



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL 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**

Luis Daniel Jimenez Ramírez

Asesorado por el Mtro. Ing. Rony Aureliano Jucup Solis

Guatemala, septiembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL 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

LUIS DANIEL JIMENEZ RAMÍREZ

ASESORADO POR EL MTRO. ING. RONY AURELIANO JUCUP SOLIS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2020

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 Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino Gonzales
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto Gonzáles Padilla
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL 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.

Luis Daniel Jimenez Ramírez

Ref. EEPFI-347-2020
Guatemala, 29 de febrero de 2020

Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMEROS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA**, presentado por el estudiante **Luis Daniel Jimenez Ramírez** carné número **200915584**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento.

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

Sin otro particular,

Atentamente,

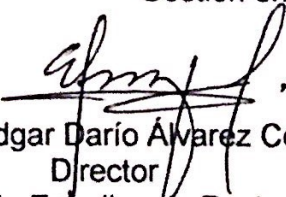
"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Rony Aureliano Jucup Solís
Asesor

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


Mtra. Rocío Carolina Medina Galindo
Coordinadora de Maestría
Gestión en Ingeniería de Mantenimiento




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



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EME-004-2020

Guatemala, febrero de 2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN LOS AISLADORES DE POLÍMEROS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 69 Y 138 KV EN EL ÁREA METROPOLITANA**, presentado por el estudiante universitario Luis Daniel Jimenez Ramirez, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





DTG. 218.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL 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 el estudiante universitario: **Luis Daniel Jimenez Ramirez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, septiembre de 2020

AACE/asga

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 una fuente de inspiración.
Familia y amigos	Que de una u otra forma han influido en mí, permitiéndome compartir momentos de alegrías y tristezas.

AGRADECIMIENTOS A:

- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por ser el 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 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
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
4. JUSTIFICACIÓN	9
5. OBJETIVOS	11
5.1. Objetivo general	11
5.2. Objetivos específicos.....	11
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Generalidades de líneas de transmisión	15

7.1.1.	Elementos que conforman una LT	16
7.1.2.	Estructura de soporte.....	18
7.1.3.	Aislamiento.....	19
7.1.4.	Conductor.....	19
7.1.5.	Herrajes	20
7.1.6.	Apantallamiento	21
7.1.7.	Sistema de puesta a tierra	22
7.2.	Aisladores eléctricos de potencia.....	23
7.2.1.	Aisladores de polímero	23
7.2.2.	Características técnicas	28
7.2.3.	Ventajas y desventajas con respecto a otras tecnologías.....	30
7.3.	Mantenimiento industrial	32
7.3.1.	Mantenimiento predictivo	33
7.3.2.	Esquema general de implementación	35
7.4.	Ensayos no destructivos	37
7.4.1.	Inspección visual.....	37
7.4.2.	Análisis de vibraciones.....	37
7.4.3.	Termografía infrarroja	38
7.4.4.	Análisis por ultrasonido	38
7.4.5.	Ultrasonido propagado en aire.....	39
7.4.6.	Análisis con partículas magnetitas	40
7.4.7.	Líquidos penetrantes.....	40

7.5.	Identificación de ensayos no destructivos a utilizar	40
7.6.	Fallas en líneas de transmisión de 69 y 138 kV	41
7.6.1.	Fallas relacionadas al aislamiento y medidas de mitigación	42
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	45
9.	METODOLOGÍA	47
9.1.	Enfoque	47
9.2.	Diseño	47
9.3.	Tipo	48
9.4.	Alcance.....	48
9.5.	Variables e indicadores	48
9.6.	Fases.....	50
9.7.	Resultados esperados.....	51
9.8.	Población y muestra	51
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	53
11.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	55
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	57
13.	REFERENCIAS.....	59

14. APÉNDICES67

15. ANEXOS.....71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución	14
2.	Generación, transmisión y distribución.....	16
3.	Disposición de un poste en una LT	17
4.	Tipos de estructuras típicas	18
5.	Ángulo de apantallamiento.....	22
6.	Materiales en aisladores	23
7.	Construcción de un aislador polimérico.....	25
8.	Configuración en suspensión	26
9.	Configuración remate a 45°	27
10.	Configuración en tangente	28
11.	Aislador polimérico Hubbell Ohio Brass	29
12.	Taxonomía de la conservación industrial	33
13.	Proceso en la implantación del mantenimiento predictivo.....	36
14.	Rangos de frecuencia de sonido	39
15.	Cronograma de actividades	55

TABLAS

I.	Ventajas y desventajas del cobre y aluminio	20
II.	Ventajas y desventajas de los materiales	31
III.	Operativización de variables	49
IV.	Presupuesto de la investigación	57

LISTA DE SÍMBOLOS

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

GLOSARIO

ANSI	(Instituto Nacional Estadounidense de Estándares).
Axial	Referente a la dirección de la carga, del eje.
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.
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.

RESUMEN

El mantenimiento de líneas de transmisión aplicado por la mayoría de las empresas transportistas en Guatemala es de forma periódica, lo que se conoce como mantenimiento preventivo. Aunque la tendencia en la industria es hacia la adaptación del mantenimiento a prácticas más predictivas, aún hace falta más tiempo para la implementación completa de este tipo de filosofías.

El aislamiento en las líneas de transmisión es una de las partes más importantes de este tipo de instalaciones, ya que estos elementos cumplen con varias funciones que, si no se tiene un adecuado plan de conservación podría causar pérdidas, tanto materiales como humanas. La aplicación de técnicas de ensayos no destructivos en el aislamiento de las líneas de transmisión ayuda a mantener cierto monitoreo de la condición y permitirá actuar a tiempo ante cualquier contingencia.

El presente diseño de investigación busca apoyar el cambio a una filosofía más predictiva en las empresas transportistas que operen líneas de transmisión, iniciando por el mantenimiento en aisladores poliméricos mediante la utilización de ensayos no destructivos.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento predictivo es un conjunto de aplicaciones y técnicas que se emplean con el fin de detectar posibles fallas en los elementos, maquinas 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 identificarán cuáles son los ensayos no destructivos que mejor se adecuan para la evaluación de los aisladores de polímero en líneas de transmisión y, en base a esto, plantear un modelo de mantenimiento predictivo.

El presente trabajo será 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 realizará 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 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.

El esquema de solución sugerido plantea varias fases, en las cuales como primera instancia es necesario definir el problema, seguidamente se recopilará la información necesaria por medio de investigaciones, normativas, manuales entre otros, luego será necesaria la revisión y análisis documental, identificación de ensayos no destructivos a aplicar y aplicarlos en campo, finalmente, en base a los resultados por los reportes, desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo.

En el capítulo I se tocarán temas relacionados a una base teórica que servirá 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 se hará el desarrollo de la investigación.

En el capítulo III se presentarán los resultados.

En el capítulo IV abarcará la discusión de los resultados.

2. ANTECEDENTES

En líneas de transmisión es de vital importancia contar con metodologías de mantenimiento predictivo para los aisladores debido a que las fallas en estos elementos resultan en elevados costos de pérdida debido a indisponibilidad y sanciones por parte del ente regulatorio, según lo explican en su trabajo Santana y Moreno (2004), quienes brindan un aporte a este trabajo de forma práctica, ya que en él se mencionan las experiencias relacionadas al monitoreo de condición en aisladores de líneas de transmisión de ISA y REP. En el trabajo se menciona que para detectar daños en aisladores se realizan una serie de ensayos que no afectan en la operación del equipo, tal como la inspección visual, medición del campo eléctrico, termografía y otros equipos de diagnóstico. Los resultados arrojados muestran cuales son las causas más comunes de falla en aisladores de polímero.

Orellana (2019) menciona en su trabajo que cuando un plan de mantenimiento se elabora partiendo del análisis que se generó por ensayos no destructivos, se garantiza obtener resultados que reflejen la condición de operación nominal, con los que se pueden plantear rutinas de mantenimiento más eficientes. El aporte metodológico que proporciona el trabajo es la determinación de las técnicas a utilizar basándose en los criterios de alerta deseados. Para el desarrollo de la estrategia de mantenimiento explicado en el trabajo, se sigue una secuencia de pasos que abarcan la recopilación de datos, la revisión y análisis documental, el diseño del plan de mantenimiento, ejecución del plan de mantenimiento y, por último, la propuesta de la estrategia de monitoreo de condición. Se determinó cual será la mejor combinación de técnicas de mantenimiento basándose en los resultados de los ensayos no destructivos.

Para diseñar un esquema de detección de fallas a nivel industrial, es necesario conocer la información del entorno donde se aplicará. Según Aranguren y Tarantino (2009) se requiere el conocimiento de los niveles de riesgo y criticidad de los elementos a analizar con el fin de definir cuál es la técnica o conjunto de técnicas más apropiadas a utilizar. El aporte de este trabajo es metodológico, ya que menciona una serie de procesos que ayudaran a detectar cual es el origen de las fallas más comunes. Ya que el trabajo muestra distintos métodos para la detección de fallas, la metodología difiere para cada uno; sin embargo, es posible afirmar que todos se basan en el reconocimiento del proceso, variables y las causas más comunes de falla. Al plantearse un escenario completo del proceso surgen una serie de preguntas, que al ser respondidas da como resultado la ubicación del origen de las fallas críticas.

El aporte metodológico es debido a que es posible utilizar la misma lógica para la estructuración de una estrategia de mantenimiento en una LT, debe de contemplar todos cada una de las partes que la conforman, poniendo especial cuidado al aislamiento, siendo el elemento más crítico según lo mencionan en su trabajo Gutiérrez, Mora y Pérez (2009). Se aporta de manera práctica al trabajo ya que menciona una serie de puntos específicos a tener en consideración cuando se evalúe el estado de los aisladores. En la investigación se define la metodología para la evaluación de las tareas de mantenimiento en aisladores en base a las funciones principales de estos elementos. Como resultado se obtienen una serie de tareas para implementar tomando en cuenta el análisis de las fallas y sus efectos.

Según Fuentes (2019) el uso de herramientas de ingeniería del mantenimiento como indicadores de operación, criticidad de equipos e historial de fallas, entre otros es necesario para sintetizar y sistematizar un adecuado y

eficiente modelo de mantenimiento, tal y como se describe en su trabajo. El aporte metodológico del documento es la manera en la que se identifican los causales de eventos que comprometan el correcto funcionamiento de los equipos a intervenir. La metodología utilizada fue enlistar y categorizar los elementos objeto de investigación, seguido de describir las partes y las fallas que más les afectan, así como el detalle del historial del mantenimiento usado u las causas que dieron origen a estas tareas; la tercera fase consiste en la implementación de indicadores que mejoren la confiabilidad del sistema y, por último, con base en los resultados del análisis anterior, plantear el conjunto de tareas de mantenimiento más factible. El resultado que el trabajo presenta es un modelo de plan de mantenimiento sistematizado con el que se garantiza un alto índice de disponibilidad.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

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 están inminentes a fallar, o se desperdicia recurso al solamente cambiarlo de forma periódica sin tomar en cuenta la condición en la que se encuentra.

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 originadas en los aisladores de polímero durante la operación de las líneas de transmisión. Como consecuencia se pueden derivar una serie de problemas como sanciones por indisponibilidad o algún tipo de demanda, sin tomar en cuenta la desacreditación en la reputación de la empresa transportista dueña de la línea.

Pregunta central:

¿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 auxiliares:

- ¿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 preventivo 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?

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se enfoca en la línea de investigación de la gestión del mantenimiento del programa de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Esto es posible decirlo debido a que por medio del apalancamiento de técnicas de ensayos no destructivos se pretende realizar el un modelo de mantenimiento con el que se garantice de alguna manera la continuidad de la operación.

La importancia de realizar esta investigación radica en mantener una alta calidad del servicio de energía eléctrica a todos los usuarios, por medio de elevados índices de disponibilidad de operación en las líneas de transmisión de 69 y 138 kV; evitando aperturas no programadas a causa de fallas en los aisladores de polímero. El tiempo promedio de vida en condiciones ideales de un aislador de polímero es aproximadamente 30 años; sin embargo, las líneas de transmisión no cuentan con monitoreo permanente en el que se pueda dar las alertas al momento en el que se altere su funcionamiento normal. Es necesario conocer por medio de ensayos que no entorpezcan la operación cual es la condición en la que se encuentran los aisladores y, programar tareas que mejor se adecuen al problema que esté afectando su funcionamiento.

La necesidad de la elaboración de este trabajo es evitar la indisponibilidad en las líneas de transmisión debido a fallas en el aislamiento. El origen de las fallas en aisladores puede ser muy particular para cada LT; existiendo un alto porcentaje de causas no definidas y, allí es donde el trabajo toma relevancia, pretendiendo reducir dicho índice y hacer más controlable la operación, conociendo las causas de falla mediante la aplicación de END.

El interés y motivación personal al desarrollar el presente trabajo es que por medio de esta investigación se diseñe un modelo de mantenimiento predictivo que sea capaz de garantizar la calidad de la energía eléctrica suministrada a cada uno de los usuarios del pueblo de Guatemala que la consuman.

Del presente trabajo se podrá beneficiar cualquier usuario del transporte de energía eléctrica; así como también, empresas transportistas que aún no cuenten con un modelo de mantenimiento similar o, algún interesado en desarrollar un modelo de gestión del mantenimiento predictivo utilizando ensayos no destructivos.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo 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.

5.2. Objetivos 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 preventivo 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.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La necesidad de la elaboración de este trabajo radica en garantizar el servicio continuo en las líneas de transmisión. El origen de las fallas en aisladores puede ser muy particular para cada LT; existiendo un alto porcentaje de causas no definidas y, allí es donde el trabajo toma relevancia, pretendiendo reducir dicho índice y hacer más controlable la operación, conociendo las causas de falla mediante la aplicación de END.

De igual modo, se debe de determinar los parámetros a medir en los aisladores de polímero mediante el uso de ensayos no destructivos, tomando en cuenta la aplicabilidad y la utilidad del aporte de los resultados. Una vez seleccionados cuales ensayos no destructivos serán utilizados, se procederá a su aplicación en los aisladores de polímero de una línea de transmisión típica de 69 y 138 kV, con lo cual se pretende conocer la condición en la que se encuentran. Se desarrollará un modelo de mantenimiento predictivo a partir de los resultados de los ensayos no destructivos previamente aplicados.

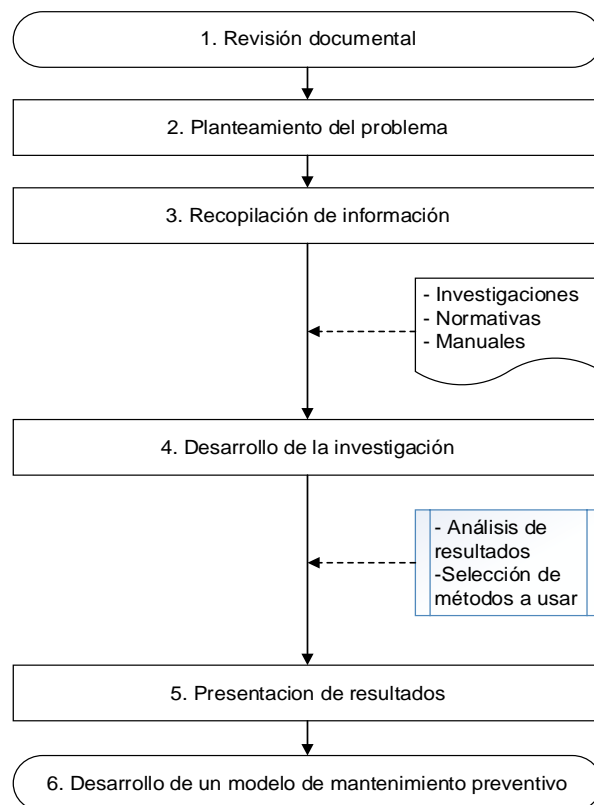
En la primera fase, como punto de partida se definirá el problema, y se procede a recopilar más información acerca del tema, en la segunda fase, por medio del análisis de la información obtenida, se llega a determinar cuál de la amplia gama de ensayos no destructivos existentes se adecuan de mejor manera, ofrece resultados más relevantes y tiene mejor aplicabilidad en aisladores de polímero en líneas de transmisión de 69 y 138 kV.

En la tercera fase se deberá definir cuáles de los problemas o fallas más comunes que afectan a los aisladores de polímero mediante la comparación del

impacto en los índices de disponibilidad y confiabilidad por cada uno de los aspectos analizados.

Por último, en la fase cuatro se realizarán los ensayos no destructivos previamente seleccionados, con base a los resultados obtenidos y teniendo en consideración las fallas más comunes y/o perjudiciales en aisladores de polímero, se procederá a desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo mejor adecuado a estos elementos.

Figura 1. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

7. MARCO TEÓRICO

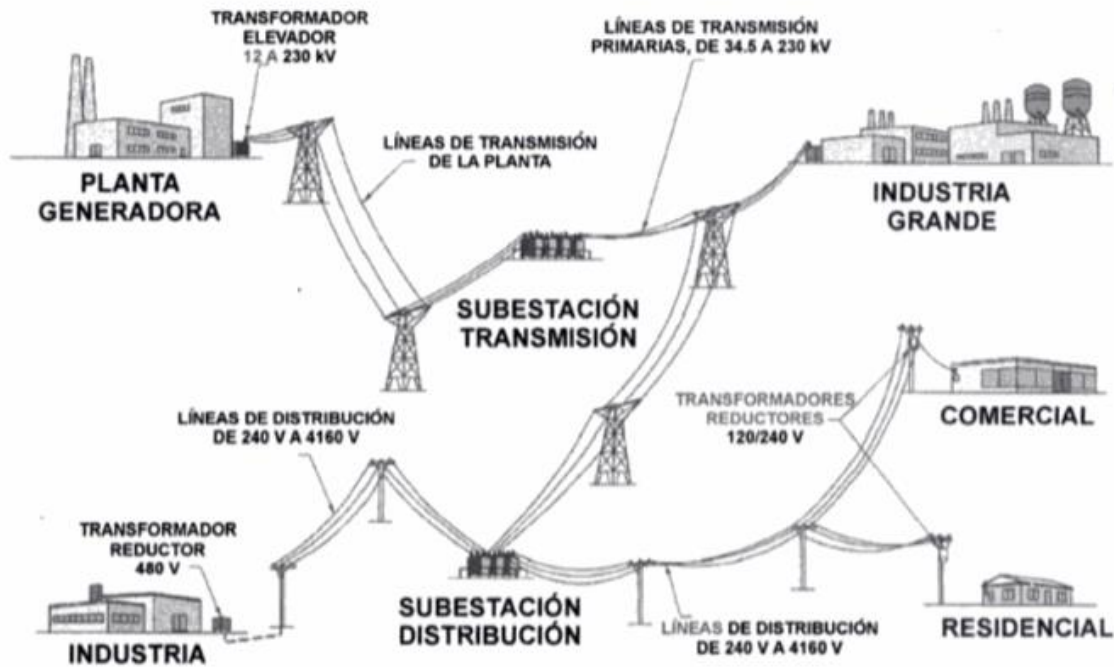
En este apartado se mostrará la información recopilada referente a los conceptos de líneas de transmisor, aisladores de polímero, fallas comunes en líneas de transmisión de 69 y 138 kV, mantenimiento predictivo y ensayo no destructivos.

7.1. 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 2. **Generación, transmisión y distribución**



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

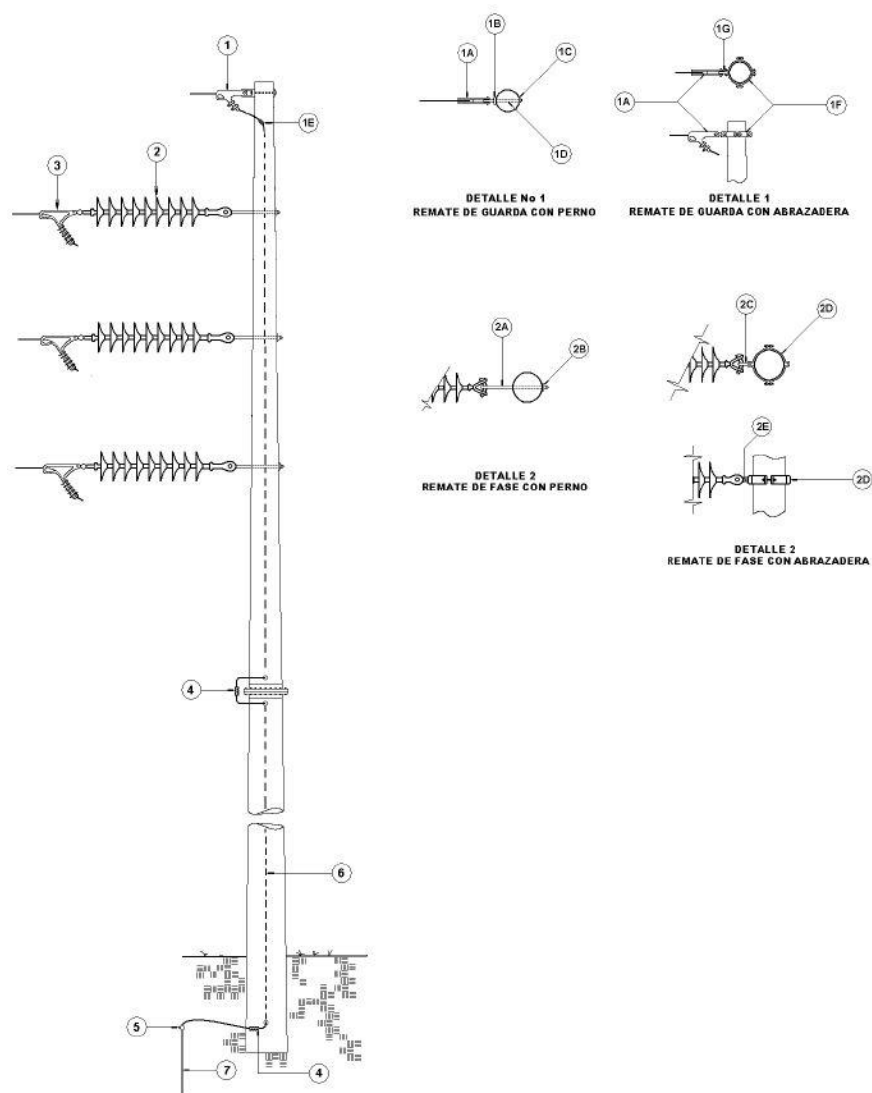
7.1.1. **Elementos que conforman una LT**

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 3. Disposición de un poste en una LT

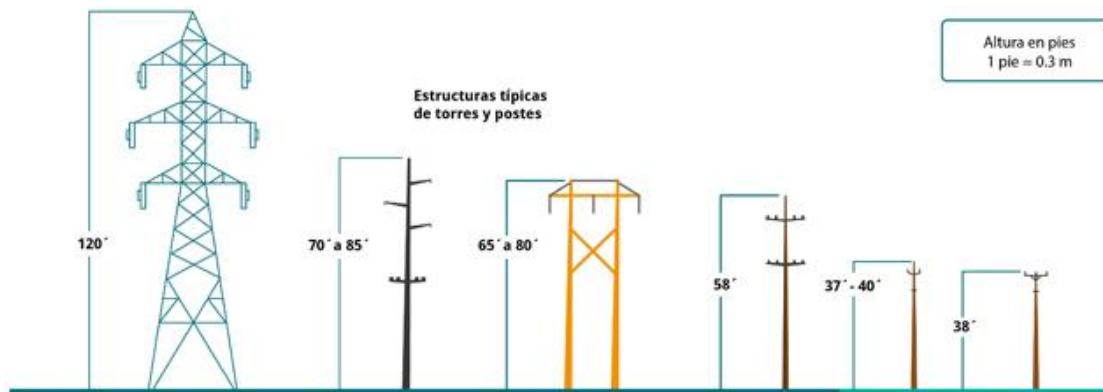


Fuente: Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (2007). *Manual de construcción de líneas de transmisión.*

7.1.2. 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 4. Tipos de estructuras típicas



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

Para determinar la estructura a 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

7.1.3. 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.

7.1.4. 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**

	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.*

7.1.5. **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.

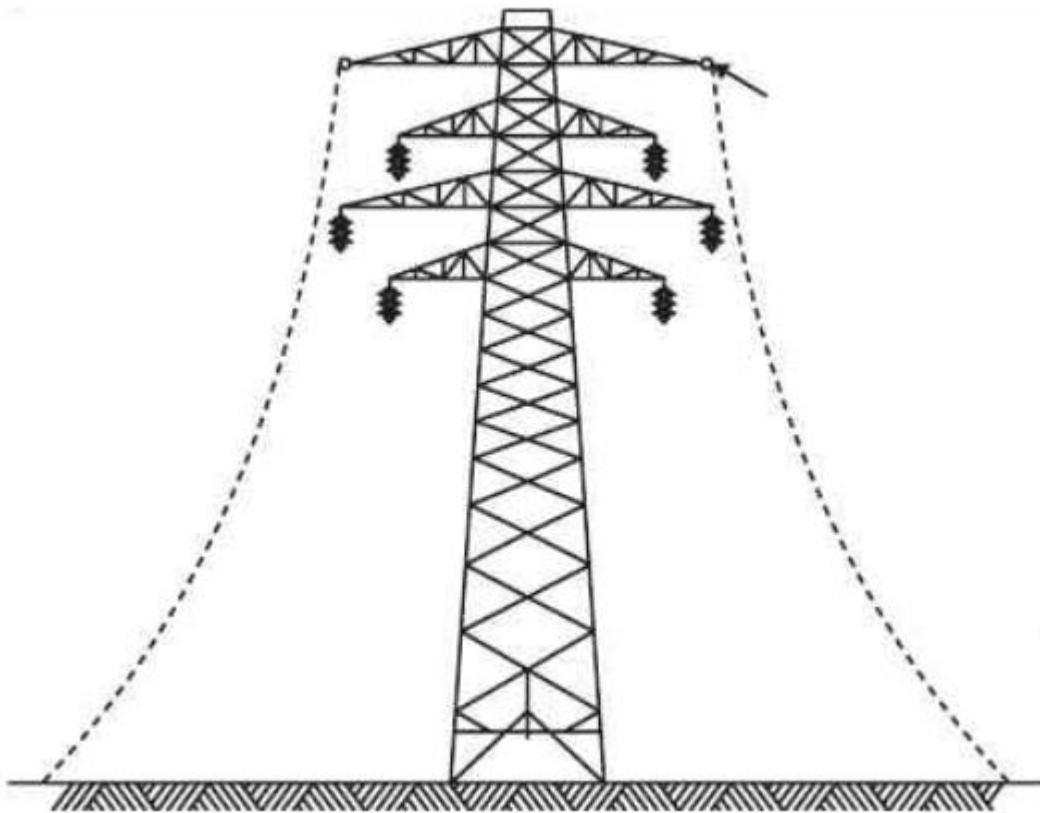
Para la selección y diseño de una línea de transmisión, generalmente las empresas transportista se basan en normativas internacionales que garantizan un adecuado desempeño en cada uno de los elementos a utilizar, siendo el caso para los herrajes la norma (IEC 61284:1997) que especifica cuales deberán 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.

7.1.6. 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 a utilizar y norma en la que se basaran los cálculos, siendo la (IEEE 1243-1997) y (IEEE 1410-2010) las más utilizadas, (Salazar, 2016).

Figura 5. **Ángulo de apantallamiento**



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

7.1.7. 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).

7.2. Aisladores eléctricos de potencia

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 6. **Materiales en aisladores**



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

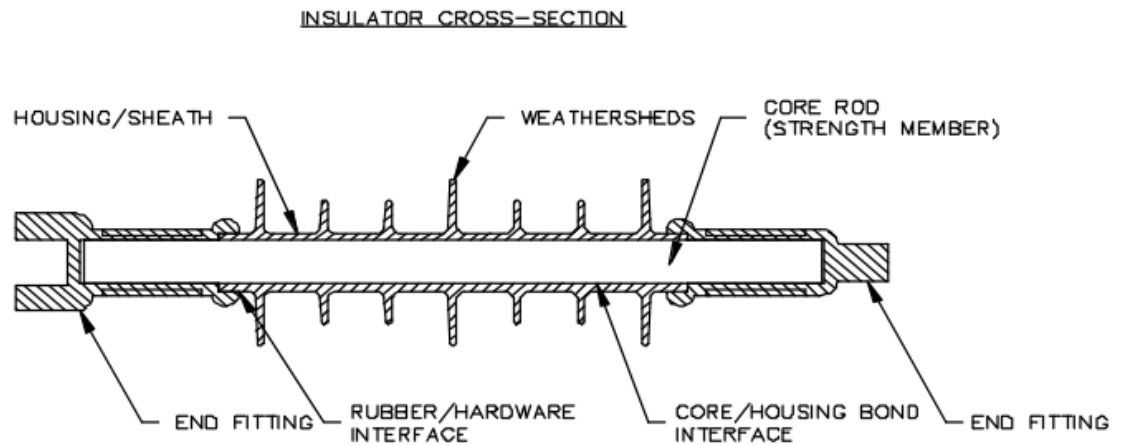
7.2.1. Aisladores de polímero

Kapal Sharma (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 7. **Construcción de un aislador polimérico**

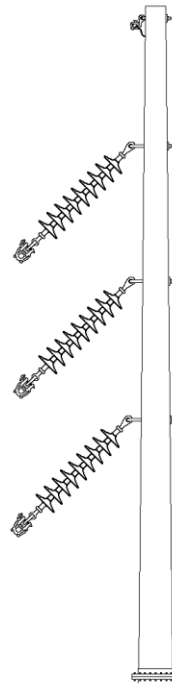


Fuente: Kapal. (2011). *Polymeric Insulators*.

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.

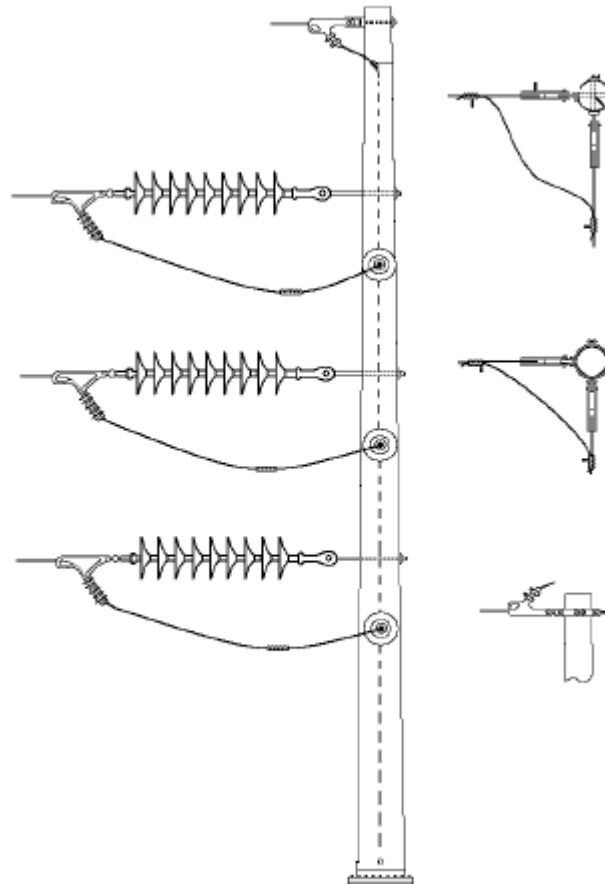
Figura 8. **Configuración en suspensión**



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.

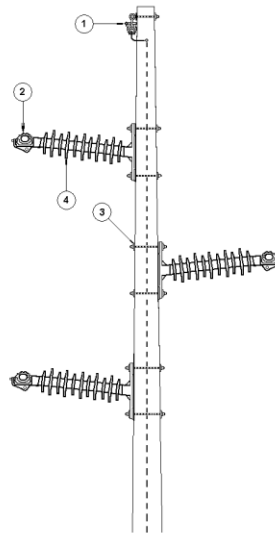
Figura 9. **Configuración remate a 45°**



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 10. **Configuración en tangente**



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

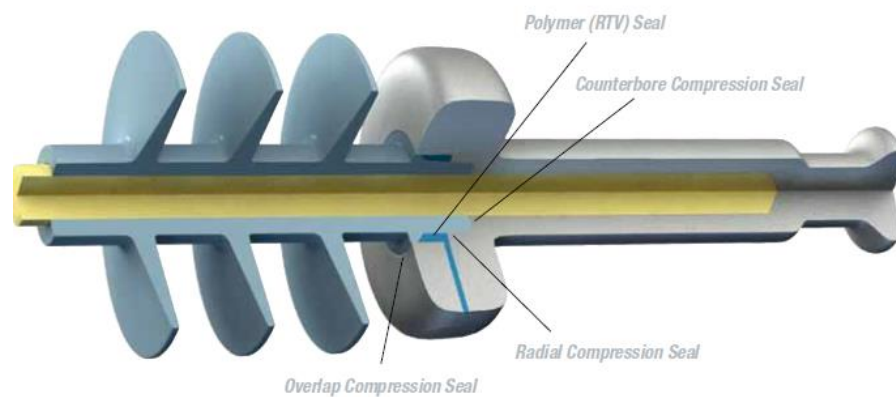
7.2.2. **Características técnicas**

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 cada uno de los aislamientos; sin embargo, estas se apoyan mucho en normas internacionales como lo pueden ser 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 11. **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)

7.2.3. 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 sus practicidad permitiendo construir líneas de transmisión a velocidades que no podrían alcanzarse utilizando aisladores de porcelana o vidrio.

La tabla mostrada a continuación enlista las ventajas y desventajas 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.

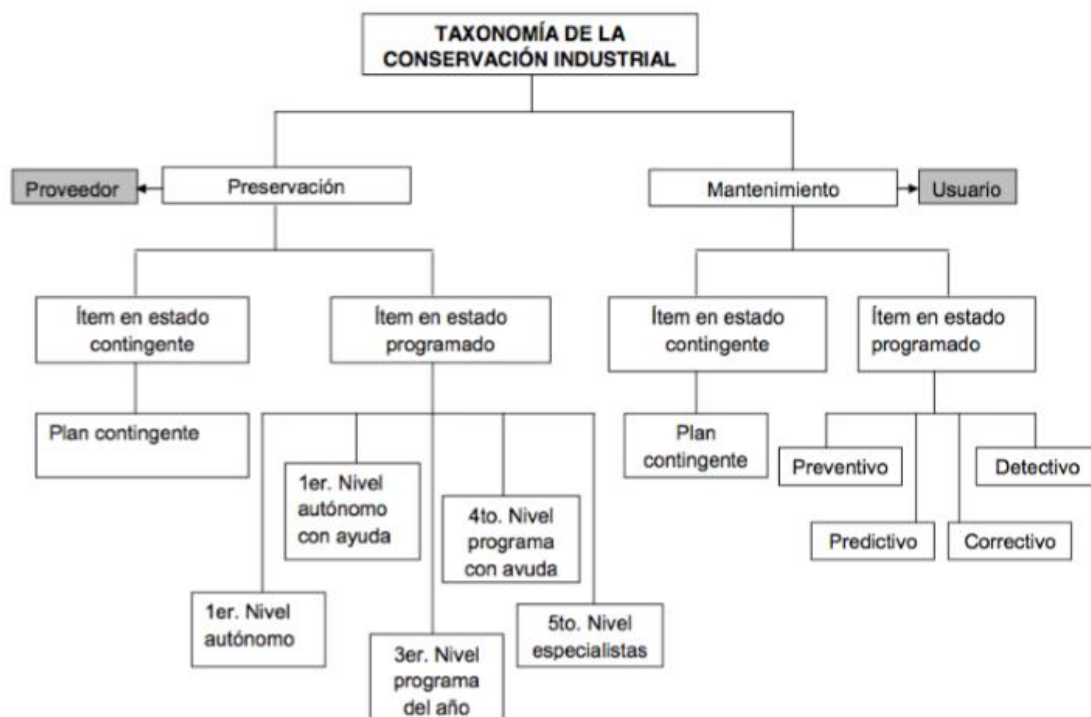
7.3. Mantenimiento industrial

“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 12. **Taxonomía de la conservación industrial**



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

7.3.1. **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.

7.3.2. 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 a su diagnóstico” (p. 57).

Figura 13. **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 maquina o equipo
- Pronóstico de la condición
- Generación de avisos

7.4. 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).

7.4.1. 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).

7.4.2. 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.

7.4.3. Termografía infrarroja

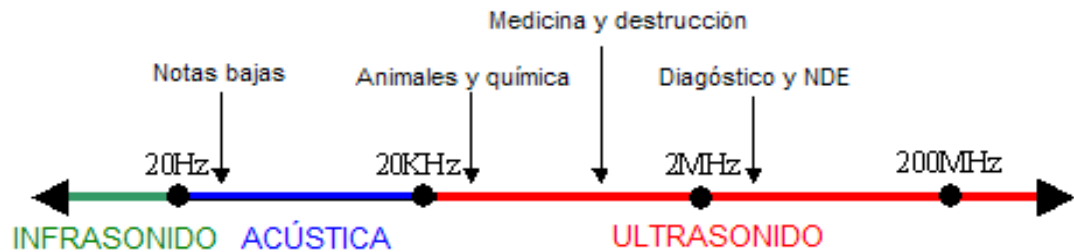
Según Pérez (2016) la termografía infrarroja es una herramienta que permite visualizar la temperatura superficial de los materiales considerablemente precisa sin tener necesidad de tener contacto con la pieza, ya que los equipos permiten la medición a distancia. En su trabajo, este autor menciona que: “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.

7.4.4. 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 14. Rangos 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 eléctricos y *tracking* eléctrico.

7.4.5. 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 (García, 2016).

Este autor también menciona 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.

7.4.6. Análisis con partículas magnetitas

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 revelaran las discontinuidades a lo largo de la superficie del material ensayado (Gómez, 1998).

7.4.7. 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).

7.5. Identificación de ensayos no destructivos a utilizar

Según explican Cárdenas y Garzon (2012) en su trabajo, 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).

7.6. 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.
- Perdidas por efecto Joule en elementos de unión: esto se debe principalmente debido a la virtud propia de los conductores de aluminio para la contracción y elongación.
- Perdidas 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.

7.6.1. 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 a utilizar según como Godoy (2019) lo define en su trabajo, son:

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

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades de líneas de transmisión

1.1.1. Elementos que conforman una LT

1.1.1.1. Estructura de soporte

1.1.1.2. Aislamiento

1.1.1.3. Conductor

1.1.1.4. Herrajes

1.1.1.5. Apantallamiento

1.1.1.6. Sistema de puesta a tierra

1.2. Aisladores eléctricos de potencia

1.2.1. Aisladores de polímero

1.2.1.1. Características técnicas

1.2.1.2. Ventajas y desventajas con respecto a otras tecnologías

1.3. Mantenimiento industrial

1.3.1. Mantenimiento predictivo

- 1.3.1.1. Esquema general de implementación
- 1.4. Ensayos no destructivos
 - 1.4.1. Inspección visual
 - 1.4.2. Análisis de vibraciones
 - 1.4.3. Termografía infrarroja
 - 1.4.4. Análisis por ultrasonido
 - 1.4.4.1. Ultrasonido propagado en aire
 - 1.4.5. Análisis con partículas magnetitas
 - 1.4.6. Líquidos penetrantes
- 1.5. Identificación de ensayos no destructivos a utilizar
- 1.6. Fallas en líneas de transmisión de 69 y 138 kV
 - 1.6.1. Fallas relacionadas al aislamiento y medidas de mitigación
- 2. RECOLECCIÓN DE DATOS
- 3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

En esta sección del trabajo se presentará un conjunto de métodos que describen la forma en la que se pretende desarrollar la investigación.

9.1. Enfoque

El enfoque de la investigación es mixto debido a que se aplican técnicas características de la investigación cuantitativa, como también se hace uso de las bondades de la investigación cualitativa. De la parte cuantitativa, se usarán mediciones que permitirán analizar un conjunto de datos para obtener índices estadísticos. Mientras tanto, por la parte cualitativa se hará una revisión documental que será interpretada para enriquecer el presente trabajo.

9.2. Diseño

El presente diseño de investigación será del tipo no experimental, debido a que las mediciones de la condición de operación en los aisladores de polímero serán en sitio. Se aplicarán ensayos no destructivos con herramientas y equipos especializados durante el funcionamiento normal de operación, con el objetivo analizar los resultados obtenidos y plasmar un panorama situacional bastante acertado que servirá como base para el planteamiento de un modelo de mantenimiento predictivo más adecuado.

9.3. Tipo

El tipo de estudio es descriptivo ya que en él se observarán las circunstancias de operación normal de los aisladores de polímero en las líneas de transmisión de 69 y 138 kV, para finalmente 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

9.4. Alcance

El alcance metodológico es descriptivo porque en la investigación se hará especial énfasis en conocer cuál es la condición en la que operan los aisladores de polímero en una línea de transmisión de 69 o 138 kV típica, sin llegar al detalle del porque ocurre de esa manera.

9.5. Variables e indicadores

Las variables e indicadores se describen en la siguiente tabla:

Tabla III. **Operativización de variables**

Objetivo	Variable	Tipo de variable	Indicador	Técnica	Plan de tabulación
Identificar las fallas más comunes que afectan a los aisladores de polímero de líneas de transmisión de 69 y 138 kV	Tipos de fallas	Dependiente Cualitativa Nominal	Tiempo de ocurrencia de falla	Recopilación de información: historial de eventos y diagrama de pareto	Uso de la Tabla II (ANEXOS)
Clasificar la criticidad de fallas basándose en su recurrencia.	Criticidad de falla	Independiente Cuantitativo Cardinal	Índice de criticidad	Cálculo del índice de criticidad (MTTB)	Uso de Tabla III (ANEXOS) y Excel.
Determinar la mejor combinación de técnicas para la adecuada conservación de aisladores de polímero de una línea de transmisión	Técnicas de mantenimiento, ensayos no destructivos	Dependiente Cualitativa Nominal	Periodo de aplicación de combinación de técnicas	Estadística descriptiva	Uso de Tabla IV (ANEXOS)
Divulgar por medio de afiches en áreas cercanas a las líneas de transmisión acerca del procedimiento para notificación de averías.	Técnica de la divulgación de la información	Dependiente Cualitativa Nominal	Afiches	Diseño grafico	Afiche

Fuente: elaboración propia.

9.6. Fases

- Fase 1: revisión documental

Para elaborar la investigación se buscarán documentos para conocer cuáles son los antecedentes del problema y marco teórico que abarca el mismo. (4 semanas)

- Fase 2: diagnóstico

En esta fase se recopilará la información correspondiente a los tipos de fallas que aplican a los aisladores de polímero. Así mismo, también se buscará información acerca de ensayos no destructivos que se encuentran en el mercado de Guatemala, para elaborar una descripción de que resultados arrojan cada uno de. (8 semanas)

- Fase 3: análisis

Se realizará una evaluación de las fallas más comunes por las que se ve afectada la disponibilidad y confiabilidad de una línea de transmisión de 69 y 138 kV típica y de estos se segmentarán aquellos que están relacionados al aislamiento. (8 semanas)

- Fase 4: evaluación

Se realizará la propuesta para el modelo de mantenimiento predictivo que se aplicará sobre los aisladores de polímero con base en la información recopilada en la fase 2 y el análisis de la información previamente realizado en la fase 3. (2 semanas)

- Fase 5: socialización

En esta fase será donde se elabore un afiche con la información más relevante y se indicará cual será el proceso para la notificación de averías en el aislamiento de las líneas de transmisión. (3 semanas)

9.7. Resultados esperados

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

También se espera conocer cuáles de los ensayos no destructivos que se encuentren en el mercado nacional aportan en el conocimiento de las condiciones de operación de los aisladores de polímero.

Así mismo se pretende obtener una tabla donde se identifiquen cuáles son los tipos de falla que más afectan en el desempeño y operación de los aisladores de polímero instalados en una línea de transmisión de 69 y 138 kV.

Finalmente, se espera que con la inclusión de lo anterior se obtenga un modelo de mantenimiento predictivo aplicado a los aisladores de polímero.

9.8. Población y muestra

Para conocer el dato estadístico de la muestra poblacional es necesario hacer una serie de suposiciones que facilitarán el cálculo. En primer lugar, se hace la suposición que una línea de transmisión de 69 y 138 kV típica en el área metropolitana tiene una longitud aproximada de 2 km, la distancia entre postes es de alrededor 100 metros, y cada poste tiene instalados tres aisladores, con lo

cual la población a analizar será igual a 63. Con las aclaraciones anteriores podemos afirmar que el valor de la muestra aleatoria poblacional es la siguiente:

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{d^2 \times (N-1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q} \quad (1)$$

$$n = \frac{63 \times 1.96^2 \times 0.05 \times 0.95}{0.05^2 \times (63-1) + 1.96^2 \times 0.05 \times 0.95} = 33.65 \quad (2)$$

Es posible afirmar por medio de esta ecuación que el número de aisladores que serán sometidos a ensayos no destructivos durante la elaboración de la investigación, serán 33.65. Sin embargo, no es posible analizar solamente el 65 % de un aislador; además, debido a la practicidad de analizar los aisladores de una estructura, se puede decir que es más conveniente someter a ensayos a 33 aisladores, lo que a su vez nos arroja un total de 11 estructuras, quienes serán la muestra aleatoria de este trabajo.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

De la fase uno se realizará la revisión documental para obtener una visión general de cómo y cuáles son las características situacionales del medio en el que se desenvolverá la investigación.

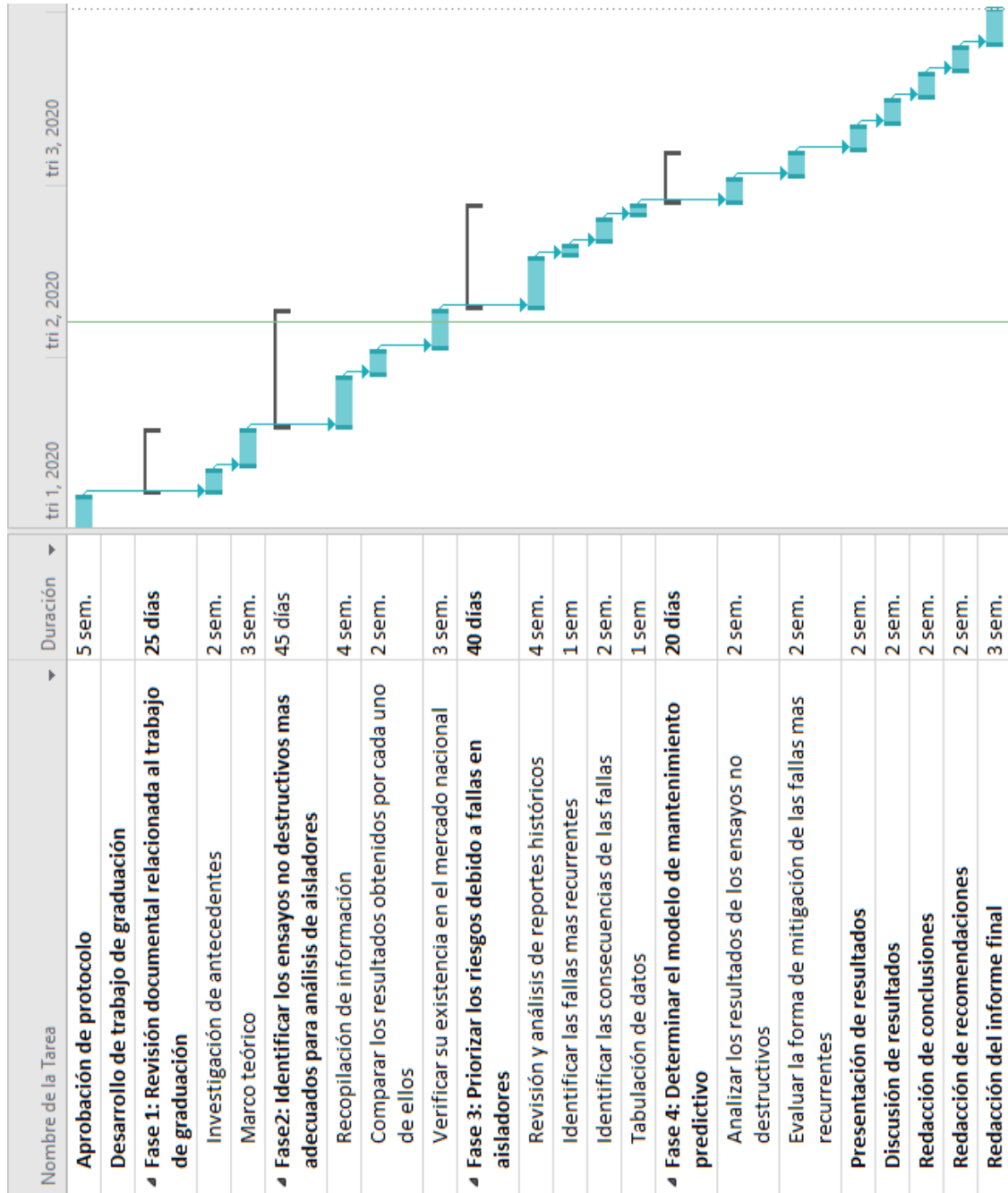
En la segunda fase, por medio de la observación y con ayuda de la información recolectada sobre los diversos ensayos no destructivos que pueden encontrarse en el mercado guatemalteco, se elaborará una tabla con la se generará una gráfica con ayuda de software de cálculo

En la fase tres con la ayuda de estadística descriptiva se analizarán los datos obtenidos de la fase anterior, para compararlos y de alguna forma validarlos contra los datos de historiales, documentos de control y bitácoras de una empresa transportista de energía eléctrica correspondiente a las fallas en líneas de transmisión. Para elaborar este análisis se utilizarán herramientas tales como la media, moda y mediana; también se utilizarán herramientas de administración como Pareto, apoyándose de software de cálculo. Al finalizar este análisis se pretende conocer cuáles son las causas de indisponibilidad estadísticamente más comunes en líneas de transmisión de 69 y 138 kV típicas por problemas en los aisladores de polímero.

De la fase cuatro la propuesta a usar es un modelo de mantenimiento predictivo basándose en las fallas más comunes en los aisladores de polímero y en los ensayos no destructivos más adecuados al objetivo de mantener un alto índice de disponibilidad.

11. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Figura 15. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Debido a que, en cada una de las fases propuestas para el desarrollo de este trabajo de investigación se cuentan con los recursos necesarios para la ejecución, es posible decir que es factible la realización de la investigación y cumplir con cada uno de los objetivos.

Los elementos a evaluar, los reportes y documentación histórica relacionada a las instalaciones serán prestados por la parte interesada.

La aplicación de los ensayos no destructivos, personal técnico y profesional necesario, análisis de reportes que sean requeridos serán ejecutados por entidades que sean expertos en cada una de estas áreas; sin embargo, cualquier gasto será financiado por el propio investigador.

Tabla IV. Presupuesto de la investigación

No.	Recurso	Descripción del gasto	Costo	%	Financista
1	Humano	Inversión del tiempo del investigador	Q 1,500.00	8.66 %	Propio
2	Humano	Asesor del trabajo	Q 2,500.00	14.43 %	Propio
3	Humano	Técnicos especialistas	Q 1,500.00	8.66 %	Propio

Continuación de tabla IV

No.	Recurso	Descripción del gasto	Costo	%	Financista
4	Tecnológico	Aplicación de ensayos no destructivos	Q 6,000.00	34.63 %	Propio
5	Humano	Asesor de trabajo de campo	Q 1,500.00	8.66 %	Propio
6	Transporte	Combustible y depreciación del vehículo	Q 1,000.00	5.77 %	Propio
7	Varios	Insumos varios	Q 2,000.00	11.54 %	Propio
8	Equipo	Depreciación de laptop y equipo diverso	Q 500.00	2.89 %	Propio
9	Varios	Gastos imprevistos (5%)	Q 825.00	4.76 %	Propio
Total			Q 17,325.00	100.00%	

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS

1. American National Standards Institute. (2012). *ANSI/NEMA C29.11-2012 Composite Insulators - Test Methods*. ANSI. Washington D.C.: ANSI. Recuperado de <https://webstore.ansi.org>. Consulta: julio de 2019.
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>. Consulta: julio de 2019.
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>. Consulta: julio de 2019.
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, Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>. Consulta: noviembre de 2019.

6. Bustillos, A., y Pérez, V. (S. Electricidad, Editor) (2015). *Introducción a las líneas de transmisión de energía eléctrica*. Recuperado del Sector Electricidad, <http://www.sectorelectricidad.com>. Consulta: noviembre de 2019.
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>. Consulta: julio de 2019.
8. COIDEA. (2017). *Aislador polimérico de alta tensión*. Recuperado de www.coideasa.com. Consulta: noviembre de 2019.
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, Guatemala, Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt>. Consulta: agosto de 2019.
10. 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>. Consulta: noviembre de 2019.
11. Electricidad Aplicada. (2017). *Ventajas y desventajas del cobre vs aluminio en el cableado eléctrico*. Recuperado de <https://www.electricaplicada.com>. Consulta: agosto de 2019.

12. Enríquez, G. (2000). *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*. Ciudad de México, México: Limusa. Recuperado de <https://www.worldcat.org>. Consulta: julio de 2019.
13. Errázuriz, A., y Rivera, J. (2013). *Energía: la electricidad en un Mundo que Avanza*. Santiago, Chile: Origo Ediciones. Recuperado de <http://biblioteca.olade.org>. Consulta: noviembre de 2019.
14. 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). Maestría en Ingeniería de Mantenimiento. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt>. Consulta: noviembre de 2019.
15. 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, Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>. Consulta: octubre de 2019.
16. 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, Guatemala.

Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>. Consulta: noviembre de 2019.

17. Gómez, F. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Murcia, España: Universidad de Murcia. Recuperado de <https://www.um.es/web/biblioteca>. Consulta: noviembre de 2019.
18. Gonzáles, F. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid, España: Artegraf, S.A. Recuperado de <http://www.amazon.com>. Consulta: septiembre de 2019.
19. 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>. Consulta: noviembre de 2019.
20. 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
21. Hubbell. (2011). *Ohio Brass Catalog 24 - Quadri*Sil Insulators*. Recuperado de <https://hubbellcdn.com>. Consulta: octubre de 2019.
22. 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>. Consulta: noviembre de 2019.

23. 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>. Consulta: noviembre de 2019.
24. 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>. Consulta: agosto de 2019.
25. 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>. Consulta: noviembre de 2019.
26. Kapal Sharma, R.E.T. (2011). *Polymeric Insulators*. Recuperado de <http://www.appstate.edu>. Consulta: octubre de 2019.
27. 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, Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>. Consulta: noviembre de 2019.
28. 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>.
Consulta: noviembre de 2019.

29. 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, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt>.
Consulta: noviembre de 2019.
30. Peña, J. (2008). *Análisis de fallas en las líneas de transmisión del Grupo Empresarial ISA*. Universidad Tecnológica de Pereira, (tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Recuperado de <https://biblioteca.utp.edu.co>. Consulta: octubre de 2019.
31. 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, Guatemala. Recuperado de <http://biblioteca.usac.edu.gt>.
Consulta: noviembre de 2019.
32. 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 Politecnica Nacional. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec>. Consulta: noviembre de 2019.

33. 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>. Consulta: noviembre de 2019.
34. 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>. Consulta: octubre de 2019.
35. Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (2007). *Manual de construcción de líneas de transmisión*. Transportista Eléctrica Centroamericana, Construcción de Líneas de Transmisión. Guatemala: Transportista Eléctrica Centroamericana.
36. Wadhwa, C. (2010). *High Voltage Engineering*. Delhi, India: New Age Publishers. Recuperado de <http://www.amazon.com>. Consulta: noviembre de 2019.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Matriz de coherencia

DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO USANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN AISLADORES DE POLIMERO DE UNA LINEA DE TRANSMISION DE 69 KV	
Desarrollo de un modelo de mantenimiento predictivo usando ensayos no destructivos en los aisladores de polímero de una línea de transmisión de 69 KV	
Preguntas	Referencia
¿Cuál es el modelo de mantenimiento predictivo aplicado a los aisladores de transmisión de 69 KV mediante la aplicación de ensayos no destructivos busca prevenir fallas usando ensayos no destructivos inspecciones, mejorará las condiciones de operación, reducir los sobrecostos debido a los aisladores de polímero de transmisión de 69 KV? consecuentemente se obtendrá un aumento los niveles de confiabilidad de la instalación.	<p>Antecedentes</p> <p>Santana, W., & Moreno, H. (2004). EXPERIENCIA EN EL USO DE AISLADORES COMPLETOS EN LAS LINEAS DE TRANSMISION DE INTERCONEXION ELECTRICA (COLOMBIA) Y RED DE ENERGIA DEL PERU REPUBLICANA. (pp. 10). Medellín: INTERCONEXION ELECTRICA S.A. Recuperado el septiembre de 2019, de https://repositorio.usac.edu.gt/handle/document/113</p> <p>¿Cuáles son las técnicas de ensayos no destructivos más adecuadas para analizar el estado de los aisladores de 69 KV?</p> <p>Quando un plan de mantenimiento se elabora, partiendo del análisis que se generó en la operación normal, con los que se pueden plantear rutinas de mantenimiento más eficientes (Orellana, 2019). El aporte metodológico que propociona el trabajo es la determinación de las técnicas a utilizar basándose en los criterios de alerta deseados. Para el desarrollo de la estrategia de mantenimiento explicado en el trabajo, se sigue una secuencia de pasos que abarcan la recopilación de datos, la revisión y análisis documental, el diseño del plan de mantenimiento, ejecución del plan de mantenimiento y, por último, la propuesta de la estrategia de monitoreo de condición. Se determinó cual sería la mejor combinación de técnicas de mantenimiento basándose en los resultados de los ensayos no destructivos.</p> <p>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 Fin de Máster). Universidad de San Carlos de Guatemala. Maestría en Ingeniería de Mantenimiento. Ciudad de Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado el septiembre de 2019, de http://www.repositorio.usac.edu.gt/handle/prim/12206</p>
¿Qué tipo de fallas en aisladores de polímero de líneas de transmisión de 69KV son de mayor riesgo?	<p>Definición</p> <p>La investigación se enfoca en el desarrollo de un modelo de mantenimiento predictivo, limitándose a los aisladores de líneas de transmisión, siempre que estas se encuentren en operación.</p> <p>Consecuencias</p> <p>De no realizarse un plan de mantenimiento predictivo seguirán ocurriendo fallas originadas en los aisladores de polímero durante la operación de las líneas de transmisión. Como consecuencia se afectará la confiabilidad de la línea, lo que ocasiona la desactualización en la reputación de la empresa transportista dueña de la línea.</p> <p>Atanguren, S., & Tarantino, R. (2009). METODOLOGIAS Y FUNDAMENTOS DE DETECCIÓN DIAGNOSTICO DE FALLAS EN AISLADORES DE POLIMERO. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 1(13), 106-116. Recuperado el septiembre de 2019</p> <p>Guilénrez, A., Mora J., & Pérez, S. (agosto de 2009). Desarrollo de una estrategia de mantenimiento basada en técnicas no destructivas en una línea de transmisión de 115KV. Soporte técnico, 2(43), 11-16. doi:http://dx.doi.org/10.22517/23447214.2571</p>
¿Cuál la mejor combinación de técnicas para la adecuada conservación de aisladores de polímero de una línea de transmisión de 69KV?	<p>La metodología a utilizar para la estructuración de una estrategia de mantenimiento en líneas de transmisión debe de contemplar todos los elementos que la conforman, poniendo especial cuidado al aislamiento que es uno de los elementos más críticos (Guilénrez, Mora J., & Pérez, 2009). Se aporta de manera práctica al trabajo ya que se muestra el estado de los aisladores. En la investigación se define la metodología para la evaluación de las tareas de mantenimiento en aisladores en base a las funciones principales de estos elementos. Como resultado se obtienen una serie de tareas para implementar tomando en cuenta el análisis de las fallas y sus efectos.</p> <p>Según Fuentes (2019) el uso de herramientas de ingeniería del mantenimiento como indicadores de operación, criticidad de equipos e historial de fallas, entre otros es necesario para smetizar y sistematizar un adecuado y eficiente modelo de mantenimiento, tal y como se describe en su trabajo. El aporte metodológico del trabajo es el uso de herramientas de ingeniería del mantenimiento para describir el concepto funcional en un historial de mantenimiento. La metodología utilizada fue enlistar y categorizar los elementos objeto de investigación, seguido de describir las partes y las fallas que más les afectan, así como el detalle del historial del mantenimiento usado u las causas que dieron origen a estas tareas; la tercera fase consiste en la implementación de indicadores que mejoran la confiabilidad del sistema y por último, con base en los resultados del análisis anterior, plantear el conjunto de tareas de mantenimiento más factible. El resultado que el trabajo presenta es un modelo de plan de mantenimiento sistematizado con el que se garantiza un alto índice de disponibilidad.</p> <p>Fuentes, E. (2019). Sistematización del modelo de mantenimiento de una planta de corte y doble, con enfoque en indicadores de disponibilidad con base a la herramienta de mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC). (Tesis de Fin de Máster). Universidad de San Carlos de Guatemala, Maestría en Ingeniería de Mantenimiento. Ciudad de Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado el Septiembre de 2019, de http://www.repositorio.usac.edu.gt/handle/prim/10917</p>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Listado de ensayos no destructivos**

Núm.	Ensayo no destructivo	Ventajas	Desventajas	Variables medidas
1				
2				
3				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Listado de fallas en líneas de transmisión**

Núm.	Línea de transmisión	Tipo de falla	MTBF	MTTR	Disponibilidad
1					
2					
3					

Fuente: elaboración propia.

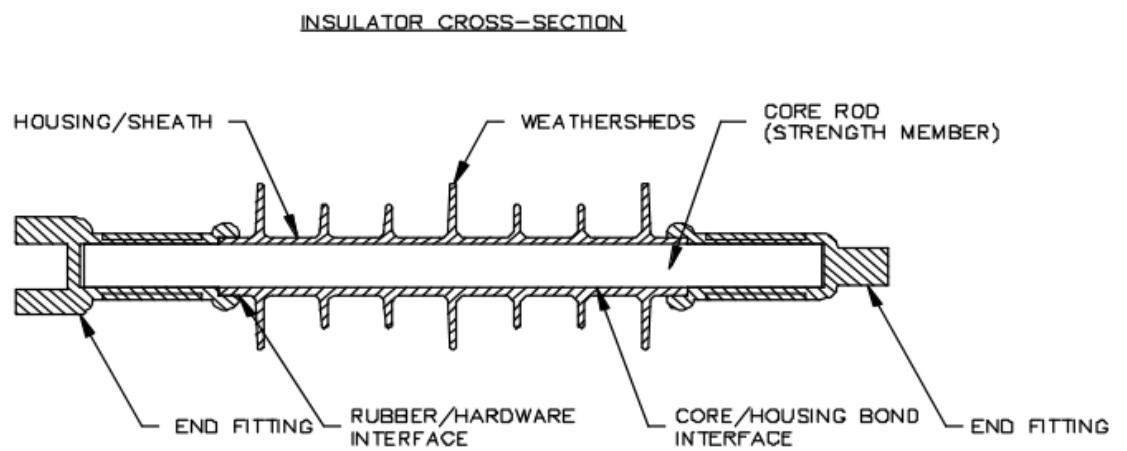
Apéndice 5. **Modelo de plan de mantenimiento**

Núm.	Línea de transmisión	Técnica	Inicio	Final	Observaciones
1					
2					
3					

Fuente: elaboración propia.

15. ANEXOS

Anexo 1. Composición interna de un aislador



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