



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS
NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMERO DE UNA LÍNEA DE
TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA**

Ing. Luis Daniel Jimenez Ramírez

Asesorado por el Mtro. Ing. Rony Aureliano Jucup Solís

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS
NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMERO DE UNA LÍNEA DE
TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. LUIS DANIEL JIMENEZ RAMÍREZ

ASESORADO POR EL MTRO. ING. RONY AURELIANO JUCUP SOLIS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Rocío Carolina Medina Galindo
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
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:

**DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS
NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMERO DE UNA LÍNEA DE
TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA**

Tema que me fuera asignado por la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha de 29 de febrero de 2020.

Ing. Luis Daniel Jimenez Ramírez



Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.074.2022

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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMERO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA**, presentado por: **Luis Daniel Jimenez Ramírez**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, enero de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, enero de 2022

LNG.EEP.OI.074.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMERO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA”

presentado por **Luis Daniel Jimenez Ramírez** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**





Guatemala 26 de noviembre 2020.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **Trabajo de Graduación** titulado: **“DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMERO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA”** del estudiante **Ing. Luis Daniel Jimenez Ramírez** quien se identifica con número de carné **200915584** del programa de **Maestría en Ingeniería de Mantenimiento**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

Mtra. Inga. Rocío Carolina Medina Galindo
Coordinadora
Maestría en Ingeniería de Mantenimiento
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 30 de octubre de 2020

**Ingeniero Mtro.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12**

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación del estudiante Luis Daniel Jimenez Ramírez, carné número 200915584, cuyo título es '**DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMERO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA**', para optar al grado académico de Maestro en Ingeniería de Mantenimiento, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante "Jimenez Ramírez", continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

**RONY AURELIANO JUCUP SOLÍS
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
COLEGIADO NO. 16,912**

Rony Aureliano Jucup Solís
Magister en Administración de Empresas
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado 16912
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su eterna bondad, bendiciones y misericordia.
Mis padres	Luis Jiménez y Consuelo Ramírez. Su amor incondicional será siempre mi inspiración.
Mi novia	Marlin López. Por ser ese apoyo incondicional que siempre necesité.
Mis hermanos	Gabriela y Javier Jimenez. Por ser mi fuente de inspiración.
Familia y amigos	Que de una u otra forma han influido en mí, permitiéndome compartir momentos de alegrías y tristezas juntos.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la *alma mater* que me permitió alimentarme de conocimiento.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme las bases académicas necesarias para realizar este trabajo de graduación.

**Escuela de Estudios de
Postgrados de la
Facultad de Ingeniería**

Por proporcionarme todos los conocimientos que permitieron la elaboración de este trabajo de graduación.

Empresa transportista

Por proporcionarme la información necesaria para realizar este diseño de investigación.

Asesor

Mtro. Ing. Rony Jucup por haberme guiado durante el desarrollo de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS	XI
OBJETIVOS.....	XIII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XV
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Generalidades de líneas de transmisión	1
1.1.1. Elementos que conforman una línea de transmisión	2
1.1.2. Estructura de soporte	4
1.1.3. Aislamiento	5
1.1.4. Conductor	5
1.1.5. Herrajes	6
1.1.6. Apantallamiento	7
1.1.7. Sistema de puesta a tierra	8
1.2. Aisladores eléctricos de alta tensión	9
1.2.1. Aisladores de polímero	9
1.2.2. Características técnicas.....	14
1.2.3. Ventajas y desventajas con respecto a otras tecnologías	16
1.3. Mantenimiento industrial.....	18

1.3.1.	Mantenimiento predictivo.....	19
1.3.2.	Esquema general de implementación	21
1.4.	Ensayos no destructivos	23
1.4.1.	Inspección visual	23
1.4.2.	Análisis de vibraciones.....	24
1.4.3.	Termografía infrarroja.....	24
1.4.4.	Análisis por imagen ultravioleta.....	25
1.4.5.	Análisis por ultrasonido	25
1.4.6.	Ultrasonido propagado en aire	26
1.4.7.	Análisis con partículas magnéticas	26
1.4.8.	Líquidos penetrantes.....	26
1.5.	Identificación de ensayos no destructivos por utilizar.....	27
1.6.	Fallas en líneas de transmisión de 69 y 138 kV	27
1.6.1.	Fallas relacionadas al aislamiento y medidas de mitigación	28
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	31
2.1.	Datos históricos fallas en líneas de transmisión.....	31
2.2.	Visita de campo de inspección.....	32
2.3.	Visita de aplicación de ensayos no destructivos	34
2.4.	Tipos de fallas más comunes en aisladores de polímero de 69 y 138 kV	36
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	39
3.1.	Criticidad de fallas	39
3.1.1.	Categorización de fallas	39
3.1.2.	Rangos admisibles de operación	49
3.1.3.	Ponderación de criticidad	51
3.2.	Ensayos no destructivos	53

3.2.1.	Inspección visual	55
3.2.2.	Termografía	57
3.2.3.	Ultrasonido propagado en aire.....	61
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
4.1.	Historial de fallas	65
4.2.	Ensayos no destructivos.....	66
4.2.1.	Inspección visual	66
4.2.2.	Termografía	67
4.2.3.	Ultrasonido.....	68
4.3.	Modelo de mantenimiento predictivo para aisladores de polímero en líneas de transmisión	69
4.3.1.	Periodicidad de aplicación	69
4.3.2.	Secuencia de aplicación	71
4.4.	Notificación para incorrecta operación de aisladores de polímero	74
4.5.	Análisis del trabajo	76
4.5.1.	Análisis interno	76
4.5.2.	Análisis externo	77
	CONCLUSIONES	79
	RECOMENDACIONES.....	81
	REFERENCIAS	83
	APÉNDICES	91
	ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Generación, transmisión y distribución.....	2
2.	Disposición de un poste en una LT	3
3.	Tipos de estructuras típicas.....	4
4.	Ángulo de apantallamiento	8
5.	Materiales en aisladores.....	9
6.	Construcción de un aislador polimérico.....	11
7.	Configuración en suspensión	12
8.	Configuración remate entre ángulos de 45° - 90°.....	13
9.	Configuración en tangente	14
10.	Aislador polimérico Hubbell Ohio Brass	15
11.	Taxonomía de la conservación industrial	19
12.	Proceso en la implantación del mantenimiento predictivo	22
13.	Rangos de frecuencia de sonido	25
14.	Ubicación de poste 600085	33
15.	Fallas registradas 2017 a 2019	42
16.	Horas de indisponibilidad entre 2017 y 2019.....	43
17.	Porcentajes de horas de indisponibilidad trimestral por año	44
18.	Salidas forzadas entre 2017 y 2019	45
19.	Porcentaje de salidas forzadas trimestrales por año.....	45
20.	Tiempo de indisponibilidad por modo de falla en aisladores	47
21.	Número de salidas forzadas por modo de falla	48
22.	Salidas forzadas por fallas en el aislamiento.....	49
23.	Tiempo de indisponibilidad por fallas en el aislamiento.....	50

24.	Matriz de criticidad	52
25.	Diagrama cajas y bigotes de temperaturas.....	59
26.	Fotografía de estructura 600085.....	60
27.	Punto caliente en conexión pernada.....	61
28.	Ruido en aislamiento.....	62
29.	Diagrama de cajas y bigotes de nivel de sonido	64
30.	Diagrama de preparación de tareas.....	72
31.	Diagrama de aplicación de END	73
32.	Código QR de enlace a infografía	74
33.	Infografía para la notificación de averías	75

TABLAS

I.	Ventajas y desventajas del cobre y aluminio	6
II.	Ventajas y desventajas de los materiales	17
III.	Fallas relevantes en aisladores.....	32
IV.	Porcentajes y horas de indisponibilidad trimestral	44
V.	Porcentajes y salidas forzadas trimestrales	46
VI.	Conteo de fallas totales entre 2017 y 2019.....	46
VII.	Conteo fallas por el aislamiento entre 2017 y 2019	48
VIII.	Criticidad de fallas en el aislamiento	53
IX.	Selección de estructuras.....	55
X.	Aspectos por evaluar y detalles en inspección visual	56
XI.	Lecturas de ensayo de inspección visual.....	57
XII.	Lecturas de termografía	58
XIII.	Valores estadísticos de temperaturas.....	59
XIV.	Lecturas de ultrasonido.....	63
XV.	Valores estadísticos de nivel de ruido.....	64
XVI.	Modelo de mantenimiento predictivo	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
I	Corriente
dB	Decibelio
Hz	Hertz
m	Metro
MCM	Mil Circular Mils
mm	Milímetros
N	Newtons
V	Voltio
VA	Volt-Amperio
W	Watt

GLOSARIO

ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
Axial	Referente a la dirección de la carga, del eje.
Blackout	Colapso total del sistema eléctrico de potencia interconectado
Carga	Fuerza mecánica soportada.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Conductor	Medio que utilizan los electrones para trasladarse de un punto a otro.
END	Ensayo no destructivo.
Esfuerzo	Cuando determinada fuerza actúa sobre una estructura.
Generación	Transformación de cualquier tipo de energía a energía eléctrica.
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Ionización	Conversión de átomos de determinado compuesto en átomos cargados eléctricamente.
ISO	Organización Internacional de Normalización.
Longitudinal	Referente a la dirección de la carga, a lo largo.
LT	Línea de transmisión
MTBF	Tiempo medio entre fallas
MTTR	Tiempo medio de reparación de fallas
Polímero	Moléculas formadas por unión de unidades fundamentales, repitiéndose a lo largo de la cadena.
Transformación	Conversión de un nivel de tensión a otro.
Transmisión	Conjunto de elementos que permiten el traslado de la energía de un punto a otro.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

El problema es el deterioro en las condiciones mínimas de operación en los aisladores de polímero de líneas de transmisión de 69 y 138 kV porque no permite la adecuada y eficiente explotación industrial de los activos de las empresas de transporte de energía eléctrica en Guatemala.

Debido a que no se cuenta con un modelo de mantenimiento predictivo, no es posible identificar aquellos elementos que podrían fallar, o se incurre en sobrecostos al reemplazar elementos cuya vida útil no ha finalizado.

La investigación se limita al desarrollo de un modelo de mantenimiento para los aisladores de polímero en líneas de transmisión, cuando los mencionados elementos se encuentren bajo operación.

De no realizarse un plan de mantenimiento predictivo seguirán ocurriendo fallas de naturaleza mecánica o eléctrica en los aisladores de polímero durante la operación de las líneas de transmisión. Como consecuencia de una no adecuada conservación de los elementos en las líneas de transmisión, se puede poner en riesgo la estabilidad del sistema, ya que algunas líneas de transmisión se encuentran operando en interconexiones y nodos eléctricos tan importantes que una indisponibilidad forzada podría provocar un efecto en cascada que al no compensarse inmediatamente, resultaría en un caso extremo llegar a un *blackout*, agravándose aún más la situación, si se toma en consideración que para el caso del sistema de transmisión guatemalteco, aún se encuentra en una configuración radial.

- Pregunta central de la investigación

¿Cómo se pueden determinar las fallas más recurrentes en los aisladores de polímero en líneas de transmisión de 69 y 138 kV y a partir de ello, incrementar su vida útil?

- Preguntas orientadoras
 - ¿Qué tipo de fallas ocurren en aisladores de polímero de líneas de transmisión de niveles de tensión de 69 y 138 kV?
 - ¿Cuál es la criticidad de las fallas dependiendo de su ocurrencia en aisladores de polímero dentro del área metropolitana?
 - ¿Cuál la mejor combinación de técnicas de mantenimiento predictivo para la adecuada conservación de aisladores de polímero de una línea de transmisión de 69 y 138 kV?
 - ¿Cómo la población en general puede notificar alguna operación incorrecta en los aisladores de polímero de las líneas de transmisión?

OBJETIVOS

General

Desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo utilizando ensayos no destructivos en aisladores de polímero de una línea de transmisión de 69 y 138 kV.

Específicos

- Identificar las fallas más comunes que afectan a los aisladores de polímero de líneas de transmisión de 69 y 138 kV.
- Clasificar la criticidad de fallas basándose en su recurrencia.
- Determinar la mejor combinación de técnicas de mantenimiento predictivo para una adecuada conservación en aisladores de polímero de una línea de transmisión de 69 o 138 kV.
- Divulgar por medio de afiches en áreas cercanas a las líneas de transmisión acerca del procedimiento para notificación de averías.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El trabajo de investigación es del tipo descriptivo, debido a que durante su desarrollo se observó el registro de la ocurrencia de fallas; obteniendo información estadística acerca de la recurrencia y consecuencia de cada una de estos eventos. Paralelamente, se observaron también las circunstancias de operación normal de los aisladores de polímero en las líneas de transmisión de 69 y 138 kV, con el fin de medir parámetros del tipo cualitativo, además de otros del tipo cuantitativo como temperatura y nivel de ruido para plantear un modelo de mantenimiento predictivo que se ajuste de mejor manera a este tipo de elementos, que son esenciales y críticos no solo en líneas de alta tensión, sino también en cualquier instalación en la que haya presencia de energía eléctrica

La instalación que fue objeto análisis para este estudio es una línea de transmisión de 69 kV ubicada sobre la Calzada Roosevelt, una de las rutas de acceso a la ciudad capital más transitada dentro del área metropolitana. Esta línea está compuesta por 63 estructuras, las cuales son en su mayoría postes de concreto de 24 metros de altura. Esta instalación tiene cerca de 60 años de estar en operación, durante este periodo ha sufrido algunas modificaciones en busca de la mejora; sin embargo, la ruta o trazo de la línea no ha cambiado.

Para desarrollar un plan de mantenimiento predictivo es necesario conocer los datos históricos de cómo han operado las instalaciones con el fin de priorizar los eventos y elementos que son críticos. Para el caso específico de esta investigación se procedió a recolectar la información de forma transversal, por medio de un registro de fallas no estandarizado que la empresa dueña de las instalaciones llevaba al momento del inicio del estudio.

Se replantearon los registros de fallas en una nueva base datos incluyendo conceptos de modo y causa de falla, con ayuda del *software* Microsoft Excel se aplicaron herramientas de estadística descriptiva segmentando las fallas ocurridas debido a una mala operación en los aisladores de las líneas de transmisión. Así mismo, se identificaron cuáles son los modos y causas más a los que se debía dar prioridad mediante un análisis de recurrencia por consecuencia, evidenciando el nivel de criticidad de estos.

Se seleccionó la instalación 'Línea 86' que sería el objeto de estudio para este trabajo, esta cuenta con 63 estructuras de las cuales se seleccionaron 9 como muestra poblacional representativa, tres debido a su criticidad y el 10 % de forma aleatoria para garantizar la validez del análisis. Durante la visita de reconocimiento, realizada previamente se identificaron generalidades de las estructuras a intervenir como ubicación exacta, condiciones de operación y otros datos recolectados por medio de un formato previamente realizado por el investigador. La visita fue dirigida por el investigador y un supervisor de seguridad industrial debido a que estas se encontraban en operación al momento de la visita.

De la diversidad de ensayos no destructivos aplicables, se evaluó con respecto a la disponibilidad de su acceso en el mercado nacional, de esta cuenta resultó seleccionándose la inspección visual, termografía infrarroja y ultrasonido propagado en aire. Se planificó la visita para la aplicación de estos ensayos y verificación de la correcta operación de la instalación a intervenir con el acompañamiento de un supervisor de seguridad industrial, el investigador que estaría a cargo de toda la actividad y del ensayo de inspección visual; por último, se contó también con los técnicos especialistas que estuvieron a cargo de los ensayos de termografía y ultrasonido. Durante esta visita fue posible evidenciar la existencia de un punto caliente en una conexión pernada, evento que fue

anotado en la ficha de inspección utilizada a lo largo del desarrollo de las actividades anteriormente mencionadas.

A partir de los resultados de la visita de aplicación de los END se generaron gráficos utilizados para aplicárseles herramientas estadísticas de nivel descriptivo como gráficos de barras, gráficos circulares y diagramas de cajas y bigotes, con los cuales se evidencia que la eventualidad del llamado 'punto caliente' detectado en primera instancia por el ensayo de termografía y confirmado por el ensayo de ultrasonido, se encontraba totalmente fuera del rango de operación normal de las instalaciones.

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento predictivo es un conjunto de aplicaciones y técnicas que se emplean con el fin de detectar posibles fallas en los elementos, máquinas o activos en general, en etapas tempranas. Entre las técnicas más utilizadas en este tipo de mantenimiento se encuentran los ensayos no destructivos, los cuales se aplican para obtener un parámetro de las propiedades físicas, mecánicas, químicas entre otras, en condiciones de operación. En esta investigación se identifican cuáles son los ensayos no destructivos que mejor se adecuan para la evaluación de los aisladores de polímero en líneas de transmisión y con base en esto, plantear un modelo de mantenimiento predictivo.

El presente trabajo es una sistematización, ya que mediante el ordenamiento, agrupación, clasificación, identificación y catalogación de la información de los ensayos no destructivos encontrados en Guatemala y las fallas más recurrentes en los aisladores de polímero de una línea de transmisión de 69 y 138 kV, se realizó un modelo de mantenimiento predictivo.

Debido a que no se cuenta con un modelo de mantenimiento predictivo detallado y específico para los aisladores de polímero para una línea de transmisión típica de 69 y 138 kV en las empresas transportistas de energía eléctrica, se desperdician recursos tanto en materiales como en personal, haciendo solamente mantenimiento preventivo o en el peor de los casos correctivo.

La importancia de la solución planteada mediante la elaboración de este trabajo es que puede ser una guía para mantener una alta disponibilidad y

confiabilidad que no solo sea beneficioso para las empresas transportistas, sino también para los clientes y usuario final de este servicio, garantizando una alta calidad en el suministro de la energía eléctrica. Además, por medio de la realización de esta investigación, se espera el beneficio de proporcionar una guía esquemática y metodológica para cualquier otra empresa o persona que desee implementar un modelo de mantenimiento predictivo fundamentándose en la implementación de ensayos no destructivos.

En el esquema de solución se plantearon varias fases, en las cuales como primera instancia se definió el problema, seguidamente se recopiló la información necesaria por medio de investigaciones, normativas, manuales entre otros, luego se realizó la revisión y análisis documental, identificación de ensayos no destructivos a aplicar y aplicarlos en campo, finalmente, con base en los resultados por los reportes, se elaboró un modelo de mantenimiento predictivo.

En el capítulo I se abordan temas relacionados a las bases teóricas que servirán para fundamentar el desarrollo de toda la investigación. Se cubrirán conceptos tales como mantenimiento, técnicas de ensayos no destructivos, aislamiento en líneas de transmisión y fallas más recurrentes que afectan la confiabilidad en los aisladores de polímero.

El capítulo II comprende el desarrollo de la investigación, donde se explica cómo se recolectaron los datos a evaluar, contemplando los datos históricos de las fallas en las líneas de transmisión, la explicación del desarrollo de la visita de inspección y de la aplicación de los ensayos no destructivos en sitio y los tipos de fallas más comunes ocurridas en aisladores de polímero de los niveles de tensión evaluados.

En el capítulo III se presentan los resultados de los análisis de la criticidad de fallas, realizando una categorización de fallas con base en el modo y causa de falla, se definen cuáles son los rangos de operación admisibles y se contrastan con los resultados a la fecha. Seguidamente también se presentan los resultados de los ensayos no destructivos practicados y sus tendencias.

En el capítulo IV abarca la discusión de los resultados de los ensayos no destructivos empleados, se da a conocer la propuesta del plan de mantenimiento predictivo mostrando detalles de periodicidad de aplicación, tareas preparativas y los pasos a seguir durante la ejecución de los trabajos. También se incluye una sección en la cual se da a conocer cuál es la validez interna y externa del trabajo.

1. MARCO TEÓRICO

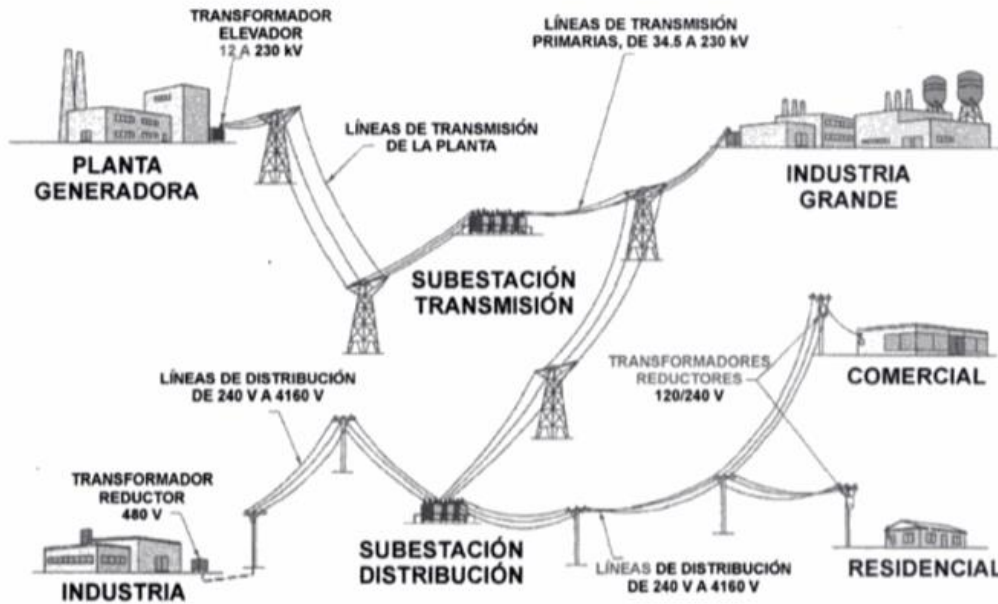
En este apartado se mostrará la información recopilada referente a los conceptos de líneas de transmisor, aisladores de polímero, fallas comunes en líneas de transmisión de 69 y 138 kV, mantenimiento predictivo y ensayo no destructivos.

1.1. Generalidades de líneas de transmisión

Cuando se habla de transporte de energía eléctrica, es necesario hacer la relación de un medio de transporte convencional con una línea de transmisión. En este caso el material a transportar sería la electricidad, el medio en el que se transporta serían los conductores eléctricos y los puntos de llegada y salida, las subestaciones eléctricas de potencia. Según Bustillos y Pérez (2015) las líneas de transmisión son el medio físico en el cual se transporta la energía eléctrica.

Las líneas de transmisión son los elementos que hacen posible trasladar la energía desde los grandes centros de generación, hasta los usuarios finales de esta, existiendo etapas intermedias como las subestaciones de maniobra o transformación, líneas de distribución y líneas de baja tensión en 120/240 V.

Figura 1. **Generación, transmisión y distribución**



Fuente: Enríquez. (2000). *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*.

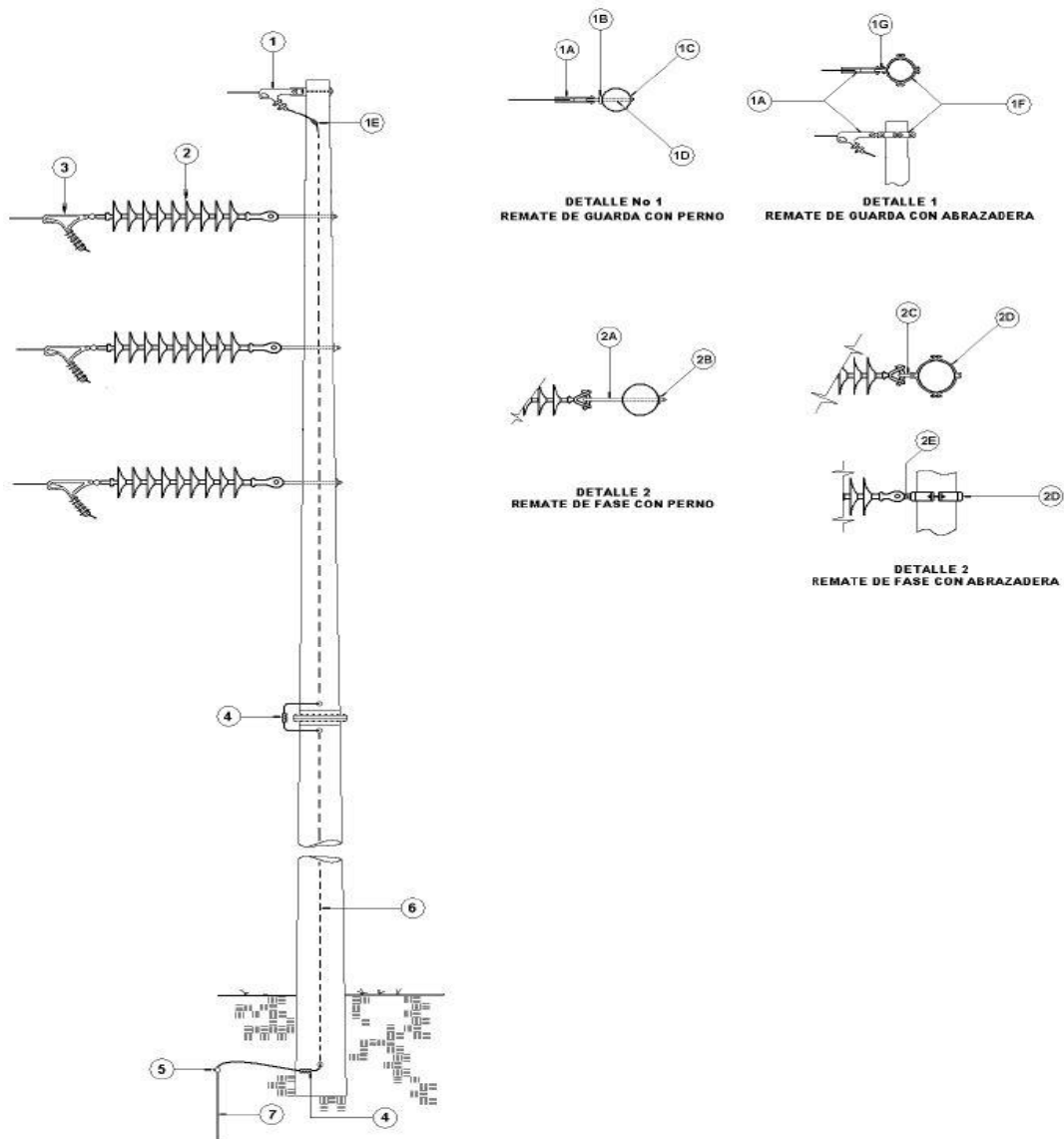
1.1.1. Elementos que conforman una línea de transmisión

Una línea de transmisión aérea consta de varias partes, de las cuales es posible omitir alguna debido a su función. Las líneas están formadas por una serie de estructuras que sirven para soportar todos los demás elementos, entre ellos, los conductores. Los cables conductores son los encargados de llevar la potencia de un punto a otro.

Adicionalmente, para poder concatenar los cables conductores a las estructuras de soporte, es necesario una serie de herrajes y el aislamiento, quien será el encargado de mantener las distancias de seguridad para no producir un corto circuito o un arco eléctrico. Por último, se tiene un aterramiento de cada una

de las estructuras como parte de la protección por descargas electroatmosféricas.

Figura 2. Disposición de un poste en una LT

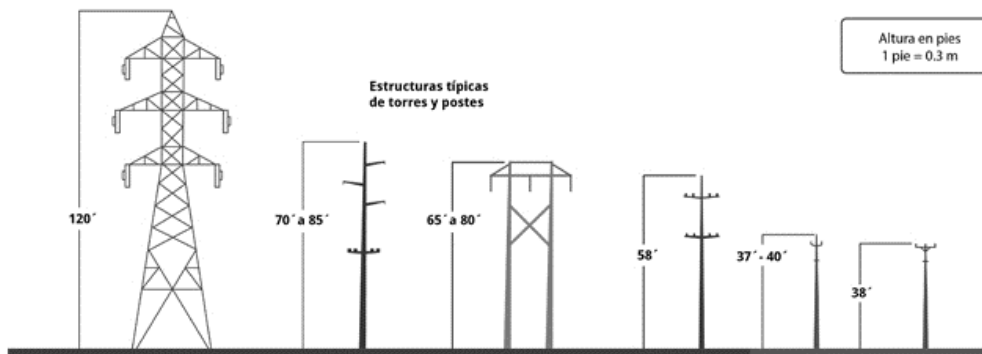


Fuente: Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (2007). *Manual de construcción de líneas de transmisión.*

1.1.2. Estructura de soporte

Analizando los elementos de las LT con un enfoque mecánico, este es uno de los más importantes, ya que su trabajo es el de soportar todas las fuerzas axiales y momentos de los esfuerzos que son producidos por la tensión mecánica transferida por los conductores.

Figura 3. Tipos de estructuras típicas



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

Para determinar la estructura por utilizar es necesario evaluar ciertas condiciones en las que una línea de transmisión estará operando, como pueden ser:

- Distancias mínimas de seguridad
- Trayectoria de la LT
- Condiciones ambientales
- Configuración de la disposición física
- Análisis de esfuerzos mecánicos

1.1.3. Aislamiento

El aislamiento en líneas de transmisión como en cualquier tipo de instalación eléctrica es uno de los elementos más importantes a tener en consideración, no solo para su diseño y selección, sino también durante su operación y mantenimiento. Bustillos y Pérez (2015) en su trabajo hacen hincapié en argumentar que los aisladores eléctricos son los responsables de mantener la distancia de fuga superficial necesaria entre la parte conductora (cables conductores) y la parte que estará aterrizada (estructuras de soporte).

Entre los materiales más utilizados para la construcción de aisladores eléctricos de potencia encontraremos el vidrio, porcelana y polímero o también conocidos como compuestos, ya que están hechos de una selección de materiales poliméricos específicamente diseñados para limitar la conducción de energía eléctrica en su superficie, y también brindando otras ventajas.

1.1.4. Conductor

En Guatemala existe una supremacía en la usanza de conductores eléctricos desnudos, conformados por hilos metálicos ordenados de forma helicoidal alrededor de un hilo central, según menciona Boj (2004), añade, el hilo central de los conductores puede ser o no del mismo material; sin embargo, cuando es de otro material se hace pensando en brindarle un mejoramiento al conductor de sus características mecánicas, es entonces cuando el hilo central pasa a llamarse: alma.

Entre los materiales más utilizados para la construcción de conductores en líneas aéreas de transmisión están el aluminio, aleación de aluminio y en algunos

muy pocos casos el cobre. La tabla presentada a continuación, muestra las ventajas y desventajas de la utilización del cobre y aluminio en conductores.

Tabla I. **Ventajas y desventajas del cobre y aluminio**

Material	Ventajas	Desventajas
Cobre	<ul style="list-style-type: none"> - Alta conductividad - Diámetros menores en conductores - Fácilmente soldable (uniones) 	<ul style="list-style-type: none"> - Pesado - Alto costo de adquisición - Alta elongación por su ductilidad
Aluminio	<ul style="list-style-type: none"> - Liviano (30 % peso cobre) - Bajo costo de adquisición - Alta pureza ($\approx 99.5\%$) - Fácil de manipular y trabajar 	<ul style="list-style-type: none"> - Media conductividad (61 % del cobre) - Cuando se contrae/enfría puede provocar pérdidas en uniones - Diámetros mayores en conductores

Fuente: Electricidad Aplicada. (2017). *Ventajas y desventajas del cobre vs aluminio en el cableado eléctrico.*

1.1.5. **Herrajes**

López (2005) explica que se designa con el nombre de herrajes al conjunto de elementos y accesorios que funcionan con los propósitos principales de fijación a las estructuras de soporte, unión y protección mecánica de: cables conductores, aislamiento, cable de guarda y puesta a tierra.

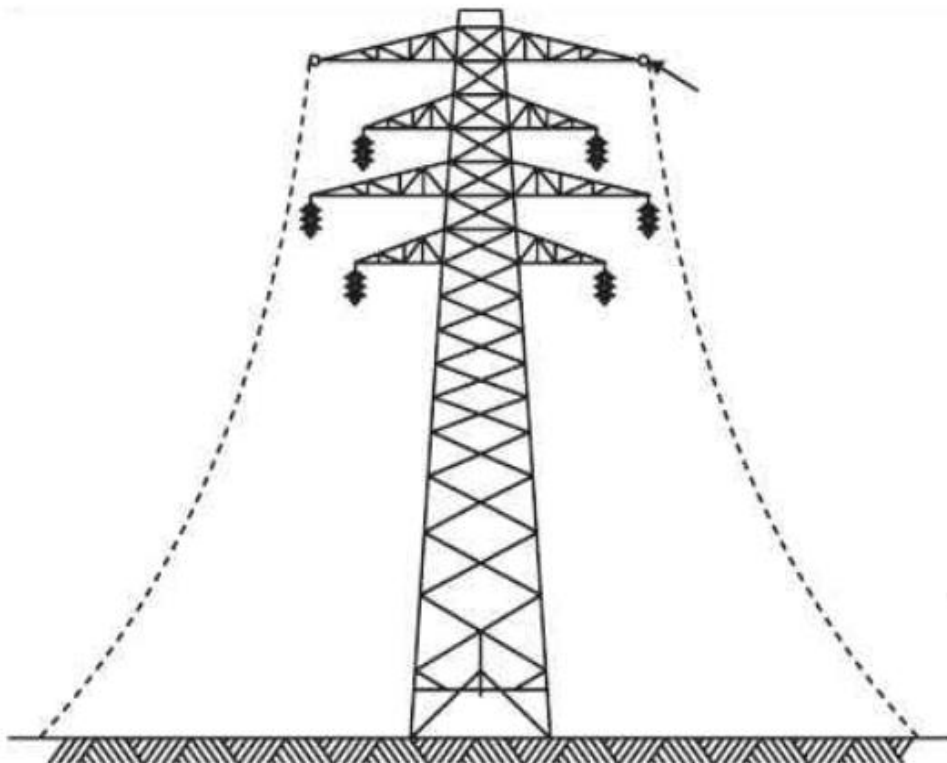
Para la selección y diseño de una línea de transmisión, generalmente las empresas transportista se basan en normativas internacionales que garantizan un adecuado desempeño en cada uno de los elementos por utilizar, siendo el caso para los herrajes la norma (IEC 61284:1997) que especifica cuales deberán de ser las pruebas y requerimientos mínimos en los herrajes instalados en líneas aéreas de más de 45 kV. En el caso de Guatemala, existe la norma (NTDOST) que especifica cuáles serán las características mínimas con las que deberán contar cada elemento instalado en una LT; sin embargo, esta se apoya en las especificaciones que dictan las normas IEC.

1.1.6. Apantallamiento

El apantallamiento de una línea de transmisión tiene la función de proteger a los conductores de fase contra descargas electroatmosféricas, para esto es necesario instalara un conductor en la parte superior de la estructura que puede ser de acero galvanizado, aluminio o incluso aleaciones de aluminio.

Para la selección de este conductor es necesario tener en cuenta varios factores como las consideraciones mecánicas de esfuerzos, impedancia del conductor ante el frente de onda electroatmosférico, voltaje crítico de flameo, corriente crítica de arqueo del rayo, ángulo de apantallamiento, modelo por utilizar y norma en la que se basarán los cálculos, siendo la (IEEE 1243-1997) y (IEEE 1410-2010) las más utilizadas, (Salazar, 2016).

Figura 4. **Ángulo de apantallamiento**



Fuente: Wadhwa. (2010). *High Voltage Engineering*.

1.1.7. **Sistema de puesta a tierra**

Las funciones principales que se deben de cumplir en una adecuada instalación de este sistema son las de proteger de las descargas electroatmosféricas a los personeros y los equipos o elementos instalados. Es importante mencionar que este sistema es el complemento del apantallamiento, quien recibe la descarga y es drenado a través de este, proporcionando para la falla un camino hasta descargarse en el suelo (Godoy, 2019).

1.2. Aisladores eléctricos de alta tensión

Mecánicamente los aisladores en las líneas de transmisión tienen por objetivo sostener y sujetar a los conductores a la estructura, no permitiendo su movimiento longitudinal o transversal. Eléctricamente hablando, los aisladores tienen por función evitar la derivación de la corriente que se conduce en los cables de potencia hacia tierra, de lo contrario se tendría una pérdida de potencia y posible falla destructiva en dicho elemento (Gonzales-Longatt, 2007).

Existen tres distintos tipos de materiales utilizados en la manufacturación de aisladores, los cuales son: vidrio, porcelana y sintéticos o mejor conocidos como poliméricos.

Figura 5. **Materiales en aisladores**



Fuente: Gonzales-Longatt. (2007). *Capítulo 1: Elementos de líneas de transmisión aéreas.*

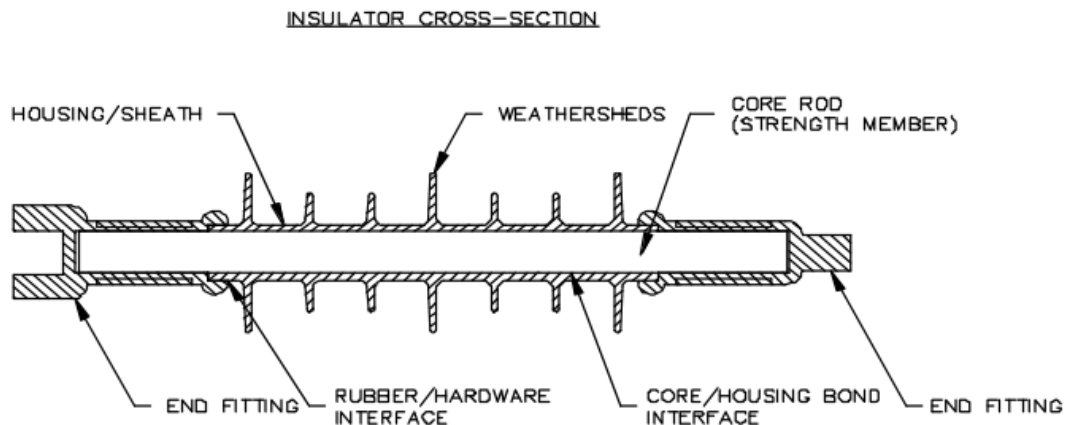
1.2.1. Aisladores de polímero

Kapal (2011) en uno de sus artículos técnicos explican que los aisladores de polímero están contruidos de forma que puedan soportar elevadas cargas mecánica y al mismo tiempo brindar el aislamiento requerido para el nivel de voltaje de la instalación en la que será puesto en operación. Estos cuentan con

una serie de componentes que, en conjunto, hacen posible que cumplir con sus funciones para mantener en operación la línea de transmisión. Estos componentes son:

- Núcleo: es la parte interna de aislador, está diseñado para soportar la carga mecánica bajo la que será sometido el aislador. Generalmente hecho por un arreglo de fibras de vidrio formando una matriz de resina.
- Recubrimiento: es la parte externa del aislador, está hecho de materiales sintéticos compuestos, en algunos diseños este constituye una parte intermedia entre las campanas y el núcleo del aislador.
- Campanas: su función principal es aumentar la distancia de fuga y evitar que esta se acorte debido a motivos ambientales y climáticos, en el caso de lluvia cortando el paso continuo de las gotas de agua.
- Acople: este elemento es el encargado de permitir la unión mecánica entre el aislador-estructura y aislador-conductor, permitiendo transferir la carga mecánica ejercida por el propio conductor hacia la estructura.

Figura 6. **Construcción de un aislador polimérico**

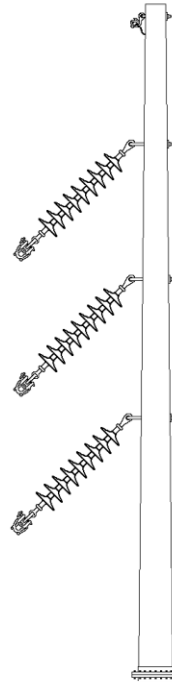


Fuente: Kapal Sharma. (2011). *Polymeric Insulators*.

Los aisladores se pueden clasificar según la disposición en la que se instale sobre la estructura de soporte, ya que así dependerá de cómo la carga mecánica será aplicada sobre el elemento.

Los aisladores de remate y también en los de suspensión, el diseño del aislador es básicamente el mismo, cambiando solamente la forma del elemento que servirá para acoplarse con el conductor. Estos se caracterizan por soportar altas cargas mecánicas longitudinales, debido a la naturaleza de la configuración. Prácticamente la selección de una configuración y otra dependerá del ángulo del trazo que recorra la LT. En Guatemala generalmente los diseños de las líneas de transmisión usando postes de concreto, se define que para ángulos de 15° a 45° será una configuración de suspensión.

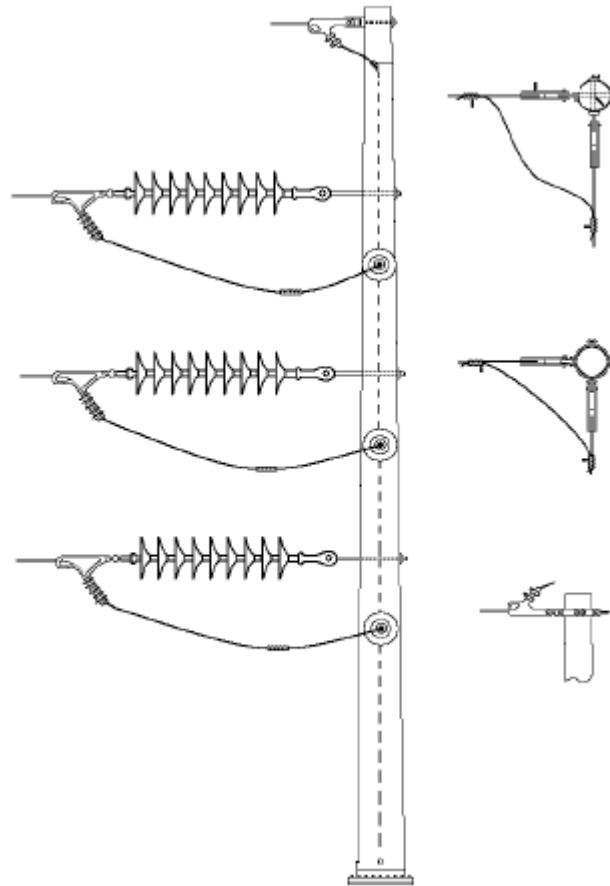
Figura 7. **Configuración en suspensión**



Fuente: Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (2007). *Manual de construcción de líneas de transmisión.*

Para la configuración en remate existen dos escenarios, ya que puede usarse cuando en el trazo de la línea existan ángulos que se encuentre desde los 45° hasta los 90°, o simplemente cuando se halla alcanzado un número determinado de estructuras del tipo tangente entre cada poste terminal, esto dependerá de las políticas de diseño de cada empresa transportista.

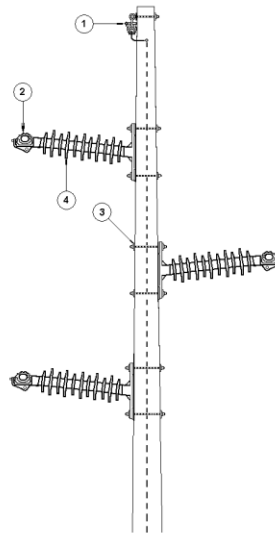
Figura 8. **Configuración remate entre ángulos de 45° - 90°**



Fuente: Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (2007). *Manual de construcción de líneas de transmisión.*

Los aisladores de tipo poste son utilizados cuando en las estructuras de soporte no sobrepasan los 15° del ángulo de cambio del trazo de la línea, y se caracterizan por no soportar una alta carga mecánica longitudinal ya que solamente están diseñados para sostener verticalmente los conductores.

Figura 9. **Configuración en tangente**



Fuente: Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (2007). *Manual de construcción de líneas de transmisión.*

1.2.2. **Características técnicas**

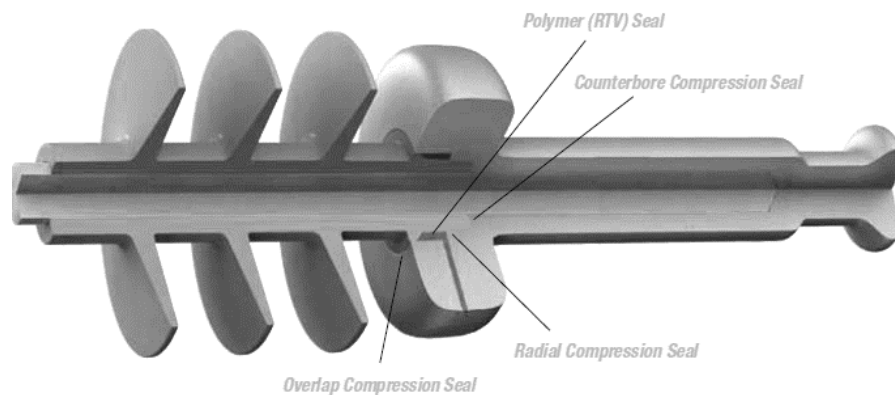
En Guatemala existe un sistema de normas técnicas para la operación de instalaciones de alta tensión (NTDOST), en esta se muestran las características mínimas necesarias para el aislamiento de las líneas de transmisión; sin embargo, en esta investigación se hará énfasis en los niveles de tensión de 69 y 138 kV. Cabe mencionar que en estas basan sus referencias en gran medida en normas internacionales como lo son ANSI o IEC.

En este trabajo se usará como referencia las normas del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares, por sus siglas en inglés ANSI, en el que

menciona en sus estándares publicados una serie de requisitos mínimos que los fabricantes de aisladores de polímero deben de garantizar para sus productos.

Entre las normas que propone ANSI para estandarizar las características de los aisladores de transmisión, se encuentran separadas por la forma en la que serán instalados. Es decir que hay una norma para aisladores de suspensión y otra para los de remate (ANSI/NEMA C29.12-2013), para aisladores tipo poste (ANSI/NEMA C29.17-2013), incluso para realizar los ensayos en los aisladores de ambos tipos (ANSI/NEMA C29.11-2012).

Figura 10. **Aislador polimérico Hubbell Ohio Brass**



Fuente: Hubbell. (2011). *Ohio Brass Catalog 24 - Quadri*Sil Insulators*.

Existen algunas características básicas que no importando cual sea el tipo de aislador, siempre se deben de cumplir ya que coinciden lo estipulado en las normas, siendo las más importantes las que se presentan a continuación:

- Características eléctricas:
 - Tensión soportada del impulso al rayo en seco (kV)

- Tensión soportada de frecuencia industrial bajo lluvia y en seco (kV)
- Tensión de contoneo de frecuencia industrial bajo lluvia y en seco (kV)
- Tensión de perforación a frecuencia industrial (kV)
- Tensión crítica de tipo impulso positivo y negativo (kV)
- Características mecánicas:
 - Carga mecánica nominal (kN)
 - Resistencia electromecánica (kN)
 - Resistencia a la flexión (kN)
- Características dimensionales:
 - Distancia de fuga (mm)
 - Diámetro máximo entre campanas (mm)
 - Paso nominal (mm)
 - Tamaño del acoplamiento (mm)

1.2.3. Ventajas y desventajas con respecto a otras tecnologías

Los aisladores de polímero son elementos que ofrecen una gran cantidad de ventajas sobre sus predecesores de vidrio y cerámica, aunque también en algunos aspectos tales como el mantenimiento el vidrio y cerámica tienen un poco más de practicidad.

Según COIDEA (2017) en su página web los aisladores de polímero tienen las ventajas que los hacen mejores en cuanto a la instalación, ya que por lo ligeros que son pueden instalarse más fácil, rápido a un menor costo, el beneficio de su instalación radica en su practicidad permitiendo construir líneas de transmisión a velocidades que no podrían alcanzarse utilizando aisladores de porcelana o vidrio.

La tabla que se muestra a continuación enlista las ventajas y desventajas de los materiales con los que se construyen los aisladores para líneas de transmisión.

Tabla II. **Ventajas y desventajas de los materiales**

	Ventajas	Desventajas
Vidrio	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor resistencia dieléctrica comparado con la cerámica. • Bajo coeficiente de dilatación térmica. • Alta resistividad. • Mayor resistencia a la tracción que la cerámica. • Larga vida útil. • Más económico que la cerámica. 	<ul style="list-style-type: none"> • La humedad se puede condensar fácilmente en su superficie. • No muy adecuado para zonas con alta contaminación. • Para altos voltajes, el moldeado del vidrio termina siendo irregular, provocando tensiones internas. • Vulnerable a actos vandálicos. • Extremadamente pesado.
Cerámica	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo coeficiente de dilatación térmica. • Larga vida útil. • Más económico que el polímero. 	<ul style="list-style-type: none"> • La humedad se puede condensar fácilmente en su superficie. • No muy adecuado para zonas con alta contaminación. • Vulnerable a actos vandálicos. • Extremadamente pesado.
Polímero	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones compactas y ligero. • Cuerpo rígido pero flexible. • Resistencia a actos vandálicos. • Elevada resistencia a la tracción. • Alto desempeño en ambientes a la intemperie. • Alta resistencia en ambientes con alta contaminación. • Características hidrofóbicas. • Larga vida útil. • Resistencia al tracking eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Si la humedad entra al núcleo se provocará una falla catastrófica. • No muy efectivos en áreas donde hay incendios forestales. • Sujetos al ataque de aves. • No adecuados para zonas costeras por el ambiente salino.

Fuente: elaboración propia.

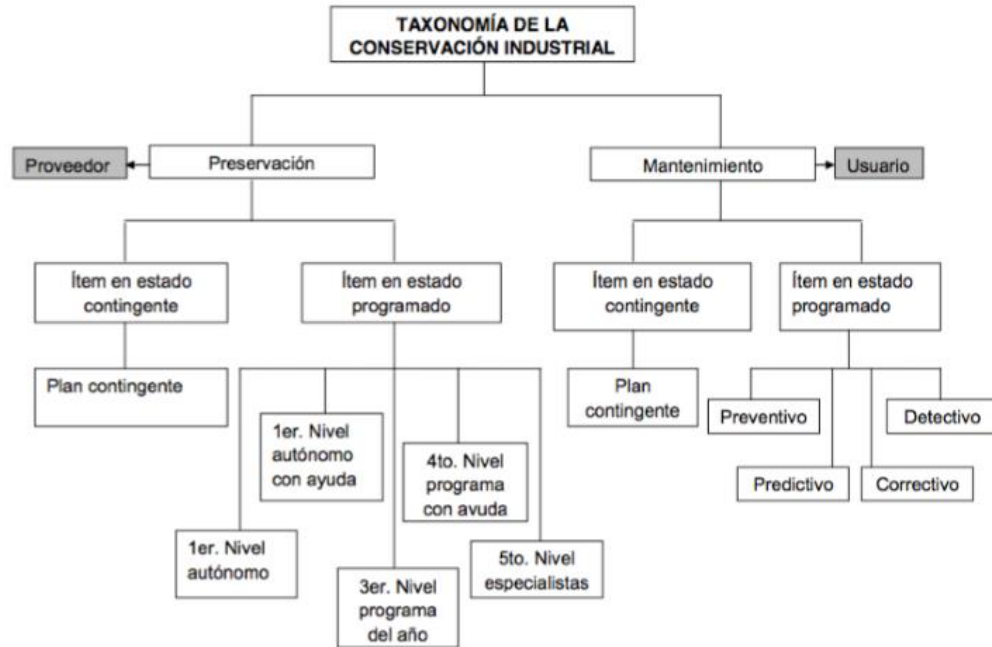
1.3. Mantenimiento industrial

El mantenimiento en la industria es un campo de la ingeniería de interés y con un amplio impacto económico, tal como se justifica el hecho de que en algunas industrias los costos derivados del mantenimiento constituyen un porcentaje del producto interno bruto (González, 2005, pág. 7).

Tal como lo explica González (2005) en su trabajo, el mantenimiento industrial solamente data de unas pocas décadas desde que se conoce y se define como un importante desarrollo, metodología y aplicación en cualquier industria, siendo este necesario para lograr competir a nivel global.

Existe una diversidad de tipos de mantenimiento basados en las distintas filosofías de sus autores; sin embargo, en este trabajo solamente se verá el tipo de mantenimiento predictivo. Los principales son correctivo, preventivo y predictivo, el resto de los otros tipos de mantenimiento solamente son una variación o combinación de los tipos principales del mantenimiento.

Figura 11. **Taxonomía de la conservación industrial**



Fuente: Sánchez. (2017). *Técnicas de mantenimiento predictivo: metodología de aplicación en las organizaciones.*

1.3.1. **Mantenimiento predictivo**

Este tipo de mantenimiento permite la identificación de y pronóstico anticipado de la ocurrencia de posibles fallas en el sistema evaluado con esta herramienta. Pérez (2016) explica que el mantenimiento predictivo tiene como objetivo ejecutar las acciones sugeridas por el mantenimiento preventivo en el momento justo antes de que el equipo quede indisponible, aprovechando al máximo los recursos e insumos.

El mantenimiento predictivo se apoya de varias técnicas tal como análisis de aceite, termografía infrarroja, análisis de vibraciones, radiografía, análisis por

ultrasonido, entre otras para predecir o estimar cuando sucederán las fallas (Colíndres, 2019). Esto se logra mediante el monitoreo de las condiciones en las que los equipos están operando, llevando un adecuado registro histórico, con esto se puede obtener el mayor rendimiento de la maquinaria, equipos y cualquier otro elemento que sea objeto en la ejecución de este mantenimiento (Pérez, 2016).

Mosquera (2001) explica que idealmente se debe de verificar la condición de los elementos a evaluar mientras estos se encuentran en operación y de forma periódica. El objetivo es reemplazar las revisiones periódicas del mantenimiento preventivo, por la verificación, chequeo y monitoreo regular con la cual se obtiene un indicador de la evolución del estado de los elementos a evaluar. Es imprescindible definir límites permisibles cuando ejecutamos este tipo de mantenimiento, ya que estos serán los que nos darán las señales de alerta para realizar un cambio de piezas o cualquier elemento necesario para no llegar a la falla.

Según explica Mosquera (2001) existen varias ventajas que nos proporciona el desarrollar este tipo de mantenimiento en cualquier proceso productivo; sin embargo, también plantea cuales podrían ser las desventajas de implementarlo.

Ventajas:

- Detección de fallas en etapas tempranas.
- Se apoya de herramientas y técnicas de análisis que no requieren sacar de línea la instalación.
- Manejo eficiente de repuestos, refacciones y consumibles.
- Mejora la confiabilidad de la instalación.
- Reducción del tiempo de indisponibilidad de la instalación.

- Reducción en los costos del mantenimiento.
- Desventajas:
- Requiere una alta inversión inicial.
 - Requiere equipo más especializado.
 - Es necesario contar con personal mejor cualificado.

1.3.2. Esquema general de implementación

Existe una serie de pasos que son necesario para la implementación del mantenimiento predictivo en una organización, Sánchez (2017) en su trabajo explica que: “La aplicación de este tipo de mantenimiento se basa en proveer información sobre la condición de cada una de las maquinas o elementos dentro de la instalación, lo suficientemente precisa para tomar una decisión de acuerdo con su diagnóstico” (p. 57).

Figura 12. **Proceso en la implantación del mantenimiento predictivo**



Fuente: Sánchez. (2017). *Técnicas de mantenimiento predictivo: metodología de aplicación en las organizaciones.*

La Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) contiene un estándar que es la base metodológica para la implementación del mantenimiento predictivo (ISO 13374-1:2003), en ella se indican seis pasos claves para alcanzar el objetivo de este mantenimiento (Sánchez, 2017).

- Adquisición de datos
- Manipulación de datos
- Detección de la condición
- Detección de la salud de la máquina o equipo
- Pronóstico de la condición
- Generación de avisos

1.4. Ensayos no destructivos

En su trabajo Pérez (2016) mantiene que: “Los ensayos no destructivos son todas aquellas pruebas que al ser aplicadas a un material no llegara a alterar de forma permanente ninguna de sus propiedades físicas, mecánicas o químicas” (p.23).

1.4.1. Inspección visual

De acuerdo con Gómez (1998) esta técnica es la que se utiliza en primera instancia debido a sus simplicidad y practicidad para ser aplicada. Aunque la forma más simple de aplicarla seria meramente por la inspección visual realizada por el técnico de mantenimiento, también existen otras que incluyen el uso de microscopios, lentes de aumento, lámparas estroboscópicas, cámaras hasta incluso un sistema de endoscopios para uso industrial.

Esta técnica puede indicar de primera mano cualquier defecto perceptible que esté afectando el incorrecto funcionamiento del equipo objeto de la evaluación, disparando alarmas para evaluar más minuciosamente con otras técnicas más especializadas (Gómez, 1998). Godoy (2019) menciona en su trabajo que puede llegar a incluirse herramientas para hacer de este ensayo más efectivo, como lo es la utilización de cámaras fotográficas con lentes de acercamiento para obtener mayor detalle o incluso la utilización de drones con cámaras fotográficas o de video, con el objetivo de llegar a apreciar detalles en ángulos que desde una posición en el nivel del suelo es muy complicado de alcanzar, logrando un análisis rápido en tiempo real o incluso uno más minucioso posteriormente a la ejecución del ensayo.

1.4.2. Análisis de vibraciones

Pérez (2016) expone que al evaluar un equipo por la técnica de análisis de vibraciones es posible indicar cuál es el estado del equipo con una gran certeza. Si bien es cierto que todos los equipos vibran, ya sea que roten, se tengan algún tipo de movimiento o sean totalmente estacionarios, existen parámetros que indican cuando la vibración es normal o están indicando que existe algún funcionamiento fuera de los parámetros de operación nominales.

1.4.3. Termografía infrarroja

Según Pérez (2016) la termografía infrarroja es una herramienta que permite visualizar la temperatura superficial de los materiales considerablemente precisa sin tener necesidad de tener contacto con la pieza, ya que los equipos permiten la medición a distancia. En su trabajo, este autor menciona que: “El uso de la termografía es de vital importancia debido a que los aisladores en líneas de transmisión son elementos que se encuentran instalados a una altura considerable respecto del suelo” (p. 29).

Por su parte Godoy (2019) resalta que: “El uso de este tipo de técnica radica en la importancia de medir el calor emitido debido a las condiciones de operación de los elementos de una LT, ya que esto permitirá detectar patrones y destacar aquellos que se encuentren fuera de los parámetros normales” (p. 318). Es importante resaltar que para realizar esta técnica es necesario que las líneas de transmisión estén operando por lo menos con un 40 % de su capacidad de carga nominal, de lo contrario la medición tomada no podrá indicar ningún parámetro anormal.

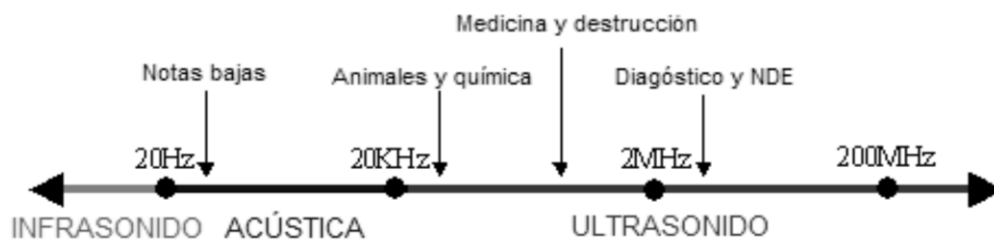
1.4.4. Análisis por imagen ultravioleta

Cardona (2018) menciona las ventajas de la utilización de un tipo de cámara que adicional de capturar imágenes en formato estático o dinámico en el espectro de luz visible al ojo humano, también lo hace en el espectro superiores a él. En su investigación, Cardona (2018) hace referencia a la conveniencia de este ensayo al detectar fenómenos como el efecto corona que se manifiesta justamente en este rango del espectro de colores, con lo que se vuelve un ensayo práctico para la detección de este tipo de fallas en sitio.

1.4.5. Análisis por ultrasonido

Esta técnica utiliza la percepción de las ondas de sonido generadas en alta frecuencia por medio de equipo especializado (Pérez, 2016).

Figura 13. Rango de frecuencia de sonido



Fuente: Cárdenas y Garzon. (2012). *Diagnóstico de redes de distribución aéreas de 11.4 hasta 34.5 kV con la técnica de ultrasonido.*

Pérez (2016) en su trabajo sostiene que con el análisis por ultrasonido es posible detectar fricción y desgaste en máquinas rotativas, diversos tipos de fugas, pérdidas de vacío. Por su parte Cárdenas y Garzon (2012) mencionan que por medio del ultrasonido es posible detectar también anomalías en el

funcionamiento de elementos eléctricos como lo son las descargas parciales, ionización de partículas, efecto corona, arcos y tracking eléctricos.

1.4.6. Ultrasonido propagado en aire

Los equipos de detección ultrasónica están diseñados para capturar las ondas producidas por sonido en alta frecuencia y luego convertirlas en señales de sonido que estén dentro del espectro de frecuencias audibles por el ser humano, adicionalmente el equipo cuenta con una interfaz gráfica que muestra gráficamente el comportamiento de las ondas de sonido capturadas. Es también posible interpretarse como que el equipo de análisis por ultrasonido es una extensión de la percepción auditiva humana detectando aproximadamente desde los 20 kHz hasta los 100 kHz (García, 2016).

1.4.7. Análisis con partículas magnéticas

Este tipo de prueba se centra en la detección de discontinuidades superficiales en el material a evaluar. Tiene la limitación de solamente poder ser aplicado en materiales magnetizables, ya que su principio de funcionamiento es el ordenamiento de los dominios magnéticos en el material para crear temporalmente campos magnéticos en el material que propician sostener las limaduras magnéticas, quienes revelarán las discontinuidades a lo largo de la superficie del material ensayado (Gómez, 1998).

1.4.8. Líquidos penetrantes

Este tipo de prueba al igual que el ensayo de partículas magnéticas, tiene por objeto la detección de discontinuidades superficiales y, su aplicación consiste en el uso secuencial de líquidos y tintes especiales sobre la

superficie a evaluar, con el fin de revelar aquellas fisuras o daños encontrados en el material (Gómez, 1998, pág. 80).

1.5. Identificación de ensayos no destructivos por utilizar

Según explican Cárdenas y Garzon (2012) para el caso de los aisladores en general, no siendo el material del cual están contruidos el factor más decisivo, las técnicas que mejores resultados ofrecen son:

- Inspección visual
- Termografía infrarroja
- Ultrasonido propagado por aire

Adicionalmente, mencionan que estas técnicas para el caso de detección de anomalías en los aisladores son complementarias e indispensables para crear un sólido plan de mantenimiento predictivo en aisladores de líneas de transmisión (Cárdenas y Garzon, 2012).

1.6. Fallas en líneas de transmisión de 69 y 138 kV

En las líneas de transmisión existen puntos críticos por los cuales puede estar mucho más propenso a fallar que en otros, por lo mismo dentro del mantenimiento para esta clase de instalaciones es necesario tener en cuenta cuáles serán los elementos con más criticidad y mantener un adecuado monitoreo de estos (Godoy, 2019). Este autor también menciona en su trabajo que existen varias fuentes de falla que provocan una indisponibilidad forzada de las instalaciones de transmisión y, estas pueden ser:

- Reducción del aislamiento: esto puede ser debido a que la LT se encuentra instalada en zonas altamente contaminadas o ambientes demasiado salinos.
- Pérdidas por efecto Joule en elementos de sujeción: esto se debe principalmente debido a la virtud propia de los conductores de aluminio para la contracción y elongación creando flojedad entre el herraje y el conductor.
- Pérdidas en la calibración de elementos de seccionamiento: a lo largo del trazo de líneas de transmisión pueden existir elementos de seccionamiento o interrupción que permitan tener más control y opciones de maniobras en la red.
- Fallas por descargas electroatmosféricas: se dan mayormente en zonas con un nivel isocerámico elevado y, puede provocar daños en el sistema de puestas a tierra, apantallamiento, aislamiento o elementos de unión.
- Anomalías en la puesta a tierra: se propicia debido al deterioro de los conductores enterrados que conforman el sistema de aterramiento.
- Actos vandálicos: una línea de transmisión puede fallar debido a la destrucción total o parcial de alguno de sus elementos, o incluso el robo de estos.
- Daños en los elementos de soporte: estos generalmente se dan por situaciones ambientales para los cuales no fueron diseñados, aunque también es posible que se deba debido a accidentes de tipo vehicular mayormente, esto sucede cuando el trazo de la LT se encuentra dentro de las zonas urbanas.

1.6.1. Fallas relacionadas al aislamiento y medidas de mitigación

En su trabajo Godoy (2019) menciona cuales son los eventos en los que ocurren fallas en el aislamiento y cuáles son las medidas de mitigación que toma

una de las principales empresas transportistas de energía eléctrica de Guatemala. Estas fallas pueden clasificarse dependiendo de la naturaleza del daño en mecánicas o eléctricas.

Peña (2008) hace mención del origen de las fallas en el aislamiento de las líneas de transmisión, clasificándolas:

- Factores climáticos
 - Descargas electroatmosféricas
 - Vientos fuertes
- Condiciones de operación
 - Alta contaminación
 - Ambientes con alta salinidad
- Acciones mal intencionadas
- Origen desconocido

En Guatemala las medidas de mitigación más típicas por utilizar son las que Godoy (2019) define en su trabajo

- Inspecciones visuales
 - Inspecciones con dron
- Lavado de aisladores
- Análisis con termografía infrarroja
- Análisis con ultrasonido propagado en aire

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

A largo del desarrollo de la investigación se realizaron visitas de campo de inspección del aislamiento de las líneas de transmisión, aplicación de técnicas de ensayos no destructivos. La recopilación de información se realizó de forma mixta, de corte longitudinal durante la ejecución y análisis de los resultados arrojados por los END y de corte transversal en el caso de los datos históricos.

2.1. Datos históricos fallas en líneas de transmisión

Estos datos fueron proporcionados por el dueño de las instalaciones, las cuales serán objetivo de análisis a lo largo del desarrollo de esta investigación. La información fue proporcionada el 13 de enero de 2020.

La base de datos contempla un registro sin estandarización de la falla, la ubicación geográfica, la fecha y la duración de la falla. La información en primera instancia se encontraba desorganizada ya que no se contaba con la cultura de un adecuado y eficiente registro de las fallas.

Se procedió a realizar una recategorización para ordenar cada una de las fallas para facilitar el análisis de estas y el impacto que tienen en el sistema de la empresa transportista. Cada una de las fallas registradas en la base de datos fue dividida en la nueva tabla en la descripción del elemento fallado, causa de falla, modo de falla, la instalación en la que se encuentra, fecha y duración de la falla.

Para el ordenamiento de los datos se utilizó el formato apéndice 1. registros de falla en líneas de transmisión. En estos se detectó que los datos más relevantes para el caso de las fallas en los aisladores son los siguientes:

Tabla III. **Fallas relevantes en aisladores**

Causa de falla	Modo de falla	Duración de la falla (promedio)
Reducción de distancia de fuga	Contaminación	0.03 horas
Flameo	Degradación del polímero	1.68 horas
Daño físico	Descarga electroatmosférica	1.37 horas

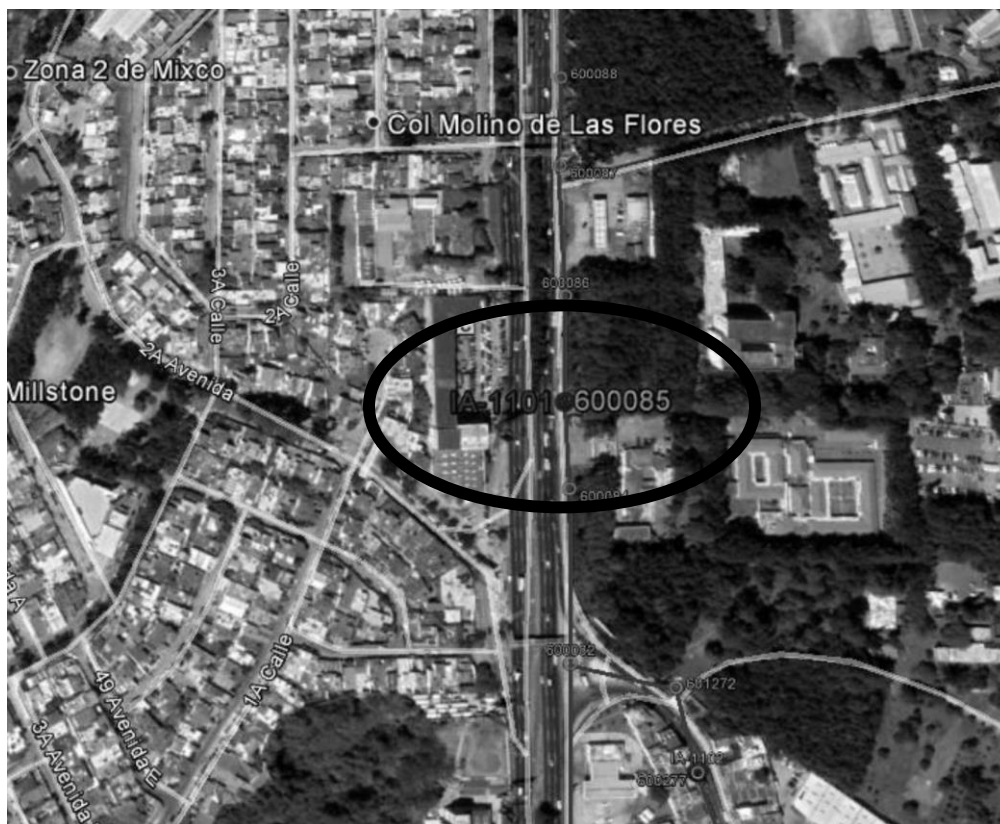
Fuente: elaboración propia.

El apéndice 1 se encuentra en la sección correspondiente.

2.2. Visita de campo de inspección

Esta visita fue realizada el 01 de febrero de 2020, a las 09:00 horas, en la ubicación de Mixco, verificando el estado de las estructuras de la línea de transmisión que se definió por motivos de este estudio como 'Línea 86' (14°38'5.89"N 90°35'31.30"O). Durante la visita estuvo presente solamente el investigador. La visita finalizó a las 09:30 horas.

Figura 14. Ubicación de poste 600085



Fuente: Google Earth (2019). Consultado el 17 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://earth.google.com/web/@14.63535134,-90.59190698,1651.27574937a,642.54373321d,35y,-85.28013465h,10.16055268t,360r>.

Durante la visita de campo se recopiló información de los aisladores de polímero en la línea de transmisión. Se registraron las condiciones en general en las que se encuentra operando (integridad del estado físico, accesorios de sujeción, entre otros).

Para la visita se utilizó el formato apéndice 2. Ficha de visita de reconocimiento. La información relevante se detalla a continuación:

- No se confirman altos niveles de contaminación en el aislamiento.
- No se observa ningún elemento ajeno que pueda generar una mala operación.
- No se observa mala operación del elemento con causa de estudio.
- En general la instalación se encuentra en buenas condiciones de operación.

El apéndice 2 se encuentra en la sección apéndices. Cabe destacar que durante la visita se pudo observar una gran afluencia vehicular. Este factor puede ser crucial para desencadenar una serie de infortunios que lleven a una inminente falla en la instalación.

Esta instalación se encuentra instalada sobre la acera de una arteria vial principal. Debido al lugar donde se encuentra instalado y la densidad vehicular circulando se hace complicado coordinar la anuencia para el mantenimiento con las entidades municipales.

La estructura en cuestión posee un dispositivo de seccionamiento montado sobre esta. Los dispositivos de seccionamiento proveen muchas bondades operativas de maniobra en las instalaciones de transmisión. Esta estructura en particular se hace de vital importancia en la línea de transmisión ya que permite una gran versatilidad en condiciones de operación especiales, tales como contingencias o mantenimientos programados en instalaciones aledañas.

2.3. Visita de aplicación de ensayos no destructivos

Previo a la coordinación de la fecha de la visita, se selecciona el ensayo no destructivo que mejor puede funcionar en para la ubicación que será objeto de estudio en esta investigación. Debido a la agilidad y practicidad en la aplicación de los ensayos, se determina que se utilizará la inspección visual, termografía y

ultrasonido propagado en aire. Es importante mencionar que para la prueba de termografía se cuenta con un equipo propiedad de la empresa transportista; sin embargo, para la prueba de ultrasonido se hizo necesaria la contratación del servicio.

Se coordina la visita de nuevo a la misma estructura en cuestión debido a su criticidad en la línea de transmisión denominada: 'Centro-Guatemala 6'. Se solicita el aval de la empresa transportista dueña de las instalaciones y se les informa de la fecha y hora del desarrollo de la actividad. Durante el desarrollo de la aplicación de los trabajos programados se contó con la presencia de personal de la empresa interesada, supervisor SISO, colaboradores capacitados para la ejecución de cada uno de los ensayos por aplicar.

Antes de iniciar con las actividades propias de END se procede a realizar la charla previa por parte del agente de seguridad industrial. En esta charla se le da a conocer a todo el personal involucrado cuáles serán las actividades que se desarrollarán a lo largo de la actividad y quienes serán los roles de cada uno durante cada una de ellas.

Se procede a delimitar el área, para esto se contó con material específico para esta tarea. Se colocan los conos de seguridad y barras para conos de advertencia previo a iniciar los trabajos. Se verifica por medio del detector de alta tensión sin contacto la operación normal de la red y se hace de conocimiento a todos que se trabajara con la instalación operando y energizada.

El formulario utilizado como permiso de trabajo se puede encontrar como apéndice 3. Permiso de trabajo. Este se puede encontrar en la sección de apéndices.

Todos los datos recopilados durante la visita fueron tomados en la tabla que se muestra como apéndice 4. Resumen de datos recopilados. Esta tabla contiene datos relevantes y fáciles de interpretar sin mayor trabajo o análisis en campo.

En el formato de control utilizado durante la visita de recolección de datos del investigador se puede encontrar que este contempla varias fases durante la toma de datos. Estas se encuentran ordenadas según el desarrollo de las actividades en el itinerario de trabajos. Se puede encontrar en la primera sección la parte de la inspección visual, en la segunda sección los datos recolectados durante la aplicación del ensayo termográfico y en la tercera sección, los datos recolectados durante la aplicación del ultrasonido propagado en aire.

El apéndice 4 se puede encontrar en la sección de apéndices.

2.4. Tipos de fallas más comunes en aisladores de polímero de 69 y 138 kV

Se realiza el reordenamiento de la tabla de registros proporcionada por el dueño de la instalación. Para cada uno de los datos suministrados se aplicarán las técnicas de análisis de fallas. A partir de esto se pretende la practicidad, estandarización y la obtención de mejores resultados.

Se reorganizará cada evento registrado, elaborando una tabla que pueda brindar más información cuando se analice. Esto se hará tomando en cuenta lo siguiente:

- Elemento fallado: dependiendo cual es la función que cumple en una instalación de una línea de transmisión.
- Modo de falla: responde a la forma en la que se produjo la falla.

- Causa de falla: responde a lo que originó la falla.
- Fecha: el registro del día, mes y año en la que se produjo el evento.
- Duración de falla: se muestra en formato decimal, indicando la cantidad de horas que se tuvo la indisponibilidad.

El fragmento de la tabla, con los datos que interesan al desarrollo de esta investigación, se encuentra en la parte de APÉNDICES, como 'Apéndice 1. Extracto de registro de fallas 2017-2019'.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Seguidamente de la evaluación de forma teórica en cuanto a las diversas técnicas de ensayos no destructivos que se pueden encontrar en el mercado nacional y el registro historial de fallas en las líneas de transmisión propiedad de la empresa transportista que está siendo objeto de estudio en esta investigación, se presentan los resultados y se plantean las tendencias en base a toda la información anteriormente mencionada para generar un plan de mantenimiento.

3.1. Criticidad de fallas

Se realizó el análisis de criticidad con base en los registros de los eventos. Inicialmente se procedió a categorizar cada uno de los eventos de tal forma que facilitara el análisis de los datos, seguidamente se definió como serían estandarizada la criticidad en base a la técnica 'frecuencia por consecuencia' para los eventos registrados en los aisladores. Finalmente, estos eventos más recurrentes se categorizaron según su criticidad y se añadieron otros tipos de fallas que pueden llegar a ocurrir también.

3.1.1. Categorización de fallas

Para definir cada uno de los eventos se tomó como base indicar en que elemento de una línea de transmisión ocurrió la falla, seguidamente de esto se utilizan los conceptos de *modo de falla* y *causa de falla* para categorizar cada uno de los registros.

A continuación, se describe cual fue el concepto tomado para definir el elemento donde ocurrió la falla:

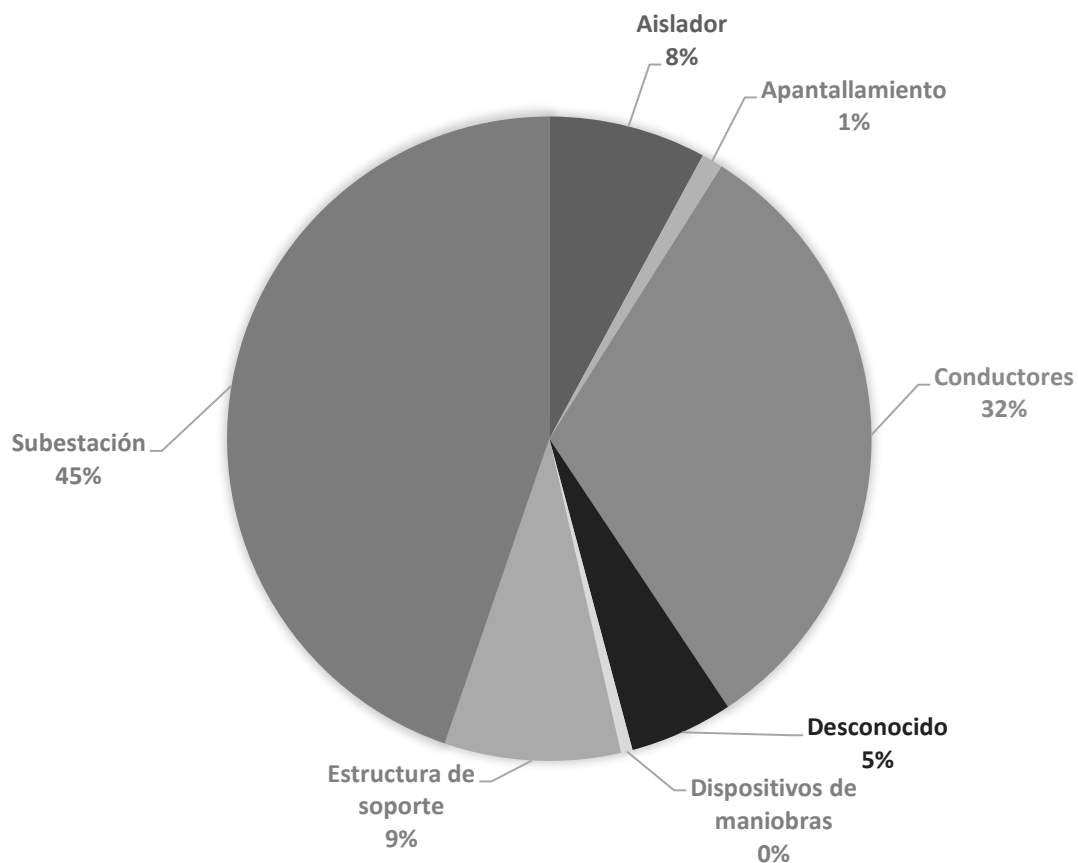
- Subestación: son aquellos eventos que se dieron a partir del disparo provocado por el relevador de protección de la subestación. Este evento pudo haber sido detonado por algún mal funcionamiento dentro de la subestación. Pueden ser eventos registrados en subestaciones propiedad de la empresa transportista, otros transportistas o por subestaciones privadas de grandes usuarios.
- Aislador: estas pueden ser por el flameo de este elemento debido a la degradación del material debido a diferentes causas que cuando se produce un arco eléctrico se calienta tanto el material que se quema el material polimérico. También es posible la falla debido a la reducción de la distancia de fuga producido por algún elemento externo o la acumulación de agentes contaminantes sobre la superficie aislante polimérica. La causa más común de falla es debido al daño físico producido por varios factores como vandalismo o debido a efectos de ambientales como descargas electroatmosféricas.
- Apantallamiento: debido al desgaste producido por los esfuerzos eléctricos que debe soportar se degrada el material, lo que lleva a la fatiga, siendo esto generalmente la causa más común de falla. Es también común que elementos externos se impacten contra estos elementos y los conductores provocando un cortocircuito.
- Conductores: puede ser por el acercamiento o contacto de elementos extraños con los conductores, produciendo cortocircuito o arcos eléctricos. Cuando un conductor se encuentra con presencia de desgaste por cualquier

factor, estos pueden llegar a romperse debido al daño físico. Cuando la línea se encuentra comprometida debido a la sobrecarga producida por la salida de otras subestaciones o líneas de transmisión cercanas, estas pueden llegar a sobrecalentarse lo que producirá el deterioro acelerado de este elemento.

- Desconocido: este tipo de eventos se catalogan de esta forma cuando se recibe el aviso y se realiza una prueba de operación y resulta ser positiva, es decir que se prueba el cierre del interruptor de potencia y no persiste la falla. Sin embargo, otras ocasiones resulta que la falla persiste, se procede a su revisión en campo y no se halla ningún elemento que indique cual fue la causa de falla. En este último se solicita nuevamente desde campo la maniobra de cierre a modo de prueba y resulta ser positiva.
- Dispositivos de maniobra: estos son aquellos elementos que permiten una versatilidad grande en la operación de la red, permitiendo seccionar tramos de línea en contingencias o situaciones especiales. Uno de los modos más comunes de falla es cuando los equipos no obedecen las ordenes remotas de operación, otro también común es cuando estos se encuentran descalibrados y cuando se operan resultan generando una falla.
- Estructura de soporte: los postes son elementos que rara vez fallan, sino es por elementos ajenos propiamente de la instalación o condición de operación. Generalmente esta parte de una línea de transmisión falla debido a colisiones vehiculares o una desestabilización del suelo, comprometiendo incluso las estructuras aledañas, pudiendo causar un efecto de dominó.

En total se contabilizan 463 eventos registrados durante enero de 2017 y octubre de 2019, de los cuales se puede derivar la gráfica que se presenta a continuación.

Figura 15. **Fallas registradas 2017 a 2019**

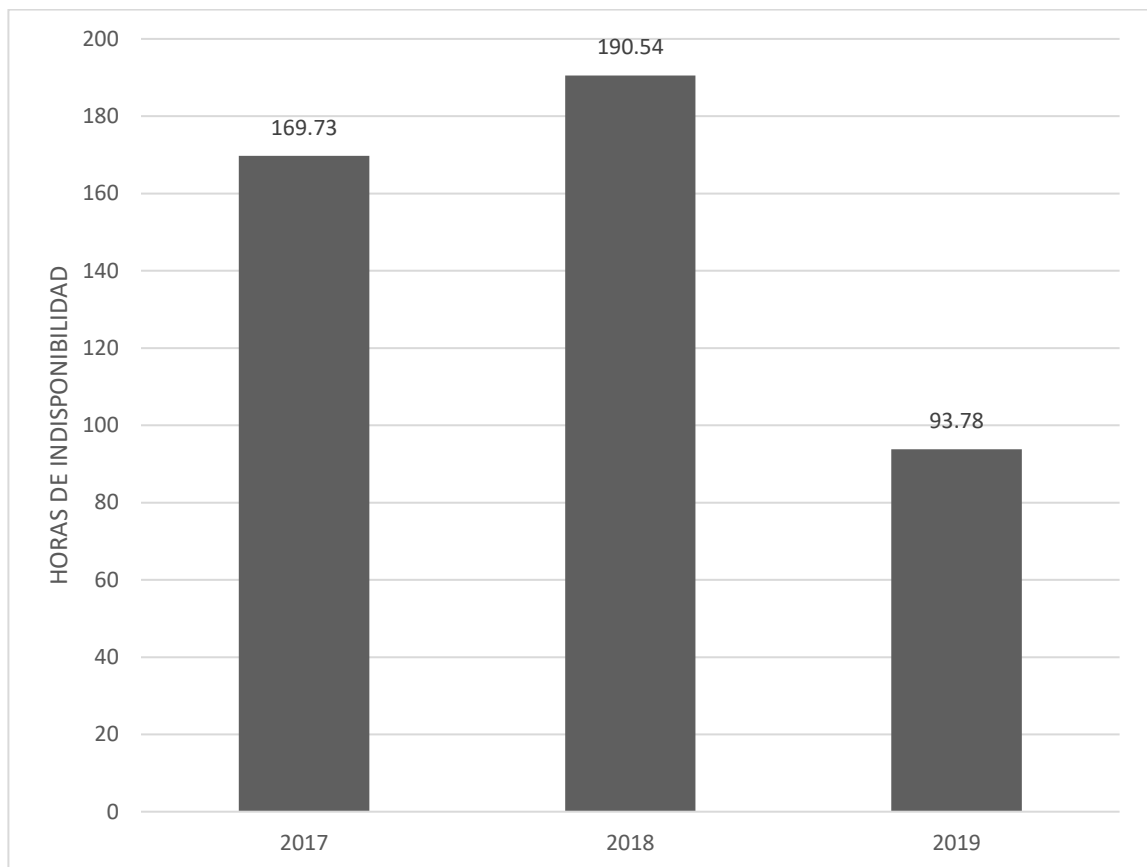


Fuente: elaboración propia.

En líneas de transmisión se contabilizan los números de salidas y el tiempo total de indisponibilidad forzada en la que la línea estuvo fuera de servicio. Estos valores registrados junto con características propias de la instalación en cuestión se evalúan y se ejecuta una sanción debido a esto, según se menciona en la

NTCSTS (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010). Es por esta razón que para las empresas que se encuentran dentro del sistema nacional interconectado no se debe de mantener un MTTR elevado.

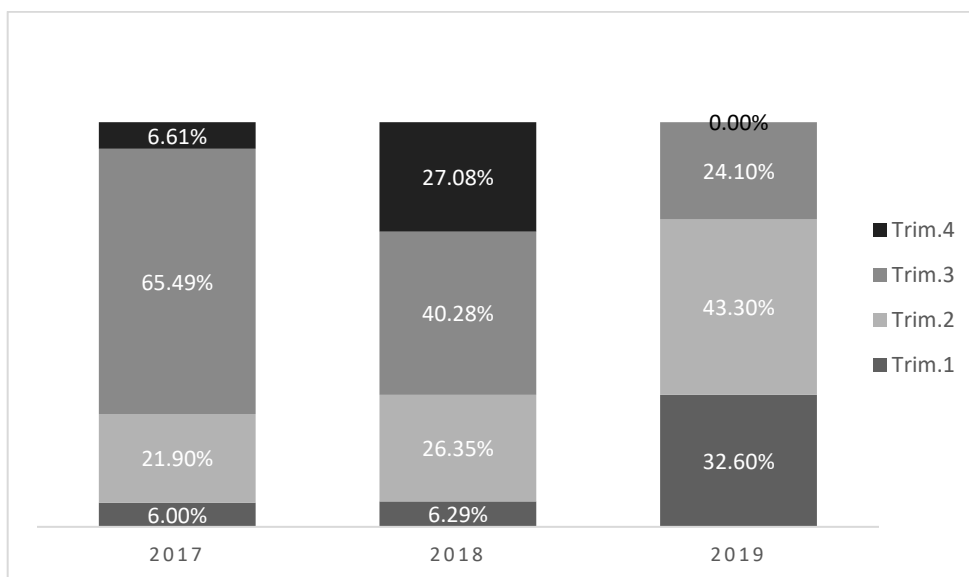
Figura 16. **Horas de indisponibilidad entre 2017 y 2019**



Fuente: elaboración propia.

En esta última gráfica se puede observar los totales de las fallas por año; sin embargo, es interesante conocer cómo se muestran los porcentajes de fallas trimestralmente para considerar dentro del análisis la falta de datos en los registros del último trimestre de 2019.

Figura 17. **Porcentajes de horas de indisponibilidad trimestral por año**



Fuente: elaboración propia.

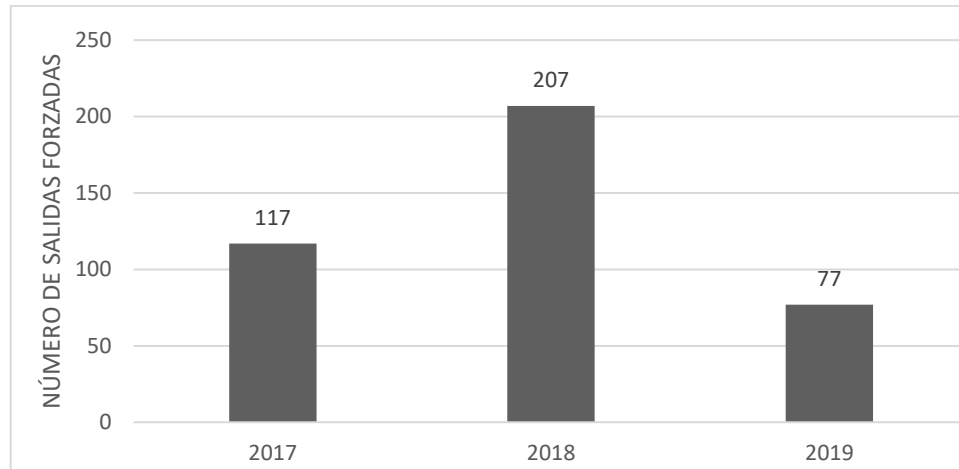
Para visualizar de forma más practica estos porcentajes en cantidades de horas de indisponibilidad separados de forma trimestral, se presentan los resultados en la tabla mostrada a continuación:

Tabla IV. **Porcentajes y horas de indisponibilidad trimestral**

Año	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	Total
2017	6.00%	21.90%	65.49%	6.61%	169.73
	10.18 horas	37.17 horas	111.16 horas	11.22 horas	
2018	6.29%	26.35%	40.28%	27.08%	190.54
	11.98 horas	50.21 horas	76.75 horas	51.60 horas	
2019	32.60%	43.30%	24.10%	0.00%	93.78
	30.57 horas	40.61 horas	22.60 horas	0.00 horas	

Fuente: elaboración propia.

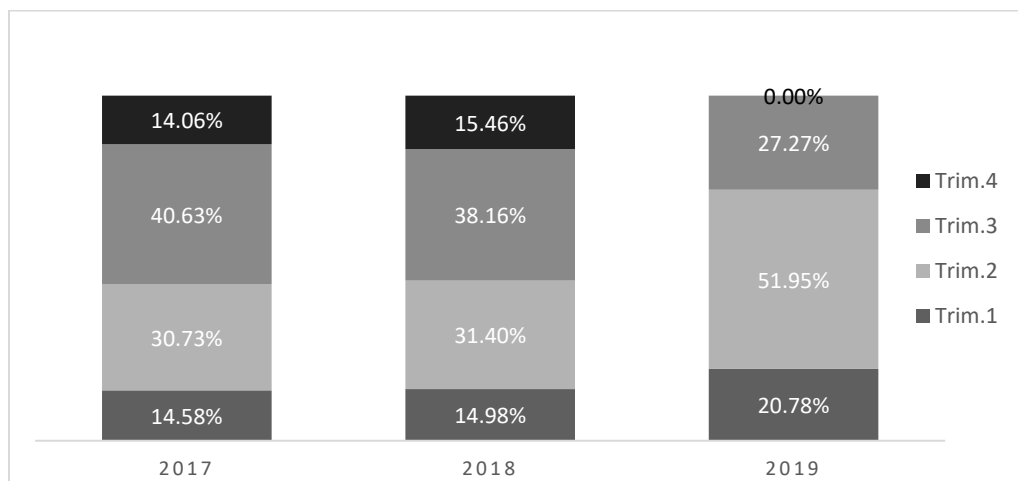
Figura 18. **Salidas forzadas entre 2017 y 2019**



Fuente: elaboración propia.

También es interesante observar cómo porcentualmente ocurrieron las fallas en base a los trimestres de cada uno de los años evaluados.

Figura 19. **Porcentaje de salidas forzadas trimestrales por año**



Fuente: elaboración propia.

Para visualizar de forma más práctica estos porcentajes en cantidades de salidas forzadas separado de forma trimestral, se presentan los resultados en la tabla mostrada a continuación:

Tabla V. **Porcentajes y salidas forzadas trimestrales**

Año	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	Total
2017	14.58 %	30.73 %	40.63 %	14.06 %	117
	17	36	48	16	
2018	14.98 %	31.40 %	38.16 %	15.46 %	207
	31	65	79	32	
2019	20.78 %	51.95 %	27.27 %	0.00 %	77
	16	40	21	0	

Fuente: elaboración propia.

De los conceptos y gráficos mostrados anteriormente se realiza una sinterización de los valores de horas de indisponibilidad y cantidad de salidas forzadas del universo de datos evaluado para esta investigación.

Tabla VI. **Conteo de fallas totales entre 2017 y 2019**

Año	Número de salidas forzadas (ocasiones)	Duración de tiempo de indisponibilidad (horas)
2017	117	162.23
2018	207	190.54
2019	77	93.79

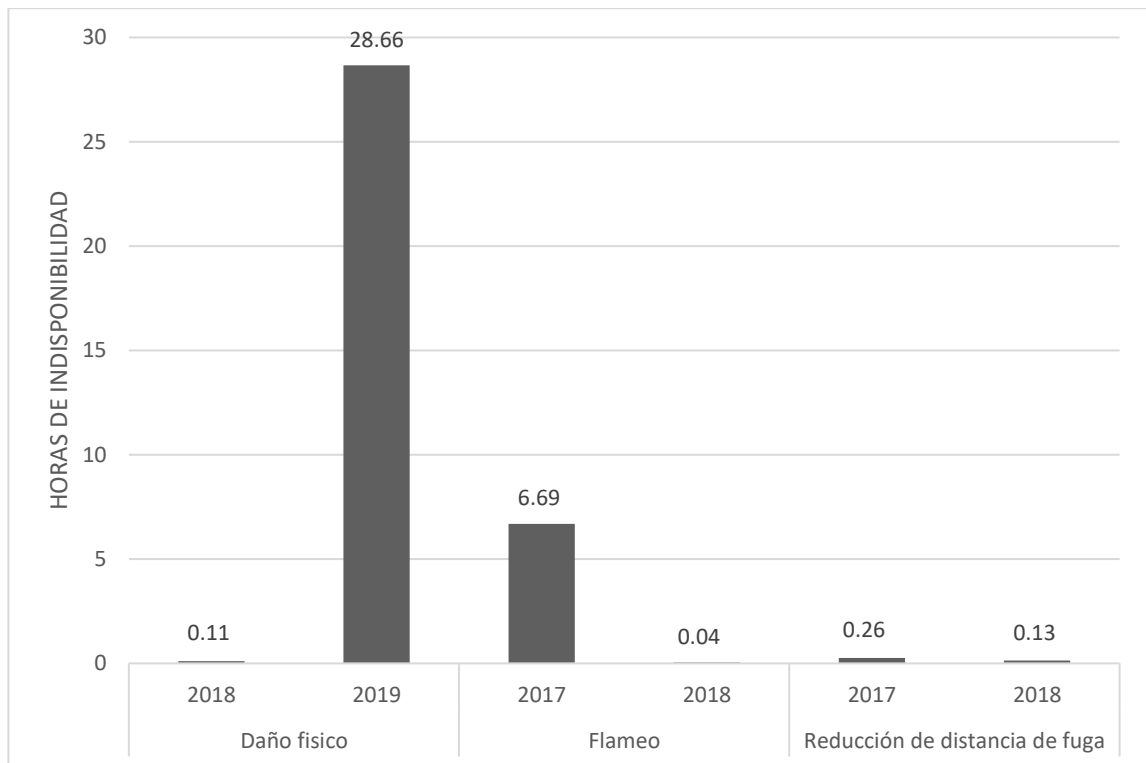
Fuente: elaboración propia.

Analizando solamente las fallas localizadas en el aislamiento es posible observar que una gran parte de los eventos registrados en este periodo de tiempo

se dieron mayormente debido al daño físico de este, en gran medida, debido a daños producidos por condiciones climáticas y descargas electro atmosféricas.

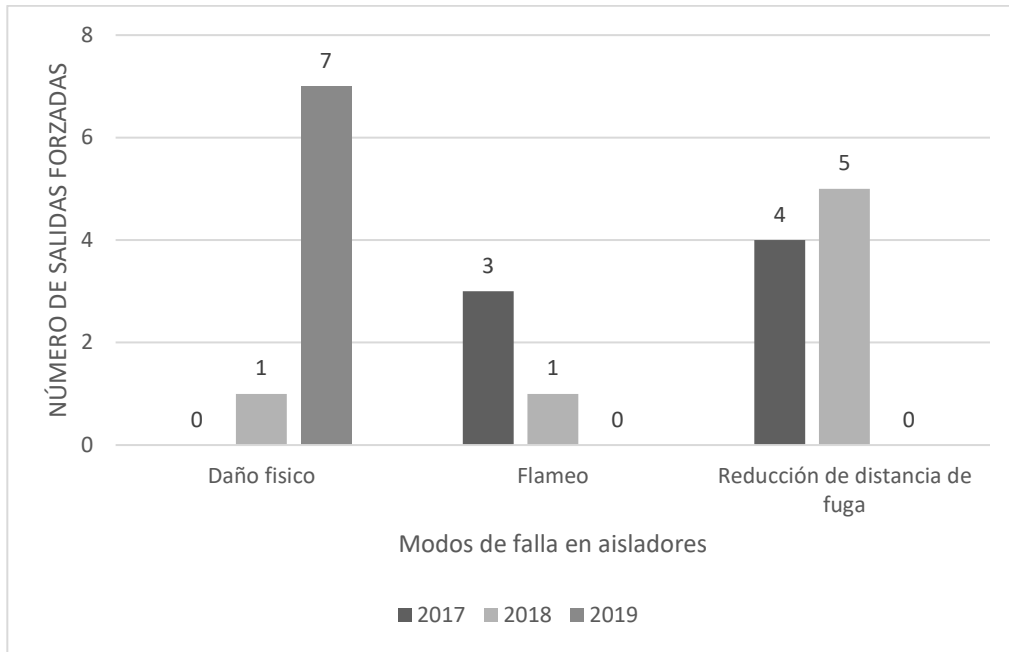
En la figura 20. Tiempo de indisponibilidad por modo de falla en aisladores' se muestra lo expresado en el anterior párrafo, superando significativamente a las fallas registradas por flameo y reducción de distancia de fuga.

Figura 20. Tiempo de indisponibilidad por modo de falla en aisladores



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Número de salidas forzadas por modo de falla**



Fuente: elaboración propia.

De las figuras 20 y 21 se realiza la siguiente tabla, que especifican los valores exactos de cada uno de los conceptos medidos.

Tabla VII. . **Conteo fallas por el aislamiento entre 2017 y 2019**

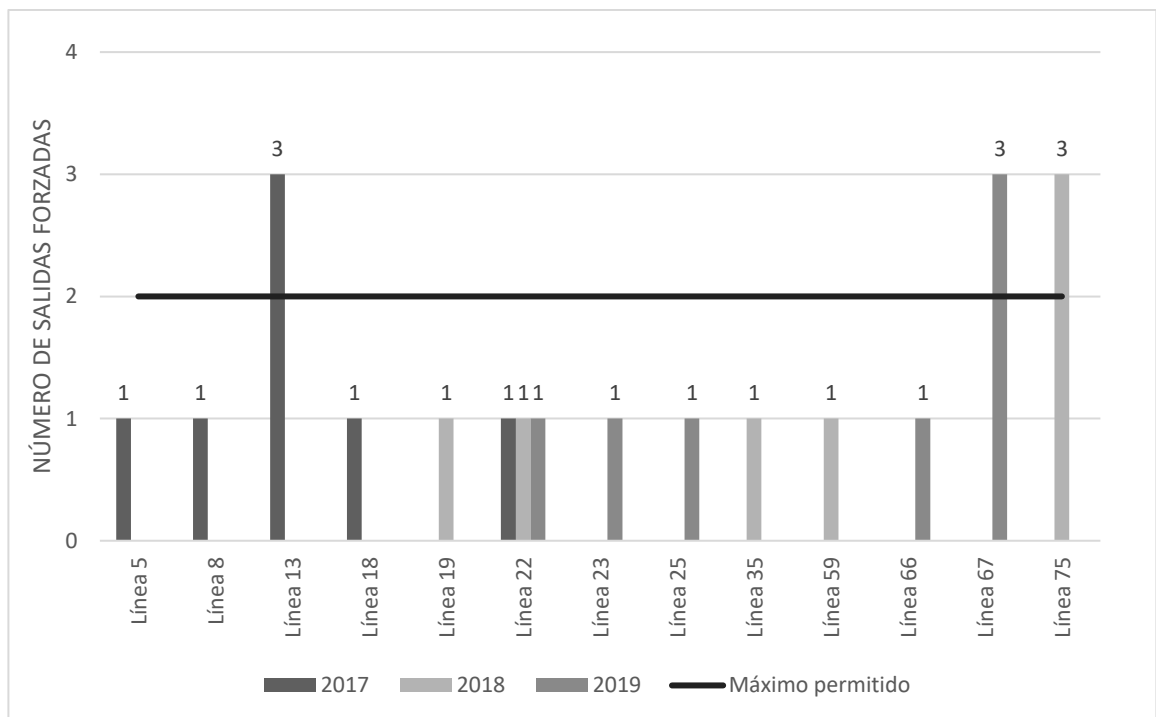
Modo de falla	Número de salidas forzadas (ocasiones)	Duración de tiempo de indisponibilidad (horas)
Daño físico	8	28.77
Flameo	4	6.74
Reducción de distancia de fuga	9	0.39

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Rangos admisibles de operación

Según lo indicado en las normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones solamente se permite dos veces por año la salida forzada de una línea de transmisión en 138 y 69 kV. Para el caso de tiempo de indisponibilidad se permite un máximo de 300 minutos, lo que también es un total de 5 horas por cada línea de transmisión de 138 y 69 kV. Según lo registrado se tiene que, para las líneas de transmisión, por motivos de fallas en el aislamiento salieron de servicio forzado tal y como se especifica en la gráfica presentada a continuación.

Figura 22. Salidas forzadas por fallas en el aislamiento

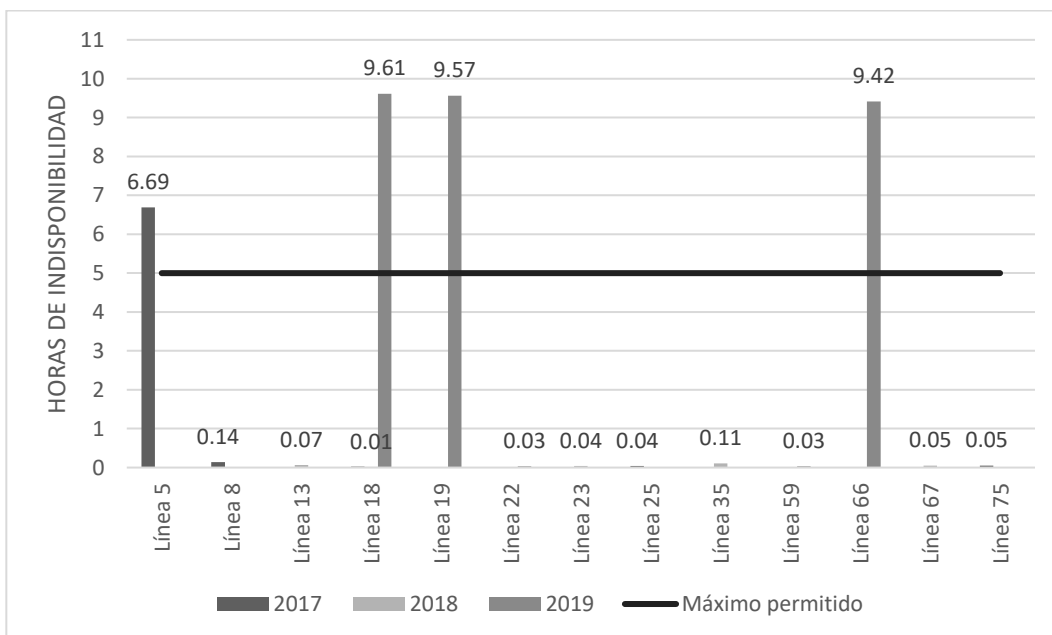


Fuente: elaboración propia.

En el gráfico anteriormente presentado se observa en el eje de las ordenadas se muestra el número de veces en las que una misma línea salió forzosamente por año, debido a alguna falla en el aislamiento. En el eje de las abscisas se muestran la nomenclatura de las líneas de transmisión objeto del estudio, esto por motivos de practicidad del análisis. Se comparan estos datos con el máximo de número de salidas forzadas permitidas por la CNEE, sin que la empresa transportista llega a ser sancionado.

Por otro lado, y como ya fue mencionado anteriormente, estas normas elaboradas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica no solamente regulan el número de salidas forzadas, sino también el tiempo de indisponibilidad de las líneas de transmisión. En este escenario, se presenta la siguiente grafica que describe la situación en la que se encuentran los registros de fallas.

Figura 23. Tiempo de indisponibilidad por fallas en el aislamiento



Fuente: elaboración propia.

En el gráfico anteriormente presentado se puede observar en el eje de las ordenadas el tiempo de indisponibilidad mostrado en horas, tomando en cuenta que la CNEE solamente permite 300 minutos (5 horas) sin llegar a la sanción para la empresa transportista dueña de la instalación eléctrica. En el eje de las abscisas se muestran las numeraciones que se les dio a las distintas líneas de transmisión.

3.1.3. Ponderación de criticidad

Se realizó un análisis de criticidad basado en la técnica de frecuencia por consecuencia para los modos de fallas y causas de fallas que afectan a los aisladores, tal y como es la intención de evaluar en este trabajo. Se estableció una ponderación para la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los modos y causas de falla ocurridos, dividiéndose en alta, media, baja y excelente en base a la cantidad de ocurrencia tomando en cuenta que en este tipo de industria no son toleradas las salidas recurrentes. Dichos valores van de 1 a 4, de menor a mayor frecuencia respectivamente, y se encuentran detallados en el apéndice 5 de la sección apéndices.

Así mismo, se realizó una ponderación para el caso de las consecuencias debido a la ocurrencia de las fallas en el aislamiento de las líneas de transmisión. Esta tabla se detalla en el apéndice 6, mismo que se encuentra en la sección de apéndices. Habiendo definido ambos criterios y sus subgrupos, se procede a evaluar cada una de las fallas.

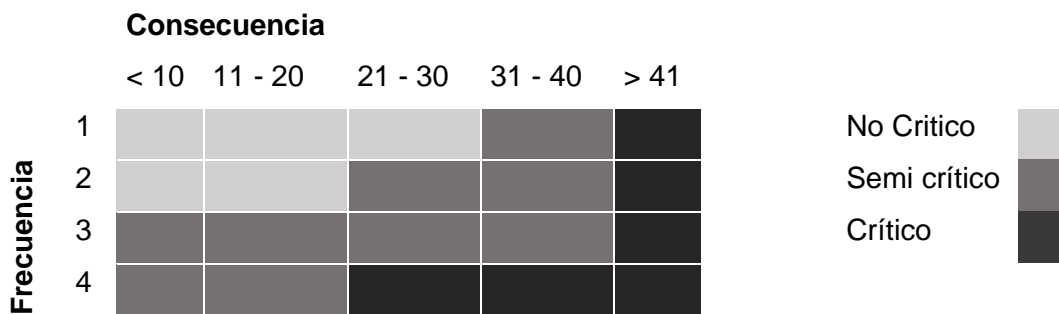
Con motivo de evaluar objetiva e integralmente la consecuencia de cada una de las fallas, se analizaron varios segmentos en los que puede llegar a afectar cada una de las causas de falla. Se consideró el impacto operacional, la

flexibilidad operacional, el costo del mantenimiento y el impacto de seguridad y medio ambiente.

Es importante destacar que el segmento que más impacto tiene durante la evaluación es el de la seguridad y medio ambiente. Esto se da debido a que la seguridad de las personas es lo que más se trata de preservar en cualquier tipo de empresa.

Cada uno de los segmentos esta ponderado con distintos valores, realizando una operación aritmética en la que el resultado final es un valor numérico que indica, en conjunto con el valor de frecuencia, en qué nivel de criticidad se encuentra cada una de las fallas.

Figura 24. **Matriz de criticidad**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla que se muestra a continuación se puede observar el resultado de la evaluación con base en los criterios anteriormente descritos.

Tabla VIII. **Criticidad de fallas en el aislamiento**

Modo de falla	Causa de falla	Frecuencia	Consecuencia	Criticidad
Reducción de distancia de fuga	Contaminación	2	11	No Crítico
	Degradación en material polimérico	2	2	No Crítico
	Desperfecto de fábrica	1	21	No Crítico
	Objetos externos	3	41	Crítico
Flameo	Contaminación	3	31	Semi crítico
	Degradación en material polimérico	2	25	No Crítico
	Desperfecto de fábrica	1	41	Crítico
	Objetos externos	2	31	Semi crítico
Daño físico	Descarga electroatmosférica	4	60	Crítico
	Objetos externos	2	41	Semi crítico
	Vandalismo	3	11	Semi crítico
	Desperfecto de fábrica	1	20	No Crítico
	Plagas o animales	2	23	Semi crítico
	Degradación en material polimérico	2	2	No Crítico

Fuente: elaboración propia.

3.2. Ensayos no destructivos

Después de realizada la investigación teórica sobre las ventajas y desventajas de la aplicación de cada una de las técnicas de ensayos no destructivos, contrastándose con la disponibilidad en el mercado nacional, se determinó que la mejor combinación de técnicas para la adecuación de los

aisladores de polímero de las líneas de transmisión que operen entre 69 y 138 kV son los ensayos no destructivos. Específicamente se utilizarán tres de ellos, inspección visual, termografía infrarroja y ultrasonido propagado en aire.

La selección de las estructuras a evaluar de la línea de transmisión fue de forma mixta, una parte fue escogida aleatoriamente y otra fue seleccionada debido a su criticidad con contar con elementos de maniobras instalados en ellas. Para distinguir el lado del grupo de aisladores a evaluar se definió previamente lados 'A' y 'B' para cada uno de los extremos de la línea.

La línea analizada fue la que en este estudio se le denominó 'Línea 86'. Tomando en consideración que, de las estructuras seleccionadas de forma aleatoria, todas se encuentran en configuración tangente, es decir que es similar a la imagen mostrada en la figura 9. Configuración en tangente. Así mismo, es necesario aclarar que, las estructuras seleccionadas por criticidad se encuentran en una configuración de doble remate; es decir que, estas están integradas de por dos juegos de aisladores.

Se le llama juego de aisladores al conjunto de aisladores instalados para soportar a cada una de las líneas, instalándose un aislador por fase. Con esta combinación de datos se define que el universo de elementos a analizar será de

Se considera la inclusión del 10 % del número total de las estructuras de la línea de transmisión a intervenir. La cantidad total de estructuras instaladas en la línea de transmisión es de 63, debido a eso se seleccionarán 6 estructuras de forma aleatoria, adicional a la cantidad de estructuras seleccionadas con base en su criticidad, las cuales serán tres.

Tabla IX. **Selección de estructuras**

Selección por criticidad	Selección aleatoria
600034	600024
600085	600044
607385	600055
	600063
	600071
	600095

Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Inspección visual

Durante la visita de ejecución de ensayos no destructivos se pudo observar que la instalación a intervenir, como las aledañas no contaban con algún daño físico o condición que pudiera intuir algún riesgo para en la operación. Se evaluaron aspectos como integridad física, correcta sujeción, tensión mecánica, limpieza.

Estos conceptos fueron tomados en base al criterio del investigador, debido a que no existe un estándar en la empresa dueña de los activos que mida estos parámetros. En la tabla mostrada a continuación, se muestra el detalle de la concepción del criterio para evaluar durante la ejecución de este ensayo.

Tabla X. **Aspectos por evaluar y detalles en inspección visual**

Aspecto por evaluar	Detalle
Integridad física	Campanas rotas
	Campanas dobladas
	Picaduras en el material
	Estado del núcleo
Sujeción	Oxidación en herrajes
	Mala instalación de herrajes
	Degradación en herrajes
	Estructura de soporte en buenas condiciones
Carga mecánica	Línea sub tensionada (en comparación con otras de fases)
	Línea sobre tensionada (en comparación con otras de fases)
	Herrajes cediendo (sobre tensión)
	Proximidad de aislador a conductor (sub-tensión)
	Proximidad de aislador a materiales externos (sub-tensión)
Limpieza	Alta contaminación ambiental
	Color del aislamiento oscurecido
	Material depositado en aislamiento
	Cobertura por sustancias extrañas

Fuente: elaboración propia.

De cada una de las estructuras analizadas se puede indicar que se encuentra visualmente en buenas condiciones, sin ningún factor que indique su mala operación o condición de riesgo por una futura falla. La forma en la que esta información fue registrada para validar las lecturas de este ensayo no destructivo se puede encontrar en el apéndice 4. Ficha de recolección de datos en el apartado de inspección visual, este formato se encuentra ubicado en la sección de anexos. En la siguiente gráfica se puede observar las lecturas tomadas en campo.

Tabla XI. **Lecturas de ensayo de inspección visual**

ESTRUCTURA	Integridad física				Sujeción				Tensión mecánica				Limpieza				
	Campanas rotas	Campanas dobladas	Picaduras en el material	Integridad del estado del núcleo	Presencia de corrosión u oxidación en herrajes	Incorrecta condición en instalación de herrajes	Degradación en herrajes	Estructura de soporte en buenas condiciones	Línea sub tensionada (comparada con otras fases)	Línea sobre tensionada (comparada con otras fases)	Herrajes cediendo (sobre tensión)	Proximidad de aislador a conductor (sub tensión)	Proximidad de aislador a elemento externo (sub tensión)	Alta contaminación ambiental	Color del aislamiento oscurecido	Material depositado en aislamiento	Aislador cubierto por sustancias extrañas
600024	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
600034	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
600044	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
600055	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
600063	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
600071	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
600085	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
600095	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
607385	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Termografía

Durante el desarrollo de las actividades del ensayo de inspección visual fue posible observar que, ningún elemento evaluado indicaba alguna alerta sobre el riesgo de operación. En la mayoría de los elementos analizados también se encontró que estaban operando de forma normal, es decir que la cámara termográfica indicaba una lectura de operación entre 24 °C y 27 °C considerando que la temperatura ambiente era de 25 °C. Sin embargo, cuando se realizó el ensayo de termografía en la estructura 600085 se halló que la temperatura en el herraje de conexión pernada estaba en un rango fuera de lo normal, siendo este superior, hallando lo que se conoce como punto caliente.

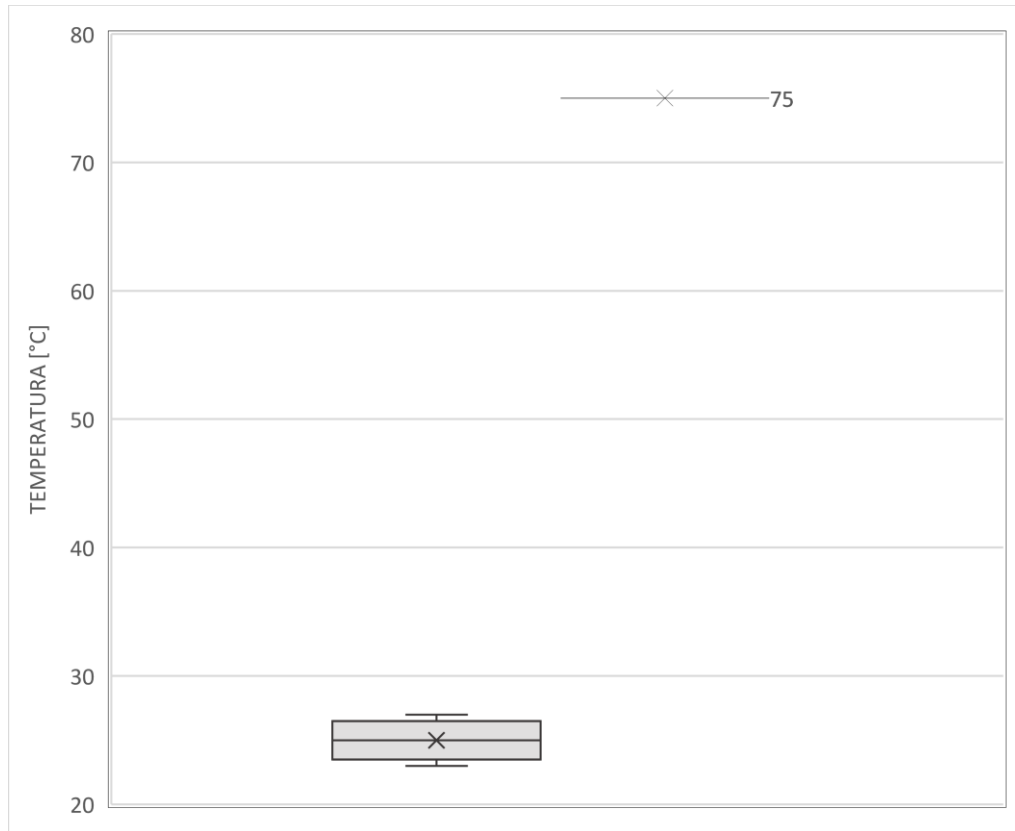
Tabla XII. **Lecturas de termografía**

ESTRUCTURA	FASES DE LADO A [°C]			FASES DE SOPORTE [°C]			FASES DE LADO B [°C]			HERRAJES [°C]	CONEXIONES [°C]
	Aa	Ba	Ca	As	Bs	Cs	Ab	Bb	Cb		
600024				24	27	26				24	26
600034	25	26	25				27	24	26	23	26
600044				26	25	23				24	24
600055				23	26	27				24	24
600063				25	27	27				26	27
600071				24	23	27				26	24
600085	26	25	25				25	24	25	26	75
600095				27	25	25				25	25
607385	23	26	25				24	26	27	24	24

Fuente: elaboración propia.

En la tabla mostrada anteriormente se puede observar las lecturas tomadas en sitio durante el ensayo de termografía. Como se explicó anteriormente, dentro del universo de datos evaluados se encuentran estructuras que cuentan con dos juegos de aisladores y otras que solo cuentan con un juego de aisladores. Ya que se definió un lado 'A' y otro 'B', también se definió, para las estructuras de un solo juego de aisladores, un lado de soporte.

Figura 25. **Diagrama cajas y bigotes de temperaturas**



Fuente: elaboración propia.

Los valores representados en la figura 25, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla XIII. **Valores estadísticos de temperaturas**

Cuartiles	Temperatura [°C]
Extremo inferior	23
Cuartil 1	24
Mediana	25
Cuartil 3	26
Extremo superior	27

Fuente: elaboración propia.

El valor de temperatura fuera del valor normal de operación se encontró en la estructura denominada como 600085, una de las estructuras seleccionadas en base a su criticidad. Como es posible observar en la figura 26 dicha estructura cuenta con un dispositivo de maniobras instalado, siendo justamente ese el propósito de haberla seleccionado.

Figura 26. **Fotografía de estructura 600085**

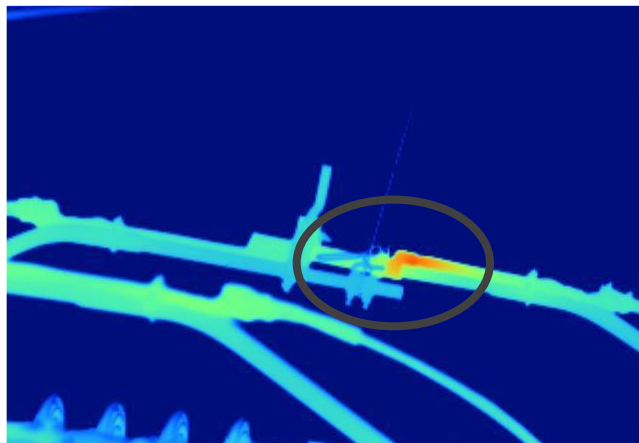


Fuente: [Fotografía de Luis Jimenez]. (Calzada Roosevelt. 2019). Colección particular.
Guatemala.

En la siguiente figura se muestra la captura tomada por la cámara termográfica donde se encontró el aumento de temperatura. Según el rango de

colores y valores de temperatura del fabricante de la herramienta, la conexión pernada estaba operando a aproximadamente 75 °C, un valor totalmente fuera de rango normal de operación, como también se confirma en la gráfica de cajas y bigotes de la figura 25.

Figura 27. **Punto caliente en conexión pernada**



Fuente: [Fotografía de Luis Jimenez]. (Calzada Roosevelt. 2019). Colección particular. Guatemala.

3.2.3. **Ultrasonido propagado en aire**

Seguidamente de realizar el ensayo de termografía se procede a realizar el ensayo de ultrasonido en cada uno de los elementos dentro del universo de datos que es objeto del estudio para esta investigación. Al igual que en los dos anteriores ensayos, se realizó un apartado dentro de la ficha de recolección de datos ubicada en el anexo 4 donde, a modo de evaluación rápida en sitio, se chequean características de las señales ultrasónicas detectadas. Durante este ensayo se utiliza el sensor tipo parabólico ya que es el recomendado cuando se realizan ensayos a grandes distancias sin perder la fidelidad del equipo.

La mayoría de los resultados del ultrasonido fueron positivos, es decir que, estos se encontraban en un rango aceptable de operación. Sin embargo, al igual que durante el ensayo de termografía, se halló que en la estructura 600085 existía una anomalía.

Figura 28. **Ruido en aislamiento**



Fuente: [Fotografía de Luis Jimenez]. (Calzada Roosevelt. 2019). Colección particular.
Guatemala.

Es posible percibir un zumbido que se describe como aleatorio e intensidad cambiante, siendo esto un indicador que se tiene un pequeño arco eléctrico. Esto hace que la información brindada por el ensayo termográfico se vea

complementada por el del ultrasonido. A continuación, se presenta la tabla de los valores obtenidos a lo largo del ensayo.

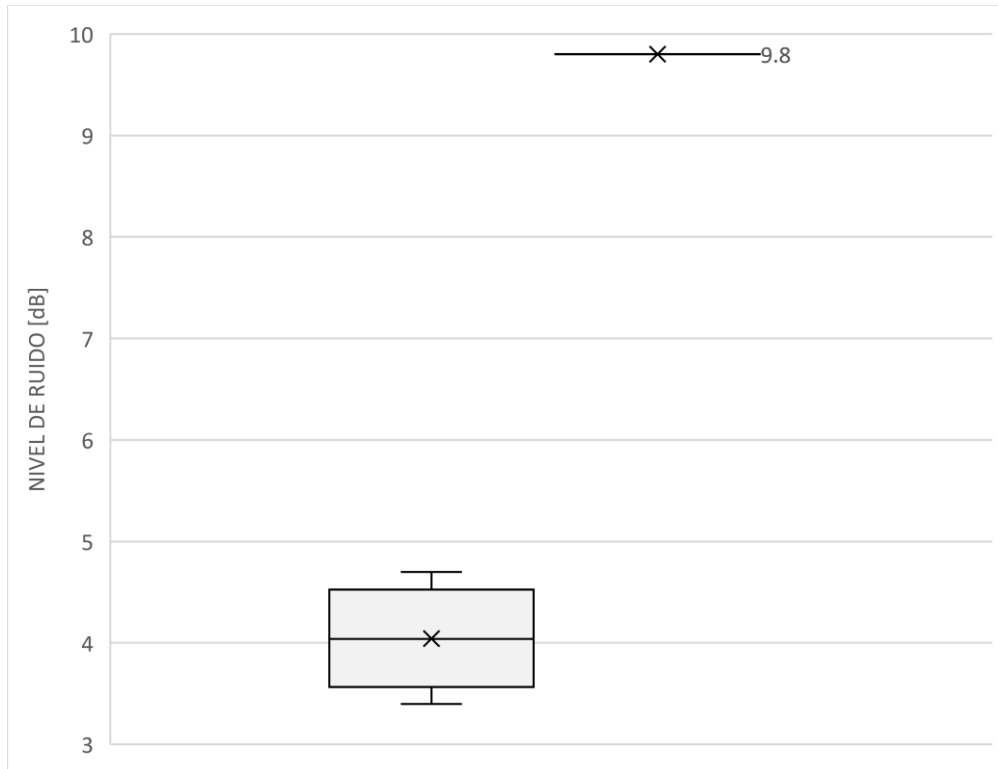
Tabla XIV. Lecturas de ultrasonido

ESTRUCTURA	FASES DE LADO A [dB]			FASES DE SOPORTE [dB]			FASES DE LADO B [dB]			HERRAJES [dB]	CONEXIONES [dB]
	Aa	Ba	Ca	As	Bs	Cs	Ab	Bb	Cb		
600024				4.2	4.6	4.2				3.7	4.0
600034	3.8	3.7	4.0				4.5	4.4	3.9	4.6	4.2
600044				4.2	4.4	3.8				4.1	3.9
600055				4.0	3.5	4.7				3.8	3.7
600063				3.8	3.6	4.7				3.9	3.6
600071				4.4	3.4	3.6				4.5	4.2
600085	4.4	4.5	4.6				4.5	4.1	4.7	3.4	9.8
600095				3.9	4.2	3.9				4.2	3.7
607385	3.5	4.1	3.5				4.3	4.2	3.4	3.4	3.8

Fuente: elaboración propia.

De los valores obtenidos es posible realizar un gráfico que ayude a entender de forma más práctica el comportamiento típico de operación de la instalación a la cual se aplicaron los ensayos.

Figura 29. Diagrama de cajas y bigotes de nivel de sonido



Fuente: elaboración propia.

Los valores mostrados en la gráfica anterior son los siguientes.

Tabla XV. Valores estadísticos de nivel de ruido

Cuartiles	Nivel de ruido [dB]
Extremo inferior	3.40
Cuartil 1	3.73
Mediana	4.04
Cuartil 3	4.35
Extremo superior	4.70

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A lo largo del desarrollo del capítulo anterior se muestran una serie de parámetros que al aplicárseles algunas de las herramientas estadísticas más conocidas, se muestra información relevante. Esto, se realizará en forma de etapas conforme se desarrolló la investigación.

4.1. Historial de fallas

Cuando se realizó el análisis de los registros de las fallas ocurridas durante el periodo de los años 2017 al 2019, se hace evidente que existe una serie de condiciones que merecen la pena considerarse:

- No se cuenta con un criterio unificado que estandarice la forma de registro de las eventualidades.
- Al haber varias personas que puedan tener acceso a realizar un registro, se da la apertura de que estos cambien en base al criterio personal de cada uno de ellos.
- Al momento de realizar la investigación y definir los límites y alcances del trabajo, no se cuenta con los datos del último trimestre del año 2019, por lo que se hace evidente una brecha entre los otros dos años evaluados.

Se hace evidente que es necesario normalizar y estandarizar la forma en la que se registran las fallas, añadiendo conceptos como modo de falla y causa de falla al formato de registro de eventos. Esta práctica facilitará en sobremanera

cualquier tipo de análisis para la empresa dueña de las instalaciones ya que permite identificar de manera exacta y precisa la causa raíz del problema y atacarlo.

4.2. Ensayos no destructivos

Al haber evaluado los distintos tipos de ensayos no destructivos y definir cuáles serían los utilizados debido a la disponibilidad del mercado nacional, se definieron la inspección visual, termografía infrarroja y ultrasonido propagado en aire. Esto debido a que las mediciones debían de realizarse de forma en la que el elemento examinado se encontrara en operación.

4.2.1. Inspección visual

Este tipo de ensayo es el más práctico de todos ya que no requiere de equipo sofisticado o difícil de hallar. Sin embargo, por esta misma razón no es posible obtener de él resultados tan determinantes como con otro tipo de ensayos no destructivos que sean más específicos para esta aplicación.

La técnica de inspección visual es más adecuada para llevar el registro del desarrollo del elemento a evaluar a lo largo de su operación, que para identificar alguna falla en etapas más desarrolladas y actuar antes de alguna eventualidad. Debido a que para detectar la falla por medio de este ensayo en etapas más desarrolladas es necesario que la madurez de la falla se tal que ya comience a notarse cambios físicos en el aislador, generalmente cuando esto ocurre la instalación ya ha salido de operación y no permite la planificación del mantenimiento.

Las líneas de transmisión dentro del área metropolitana es un tipo de infraestructura que generalmente se instala sobre la vía pública. En este sector del país es importante considerar que el tránsito es generalmente denso y dado que las vías, carreteras y caminos son también generalmente estrechos, aplicar este tipo de ensayo no destructivo es complicado desde el punto de movilización para hallar la mejor posición para contar con el mejor detalle disponible.

Al estar los aisladores a alturas que superan los 8 metros, se hace necesario alejarse lo suficiente para tener un mejor ángulo de visión. Esto a su vez representa una pérdida de percepción del detalle del elemento evaluado, y se requiere la utilización de equipo adicional como cámaras con un lente que pueda acercarse y mostrar un adecuado detalle del aislador, utilización de binoculares o considerar el uso de drones para este tipo de ensayo.

4.2.2. Termografía

Debido a que la empresa dueña de las instalaciones ya cuenta con el equipo de termografía infrarroja, se facilita incluir esta práctica a un plan de mantenimiento predictivo específico para conservar de mejor manera los aisladores de las líneas de transmisión.

Es importante considerar que al igual que lo mencionado en el ensayo de inspección visual, el espacio sobre las vías públicas podría llegar a complicar la ejecución del ensayo. Es importante tener en cuenta que durante la selección de las estructuras a intervenir durante estos ensayos se realice en lugares donde pueda tenerse un mayor rango de movilidad en donde se minimice el riesgo de los técnicos que ejecutarán los ensayos.

Se hace evidente que incluir estructuras que sean consideradas como críticas, es de vital importancia durante la planeación de la aplicación de este ensayo. Las estructuras críticas serán consideradas como aquellas que cuentan con algún elemento o dispositivo de seccionamiento, estructuras en derivaciones, estructuras que se encuentren instaladas en tramos con mayores índices de densidad de tránsito, estructuras cercanas a empresas que liberen una cantidad considerable de desechos al medio ambiente, se encuentren instaladas en vanos superiores a 300 metros o que se encuentren instalados en áreas con de registros altos de ocurrencia de tormentas eléctricas.

4.2.3. Ultrasonido

Este tipo de ensayo al ser complementario a la termografía, se toman consideración muy parecidas al antes mencionado. Sin embargo, la aplicación de este ensayo es más puntual y precisa, por lo que no pierde fidelidad en un rango de distancia en la que generalmente se tiene disponible para estudiar una estructura en vía pública.

Al momento de realizar la aplicación de los distintos tipos de ensayos no destructivos sobre la misma estructura, se hizo de forma secuencial. El tiempo consumido durante la práctica puede reducirse drásticamente si se hace de forma paralela o si cada equipo actúa de forma independiente.

También es evidente poder hacer la anotación de que tomando en consideración que las muestras deberán de seleccionarse de forma combinada, una de forma definida por su criticidad y otra de forma aleatoria, las muestras seleccionadas aleatoriamente pueden tener la peculiaridad de no ser las mismas en los ensayos de termografía y ultrasonido, esto con motivo de abarcar una mayor cantidad de elementos de muestreo. Si alguna medición sale del rango

normal de operación, siempre puede ser confirmado por su ensayo complementario con fin de identificar la causa raíz del problema.

4.3. Modelo de mantenimiento predictivo para aisladores de polímero en líneas de transmisión

Para definir un modelo predictivo, primero es necesario conocer cuáles son las causas de falla y modos de falla del equipo al que se le desea realizar un plan de mantenimiento. A lo largo de la investigación se definió cada uno de estos conceptos, mostrándose en la tabla VIII. Criticidad de fallas en el aislamiento'. Tomando como base esta información, se procede a realizar el modelo de mantenimiento predictivo enfocado a los aisladores de las líneas de transmisión, basándose en la información recolectada por el análisis de criticidad y los resultados de los ensayos no destructivos aplicados.

4.3.1. Periodicidad de aplicación

Se toma un tiempo de evaluación de base trimestral para realizar los ensayos no destructivos en los aisladores, siendo el más recurrente la inspección visual realizándose esta evaluación cada trimestre y los ensayos de ultrasonido y termografía se propone su realización cada dos trimestres. Para la toma de muestras de forma representativa se propone al menos la inclusión del 20 % del total de estructuras de la instalación sin contabilizar las estructuras seleccionadas por criticidad definidas en la sección 4.2.2.

Tabla XVI. **Cronograma de mantenimiento**

Modo de falla	Causa de falla	Ensayo no destructivo	Periodicidad de aplicación
Reducción de distancia de fuga	Contaminación	Inspección visual	Trimestral
	Degradación en material polimérico	Ultrasonido propagado en aire	Semestral
	Desperfecto de fábrica	Termografía infrarroja	Semestral
	Objetos externos	Inspección visual	Trimestral
Flameo	Contaminación	Inspección visual / Ultrasonido propagado en aire	Semestral
	Degradación en material polimérico	Ultrasonido propagado en aire	Semestral
	Desperfecto de fábrica	Termografía infrarroja	Semestral
	Objetos externos	Inspección visual	Trimestral
Daño físico	Descarga electroatmosférica	Inspección visual	Semestral
	Objetos externos	Inspección visual	Trimestral
	Vandalismo	Inspección visual	Semestral
	Desperfecto de fábrica	Ultrasonido propagado en aire / Termografía infrarroja	Semestral
	Plagas o animales	Inspección visual	Semestral
	Degradación en material polimérico	Termografía infrarroja	Trimestral

Fuente: elaboración propia.

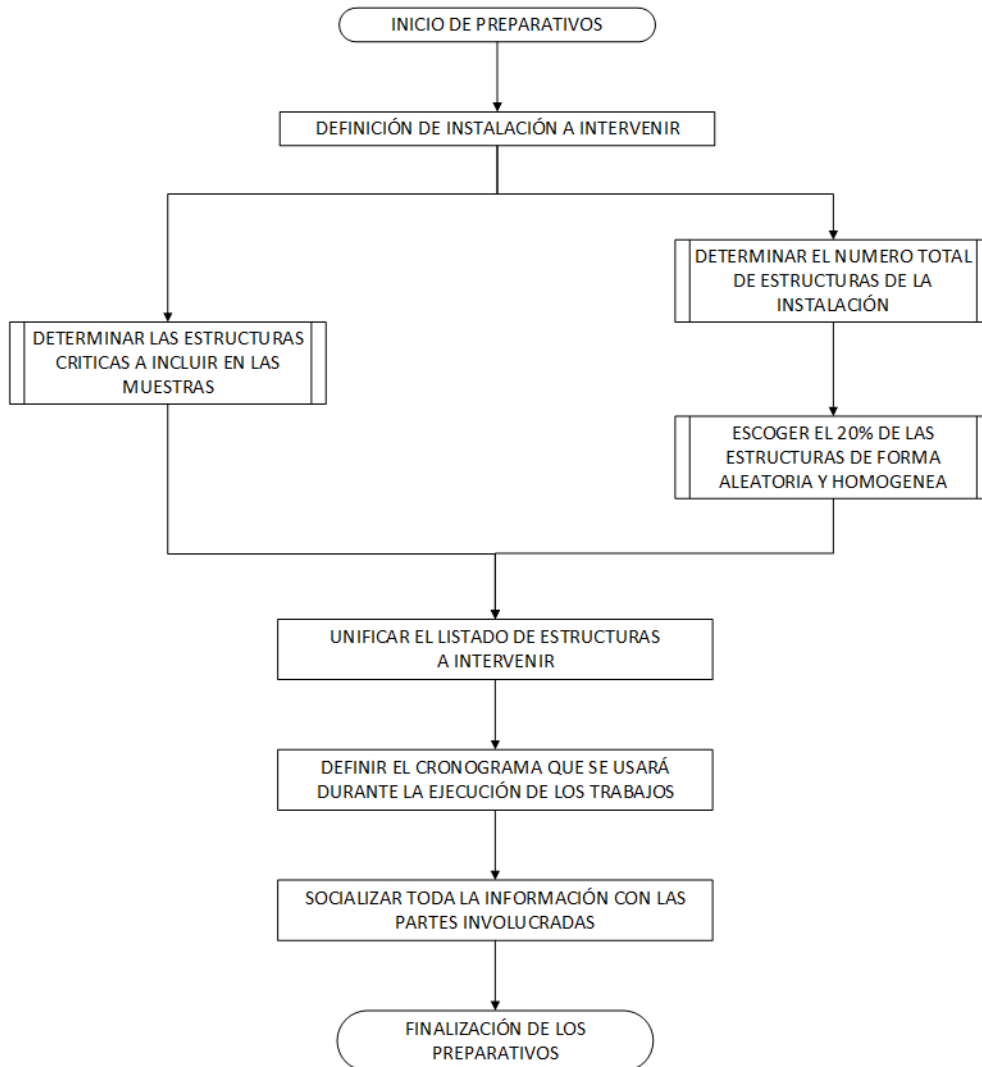
4.3.2. Secuencia de aplicación

Para desarrollar cada una de las tareas se realizaron dos distintos diagramas, uno para la preparación de las tareas y otro que contempla propiamente la aplicación en las tareas de los ensayos no destructivos, que son los mecanismos planteados en este trabajo para elaborar el modelo del mantenimiento predictivo. En esta secuencia de pasos puede notarse como cada uno de los ensayos no destructivos a aplicar, se entrelazan uno con otro y de esta forma se hacen complementarios, apalancando así el objetivo de robustecer un plan de mantenimiento predictivo en aisladores de polímero.

Para la parte de las tareas y decisiones de preparación, se contemplan varias etapas que el programador o encargado de mantenimiento deberá de tomar y realizar. Se propone la inclusión de al menos el 20 % del número total de la estructura a intervenir de forma particular en cada una de las instalaciones de líneas de transmisión, para contabilizar como una muestra de la población. Esta cantidad será adicional al número de estructuras seleccionadas con base en su criticidad, misma que se define en la sección 4.2.2.

Posteriormente se deberá definir un cronograma de actividades tomando en cuenta la disponibilidad de las partes involucradas, tiempos de traslado entre cada una de las estructuras, cantidad de estructuras analizadas por día y plazos máximos para completar cada una de estas tareas.

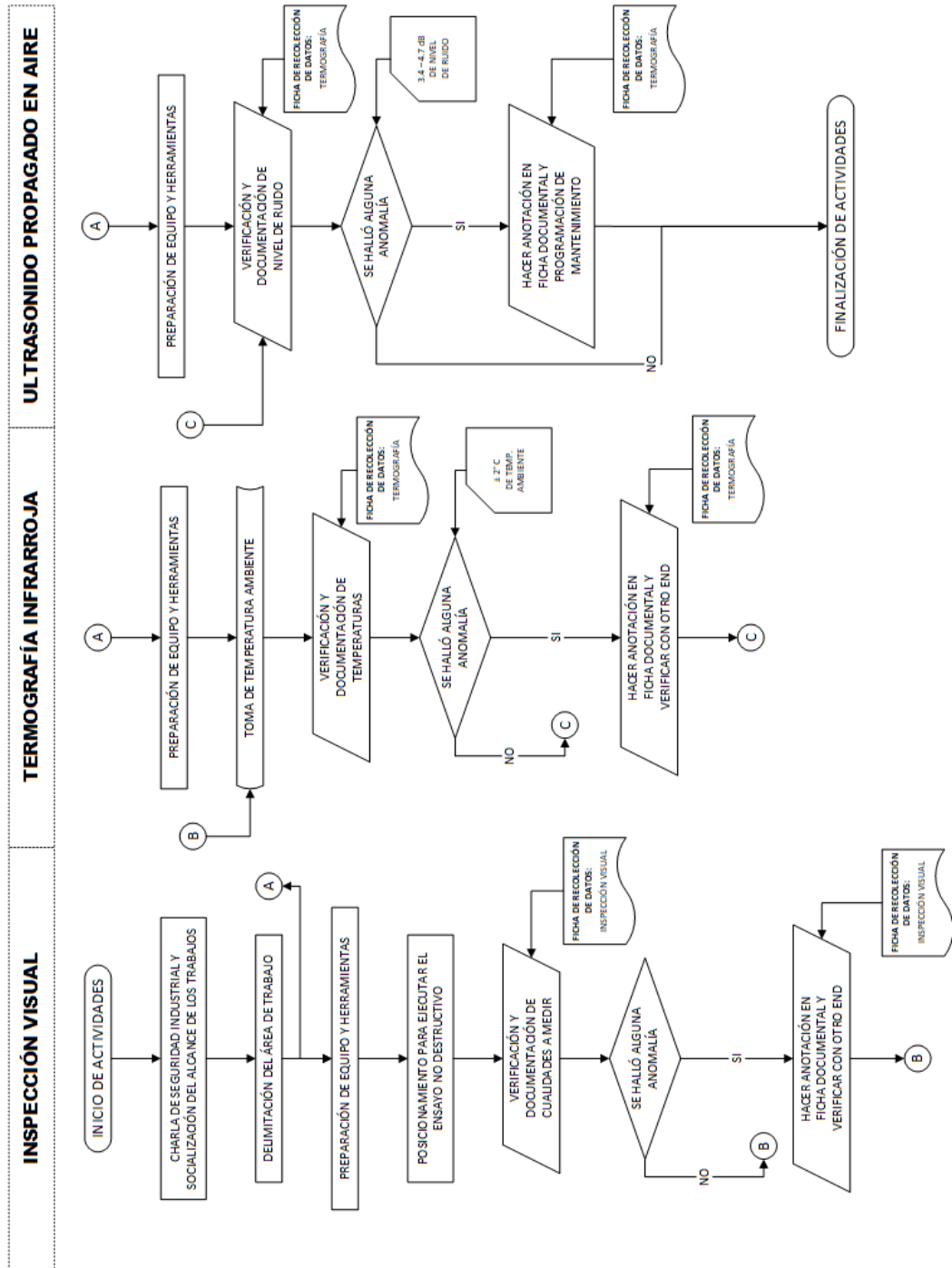
Figura 30. Diagrama de preparación de tareas



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

Entrando en materia propiamente de la ejecución de los trabajos, se plantean una serie de pasos que pretenden simplificar el proceso de medición y aplicación del mantenimiento predictivo. En este diagrama de flujo se definen las tareas, decisiones y que hacer en cualquier caso que pueda surgir durante el desarrollo de las actividades.

Figura 31. Diagrama de aplicación de END



Fuente: elaboración propia.

4.4. Notificación para incorrecta operación de aisladores de polímero

En paralelo al desarrollo de la investigación también se realizó una infografía que tiene como objetivo informar, orientar y hacer conciencia a la sociedad, involucrándola en el aviso de fallas de los aisladores de polímero de las líneas de transmisión entre 69 y 138 kV. Este hace como de conocimiento al público por medio de llaveros que se entregan con un código QR que al escanearlo lleva al sitio donde está ubicada la información.

Figura 32. Código QR de enlace a infografía



Fuente: elaboración propia, utilizando QRCode Monkey.

En la infografía se colocan elementos relacionados a la prevención de accidentes, información de cómo realizar la notificación, los canales por utilizar y la importancia de realizar el aviso. Esta se hace mediante el uso de una plataforma en línea llamada Canva, que se utiliza para el diseño gráfico de elementos de *marketing*.

Figura 33. Infografía para la notificación de averías



**ALERTA DE
AVERÍAS**

Si detectas alguna mala operación en los aisladores, por favor toma en cuenta lo siguientes y notifícalo.



**2277
7000**

1 VERIFICA QUE NO HAYAN MAS PERSONAS CERCA DEL LUGAR.

Recuerda que si ocurriera algún percance podría dañar a las personas que estén cerca.

2 OBSERVA QUE ESTA PASANDO.

Un mal funcionamiento es todo aquello que se encuentra fuera de los parámetros normales de operación, como ruido, olor, destellos, color.

3 COMUNICALE DEL PROBLEMA A LAS AUTORIDADES.

Asegurate de compartir con las autoridades, la ubicación y el numero de estructura ubicada en un fondo amarillo, este es un conjunto de 6 digitos en color negro.

4 ¡LISTO!

Al seguir estos pasos ayudaste a mantener estable al sistema y la continuidad del servicio para los vecinos.



Fuente: elaboración propia, utilizando Canva.

4.5. Análisis del trabajo

En esta sección se definirá cual es el nivel de validez del trabajo y la diferencia entre otras metodologías utilizadas por otros investigadores. También se tendrá en cuenta la forma de analizar y seleccionar la muestra poblacional que fue motivo de análisis durante el desarrollo del presente documento.

4.5.1. Análisis interno

La línea de transmisión analizada durante el desarrollo de este trabajo cuenta con un total de 63 estructuras, en la que se seleccionaron tres debido a su criticidad y 6 de forma aleatoria. Inicialmente se plantea la intervención del 10 por ciento de la población de la instalación seleccionada; sin embargo, a partir del análisis de los resultados se propone el aumento a un 20 % de la población para considerar una muestra poblacional que sea más representativa.

La porción de estructuras seleccionadas en base a su criticidad se realiza debido a que por los elementos móviles que se encuentran instalados en ellas, hacen de estos puntos incrementar su probabilidad de ocurrencia de falla. Esta medida resta validez interna al trabajo; sin embargo, es conveniente mencionar que debido a esta decisión fue posible hallar un punto de falla que podría haber hecho que la instalación completa y con posibilidad de que instalaciones aledañas pudieran haber salido de servicio y dado que esta instalación se encuentra en una localización comprometida, la indisponibilidad de esta podría haber sido catastrófica.

Por otro lado, se tiene la parte de estructuras que fueron seleccionadas de forma aleatoria. Este 10 % de estructuras seleccionadas aumentan la validez interna del trabajo ya que esta cantidad si puede representar una muestra

poblacional de la instalación completa. Las mediciones tomadas en estas estructuras definieron cuales serían los límites y valores de la media en la que la temperatura, nivel de ruido y cualidades que pueden ser apreciadas visualmente es en que los que los aisladores deben de operar en condiciones normales.

Debido a los anteriores enunciados, es posible afirmar que el trabajo si posee la suficiente validez interna para ser considerado como referencia para futuras investigaciones que puedan requerir metodologías similares o valores normales de operación de los aisladores de polímero utilizados en líneas de transmisión que operen entre 69 y 138 kV en áreas metropolitanas.

4.5.2. Análisis externo

La utilización de metodologías en mantenimiento predictivo mencionadas en el trabajo de Santana y Moreno (2004) señalan la adición de ensayos no destructivos tales como la inspección visual, termografía infrarroja, ultrasonido propagado en aire y medición de campo eléctrico. Durante la ejecución de este trabajo se tomó en cuenta la aplicación de estos ensayos a excepción de la medición del campo eléctrico, mismo que se desestimó debido a la indisponibilidad del recurso en el país. Como resultado, se obtuvo un plan de mantenimiento en el que se contempla cada una de estas técnicas del mantenimiento predictivo.

Orellana (2019) en su trabajo menciona la importancia de que previamente a realizar el plan de mantenimiento predictivo es imperioso realizar un análisis generado a partir de los resultados de los ensayos no destructivos a incluir en el mismo. Este aporte fue tomado en cuenta y aplicado en el trabajo, ya que es justamente a partir de los resultados de los ensayos no destructivos que se toman

límites máximos y mínimos en las mediciones durante la operación normal de los aisladores de polímero.

El entorno de en el que ocurren las fallas y las condiciones en las que se encuentran, influyen de forma directa para conocer cuál es el motivo por el que sucede una eventualidad. Aranguren y Tarantino (2009) mencionan esta idea, mencionando que es de vital importancia tomar en cuenta estas cualidades para desarrollar de forma más efectiva un plan de mantenimiento, enfocándose en cada una de estas razones y atacándolas de forma particular. Esta metodología planteada fue tomada en cuenta durante la ejecución del trabajo.

La aportación de forma práctica que sugiere el trabajo de Gutiérrez, Mora y Perez (2009) con respecto a las consideraciones de los puntos a evaluar en el aislamiento de las líneas de transmisión es considerado y aplicado en el trabajo. Esto permitió un mejor análisis y priorización de los elementos críticos a tomar en cuenta durante el desarrollo del plan de mantenimiento predictivo, atacando estos puntos de interés con ensayos no destructivos, los cuales tienen la bondad de medir de forma cuantitativa los parámetros en condiciones normales de operación de estos elementos.

Fuentes (2019) en su trabajo de investigación hace referencia al uso de herramientas de ingeniería del mantenimiento tales como indicadores de operación, criticidad de equipos e historial de fallas como conceptos necesarios para sintetizar un adecuado plan de mantenimiento. A lo largo del desarrollo de este trabajo se tomó en cuenta estas ideas, siendo de vital importancia para la conclusión de este ya que al aplicarlas fue posible llegar a un modelo de mantenimiento que pretende minimizar la ocurrencia de fallas, haciendo más confiable la operación de las líneas de transmisión por medio del control del adecuado funcionamiento de los aisladores de polímero.

CONCLUSIONES

1. Las fallas más comunes en los aisladores de polímero de las líneas de transmisión que operan entre 69 y 138 kV a la fecha del desarrollo de la investigación contemplan modos de falla como daño físico, flameo y reducción de distancia de fuga.
2. Se elaboró una clasificación de las fallas en las que se definió que las causas de falla más críticas son debido al contacto o acercamiento de objetos externos, desperfectos de fábrica y descargas electroatmosféricas.
3. Fue posible determinar que la mejor combinación de técnicas del mantenimiento predictivo para garantizar una adecuada conservación de los aisladores de polímero es la aplicación de ensayos no destructivos complementarios como la inspección visual, termografía infrarroja y ultrasonido propagado en aire y atacando los síntomas específicos dependiendo de los resultados obtenidos por los END.
4. Se divulgó el procedimiento de notificación de averías por medio de afiches electrónicos. La población cercana a las líneas de transmisión pudo acceder a estos mediante un código QR que se encuentra en afiches repartidos y llaveros entregados en estas áreas.

RECOMENDACIONES

1. Para identificar de mejor manera las fallas más comunes que afectan al aislamiento en las líneas de transmisión es necesario que se incluyan conceptos estandarizados como modo de falla y causa de falla, eliminando así la interpretación personal de las personas que llevan estos controles. También se recomienda contar con datos de un rango de tiempo más amplio de las condiciones en las que ha estado operando históricamente las distintas instalaciones del sistema de transmisión.
2. Entre las causas de falla más críticas se halla la ocurrencia de descargas electroatmosféricas; sin embargo, no existe un ensayo no destructivo que pueda prever esta condición. Es importante que para futuras investigaciones se puedan contemplar métodos que minimicen los efectos del impacto de una descarga electroatmosférica, haciendo especialmente énfasis en áreas que sean más propensas a estas.
3. En cuanto a la inspección visual, la implementación del uso de técnicas más actuales y adecuadas para tener más detalle de las instalaciones, estas podrían ser mediante el uso de drones que cuenten con cámaras montadas para llegar y observar detalles que no pueden ser apreciados desde el suelo.
4. Tomar en consideración, para futuras investigaciones, la inclusión de la medición del nivel de conocimiento de al menos las personas que vivan cerca de donde se encuentran instaladas las líneas de transmisión con motivo de crear una adecuada relación entre proveedor y usuario.

REFERENCIAS

1. American National Standards Institute. (2012). *ANSI/NEMA C29.11-2012 Composite Insulators - Test Methods*. 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. Aranguren, S., y Tarantino, R. (2009). Metodologías y tecnologías de detección y diagnóstico de fallas aplicadas a procesos industriales. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(13), 106-116.
5. Boj, E. (2004). *Evaluación técnico económica del diseño de líneas de transmisión de 69 kV utilizando estructuras compactas*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>.
6. Bustillos, A., y Pérez, V. (2015). *Introducción a las líneas de transmisión de energía eléctrica*. [Mensaje en un blog].. Recuperado <http://www.sectorelectricidad.com>.

7. Cárdenas, M., y Garzon, M. (2012). Diagnóstico de redes de distribución aéreas de 11.4 hasta 34.5 kV con la técnica de ultrasonido. (O. C. LTDA, Ed.) *Revista Mundo Eléctrico*(88), 51-58. Recuperado de <http://www.mundoelectrico.com>.
8. COIDEA. (2017). *Aislador polimérico de alta tensión*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de www.coideasa.com.
9. 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). Escuela de Postgrados de la Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt>.
10. Cardona, J. (2019). *Diseño de integración del equipo utilizado para análisis y mantenimiento preventivo de redes eléctricas de alta y media tensión en Guatemala, para uso en vehículos aéreos no tripulados, y su estudio económico*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>.
11. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1999). *Normas técnicas de diseño y operación del servicio de transporte de energía eléctrica*. Guatemala: Autor. Recuperado de <http://www.cnee.gob.gt>.
12. Electricidad Aplicada. (2017). *Ventajas y desventajas del cobre vs aluminio en el cableado eléctrico*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.electricaplicada.com>.

13. Enríquez, G. (2000). *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*. Ciudad de México, México: Limusa. Recuperado de <https://www.worldcat.org>.
14. Errázuriz, A., y Rivera, J. (2013). *Energía: la electricidad en un Mundo que Avanza*. Santiago, Chile: Origo Ediciones. Recuperado de <http://biblioteca.olade.org>.
15. Fuentes, E. (2019). *Sistematización del modelo de mantenimiento de una planta de corte y doble, con enfoque a indicadores de disponibilidad con base a la herramienta mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC)*.(Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt>.
16. García, D. (2016). *Utilización de tecnología ultrasónica para el diseño de rutas de monitoreo por condición de sellado de sobre y blíster en planta de producción Bayer, S.A.* (Tesis de maestría). Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>.
17. Godoy, S. (2019). *Propuesta de una guía para la construcción electromecánica de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica de 69 kV con estructuras tipo monopolo en el sistema nacional interconectado (SNI)*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>.

18. Gómez, F. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Murcia, España: Universidad de Murcia. Recuperado de <https://www.um.es/web/biblioteca>.
19. González, F. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid, España: Artegraf, S.A. Recuperado de <http://www.amazon.com>.
20. Gonzales-Longatt, F. (2007). Capítulo 1: *Elementos de líneas de transmisión aéreas*. Caracas, Venezuela: Instituto Universitario Politécnico de las Fuerzas Armadas Nacionales. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
21. Gutiérrez, A., Mora J, y Pérez, S. (2009). Desarrollo de una estrategia de mantenimiento basada en RCM para líneas de transmisión de 115kV. *Scientia et technica*, 2(42), 11-16. doi:10.22517/23447214.2571
22. Hubbell. (2011). *Ohio Brass Catalog 24 - Quadri*Sil Insulators*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://hubbellcdn.com>.
23. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1997). *IEEE 1243-1997 - IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*. IEEE, PE/T&D - Transmission and Distribution. Piscataway: Autor. Recuperado de <https://standards.ieee.org>.
24. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2010). *IEEE 1410-2010 - IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*. IEEE, PE/T&D - Transmission and

Distribution. Piscataway: Autor. Recuperado de <https://standards.ieee.org>.

25. International Electrotechnical Commission. (1997). *IEC 61284:1997 Overhead lines - Requirements and tests for fittings*. IEC, 29.240.20 - *Power transmission and distribution lines*. Ginebra: Autor. Recuperado de <https://webstore.iec.ch>.
26. International Organization for Standardization. (2003). *ISO 13374-1:2003 Condition monitoring and diagnostics of machines - Data processing, communication and presentation — Part 1: General guidelines*. ISO, *Condition monitoring and diagnostics of machine systems*. Ginebra: Autor. Recuperado de <https://www.iso.org>.
27. Kapal Sharma, R.E.T. (2011). *Polymeric Insulators*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www.appstate.edu>.
28. López, I. (2005). *Estudio técnico-económico para la conversión de la línea de transmisión de El Progreso-Ipala-Quetzaltepeque de 69 kV a 138 kV*. (tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>.
29. Mosquera, G. (2001). *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*. Caracas, Venezuela: Instituto Superior de Investigación y Desarrollo. Recuperado de <https://www.academia.edu>.
30. Orellana, W. (2019). *Desarrollo de una estrategia de mantenimiento, basado en técnicas no destructivas y la Norma ISO 17359 para la línea de*

producción No. 1 de la planta de jabones de lavandería. (tesis de maestría) Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt>.

31. Peña, J. (2008). *Análisis de fallas en las líneas de transmisión del Grupo Empresarial ISA.* (Tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Recuperado de <https://biblioteca.utp.edu.co>.
32. Pérez, M. (2016). *Gestión de mantenimiento predictivo con ensayos no destructivos para seccionadores bajo carga en líneas de transmisión 69 kV de TRELEC.* (Tesis de maestría). Escuela de Postgrados de la Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>.
33. Salazar, P. (2016). *Diseño óptimo de apantallamiento de líneas de transmisión de alto voltaje y extra alto voltaje.* (Tesis de licenciatura). Escuela Politecnica Nacional, Ingeniería eléctrica y electrónica. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec>.
34. Sánchez, A. (2017). *Técnicas de mantenimiento predictivo: metodología de aplicación en las organizaciones.* (tesis de licenciatura) .Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogota, Colombia. Recuperado de <https://biblioteca.ucatolica.edu.co>.
35. Santana, W., y Moreno, H. (2004). *Experiencia en el uso de aisladores compuestos en las líneas de transmisión de interconexión eléctrica*

ISA (colombia) y red de energía del peru REP. Medellín: Interconexión Eléctrica S.A. Recuperado de <http://www.seeds.usp.br>.

36. Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (2007). *Manual de construcción de líneas de transmisión.* Guatemala: Autor.

37. Wadhwa, C. (2010). *High Voltage Engineering.* Delhi, India: New Age Publishers. Recuperado de <http://www.amazon.com>.

APÉNDICES

Apéndice 1. Extracto de registro de fallas 2017-2019

Elemento Fallado	Modo de falla	Causa de falla	Fecha	Duración de falla (horas)
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	05/02/2017	0.02
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	18/03/2017	0.05
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	20/03/2017	0.14
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	19/04/2017	0.04
Aislador	Flameo	Contaminación	20/04/2017	0.04
Aislador	Flameo	Contaminación	20/04/2017	0.38
Aislador	Flameo	Contaminación	24/04/2017	6.28
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	01/02/2018	0.07
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	27/03/2018	0.02
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	01/04/2018	0.02
Aislador	Flameo	Contaminación	07/04/2018	0.04
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	26/04/2018	0.01
Aislador	Reducción de distancia de fuga	Contaminación	04/05/2018	0.01
Aislador	Daño físico	Descarga electroatmosférica	13/09/2018	0.11
Aislador	Daño físico	Descarga electroatmosférica	06/06/2019	9.57
Aislador	Daño físico	Descarga electroatmosférica	06/06/2019	9.61
Aislador	Daño físico	Descarga electroatmosférica	24/07/2019	0.03
Aislador	Daño físico	Descarga electroatmosférica	25/07/2019	0.03
Aislador	Daño físico	Descarga electroatmosférica	25/07/2019	0.03
Aislador	Daño físico	Descarga electroatmosférica	25/07/2019	0.01
Aislador	Daño físico	Descarga electroatmosférica	25/07/2019	9.37

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Ficha de visita de reconocimiento

FICHA DE VISITA DE RECONOCIMIENTO						
01 de febrero de 2019		INICIO	9:00 horas	FINALIZACION	09:30 horas	
PARTICIPANTES						
INVESTIGADOR:	Luis Daniel Jimenez Ramírez					
ACOMPAÑANTES:	-					
	-					
	-					
UBICACIÓN DEL ENSAYO						
NOMBRE DE LA INSTALACIÓN	Linea Centro-Guatemala 6					
NIVEL DE TENSION DE OPERACIÓN	69 kV					
ESTRUCTURA DE ESTUDIO	600085					
ESTRUCTURA ANTERIOR	600084					
ESTRUCTURA POSTERIOR	600086					
CONDICION SOCIAL			CONDICION TECNICA			
¿Se encuentra en una zona habitacional?	SI	ND	¿En que condición se observa la instalación?	MALA	REGULAR	BUENA
¿Se encuentra a orilla de calle?	SI	ND	¿Porque?			
¿Se encuentra en una zona invadida?	SI	ND	¿Se evidencia presencia de suciedad en el aislamiento?	SI		ND
¿Es accesible hasta el pie de la estructura?	SI	ND	¿Cómo catalogaría la suciedad presente?	LEVE	REGULAR	MUCHA
CONDICION AMBIENTAL			¿Se observa una buena sujecion del aislador a la estructura de	SI		ND
¿Se encuentra en una zona industrial?	SI	ND	¿Se escucha algun zumbido o sonido extraño?	SI		ND
¿Se encuentra en una arteria principal vial?	SI	ND	¿Se observa alguna anomalia en la operación normal?	SI		ND
¿Cómo calificaría el trafico en el area?	LIGERO	REGULAR	PESADO	¿Qué observa?		
¿Se evidencia presencia de humo/vapores?	SI	ND	OBSERVACIONES GENERALES			
¿Se evidencia presencia de elementos quimicos?	SI	ND	Se observa que la estructura se encuentra en buenas condiciones; a simple vista es posible decir que no existe factor que haga pensar que pueda poner en peligro la operación de la instalación.			
¿Es un area con mucha vegetacion?	SI	ND				
¿Es un area propensa a anidamiento de aves?	SI	ND				
¿Se observan nidos de aves en la instalación?	SI	ND				
¿Es un area propensa a anidamiento de plagas?	SI	ND				
¿Se observan nidos de plagas en la instalación?	SI	ND				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Permiso de trabajo

PERMISO DE TRABAJO

FECHA: 04 de abril de 2019

PARTICIPANTES

SUPERVISOR: Luis Daniel Jimenez Ramírez

SEGURIDAD INDUSTRIAL: Martín Elena López

COLABORADORES:

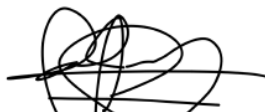
NOMBRE(S)	TAREA(S)
Fernando Hernández	Ensayo termográfico
Carlos Pérez	Ensayo ultrasonido propagado en aire

ANÁLISIS DE TRABAJO SEGURO

EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL	SI	NO	DELIMITACION DE AREA DE TRABAJO	SI	NO
Guantes	SI	NO	Conos	SI	NO
Casco	SI	NO	Cintas de advertencia	SI	NO
Botas	SI	NO	Banderines	SI	NO
Reflectivo	SI	NO	Barras para conos	SI	NO
Gafas	SI	NO	USO DE CAMIÓN CANASTA	SI	NO
TRABAJO EN ALTURAS	SI	NO	Aterrizamiento	SI	NO
Arnes	SI	NO	Canasta aislante	SI	NO
Escalera	SI	NO	Fugas	SI	NO
Línea de vida	SI	NO	Pruebas de operación	SI	NO
Bandola	SI	NO	HERRAMIENTA A UTILIZAR	SI	NO
Tie-off	SI	NO	Herramienta manual	SI	NO
TRABAJO CON TENSION	SI	NO	Herramienta eléctrica	SI	NO
Protección plástica	SI	NO	Herramienta hidráulica	SI	NO
Guantes dieléctricos	SI	NO	Herramienta especial	SI	NO
Mangas dieléctricas	SI	NO	1. Equipo de ultrasonido		
Mantas protectoras	SI	NO	2. Equipo termográfico		

FINALIZACIÓN DE TRABAJOS

Retiro de equipo(s)	SI	NO
Retiro de herramienta(s)	SI	NO
Retiro de material(es)	SI	NO
Limpieza general	SI	NO




Firma del supervisor

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Recolección de datos de visita

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
04 de abril de 2019		INICIO	9:00 horas
PARTICIPANTES			
INVESTIGADOR:	Luis Daniel Jimenez Ramirez		
ACOMPAÑANTES:	Fernando Hernández		
	Carlos Pérez		
	Marlin López		
UBICACIÓN DEL ENSAYO			
NOMBRE DE LA INSTALACIÓN	Linea Centro-Guatemala 6		
TENSION DE OPERACIÓN	69 kV		
ESTRUCTURA DE ESTUDIO	600085		
ESTRUCTURA ANTERIOR	600084		
ESTRUCTURA POSTERIOR	600086		

INSPECCIÓN VISUAL			TERMOGRAFÍA					
Integridad física	Campanas rotas	SI	NO	Aisladores	Fases / Lado	A	S	B
	Campanas dobladas	SI	NO		Fase A	26°C	-	25°C
	Picaduras en el material	SI	NO		Fase B	25°C	-	24°C
	Integridad del estado del núcleo	SI	NO		Fase C	25°C	-	25°C
Sujeción	Presencia de corrosión u oxidación en herrajes	SI	NO	Conjunto de elementos		Valor Máximo registrado		
	Incorreción en instalación de herrajes	SI	NO	Temperatura de herrajes de sujeción		26°C		
	Degradación en herrajes	SI	NO	Temperatura de conectores		75°C		
Tensión mecánica	Estructura de soporte en buenas condiciones	SI	NO	Observaciones				
	Linea sub tensionada (comparada con otras fases)	SI	NO	Se encuentra una conexión pernada operando en temperatura fuera de los parámetros normales. La medida tomada con la cámara termográfica es de 75°C				
	Linea sobre tensionada (comparada con otras fases)	SI	NO					
	Herrajes cediendo (sobre tensión)	SI	NO					
	Proximidad de aislador a conductor (sub tensión)	SI	NO					
Limpieza	Proximidad aislador a elemento externo (sub tensión)	SI	NO	ULTRASONIDO				
	Alta contaminación ambiental	SI	NO	Aisladores	Fases / Lado	A	S	B
	Color del aislamiento oscurecido	SI	NO		Fase A	4.4	-	4.5
Material depositado en aislamiento	SI	NO	Fase B		dB	-	dB	
Aislador cubierto por sustancias extrañas	SI	NO	Fase C	4.5	-	4.1	dB	
Observaciones				Conjunto de elementos		Valor Máximo registrado		
				Temperatura de herrajes de sujeción		3.4		
				Temperatura de conectores		dB		
				Temperatura de conectores		9.8		
						dB		
				Tipo de señal detectada				
				Zumbido que no varia en el tiempo				
				Zumbido que fluctuante				
				Zumbido aleatorio, cambio de intensidad				
				Observaciones				
				Se escucha un zumbido aleatorio con cambio de intensidad en una de las conexiones pernadas.				



Firma de encargado de trabajos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Ponderación de frecuencia de ocurrencia de fallas**

Nivel	Concepto	Abreviación	Puntos
Alta	más de 3 eventos por año	A	4
Media	2 - 3 eventos por año	M	3
Baja	1 - 2 eventos por año	B	2
Excelente	menos de 1 evento por año	E	1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Ponderación de consecuencia de ocurrencia de fallas**

Consideraciones	Niveles	Abreviación	Puntos
Impacto operacional	Indisponibilidad total	T	10
	Indisponibilidad parcial	M	5
	Indisponibilidad nula	N	1
Flexibilidad operacional	No existe respaldo	SR	4
	Respaldo comprometido	RC	2
	Existe respaldo	R	1
Costo del mantenimiento	Mas de 30,000 quetzales	MA	20
	30,000 - 10,000 quetzales	A	10
	10,000 - 5,000 quetzales	M	5
	Menos de 5,000 quetzales	B	1
Impacto de seguridad y medio ambiente	Afecta la seguridad humana	H	30
	Afecta el medio ambiente	MA	20
	Afecta las instalaciones	I	10
	No provoca daño	N	0

Fuente: elaboración propia.

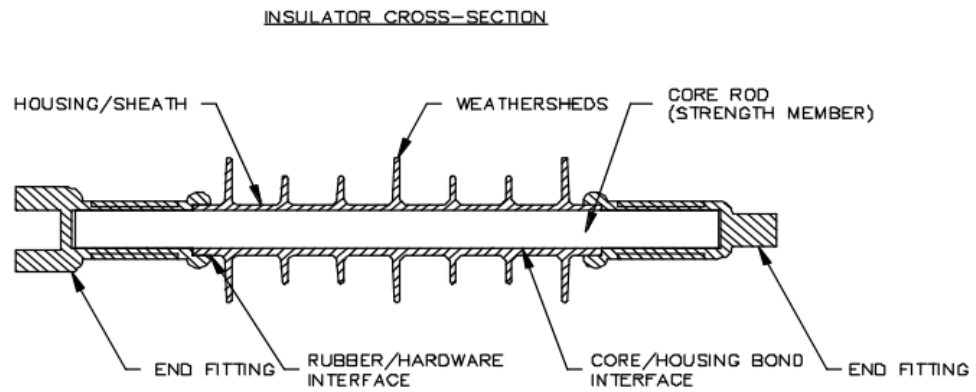
Apéndice 7. Criticidad, frecuencia por consecuencia

Causa de falla	Frecuencia		Consecuencia							Total	Criticidad	
			Impacto operacional	Flexibilidad operacional	Costo de manten.	Seguridad y medio ambiente						
Contaminación	B	2	M	5	RC	2	B	1	N	0	11	No Crítico
Degradación en material polimérico	B	2	N	1	R	1	B	1	N	0	2	No Crítico
Desperfección de fábrica	E	1	M	5	SR	4	B	1	N	0	21	No Crítico
Objetos externos	M	3	T	10	SR	4	B	1	N	0	41	Crítico
Contaminación	M	3	M	5	RC	2	B	1	MA	$\frac{2}{0}$	31	Semi-crítico
Degradación en material polimérico	B	2	N	1	SR	4	B	1	MA	$\frac{2}{0}$	25	No Crítico
Desperfección de fábrica	E	1	M	5	SR	4	B	1	MA	$\frac{2}{0}$	41	Crítico
Objetos externos	B	2	M	5	RC	2	B	1	MA	$\frac{2}{0}$	31	Semi-crítico
Descarga electroatmosférica	A	4	T	10	SR	4	BM	0	MA	$\frac{2}{0}$	60	Crítico
Objetos externos	B	2	T	10	SR	4	B	1	N	0	41	Semi-crítico
Vandalismo	M	3	M	5	RC	2	B	1	N	0	11	Semi-crítico
Desperfección de fábrica	E	1	M	5	RC	2	A	$\frac{1}{0}$	N	0	20	No Crítico
Plagas o animales	B	2	N	1	RC	2	B	1	MA	$\frac{2}{0}$	23	Semi-crítico
Degradación en material polimérico	B	2	N	1	R	1	B	1	N	0	2	No Crítico

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Composición interna de un aislador



Fuente: Kapal Sharma. (2011). *Polymeric Insulators*.

