléctricas

En Guatemala, para garantizar la confiabilidad y la continuidad del servicio de energía eléctrica, los agentes del mercado deben cumplir con las normas establecidas por los entes regulador y rector que rigen el mercado eléctrico nacional de acuerdo con las siguientes normas establecidas legalmente como marco regulatorio nacional. Para realizar un análisis en el marco regulatorio de Guatemala se listan a continuación las normas aplicables al estudio.

Según el AMM el mantenimiento conlleva una responsabilidad ya que el transportista debe “controlar la condición de sus líneas y equipos de subestaciones, incluyendo las protecciones, a fin de decidir su mantenimiento y reparación y declarar su estado de operación” (Administrador del Mercado Mayorista, 2003, p. 4).

7.3.1. Normas técnicas del sistema de control y protección

“Son las disposiciones emitidas por la Comisión de conformidad con la Ley y este Reglamento, en congruencia con prácticas internacionales aceptadas y que servirán para complementar el conjunto de regulaciones sobre las actividades del sector eléctrico” (Acuerdo Gubernativo 256-97, 1997, p. 23).

7.3.2. Normas operativas aplicables en el sistema de control y protección

Según el Ministerio de Energía y Minas de Guatemala son “las disposiciones y procedimientos, emitidos por el AMM y aprobados por la CNEE, que tienen por objeto, garantizar la coordinación de la operación del SNI, para abastecer la demanda a mínimo costo, manteniendo la continuidad y la calidad del servicio” (Administrador del Mercado Mayorista, 1998, p. 67).

7.3.3. Normas comerciales aplicables al sistema de control y protección

“Es el conjunto de disposiciones y procedimientos, emitidos por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM), y aprobados por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, que tienen por objeto, garantizar la coordinación de las transacciones comerciales del Mercado Mayorista” (Administrador del Mercado Mayorista, 1998, p. 67).

7.3.4. Normas aplicables al mantenimiento del sistema de control y protección

El mantenimiento de los sistemas de control y protección normalmente se encuentra establecido en los lineamientos de las Normas Técnicas, las Normas de Coordinación Operativa y las Normas de Coordinación Comercial de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

7.4. Fallas en subestaciones eléctricas de 69 kV

Para obtener una mejor apreciación de las fallas se pueden citar varias características.

7.4.1. Duración de las fallas de una subestación eléctrica compacta de barra simple y barra de transferencia

Debido a la naturaleza de la energía es muy común que las fallas sean de alto impacto en el SNI, por lo tanto, la duración de las fallas de una subestación eléctrica impacta en la energía no suministrada que se les vende a los consumidores.

7.4.2. Frecuencia de las fallas en una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia

Otro parámetro importante para la evaluación es el costo en que se incurre cuando se da una falla debido a la frecuencia con que esta ocurre, de tal manera que, la cantidad en tiempo y dinero multiplicado por la frecuencia de las fallas del elemento involucrado da como resultado el costo total del evento y así se evidencie la necesidad de mejora de las prácticas de mantenimiento que actualmente se utilizan.

7.4.3. Costo asociado al mantenimiento en el sistema de control y protección de una subestación compacta con barra simple y barra de transferencia

El costo que actualmente se refleja en el mantenimiento en el sistema de control y protección está asociado principalmente al mantenimiento correctivo y

preventivo, pero es necesario que se cambie la metodología que debe satisfacer en corto, mediano y también a largo plazo con las necesidades que actualmente presentan nuestros sistemas eléctricos y la seguridad industrial preventiva del personal que opera y mantiene las instalaciones y para asegurar el servicio continuo de los elementos que conforman la subestación.

Citando a Hilber (2008), “ha sido mostrado que, con una diversificación del mantenimiento entre componentes, es posible disminuir el costo total del mantenimiento mientras se incrementa la confiabilidad promedio para los consumidores” (p. 49).

El reglamento de la CNEE confirma que “Los costos anuales de operación, mantenimiento y administración, que serán como máximo el 3 % del costo total de la inversión, este porcentaje podrá ser modificado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, sobre la base de estudios técnicos” (Acuerdo Gubernativo 256-97, 1997, p. 37). Por ejemplo, las empresas transportistas invierten 20 millones de quetzales en una instalación y solamente se reconoce para el mantenimiento y operación 600 mil quetzales, aparte del peaje que se cobra por el transporte de la energía eléctrica por MWh.

7.5. Tipos de mantenimiento

Aunque existen varios tipos de mantenimiento que con el paso de los años se han desarrollado idealmente el mantenimiento debe ser ordenado y estructurado ya que “los modelos también ofrecen una visión de cómo la integración directa de los datos de la operación recopilada a través de los modelos desarrollados a nivel de componentes puede ayudar a mejorar el funcionamiento y la gestión del mantenimiento” (Mazidi, 2017, p. 10).

7.5.1. Mantenimiento correctivo

La metodología de este mantenimiento en la historia se ha mantenido y conservado ya que es el primero en aparecer cuando se inicia la industria y su principio básico es dejar que el equipo falle para ser reparado. No ofrece mayor versatilidad y si es un equipo importante el fallado no es conveniente utilizarlo.

7.5.2. Mantenimiento preventivo

Se realiza al evaluar la periodicidad de la intervención de los equipos para evitar que fallen, no es conveniente en todos los casos porque en algunos equipos es requerido antes el mantenimiento y en otros después por lo que de acuerdo con el costo a veces no es recomendable realizarlo igual para diferentes equipos de la instalación.

7.5.3. Mantenimiento predictivo

Se basa en mediciones de los sistemas para predecir cuándo pueden fallar los equipos e intervenirlos antes de que eso ocurra, igual que en el mantenimiento preventivo no se puede realizar en todos los equipos a menos que tenga parámetros medibles que determinen su comportamiento al fallar.

7.5.4. Mantenimiento centrado en confiabilidad

Es una metodología de mantenimiento donde se combinan los 3 tipos de mantenimiento anteriores y se basa en la condición de los equipos para caracterizarlos de acuerdo con la función que cumplen en el sistema y al observar sus modos de falla, se puede decir, que es un mantenimiento flexible que determina las necesidades de cada equipo por separado. Citando también a

Bertling (2002), “es beneficioso aplicar al manejo de proyectos las estrategias que estén basadas en resultados desde técnicas sistemáticas cuantitativas como la metodología RCM” (p. 382).

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

- 1.1. Actividades de mantenimiento en una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia.
- 1.2. Actividades de mantenimiento de equipos primarios
- 1.3. Actividades de mantenimiento de equipos de control y protección

2. RECOLECCIÓN DE DATOS

- 2.1. Reconocimiento de gastos de operación y mantenimiento según el marco regulatorio de una subestación eléctrica Compacta con barra simple y barra de transferencia.
 - 2.1.1. Costo de reconocimiento de una subestación compacta.
 - 2.1.2. Costo de reconocimiento de una bahía de línea.
 - 2.1.3. Costo de reconocimiento de una bahía de transformador.

2.1.4. Costo del mantenimiento del sistema de control y protección.

3. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD EN EL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE LA SUBESTACIÓN

3.1. Mantenimiento centrado en confiabilidad del sistema de control y protección

3.2. Caracterización de los elementos del sistema de control y protección

3.3. Modos de falla de los elementos del sistema de control y protección

4. COSTOS EN EL MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL Y PROTECCIÓN DE LA SUBESTACIÓN

4.1. Tipo de fallas en una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia

4.2. Costos de las fallas en una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia

4.2.1. Costo por energía no suministrada

4.2.2. Costo por penalizaciones

4.2.3. Costo por reparación de elementos del sistema de control y protección

4.3. Costo del mantenimiento centrado en confiabilidad

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE DATOS

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

El enfoque del estudio propuesto es mixto, ya que contempla el análisis de calidad y características del mantenimiento cualitativamente y comparación de costos, tiempo y recursos cuantitativamente.

El alcance es correlacional, dado que se establecen relaciones entre 2 o más variables, es decir, se realiza una comparación de disminución o aumento de una variable respecto a otra variable en el tiempo.

El diseño adoptado será no experimental, pues la información del impacto económico de la implementación de mantenimiento en sistemas de control y protección de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando el marco regulatorio de Guatemala se analizará en su estado original sin ninguna manipulación; además será transversal pues se estudiarán en un período determinado las tareas del mantenimiento, y longitudinal, pues se analizará el comportamiento de los costos del mantenimiento a través del tiempo.

9.2. Fases del estudio

Las fases que componen el desarrollo del estudio se describen en el orden que se mencionan.

9.2.1. Fase 1: recopilación de la información

En la primera fase se realizará la recopilación de la información de las fallas de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia y la duración de estas, además de la información de mantenimientos correctivos y preventivos e investigar las fuentes de información necesarias para enriquecer el estudio.

9.2.2. Fase 2: caracterización de la información

La segunda fase consiste en caracterizar las actividades actuales de mantenimiento de los equipos del sistema de control y protección para garantizar la adecuada administración de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia.

9.2.3. Fase 3: análisis del marco regulatorio

La tercera fase consiste en analizar el marco regulatorio de acuerdo con el reconocimiento de gastos de operación y mantenimiento de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia.

9.2.4. Fase 4: análisis de la información

La cuarta fase consiste en analizar las condiciones de mantenimiento de los equipos de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia de acuerdo con el establecimiento de las caracterizaciones y modos de falla del mantenimiento centrado en confiabilidad.

9.2.5. Fase 5: determinación del impacto técnico – económico

La quinta fase consiste determinar el impacto técnico - económico al adoptar el mantenimiento centrado en confiabilidad en comparación con el plan de mantenimiento actual del sistema de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio.

9.3. Unidades de análisis

La población en estudio serán los equipos que componen el sistema de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia, la cual se encuentra dividida en subpoblaciones dadas por la función que cumplen y el modo en que fallan, de la cual se extraerán muestras de forma cualitativa y cuantitativamente, que serán estudiadas en su totalidad.

Además, se toma en cuenta que deben compararse las variables cuantitativas representadas por las normas en el marco regulatorio de Guatemala que contemplan los sistemas de control y también los sistemas de protección de una subestación compacta de barra simple y barra de transferencia.

9.4. Variables

¿Cómo se realizan las actividades actuales de mantenimiento de los equipos del sistema de control y protección para garantizar su adecuada administración en la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia?

Tabla I. **Variables pregunta 1**

Criterio Variable	Categoría		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua			
Equipos del sistema		X				X	Ordinal
Actividades de mantenimiento		X				X	Ordinal

Fuente: elaboración propia.

¿Cómo analizar el marco regulatorio de acuerdo con reconocimiento de gastos de operación y mantenimiento para una subestación compacta con barra simple y barra de transferencia?

Tabla II. **Variables pregunta 2**

Criterio Variable	Categoría		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continúa			
Equipo del sistema		X				X	Ordinal
Cumple con la normativa o no	X					X	Nominal

Fuente: elaboración propia.

¿Cómo analizar las condiciones de mantenimiento de los equipos de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia de acuerdo con el establecimiento de las caracterizaciones y modos de falla del mantenimiento centrado en confiabilidad?

Tabla III. **Variables pregunta 3**

Variable \ Criterio	Categoría		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua			
Tipo de equipo		X				X	Ordinal
Función que cumple		X				X	Ordinal

Fuente: elaboración propia.

¿Cuál es el impacto técnico - económico al adoptar el mantenimiento centrado en confiabilidad en comparación con el plan de mantenimiento actual del sistema de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio?

Tabla IV. **Variables pregunta 4**

Variable \ Criterio	Categoría		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continúa			
Energía no suministrada			X			X	Ordinal
Índice de calidad de servicio			X			X	Ordinal
Costo de mantenimiento por equipo			X			X	Ordinal
Costo de las fallas			X			X	Ordinal

Fuente: elaboración propia.

9.5. Resultados esperados

Obtener el costo estimado del mantenimiento basado en confiabilidad comparado con el mantenimiento tradicional que se realiza actualmente en el sistema de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia como principal resultado. Además de realizar las observaciones técnicas sobre el mantenimiento del sistema de control y protección de la subestación para la mejora de este y cuantificar el costo de las fallas y su reparación relacionadas también con el sistema de control y protección, todo esto considerando las limitaciones del marco regulatorio de Guatemala.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El impacto técnico - económico del mantenimiento centrado en confiabilidad de un sistema de control y protección de una subestación eléctrica de 69kV se debe analizar cuantitativamente a través de los costos que implica tener una falla y la duración de esta a través de la estadística descriptiva al separar los datos por criterios temporales y cronológicos, además, también se debe analizar el tiempo y el costo del mantenimiento tanto preventivo como correctivo con los métodos tradicionales de mantenimiento a través del mismo análisis estadístico descriptivo.

Las técnicas de análisis de información cuantitativa serán aplicadas a los datos estadísticos recopilados de un historial de fallas del año 2018 al año 2020, estos datos que tienen como variable de medición el costo generado por la cantidad de energía no suministrada a los clientes y el tiempo que duró cada falla, otra variable de medición será el costo que generó un mantenimiento correctivo para mitigación de la falla y de esta manera se determinará el impacto económico.

La otra variable de medición será el costo que actualmente se tiene de los mantenimientos programados al sistema de control y protección de una subestación eléctrica de 69 kV ya que a través de la optimización debida a la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad deberá tener un ahorro reflejado en costos que se debe proyectar.

Las técnicas de análisis de información cualitativa se utilizarán para clasificar los equipos por su impacto en el momento de fallar el sistema al que pertenecen, además, estas técnicas de información permitirán clasificar si el

mantenimiento cumple con los requerimientos de la normativa vigente en el país. Para este análisis se hará uso de las técnicas la clasificación de la información organizándola, categorizándola y describiéndola.

Para el análisis de la información cuantitativa se hará usos del software de cálculo Excel, para procesar adecuadamente los datos y su presentación gráfica para facilitar su comprensión y comparación entre las variables a medir para determinar la factibilidad de la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad.

El manejo de la información cualitativa se hará con el software Word integrado también con el software Excel ya descrito en el párrafo anterior, de esta manera se tendrá la facilidad de complementar la información para su correcta presentación e interpretación al incluir infografías, tablas, gráficas y figuras para descripción de las unidades de análisis.

Por último, el análisis técnico se hará a través de la experiencia al utilizar las filosofías de control y protección que se maneja actualmente bajo la revisión y aprobación del asesor.

11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El estudio es factible porque se propone como parte de las atribuciones diarias que actualmente se realizan en la empresa propietaria de la subestación objeto del estudio. Se considera que los recursos con que se cuentan y se reflejan en tabla de detalles de costos, donde se muestra el costo que conlleva la utilización de cada uno de los recursos.

Para la primera fase se debe realizar las consultas necesarias de las bibliografías encontradas para la obtención de información como herramienta de investigación para las primeras 2 fases del estudio, así como la información de los equipos de la subestación eléctrica en estudio.

Para el desarrollo de la segunda a la cuarta fase se debe tener el acceso a la información del historial de fallas y mantenimientos de la subestación eléctrica en estudio, además es necesario contar con la información de los costos del mantenimiento.

Para la cuarta fase se desarrollará la caracterización de los equipos y sus modos de falla con la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad.

Por último, en la quinta fase se debe realizar el análisis técnico – económico del mantenimiento centrado en confiabilidad considerando las limitaciones del marco regulatorio de Guatemala.

A continuación, se muestra el detalle de costos necesarios para la realización del presente estudio y se toma en cuenta el tiempo necesario para cumplir con el mismo.

Tabla V. **Detalle de costos**

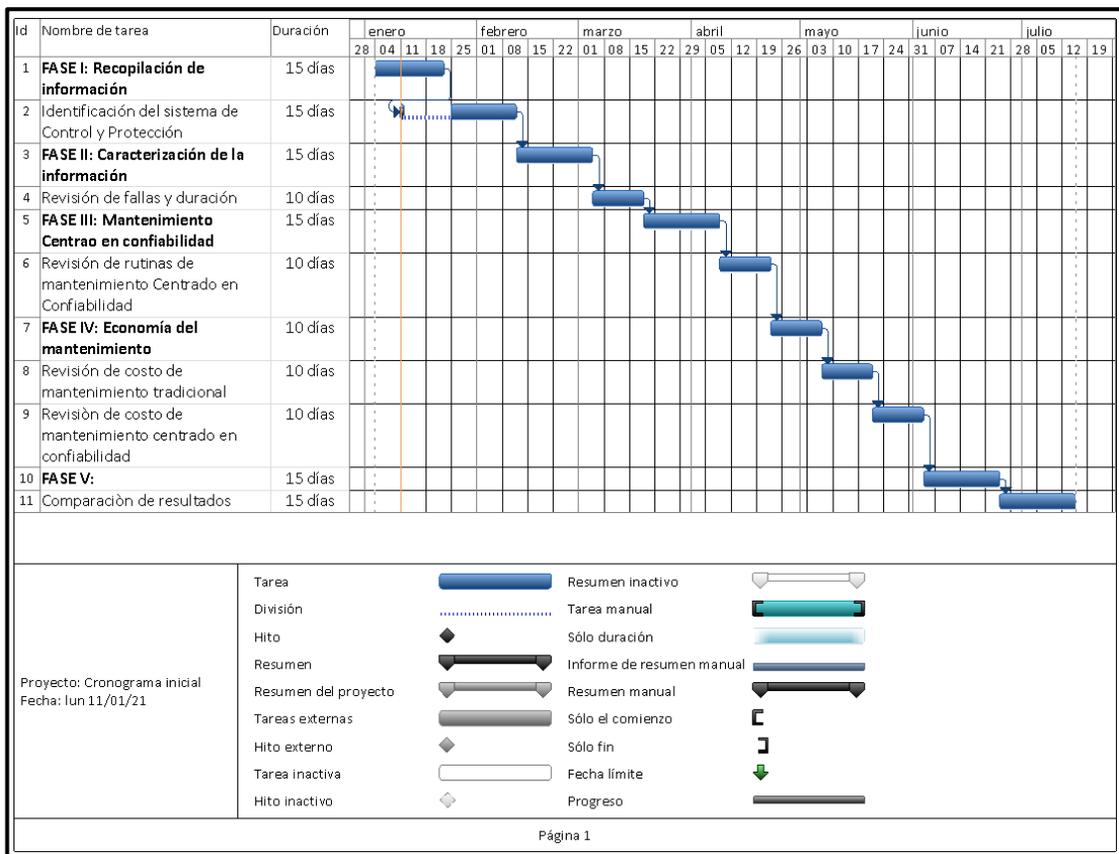
Ítem	RECURSO	Cantidad	Costo	% de Inversión
1	Equipo de computo	1	Q 6,000.00	16.23 %
2	Energía Eléctrica	667	Q 800.00	2.16 %
3	Internet	6	Q 300.00	0.81 %
4	Tinta para impresora	2	Q 120.00	0.32 %
5	Papelería	2	Q 60.00	0.16 %
6	Honorarios de asesor por hora	24	Q 2,000.00	5.41 %
7	Honorarios de tesista por hora	720	Q 24,000.00	65.90 %
8	Imprevistos	1	Q 3,700.00	10.01 %
	Total		Q 36,980.00	100.00 %

Fuente: elaboración propia.

12. CRONOGRAMA

Se contempla el siguiente cronograma para la elaboración del estudio ordenado cronológicamente.

Figura 7. Cronograma



Fuente: elaboración propia, empleando software Microsoft Project 2013.

13. REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (1998). *Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista*. Guatemala: Autor.
2. Bertling, L. (2002). *Reliability Centered Maintenance for Electric Power Distribution Systems* (tesis doctoral). Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia. Recuperado de <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:9186/FULLTEXT01.pdf>
3. Acuerdo Gubernativo 256-97. *Reglamento de La Ley General de Electricidad*. Diario de Centroamérica. Guatemala. 2 de abril de 1997.
4. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1999). *Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución*. Guatemala: Autor.
5. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1999). *Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica*. Guatemala: Autor.
6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2002). *Informe de labores 1,997 - 2,002*. Guatemala: Autor.
7. Harper, G. E. (2002). *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*. Ciudad de México, México: Limusa.

8. Harper, G. E. (2000). *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*. Ciudad de México, México: Limusa.
9. Hilber, P. (2008). *Maintenance Optimization for Power Distribution System (tesis doctoral)*. Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia. Recuperado de <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:13421/FULLTEXT01.pdf>
10. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. (2009). *Guide for Power System Protection Testing (C37.233)*. New York, Estados Unidos: Autor.
11. Mazidi, P. (2017). *From Condition Monitoring to Maintenance Management in Electric Power System Generation with focus on Wind Turbines (tesis doctoral)*. Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España. Recuperado de <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/26617/TD00329.pdf>
12. Ministerio de Energía y Minas (2020). *Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2020 - 2050*. Guatemala: Autor.
13. Méndez, W. M. (2019). *Metodología para el desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento aplicado a subestaciones de distribución de energía eléctrica (tesis de maestría)*. Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unibague.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12313/612/1/Tesis.pdf>

14. Moubray, J. (2004). *Reliability - centred Maintenance (RCM)*. Asheville, Estados Unidos: Edwards Brothers.
15. Tavares, L. (2000). *Administración Moderna de Mantenimiento*. Río de Janeiro, Brasil: Novo Polo Publicações. Recuperado de <https://soportec.files.wordpress.com>

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Matriz de coherencia

Título de la investigación	Planteamiento del problema de investigación	Preguntas de Investigación		Objetivos
		Principal	General	
Diseño de investigación para el análisis técnico - económico de la implementación de mantenimiento en el sistema de control y protección de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio de Guatemala.	Sobrecosto por mantenimiento inadecuado con las necesidades del sistema de Control y Protección de la Subestación Eléctrica compacta	¿Cuál es el impacto técnico - económico del mantenimiento en el sistema de control y protección de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio?		Determinar el impacto técnico - económico de la implementación del mantenimiento en el sistema de control y protección de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio.
		Auxiliares	Específicos	
		¿Cómo se realizan las actividades actuales de mantenimiento de los equipos del sistema de control y protección para garantizar la adecuada administración de una subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia?		Recopilar las actividades actuales de mantenimiento de los equipos del sistema de control y protección para garantizar su adecuada administración en la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia.

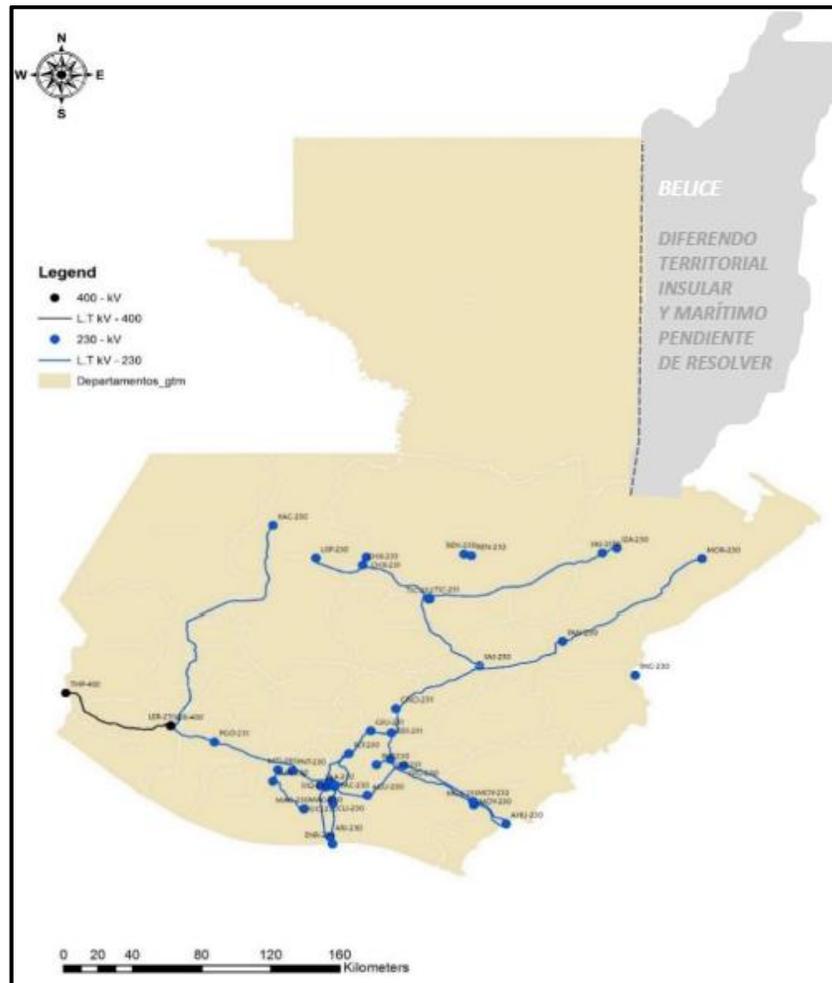
Continuación de apéndice 1.

Auxiliares	Específicos
¿Cómo analizar el marco regulatorio de acuerdo con el reconocimiento de gastos de operación y mantenimiento para una subestación compacta con barra simple y barra de transferencia?	Analizar el marco regulatorio de acuerdo con el reconocimiento de gastos de operación y mantenimiento para una subestación compacta con barra simple y barra de transferencia.
¿Cómo analizar las condiciones de mantenimiento de los equipos de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia de acuerdo con el establecimiento de las caracterizaciones y modos de falla del mantenimiento centrado en confiabilidad?	Analizar las condiciones de mantenimiento de los equipos de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia de acuerdo con el establecimiento de las caracterizaciones y modos de falla del mantenimiento centrado en confiabilidad
¿Cuál es el impacto técnico - económico al adoptar el mantenimiento centrado en confiabilidad en comparación con el plan de mantenimiento actual del sistema de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio?	Determinar el impacto técnico - económico al adoptar el mantenimiento centrado en confiabilidad en comparación con el plan de mantenimiento actual del sistema de control y protección de la subestación eléctrica compacta con barra simple y barra de transferencia considerando las limitaciones del marco regulatorio.

Fuente: elaboración propia.

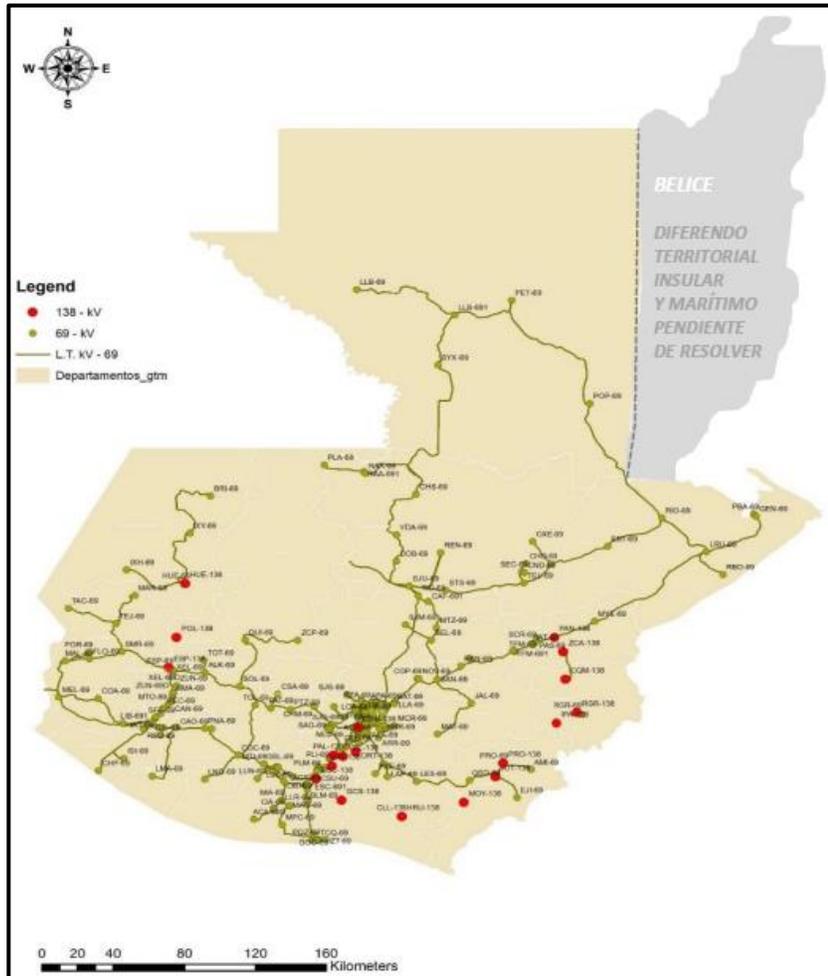
15. ANEXOS

Anexo 1. Red eléctrica en 230 kV y 400 kV



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2020 - 2050*. (2020). Consultado el 6 de abril de 2021. Recuperado de https://www.cnee.gob.gt/PlanesExpansion/2020-2050/PlanExpensionSistemaTransporte2020-2050_1.pdf.

Anexo 2. Red eléctrica en 69 kV y 138 kV



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2020 - 2050*. (2020). Consultado el 6 de abril de 2021. Recuperado de https://www.cnee.gov.gt/PlanesExpansion/2020-2050/PlanExpansionSistemaTransporte2020-2050_1.pdf.