



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA REALIZAR LA
INSPECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS CON UNA RED DE DRONES
AUTOMATIZADA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 KV DEL TRAMO 3, PROYECTO
SIEPAC**

Ing. Edy Ottoniel Aguilar Rivas

Asesorado por Mtro. Ing. Edwin Mariano Cornejo Cotí

Guatemala, mayo 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA REALIZAR LA
INSPECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS CON UNA RED DE DRONES
AUTOMATIZADA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 KV DEL TRAMO 3, PROYECTO
SIEPAC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. EDY OTTONIEL AGUILAR RIVAS
ASESORADO POR MTRO. ING. EDWIN MARIANO CORNEJO COTÍ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. César Augusto Castillo Morales
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Rene Roberto Castellanos Moreira
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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

LNG.DECANATO.OI.460.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA REALIZAR LA INSPECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS CON UNA RED DE DRONES AUTOMATIZADA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 KV DEL TRAMO 3, PROYECTO SIEPAC**, presentado por: **Ing. Edy Ottoniel Aguilar Rivas**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente 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, mayo de 2023
AACE/gaoc



Guatemala, mayo de 2023

LNG.EEP.OI.460.2023

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:

**“VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA REALIZAR LA
INSPECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS CON UNA RED DE DRONES
AUTOMATIZADA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 KV DEL TRAMO 3, PROYECTO**

SIEPAC”

presentado por **Ing. Edy Ottoniel Aguilar Rivas**
correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y
ambiente**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Edm
Mtro. Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí
Director

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





Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA REALIZAR LA INSPECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS CON UNA RED DE DRONES AUTOMATIZADA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 KV DEL TRAMO 3, PROYECTO SIEPAC** del estudiante **Edy Ottoniel Aguilar Rivas** quien se identifica con número de carné **100015986** del programa de Maestría En Energía Y Ambiente .

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.



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestría En Energía Y Ambiente
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: "**VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA REALIZAR LA INSPECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS CON UNA RED DE DRONES AUTOMATIZADA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 KV DEL TRAMO 3, PROYECTO SIEPAC**" del estudiante **Edy Ottoniel Aguilar Rivas** del programa de **Maestría en Energía y Ambiente** identificado(a) con número de carné 100015986.

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


Edwin Mariano Cornejo Coti
Ingeniero Electricista
No. Colegiado 8180

Mtro. Ing. Edwin Mariano Cornejo Coti

Colegiado No. 8180

Asesor de Tesis

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:

**VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍA PARA REALIZAR LA
INSPECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS CON UNA RED DE DRONES
AUTOMATIZADA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN 230 KV DEL TRAMO 3, PROYECTO
SIEPAC**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería de Estudios de Postgrado, con fecha 20 de junio de 2022.



Ing. Edy Ottoniel Aguilar Rivas

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por la vida y su fortaleza para la culminación de mis metas.
Mi madre	Cristina Rivas, por su amor y cariño y hacer de mí una persona con aspiraciones y metas.
Mi padre	Por sus consejos y guiarme en la vida para perseguir metas a través de la educación (q. e. p. d.).
Mi esposa	Por estar conmigo en todos mis logros y alentarme para que juntos seamos ejemplo para nuestros hijos.
Mis hijos	Por ser mi fortaleza y vitalidad para hacer las cosas necesarias para salir adelante.
Mis hermanos	Que me animan para culminar cada propósito que me he trazado.
Mis sobrinos	Que mis pasos sean un ejemplo para sus vidas.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me permitió formarme a nivel superior y dar la oportunidad de seguir creciendo académicamente.
Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería	Por abrir nuevos programas de formación y permitir alcanzar un grado académico más.
Empresa Propietaria de la Red	Por ser parte de su recurso humano y permitir desarrollar esta investigación en uno de sus tramos de línea.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
1.1. Aspectos generales	1
1.2. Antecedente del área de estudio	1
1.3. Localización del área o lugar en estudio.....	7
1.4. Ubicación de área en estudio	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Inspección de líneas de transmisión.....	9
2.2. Tipos de inspección.....	10
2.2.1. Pedestre	10
2.2.2. Aéreas	11
2.3. Elementos de línea de transmisión.....	11
2.3.1. Estructura	12
2.3.2. Conductor	13
2.3.3. Herrajes	13
2.3.4. Servidumbre	14

2.4.	Mantenimiento.....	15
2.4.1.	Concepto.....	15
2.4.2.	Tipos	15
2.4.2.1.	Preventivo	15
2.4.2.2.	Correctivo.....	16
2.5.	Fallas en línea de transmisión.....	17
2.5.1.	Definición.....	17
2.5.2.	Tipos de fallas	18
2.5.3.	Métodos de localización de fallas.....	19
2.5.4.	Causas de fallas en líneas de transmisión	20
2.6.	Drones.....	21
2.6.1.	Definición.....	21
2.6.2.	Usos	21
2.6.3.	Clasificación	23
2.6.4.	Tipos o formas de vuelo	25
2.6.5.	Características actuales	26
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	37
3.1.	Variables	37
3.2.	Fase 1. Recopilación de la información.....	38
3.3.	Fase 2. Procesamiento de la Información.....	39
3.4.	Fase 3. Análisis y comparación de la información	46
3.5.	Fase 4. Análisis de la tecnología a incorporar.....	48
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
4.1.	Mantenimiento predictivo rutinario	51
4.1.1.	De forma pedestre.....	51
4.1.2.	Usando dron.....	61

4.1.3. Análisis de uso de drones para mantenimientos predictivos.....	80
4.2. Localizar mantenimientos correctivos.....	85
4.2.1. Localización de falla por inspección pedestre.....	85
4.2.2. Localización de falla por inspección con dron.....	88
4.2.3. Análisis de uso de drones para mantenimientos correctivo	91
4.3. Recolección data en inspección y localización de fallas.....	92
4.3.1. Análisis de las ventajas de transmisión de data en corto tiempo para inspección y localización de fallas	98
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS	105
APÉNDICES	109
ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Localización de área en estudio.....	7
2.	Ubicación de área en estudio.....	8
3.	Elementos de una línea de transmisión	12
4.	Hallazgos relacionados a Brecha.....	52
5.	Tipo de vegetación existente en el vano a menos de 10 m.....	53
6.	Tipo de vegetación existente en el vano a más de 10 m.....	54
7.	Daños en aisladores de cadenas de remate detectados.....	55
8.	Daños detectados en inspección para conductores.....	56
9.	Daños detectados en inspección para puesta a tierra.....	56
10.	Daños detectados en inspección para obra civil	57
11.	Tipo de protección recomendada para sitio de torre y pila.....	57
12.	Daños detectados en inspección para estructura	58
13.	Vista para información de inspección de brecha en un segmento de la línea.....	62
14.	Grado de detalle en inspección de brecha en un segmento de la línea	63
15.	Vista para información de brecha en sitio de torre y tipo de vegetación.....	64
16.	Vista para información de brecha debajo de la línea y cortes a 45 ° de árboles	65
17.	Vista para información de construcciones y tipo de vegetación bajo la línea.....	66
18.	Cadena de suspensión para información de inspección	67

19.	Grado de detalle en inspección de cadenas de suspensión	68
20.	Vista para información de inspección de cadena de remate.....	69
21.	Vista de grado de detalle en inspección de cadena de remate.....	70
22.	Vista para información de inspección de conductor de guarda.....	71
23.	Vista para información de inspección de conductor OPGW	72
24.	Vista para información de inspección de conductor.....	73
25.	Inspección de conductores vista sobre ellos.....	74
26.	Inspección de conductores vista perpendicular a ellos.....	74
27.	Vista para información de inspección de obra civil	75
28.	Grado de detalle en inspección de obra civil	76
29.	Vista para información de inspección de estructura.....	77
30.	Grado de detalle en inspección de estructura.....	78
31.	Hallazgo en estructura, contaminación por nido de aves.....	79
32.	Hallazgo en cadena de aislador en suspensión, daño por descarga electro atmosférica.....	80
33.	Ejemplo de imágenes en informe de inspección pedestre.....	81
34.	Características ópticas del dron DJI M30	94
35.	Capacidad de redundancia para dron DJI M30	94
36.	Componentes de base o muelle DJI Dock.....	96
37.	Paquete de base DJI Dock del M30 o M30T	96

TABLAS

I.	Técnicas de investigación utilizadas	XXIV
II.	Usos potenciales de los drones de carácter civil	22
III.	Clasificación de los drones atendiendo a sus capacidades de vuelo....	24
IV.	Características de dron DJI serie 30, generales	26
V.	Características de dron DJI serie 30, comunicación.....	29
VI.	Características de dron DJI serie 30, ópticas	31

VII.	Características de dron DJI serie 30, navegación.....	33
VIII.	Características de dron DJI serie 30, estación de batería inteligente BS3	35
IX.	Variables en estudio.....	37
X.	Estadística año 2019, aperturas de la líneas por tipo	40
XI.	Tiempos y causas de aperturas año 2019	40
XII.	Información recolectada para inspección de brecha	43
XIII.	Información recolectada para cadenas de aisladores, conductores y amortiguadores	43
XIV.	Información recolectada para cajas de OPGW	45
XV.	Sistema de puesta a tierra y obra civil.....	45
XVI.	Información recolectada para estructura	46
XVII.	Recursos propios en mantenimiento predictivo.....	51
XVIII.	Resumen de hallazgos mediante inspección aérea	59
XIX.	Tiempos usados para inspección de una torre.....	83
XX.	Indicadores de tiempos de inspección de torres	83
XXI.	Resultados de inspección pedestre para localización de falla	86
XXII.	Resumen en video recabado en inspección con dron.....	89
XXIII.	Versión de base de la serie Matrice 30	95
XXIV.	Beneficios que ofrece <i>software flighthub 2</i>	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
GHz	Giga Hertz
°	Grados
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
G	Gramo
km	Kilómetro
m	Metro
m/s	Metro por segundo
mAh	Miliamperio hora
mm	Milímetro
mW	Mili watts
nm	Nanómetro
ppm	Parte por millón

X

GLOSARIO

Autónomo	Es un vehículo capaz de imitar las capacidades humanas de manejo y control. Perciben el entorno mediante técnicas complejas como láser, radar, lidar, sistema de posicionamiento global y visión computarizada, los sistemas avanzados de control interpretan la información para identificar la ruta apropiada.
Correctivo	Se trata de un conjunto de tareas técnicas, destinadas a corregir las fallas del equipo que demuestren la necesidad de reparación o reemplazos. corrige los errores del equipo que dependen de la intervención para volver a su función inicial.
Dron	Es un vehículo aéreo que vuela sin tripulación. Su nombre se deriva del inglés drone, que en español significa abeja macho, utilizado en el ámbito militar (para reconocimiento táctico desde gran altura, vigilancia del campo de batalla o guerra electrónica) y civil (vigilancia de manifestaciones, control de la contaminación y de incendios forestales, entre otros).
EPR	Empresa Propietaria de la Red, es un consorcio público-privado creado para construir y operar el Sistema de Interconexión Eléctrica de los Países de

América Central (SIEPAC) de 230 Kv, que conecta las redes nacionales de Panamá, Costa Rica, Honduras, Nicaragua, El Salvador y Guatemala.

IEEE

I-Triple E, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), corresponden a una de las mayores asociaciones del mundo en el campo de la ciencia y la ingeniería. Hace ya unos años tenía cerca de medio millón de miembros, englobando a los profesionales del campo de la electrónica, telecomunicaciones e informática de todo el mundo, si bien tiene su sede en EE.UU.

Inspección

Hace referencia a la acción y efecto de inspeccionar (examinar, investigar, revisar), se trata de una exploración física que se realiza principalmente a través de la vista. El objetivo de una inspección es hallar características físicas significativas para determinar cuáles son normales y distinguirlas de aquellas características anormales.

NOTAM

Aviso a Navegantes (*notice to airmen*). Son avisos distribuidos por medio de telecomunicaciones que informan sobre el establecimiento, condición o modificación de cualquier instalación aeronáutica, servicio, procedimiento o peligro. También informan sobre alertas meteorológicas y avisos sobre zonas

reservadas que no pueden ser penetradas por aeronaves.

Predictivo

Son una serie de acciones que se toman, y técnicas que se aplican, con el objetivo de detectar posibles fallos y defectos de maquinaria en las etapas incipientes, para evitar que estos fallos se manifiesten en uno más grande durante su funcionamiento, evitando que ocasionen paros de emergencia y tiempos muertos, causando impacto financiero negativo.

SIEPAC

Sistema de Interconexión Eléctrica para Países de América Central, es una interconexión de las redes eléctricas de seis países de América Central.

Torre

Es una estructura alta de acero, que se usa para sostener una línea eléctrica aérea. En las redes eléctricas, se utilizan para transportar energía eléctrica a través de líneas de transmisión de alto voltaje desde las centrales generadoras hasta las subestaciones eléctricas.

UAV

Un vehículo aéreo no tripulado, comúnmente conocido como un avión no tripulado y al que se conoce como aeronave pilotada remotas por la Organización de Aviación Civil Internacional, es un avión sin un piloto humano a bordo. Su vuelo es controlado de forma autónoma por computadoras de a bordo o por el

mando a distancia de un piloto en tierra o en otro vehículo.

Vialidad

Es la probabilidad de que se pueda llevar a cabo con éxito. Por tanto, ofrece información sobre si se puede o no llevar a cabo. Así, si es viable, significa que tiene muchas posibilidades de salir adelante.

ZOOM

Objetivo de distancia focal variable, que mantiene enfocada la imagen al variar la distancia focal. Efecto de acercamiento o alejamiento de la imagen obtenido mediante este objetivo.

RESUMEN

En el mundo moderno la interrupción del fluido eléctrico, nos indica la importancia que tiene el uso de la electricidad, ante la aparición de una falla que interrumpa ese suministro se generaliza toda la actividad económica y social paralizada. Los vehículos aéreos no tripulados con el crecimiento en su tecnología y desarrollo brindan una alternativa de su uso en la detección de esas fallas o la localización de estas cuando ellas ocurren.

La investigación contó como objetivo general determinar la viabilidad de la incorporación de tecnología para realizar la inspección y localización de fallas mediante drones automatizados para una línea de transmisión 230 KV. El propósito de la investigación es establecer si la tecnología actual tiene la capacidad para realizar estas tareas y así promover su incorporación como casos de innovación y modernización aunada a otra serie de ventajas que ofrece el uso de drones.

Para el efecto se contó con una revisión y análisis de inspecciones rutinarias realizada mediante el método convencional y con el uso de drones, de igual forma se analizó un caso en particular de una localización de falla real usando ambos métodos, para con ello determinar la posibilidad de su incorporación para estas tareas en el sector eléctrico. Por último, se hizo una revisión de la tecnología actual en drones, para determinar las múltiples ventajas con que ya se cuentan en uso y disponibles en el mercado.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general

En la actualidad las inspecciones y localizaciones de fallas en líneas de transmisión de 230 KV, que por criterios de diseño están montadas en torres de celosía de alturas promedio de 25 metros y alejadas de poblados y que van por topografías difíciles se acceden con métodos tradicionales, evidencian la necesidad de incorporar tecnología actual para contribuir a la mejora de estas prácticas de inspección, dado que las prácticas tradicionales son las que han generado resultados aceptables, es posible mejorarlas y adaptarlas a las condiciones tecnológicas actuales.

- Descripción general del problema

Para la inspección y revisión de líneas eléctricas de transmisión que se instalan en torres que se encuentran en terrenos montañosos y en ocasiones con poco acceso, se emplean personas para llegar hasta la ubicación con el objetivo de realizar inspecciones rutinarias y en otras ocasiones para localizar fallas ocurridas. Por lo que se hace necesario plantear la viabilidad de usar tecnología como los drones para realizar las actividades descritas.

- Definición del problema

No se ha establecido la viabilidad de incorporar tecnología de drones para realizar la Inspección y localización de fallas de la línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC.

- Problemas específicos

No se ha determinado qué tan factible es usar una red de drones automatizada para mantenimientos predictivos rutinarios de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC.

No se ha determinado cuáles serían los beneficios de localizar mantenimientos correctivos mediante una Red de drones automatizada de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC.

No se han estimado las ventajas de transmisión de data en corto tiempo para inspección y localización de fallas de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC.

- Pregunta principal de investigación

- ¿Existirá viabilidad de la incorporación de tecnología para realizar la Inspección y localización de fallas de la línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC, con una Red de drones automatizada?

- Preguntas complementarias de investigación

- ¿Qué tan factible es usar una red de drones automatizada para mantenimientos predictivos rutinarios de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC?

- ¿Cuáles serían los beneficios de localizar mantenimientos correctivos mediante una red de drones automatizada de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC?
- ¿Se han estimado las ventajas de transmisión de data en corto tiempo para Inspección y localización de fallas de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC?

OBJETIVOS

General

Determinar la viabilidad de la incorporación de tecnología para realizar la inspección y localización de fallas con una red de drones automatizada de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC.

Específicos

1. Realizar el análisis para usar una red de drones automatizada para mantenimiento predictivo rutinario de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC.
2. Definir los beneficios de localizar mantenimientos correctivos mediante una red de drones automatizada de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC.
3. Conocer las ventajas de transmisión de data en corto tiempo para inspección y localización de fallas de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación fue desarrollada bajo un enfoque mixto dado que los datos adquiridos de las variables se analizaron bajo un enfoque cuantitativo y las conclusiones de la investigación se hicieron bajo un enfoque cualitativo.

Las variables estudiadas durante el proceso de esta investigación fueron: mantenimiento predictivo, localización de fallas y obtención de data, con el fin de obtener resultados para el análisis de la investigación.

Comprendiendo los informes de inspección y fallas de las torres del tramo 3 del proyecto SIEPAC, dentro del cual se midieron diferentes factores como lo son las fallas detectadas, el tipo de falla y el tiempo en realizar los trabajos, así como el registro de estos.

El estudio tiene las características de tipo descriptivo debido a que la incorporación de tecnología actual para tareas de inspección y localización de fallas en líneas de transmisión como parte medular de la presente investigación, requiere que se deba utilizar un método mediante análisis y con ello conseguir una situación concreta que determine si es viable o no el uso de la tecnología en estas actividades.

Se realizó un diseño de investigación no experimental transversal, debido a que no se realizaron experimentos u otro tipo de pruebas, la información utilizada y analizada comprende un periodo de año calendario en actividades de

operación y mantenimiento para el tramo de línea en estudio, se eligió el año más reciente y típico debido a la pandemia vivida, siendo el año analizado el 2019.

Con el uso de tabulación sencilla se cuantificó los valores necesarios a procesar conforme a las variables.

Tabla I. Técnicas de investigación utilizadas

Objetivos	Técnica de investigación
Realizar el análisis para usar una Red de drones automatizada para mantenimiento predictivo rutinario de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC	Tabulación de información generada de forma pedestre en inspección de sitios de torre para resaltar el tipo de información recolectada que evidencien daños, anomalías o deterioros de algún elemento para programar mejoras, cambios o reparaciones.
Definir los beneficios de localizar mantenimientos correctivos mediante una Red de drones automatizada de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC	Mediante un evento de falla ocurrido en la línea y periodo de estudio comparar los resultados generados de localización de falla y su causa, realizada mediante la actividad actual y con uso de drones que también se realizó y sacar conclusiones de esa comparación mencionado los aspectos que intervienen en cada forma de realizarlo.
Conocer las ventajas de transmisión de data en corto tiempo para Inspección y localización de fallas de línea de transmisión 230 KV del tramo 3, proyecto SIEPAC	Con la tecnología más reciente y con características de alta gama al momento de la investigación analizar las características de drones existentes para resaltar el provecho de transmisión de la información recolectada.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Las técnicas de análisis de la información utilizadas fueron: el método analítico, método de observación, método comparativo, promedio, proporcionalidad.

La técnica de recolección de datos comparó el tipo de mantenimiento y el tiempo de ejecución que lleva cada uno, así como los registros que cada uno genera, para ello se utilizó diferentes metodologías, análisis de Pareto para algunos datos y comparación de otros.

En lo que concierne a los instrumentos de la recolección de los datos se utilizó una guía de observación para identificar la información adquirida (reportes) de inspecciones y fallas de una forma ordenada y del cual se obtuvo la información necesaria como: detecciones de fallos, tiempos y otros datos relevantes, en resumen se elaboraron fichas de trabajo bibliográfico que permitieron la ordenación lógica de las ideas y sintetizar la información fundamental para el desarrollo de la investigación.

Con la información se realizaron tablas dinámicas, gráficos dinámicos los cuales ayudaron a presentar la información de una forma sencilla y entendible para su comparación y sacar conclusiones.

La investigación contempló cuatro fases siendo ellas: la fase 1, recopilación de la información, donde se recolectó toda la información histórica de inspecciones y localizaciones de fallas existentes para el año 2019.

La fase 2, procesamiento de la información: toda la información recolectada se procesó a modo de obtener información de las variables, misma que fue tabulada para su mejor comprensión y utilización en la posterior fase.

La fase 3, análisis y comparación de la información, procedió a analizar la información histórica y a comparar con algunas inspecciones y localizaciones de fallas realizadas con la tecnología que se pretende incorporar lo cual es el objetivo principal de la investigación.

Para culminar se desarrolló la fase 4, análisis de tecnología a incorporar, se procedió a realizar un análisis y comparación técnica de la tecnología actual de drones, un pequeño análisis sobre ventajas y desventajas, revisión de costos y otros aspectos técnicos.

INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión de energía eléctrica son un elemento primordial dentro de un sistema eléctrico, el cual se traduce en esencial para la sociedad por ser la forma de energía más utilizada hoy en día en los hogares y la industria, su transporte se debe realizar de grandes distancias a los centros de consumo por lo que el medio para este transporte tiene una gran importancia en el tema de disponibilidad y continuidad del servicio.

Para garantizar la disponibilidad del servicio se debe mantener ininterrumpido el suministro de la energía, por lo que se hace indispensable la constante inspección y mantenimiento de este activo para evitar interrupciones.

Estas actividades o acciones de garantizar el servicio se traducen en mantenimientos predictivo y correctivos mediante inspecciones para sus detecciones y localización cuando ocurren averías inesperadas, dichas acciones de inspección y localización son realizadas desde el inicio de estos sistemas de forma tradicional mediante personal que debe acudir hasta los sitios de torre lo que se traduce en tiempos largos y riesgos para el personal.

Con base al constante crecimiento y actualización de la tecnología en todas las ramas de la industria se ve la necesidad de ver la viabilidad de la incorporación de tecnología para realizar inspecciones y localización de fallas en líneas de transmisión, esta actualización o innovación surge de ver la tecnología actual y replicar modernización como lo son en la generación, en las protecciones de los sistemas, monitoreo y otros dentro de un sistema eléctrico.

En este trabajo de investigación uno de los principales objetivos es darle solución al problema que se plantea, es importante conocer la viabilidad de la incorporación de tecnología para realizar la Inspección y localización de fallas con una red de drones automatizada de una línea de transmisión.

Los beneficios esperados se verán reflejados en las políticas de innovación y mejoras de actividades de mantenimiento dentro del personal operativo de la empresa dado que la recolección de información ayuda a una eficiente programación y planeación de actividades de mantenimiento, adicional tendrá un aporte a las empresas de transporte de energía eléctrica.

Se pretende estimar indicadores importantes mediante la realización de mantenimientos predictivos y localización de fallas para mantenimientos correctivos mediante información históricas, tales indicadores serían tiempos, información recolectada, calidad de esa información recolectada, riesgos y otros relevantes.

La investigación está compuesta por cuatro capítulos el primero por información general relacionado al elemento y área del estudio. El segundo capítulo presenta el sustento teórico. El tercer capítulo el desarrollo de la investigación para la inspección y localización de falla en ambas formas, para luego en el capítulo cuatro se muestra los resultados de la investigación aunado a un análisis de los resultados obtenidos de determinar la viabilidad de incorporación de tecnología para realizar inspecciones y localizaciones de fallas con drones.

1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Aspectos generales

Se pretenden resaltar las investigaciones previas realizadas concernientes al área de estudio que se abordó, y se describen las experiencias más relevantes en su mayoría a nivel internacional y pocas a nivel nacional, donde se han realizado inspecciones con drones a instalaciones de transporte de energía eléctrica, así como a otros tipos de infraestructuras.

1.2. Antecedente del área de estudio

De acuerdo con las publicaciones realizadas a nivel internacional se destacan artículos de uno de los entes de mayor relevancia en el ámbito eléctrico como lo es el Institute of Electrical and Electronics Engineers por sus siglas en inglés (IEEE).

Las publicaciones resaltan datos como que la tasa de crecimiento anual global de la longitud de líneas eléctricas de transmisión para el 2020 sería del 3 %, lo que conlleva a buscar alternativas para la inspección de las líneas eléctricas, que permitan detectar rápidamente una serie de defectos, como daños en las líneas. Adicional mencionan que la inspección de líneas eléctricas mediante el uso de drones ya se ha estudiado recientemente orientados a determinar el algoritmo para obtener una ruta de inspección de la línea que soporta la longitud más corta en conjunto con un sistema de control de altitud para la inspección visual (Zhou *et. al.*, 2018).

Los trabajos mencionados en los artículos se centran en cómo utilizar los drones para realizar un sistema de detección de líneas eléctricas, pero no han tenido en cuenta el consumo de energía de estos y los problemas de asignación de recursos de comunicación.

En Costa Rica se destaca una publicación reciente en la revista *Tecnología en Marcha* de la cual se destacan aspectos muy importantes en el uso de drones para inspección de líneas de transmisión, se describe a continuación.

Meza-Mora *et. al.* (2021) ha afirmado lo siguiente:

A lo largo de nuestras inspecciones comprobamos que no solo es más seguro, al no tener que escalar la torre, también requiere menos tiempo que con cualquier otro método, sin dejar de lado la gran ventaja que nos brindan los drones con su versatilidad, ya que permiten inspeccionar líneas de difícil acceso, poder acercarnos sin alterar la estabilidad del cable ni cortando la energía eléctrica. También las nuevas funcionalidades brindan la oportunidad de en ciertos segmentos realizar algunas de las operaciones de toma semiautomáticas, lo que agiliza aún más el trabajo y permite que elementos de infraestructura que pueda ser crítico estas monitoreando sean realizados de manera más periódica, además la integración de otros sensores como LiDAR de nueva generación para los drones brindan la oportunidad de realizar una segunda labor a la vez que se realiza la principal de inspección. (p. 69)

Según los resultados y discusiones, así como las conclusiones que se explican en la cita anterior, se puede concluir que el estudio realizado por Meza-Mora *et. al.* (2021), lo más importante es resaltar que en la actualidad ya se están

usando drones para la inspección de líneas eléctricas de transmisión con resultados satisfactorios, indicando que, utilizando lentes de zoom óptico, cámaras termográficas, se puede obtener la información necesaria sin necesidad de cortar la electricidad y realizar las inspecciones necesarias.

La finalidad de la utilización de drones es incrementar la eficiencia en las labores de mantenimiento y alcanzar una mayor confiabilidad en el sistema de transmisión de energía eléctrica, los resultados entregan información de inspección torre por torre con la línea energizada, adicional persiguen la eficiencia del proceso y de la utilización misma de los datos en procesos inteligentes dentro de las mismas organizaciones.

Dentro de las publicaciones más destacadas a nivel internacional están los artículos de la asociación técnico-profesional dedicada a la estandarización, en la rama eléctrica y electrónicas IEEE ya mencionada, siendo una de su principal función promover la creatividad para el beneficio de la humanidad a través del desarrollo y la integración, mediante la aplicación de los avances en las tecnologías de la información, electrónica y ciencias en general.

Para Jenssen *et. al.* (2019):

Para prevenir los cortes de energía, las compañías eléctricas realizan regularmente inspecciones visuales de sus redes eléctricas para planificar los trabajos de reparación o sustitución necesarios. Estas inspecciones se han llevado a cabo normalmente con métodos tradicionales, como el patrullaje a pie y los estudios asistidos por helicóptero, que suelen ser lentos, caros y potencialmente peligrosos. En los últimos años, muchos investigadores han tratado de desarrollar métodos rápidos y precisos para la inspección automática y autónoma de líneas eléctricas. Por desgracia,

hasta donde sabemos, no se ha desarrollado ningún sistema de inspección de líneas eléctricas autónomo y completamente automático.

Basándonos en ello, propusimos un novedoso concepto de inspección de líneas eléctricas autónomo basado en la visión, que utiliza la inspección con vehículos aéreos no tripulados (UAV) como principal método de inspección, las imágenes ópticas como principal fuente de datos y el aprendizaje profundo como columna vertebral del análisis de datos. (p. 11)

Según lo relatado en el artículo de la revista *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, los profesionales Jenssen *et. al.* (2019), indicaron que los métodos tradicionales de inspección de líneas de transmisión eléctricas no necesariamente son los más económicos y los más seguros. Que los mantenimientos de mejoras que garantizan la continuidad del suministro eléctrico van siempre acompañados de detecciones realizadas mediante la observación de los elementos.

Resaltan también que lo novedoso en el sector eléctrico en la actualidad está basado en dos aspectos, el primero un concepto de inspección de forma autónoma la segunda que el resultado de esas inspecciones se traduce en imágenes ópticas que es el elemento esencial para aprendizaje de la parte autónoma y una generación de datos para su respectivo análisis.

El trabajo de Castillejo (2019), es un documento importante que trata del diseño e implementación de un sistema para la gestión de una flota de drones para la inspección, pero enfocado en la actividad para la cual se ha explotado más como lo son plantas fotovoltaicas.

Según Castillejo (2019):

La automatización de determinadas actividades de monitorización está pensada como un elemento esencial para ser competitivos en este mercado. Muchos de los procedimientos manuales y dispersivos que se aplican hoy en día, pronto serán superados por procedimientos centrados en los UAVs. Esto es particularmente cierto en lo que respecta a la inspección de las centrales fotovoltaicas.

Recientemente, se han usado vehículos aéreos no tripulados equipados con imágenes térmicas/visuales para la identificación de puntos calientes anormales en los módulos fotovoltaicos. La ventaja de utilizar un sistema de este tipo se deriva de su eficacia en la detección de fallos y el diagnóstico de módulos fotovoltaicos para la inspección de plantas a gran escala. (p. 15)

En la cita anterior, por el profesional Alejandro Castillejo Calle del año 2019 se puede concluir que el principal enfoque de modernizar los procesos de inspección en centrales eléctricas tiene la finalidad de ser competitivos y la visión a futuro es que muchos procedimientos que hoy se realizan en un tiempo dejarán de ser tanto eficientes como económicamente rentables impulsando a las empresas en un mediano plazo a empezar a inclinarse por estos métodos novedosos de mantenimiento.

En Guatemala las investigaciones relacionadas en el tema de drones son muy pocas hasta la fecha en términos generales en su uso en la industria y sobre el uso de incorporación para la parte de inspección de líneas de transmisión es mucho menos la información recopilada.

En la tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala del profesional Pablo Josué Orellana Rivas del año 2018 hace una de las primeras investigaciones a nivel nacional en la parte de uso de drones para temas de inspección a líneas de transmisión para el transportista más grande dentro del país

Como expresa Orellana (2018):

El uso de nuevas tecnologías podría facilitar el conocimiento del estado de equipos instalados en las líneas de transmisión. Con estos nuevos instrumentos el profesional conocerá detalles del estado de los equipos, debido a que el dron brinda una visión más amplia con que la que brindaría una persona que observa desde los puntos de referencia que tiene disponibles para realizar la evaluación.

A lo largo de la investigación se darán a conocer las pautas y los aspectos importantes que deben tomarse en cuenta al seleccionar el dron, relacionado con el tipo de inspección que se desea realizar. En el mercado existe una gran variedad de aeronaves no tripuladas que tienen diferentes funciones, y que pueden operarse bajo diferentes condiciones de vuelo, las cuales serán especificadas por cada fabricante. (p. 29)

Como cita Pablo Josué Orellana Rivas en el año 2018, la relevancia en el modelo elegido y las características de los drones es lo que hará que su implementación alcance los resultados esperados, un equipo con la última tecnología garantiza que no se está dejando nada en aprovechar de la capacidad que tiene de realizar inspecciones a elementos que conforman una línea de transmisión.

1.3. Localización del área o lugar en estudio

El área en estudio se encuentra ubicada en uno de los tramos de línea (3) del proyecto SIEPAC en Guatemala ubicado entre los departamentos de Zacapa y Chiquimula, actualmente se puede acceder desde la ciudad de Guatemala por las carreteras CA-10 norte y por CA-110.

En la figura se ilustran las líneas del proyecto SIEPAC contenidos en la región de Centro América y se hace énfasis las del territorio de Guatemala.

Figura 1. Localización de área en estudio



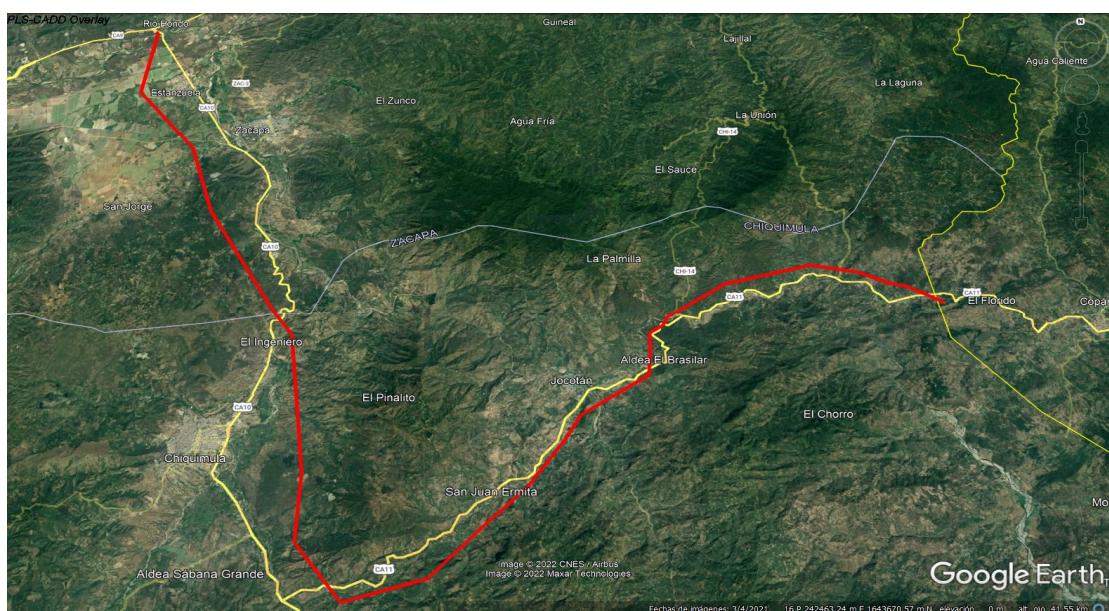
Fuente: EPR SIEPAC (2022). *Líneas SIEPAC*. Consultado el 20 de abril de 2022. Recuperado de <https://www.eprsiepac.com/contenido/aperturas/>.

1.4. Ubicación de área en estudio

El tramo de línea en estudio, se ubica su inicio en la subestación Panaluya en el municipio de Estanzuela Zacapa con coordenadas 15°02'11.34"N 89°35'26.75"W y culmina en la frontera El florido Honduras, en el municipio de Camotán Chiquimula con coordenadas 14°51'10.97N 89°13'21.86"W para su acceso dependiendo de la ubicación se puede realizar por las carreteras CA-10 y CA-11, que son paralelas en algunas partes.

Se ilustra la ruta de la línea de transmisión en color rojo desde su punto de inicio y punto final contemplada en la investigación, se puede observar los poblados y topografía por donde pasa, así como en las carreteras de acceso.

Figura 2. Ubicación de área en estudio



Fuente: Google Earth Pro (2022). Consultado el 12 de enero de 2022. Recuperado de Lansat/Copernicus 2020 INEGI.

2. MARCO TEÓRICO

El primer uso comercial de la energía eléctrica se inició alrededor de 1880, concretamente la corriente continua. Un poco más tarde, se inició la construcción de transformadores y alternadores que permitieron niveles de voltaje más altos. En 1884 se realizó el primer transporte monofásico a 18 kV destinado a alumbrado.

En 1891 en Alemania se transmitió por primera vez corriente trifásica desde una central hidroeléctrica. Dado que la demanda de electricidad históricamente ha ido en aumento, se han realizado muchos esfuerzos para lograr voltajes de transmisión más altos. Así en 1910 se alcanzaron los 150 kV y en 1922 se puso en servicio la primera línea a 245 kV. No es hasta 1952 cuando empleándose conductores en haz (más de un conductor por fase) se pudo alcanzar la tensión de 400 kV.

2.1. Inspección de líneas de transmisión

En términos generales es la actividad mediante la cual se realiza una revisión visual de los elementos que conforman la estructura de una torre de celosía, sus cimientos, herrajes y conductores así como la brecha (vegetación) por donde vuela los conductores, todo con la finalidad de encontrar daños o vandalismo, deterioro para determinar en los elementos y determinar si requieren darle una severidad para su atención mediante mejora o cambio con la única finalidad de mantener las líneas eléctricas sin indisponibilidades y minimizar interrupciones del fluido eléctrico para mantener la confiabilidad de la línea de transmisión.

2.2. Tipos de inspección

Según la forma en que se realice la actividad de la inspección de una línea de transmisión eléctrica, y según la metodología usada para el mantenimiento en la etapa de operación y mantenimiento se clasifican en dos tipos.

2.2.1. Pedestre

Como un fortalecimiento al lector de las acciones que se realizan en la actividad de inspección en una línea de transmisión, para la cual está enfocada la presente investigación, se cita el concepto de forma pedestre con la ayuda de un concepto textual.

Lemus (2013) define que:

Las inspecciones pedestres se llevan a cabo mediante caminatas a lo largo del tramo de línea en donde se realiza el mantenimiento, en estas caminatas se verifica el estado de los diferentes componentes de la línea en forma visual (a simple vista u otros medios visuales), para realizar dicha inspección, se debe de contar como mínimo con dos personas para cada tramo a inspeccionar. (p. 61)

La forma de inspección que se conceptualizó implica como mínimo el uso de dos personas para realizar esta actividad, cuyo fin primordial se centra en la observación de los elementos que conforman la infraestructura.

2.2.2. Aéreas

Continuando con una de las formas mencionadas de realizar una inspección a un activo de línea de transmisión de alta tensión, nuevamente se hace uso de la conceptualización de esta inspección.

Lemus (2013) define que:

Las inspecciones aéreas son realizadas por medio de transporte aéreo (helicóptero o avioneta), en las cuales se tienen los mismos principios que las inspecciones pedestres. La diferencia de este tipo de revisiones con respecto a las revisiones pedestres es el ángulo de visión, ya que el punto de inspección se encuentra por encima de los tramos a revisar y esto es una ayuda para cubrir puntos que no son cubiertos por las inspecciones pedestres. (p. 82)

Con estos conceptos se amplía el panorama de que son las actividades a desarrollarse, para las cuales están enfocadas la viabilidad de la incorporación de tecnología actual para realizar estas mismas actividades, pero de una forma más eficiente e innovadora.

2.3. Elementos de línea de transmisión

La finalidad en esta parte de la investigación es ilustrar al lector de forma resumida y a grandes rasgos de los elementos que conforman una línea de transmisión de transporte de energía eléctrica de nivel de tensión 230 KV.

Figura 3. **Elementos de una línea de transmisión**



Fuente: [Fotografía de Luis Madriles]. (Estanzuela, Zacapa. 2018). Colección particular.
Guatemala.

2.3.1. Estructura

En otras latitudes se les designa como apoyos, dado que en resumen esa es la acción principal que realizan como elemento de una línea de transmisión y los existen de muchos tipos, pero no es la finalidad hacer una clasificación de estos y en la investigación en desarrollo se refirió a una torre de acero galvanizado o celosía auto soportada.

Estos elementos están diseñados para soportar toda la línea (conductores y otros componentes) a la altura necesaria sobre el suelo. Están sometidos a diferentes esfuerzos debido al peso del material que soportan y a la acción del viento sobre ellos (ICAI, 2020).

En esta ocasión se aclara que se toma como parte de la estructura la cimentación que lo soporta al suelo dado que en otras clasificaciones se toma como un elemento más.

2.3.2. Conductor

Los conductores de las líneas aéreas de alta tensión están formados por hilos de acero que contribuyen a la resistencia mecánica, rodeados de hilos de aleación de aluminio, su función principal como elemento de una línea de transmisión es transportar la corriente eléctrica.

2.3.3. Herrajes

Por herrajes entendemos todas aquellas piezas metálicas que sirven de sujeción de las cadenas a la torre, a los aisladores y a los conductores. También incluyen los elementos de sujeción de los cables de tierra a la estructura del apoyo, así como diversos accesorios para los cables, como separadores, amortiguadores, manguitos de empalme, entre otros. (ICAI, 2020, p. 64)

Como ejemplo vamos a ver el desglose de una cadena común utilizada para soportar los conductores con la estructura.

- Grillete: normalmente se utilizan como primera pieza de enganche de la cadena a la torre.
- Anillo bolo con protección: se utilizan para conectar los aisladores tipo caperuza-vástago y están preparadas para acoplar el descargador.
- Descargador superior e inferior para alejar el arco eléctrico de la superficie de los aisladores.
- Rótula horquilla: se utilizan para conectar los aisladores tipo caperuza-vástago con yugos u otros herrajes asociados.
- Yugo: el yugo sirve para crear configuraciones de cadenas con doble fila de aisladores o varios conductores por fase.
- Horquilla pastilla: se utilizan para conectar yugos u otros herrajes con las grapas de suspensión.

2.3.4. Servidumbre

Por servidumbre se entiende a la parte que, a pesar de no ser un elemento activo de una línea de transmisión juega un papel tan importante dentro del conjunto de elementos que la conforman.

Se define como la franja de terreno sobre la cual se anclan las estructuras mediante la cimentación y por donde vuelan los conductores de esta, la parte importante en temas de inspección es la brecha que es la separación o libranza de los conductores con la vegetación del suelo.

2.4. Mantenimiento

A continuación, se desarrollará el concepto y tipos de mantenimientos.

2.4.1. Concepto

EPR (2020), define como mantenimiento como “conjunto de acciones y procedimientos encaminados a revisar y/o reparar un determinado equipo o instalación, para mantener o restaurar sus condiciones de operación, o para detectar, de manera preventiva, algún posible modo de falla” (p. 7).

2.4.2. Tipos

La clasificación de los tipos de mantenimiento está basada en el tipo de acción que se realiza, uno es para detectar fallas con antelación y el otro es para reparar fallas que ya ocurrieron.

2.4.2.1. Preventivo

León, (2018) resalta que “el mantenimiento predictivo en líneas eléctricas es un trabajo necesario pues este garantiza que los usuarios de energía eléctrica tengan un servicio de calidad” (p. 4).

Desde otra perspectiva el mantenimiento predictivo conlleva una periodicidad de su ejecución, sin embargo, los daños pueden ocurrir sin avisar y entre periodos de revisión por lo que el mantenimiento preventivo por sí solo no garantiza la confiabilidad del activo.

Araya, (2020) expresa que “el mantenimiento preventivo básico (MPB) consiste en un tipo de determinadas acciones destinadas a mantener un activo con una rutina y frecuencia determinada, enlistadas por una pauta a ejecutar por el mantenedor y que no necesariamente asegura confiabilidad” (p. 19).

En una línea de transmisión no se puede aplicar el lema de funcionar hasta fallar, por lo tanto, no se puede dejar de ejecutar ninguna acción preventiva sobre sus elementos y no se pueden dejar deliberadamente hasta que tengan una avería.

2.4.2.2. Correctivo

Se emplea el término de mantenimiento correctivo al que se efectúa cuando ya se ha producido una avería, consiste en sustituir o reparar los componentes que no funcionan correctamente para restituir el servicio eléctrico.

El mantenimiento correctivo es imprevisto, por lo tanto, implica, generalmente, la indisponibilidad no programada de una línea de transmisión, y supone con frecuencia gastos importantes no previstos.

Un aspecto muy importante en el mantenimiento correctivo es la investigación posterior al fallo, de tal forma que se estudien las causas que han podido originar el incidente. De esta investigación se pretende extraer conclusiones que en algunas ocasiones nos llevarán a modificar actividades de mantenimiento preventivo, inspecciones (ICAI, 2020).

Sustentado lo expuesto relacionado a la conceptualización de lo que implica el mantenimiento correctivo.

Araya, (2020)

Por otra parte, el mantenimiento contra falla (MCF), consiste en todo tipo de acciones destinadas a reparar después de ocurrida la falla, esto con motivo de reponer dicho activo físico. La realización de este tipo de mantenimiento se produce por la ocurrencia de fallas ocultas o fallas latentes, las que son difíciles de prever. (p. 19)

2.5. Fallas en línea de transmisión

Una línea de transmisión está formada por múltiples elementos y cada uno puede presentar deterioros, averías, vandalismo y una lista larga de problemas que se traducen en fallas en la línea.

2.5.1. Definición

El significado del término falla varía de acuerdo con su origen etimológico. Cuando la palabra proviene del latín falla, hace referencia a un defecto, falta o incumplimiento.

Se complementa explicado en el contexto de una línea de transmisión eléctrica, que es un estado anormal de uno de sus componentes que puede poner en riesgo la continuidad del suministro eléctrico por un periodo indeterminado dependiendo de la severidad.

Para fortalecer un poco más la definición se enmarcará las consecuencias de una falla en una línea de transmisión.

Correa (2016) indica que

Una falla en una línea de transmisión tiene un gran impacto sobre el sistema, ya que estas transportan grandes cantidades de energía hasta los centros de distribución, para luego suplir a los usuarios finales. Si ocurre una falla en una línea de transmisión, se produce la desconexión de grandes cargas, además de posibles sobrecargas en otras líneas.

Por lo anterior, se hace necesaria la implementación de herramientas que ayuden a disminuir los tiempos de estado de falla de las líneas de transmisión. La forma de actuar rápido ante estos eventos es conocer el punto de falla y repararlo. (p. 6)

2.5.2. Tipos de fallas

Se enlistan las fallas en una línea de transmisión o partes de ella donde se pueden presentar averías que pongan en riesgo la continuidad del servicio eléctrico.

- En cimentaciones de la torre
- En sistema de puesta a tierra
- En elementos estructurales de la torre
- En herrajes
- En hilos de guarda
- En conductor eléctrico
- En aisladores

Todos los enlistados según la severidad que presenten al momento de presentar una falla ponen en riesgo la continuidad del servicio de fluido eléctrico.

No está por demás presentar al lector una tipificación meramente eléctrica de los tipos de fallas cuando se involucra el conductor eléctrico.

- Fallas monofásicas a tierra
- Fallas bifásicas a tierra
- Fallas bifásicas
- Fallas trifásicas

2.5.3. Métodos de localización de fallas

Al referirnos a los métodos de localización de fallas se enmarca a fallas que involucren el conductor eléctrico y que estén inmersas corrientes y voltajes de falla que nos permiten aplicar los métodos a mencionar.

Huerta (2014) concluye que:

Los algoritmos de localización de fallas que utilizan información de un solo terminal de la línea de transmisión fallida tienen problemas de precisión debido a la presencia de resistencia de falla y al desconocimiento de la información del extremo opuesto de la línea de transmisión. (p. 53)

Cabe agregar que estos métodos se usan para determinar una distancia de uno o dos puntos de referencia al punto de la falla y al existir una falla no liberada se requiere inspeccionar o llegar al punto para evaluar y posterior reparar la falla.

- Método de reactancia
- Método de Takagi
- Método de onda viajera (onda portadora)

2.5.4. Causas de fallas en líneas de transmisión

Se detalla las causas más comunes que pueden generar una falla ya sea con indisponibilidad de la línea o no, dado que pueden existir innumerables causas pero que no son tan comunes.

Iniciamos enumerando las que ocurren desde la vegetación en la franja de servidumbre, que generalmente se traducen en una mala brecha que puede provocar fallas de libranza traducidas en fallas monofásicas a tierra.

Deslizamientos, inundaciones, fallas geológicas y erosiones en el terreno donde se encuentran las cimentaciones de la torre, que pueden traducirse en una caída de una estructura.

Deterioro, robo a pernos o piezas estructurales de torres que en un número considerable pueden debilitar la estructura y generar un colapso de la estructura.

Robo de material de sistema de puesta a tierra de las estructuras que generan un mal sistema de protección ante descargas electro atmosféricas, que generan fallas de salida de línea temporal por mal libramiento de una falla transitoria.

Fallas de aislamiento, por deterioro contaminación que pueden generar una falla de fase a tierra.

Por último, están fallas eléctricas de los conductores por puntos calientes, objetos extraños que tocan a los conductores, árboles sobre la línea por condiciones climáticas adversas y descargas electro atmosféricas.

2.6. Drones

Es de conocimiento general que los vehículos aéreos no tripulados como se le suele llamar a los drones surgieron de ámbito militar y posterior una vez liberado su uso en la parte civil su crecimiento en mejoras y aplicaciones no ha tenido límites.

2.6.1. Definición

En los años 90, el término más común para describir a estas aeronaves fue el de Vehículo Aéreo No Tripulado (más conocido por sus siglas en inglés UAV, *unmanned aerial vehicle* o UAS, *unmanned aerial system*). UAV el cual todavía es muy utilizado en el ámbito científico.

Para Department of Defense (2010):

Un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo a un operador humano utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, que puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga de pago letal o no. No se consideran UAV a los misiles balísticos o semi balísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería. (p. 113)

2.6.2. Usos

En los últimos años el desarrollo de drones se ha mejorado existiendo un sinfín de aplicaciones que van desde la recreación, uso en la industria y temas de ayuda y rescate, aunque para nadie es evidente que su mayor desempeño y

explotación empieza en la parte militar luego al liberarse la tecnología y el conocimiento se aplica en la parte civil.

Tabla II. Usos potenciales de los drones de carácter civil

Área	Aplicación
Agricultura de precisión	Aplicación de fertilizantes
	Ánalysis de estrés hídrico de las plantas
	Conteo de plantas
Cartografía	Levantamientos topográficos
	Modelos digitales de elevación
Filmografía	Cine
	Reportajes gráficos
Gestión de desastres	Huracanes
	Inundaciones
	Volcanes
	Naufragios
	Accidentes en zonas de difícil acceso
	Accidentes radiactivos
	Vertidos contaminantes
	Incendios forestales
Geología	Cartografía geológica
	Explotación minera
	Seguimiento de minas
Infraestructura	Inspección de líneas eléctricas
	Inspección de centrales térmicas
	Inspección de huertos solares

Continuación tabla II.

	Inspección de parques eólicos
	Inspección de oleoductos
	Inspección de gaseoductos
Obra civil	Inspección de carreteras, puentes y presas
	Seguimientos de obras
	Levantamientos topográficos de detalles
Paquetería	Transporte de paquetería
Telecomunicaciones	Enlace de comunicaciones
Tráfico	Control de autobuses y trenes
	Control de la contaminación
	Seguimiento del tráfico, accidentes

Fuente: Structuralia. (2020). *Introducción y normativa de los Drones*.

2.6.3. Clasificación

Para esta clasificación se parte del tipo de vuelo, aclaración necesaria de realizar dado que la clasificación se puede hacer desde distintas características, se recalca que en este apartado se realiza conforme al tipo de vuelo.

Tabla III. **Clasificación de los drones atendiendo a sus capacidades de vuelo**

Categoría	Acróni mo	Alcance (km)	Altitud de Vuelo (km)	Autonomía (horas)	Carga máxima en despegue (kg)	Tipo de aeronave
Micro	Micro	<10	250	1	<5	H, A, O
Mini	Mini	<0	150 a 300	<2	<30	H, A, O
Alcance cercano	CR	10 a 30	3,000	2 a 4	150	H, A, O
Alcance corto	SR	30 a 70	3,000	3 a 6	200	A, O
Alcance mediano	MR	70 a 200	5,000	6 a 10	1,250	A, O
Altitud baja	LADP	>250	50 a 9,000	0.5 a 1	350	A
Penetración profunda	MRE	>500	8,000	10 a 18	1,250	A, H
Autonomía media	LALE	>500	3,000	>24	<30	A
Autonomía Alta	MALE	>500	14,000	24 a 48	1,500	A, H
Altitud media	HALE	>2,000	20,000	24 a 48	12,000	A
Autonomía Alta	UCAV	1,500	10,000	2	10,000	H, A
Ofensivo	LETH	300	4,000	3 a 4	250	A
Señuelo	DEC	0 a 500	5,000	<4	250	A, H
Estratégico	STRAT	>2,000 O	20,000 a 30,000	>48	ND	A
Exo- estratosférico	EXO	ND	>30,000	ND	ND	A

Fuente: Structuralia. (2020). *Introducción y normativa de los Drones*.

Donde:

- H: se refiere a helicópteros
- A: se refiere a aeroplanos
- O: se refiere a otros
- ND: significa no disponible

La clasificación que se presenta en la siguiente tabla está extraída de AUVSI (*Association for Unmanned Vehicle Systems International*), esta clasificación abarca todas las aplicaciones de los drones, tanto civiles como militares (aunque estas últimas son en su mayoría).

2.6.4. Tipos o formas de vuelo

Para esta explicación se refiere a las diferentes modalidades de vuelo, según sean en interior o exterior; de ocio o comerciales o según el alcance visual del piloto. En este caso, es importante conocer el tipo de vuelo según el alcance visual del piloto. Según Martínez (2015), existen 3 tipos.

- Tipo uno: vuelo dentro del alcance visual del piloto, que es aquel en el que el piloto mantiene permanentemente contacto visual directo con el aparato, sin ayuda de medios ópticos o electrónicos.

En este tipo de vuelo, el dron puede moverse dentro de un espacio cilíndrico controlado por el piloto, con un radio de 500 metros y una altitud de 122 metros (400 pies).

- Tipo dos: vuelos en línea de vista extendida, en este tipo de vuelos, uno o varios observadores apoyan al piloto, pudiendo ampliar considerablemente el espacio para vuelo en modo visual.

En los vuelos de este tipo, los observadores deben tener la misma cualificación que los pilotos del dron en modo vuelos en línea de vista extendida, o acreditar los conocimientos teóricos correspondientes.

- Tipo tres: vuelos fuera del alcance visual del piloto, en este tipo de vuelo es aquel en el que la aeronave se aleja a una distancia tal del piloto, que éste no puede mantener contacto visual directo. Requiere de espacio aéreo segregado o la emisión de un NOTAM concedido por los Servicios de Información Aeronáutica.

2.6.5. Características actuales

Lo que se pretende es dejar enlistadas las características cambiantes en base a la evolución de los drones y plasmar las mismas de un equipo de alta gama en el momento de la realización de este estudio. Se toma de referencia el dron DJI Matriz 30T que salió comercialmente al mercado en marzo de 2022.

Tabla IV. Características de dron DJI serie 30, generales

Parte	Característica	Valor
Aeronave	Dimensiones (desplegado, excl. hélices)	470×585×215 mm (Ranall)
	Dimensiones (plegado)	365×215×195 mm (Ranall)
	Distancia entre ejes diagonal	668mm

Continuación tabla IV.

Parte	Característica	Valor
Aeronave	Peso (incl. dos baterías)	3770 ± 10g
	Peso máximo de despegue	3998 gramos
	Frecuencia de operación	2,4000-2,4835 GHz; 5.725-5.850 GHz
	Potencia del transmisor (EIRP)	2,4 GHz: <33 dBm (FCC); <20 dBm (CE/SRRC/MIC) 5,8 GHz: <33 dBm (FCC/SRRC); <14 dBm (CE)
	Precisión de vuelo estacionario (sin viento o con brisa)	Vertical: ±0,1 m (Sistema de visión habilitado); ±0,5 m (modo N con GPS); ±0,1 m (RTK) Horizontal: ±0,3 m (Sistema de visión activado); ±1,5 m (modo N con GPS); ±0,1 m (RTK)
	Precisión de posicionamiento RTK (RTK fijo habilitado)	1 cm+1 ppm (horizontal) 1,5 cm+1 ppm (vertical)
	Velocidad angular máxima	Paso: 150°/seg.; Guiñada: 100°/seg.
	Ángulo de inclinación máximo	35 ° (modo N y sistema de visión frontal habilitados: 25 °)
	Velocidad máxima de ascenso/descenso	6 m/s, 5 m/s
	Velocidad máxima de descenso de inclinación	7 m/s
	Velocidad horizontal máxima	23 m/s

Continuación tabla IV.

Parte	Característica	Valor
	Techo máximo de servicio sobre el nivel del mar (sin otra carga útil)	5000 m (con hélices 1671) 7000 m (con hélices 1676)
	Resistencia máxima al viento	15 m/s 12 m/s durante el despegue y el aterrizaje
	Tiempo máximo de desplazamiento [2]	36 minutos
	Tiempo máximo de vuelo	41 minutos
	modelo de motor	3511
Aeronave	Modelo de hélice	1671 1676 Gran altitud (no incluido)
	Clasificación de protección de ingreso [3]	IP55
	GNSS	GPS+Galileo+BeiDou+GLONASS (GLONASS solo es compatible cuando el módulo RTK está habilitado)
	Temperatura de funcionamiento	-20 ° a 50 °C (-4 ° a 122 °F)
ardán	Rango de vibración angular	±0,01 °
	Rango controlable	Panorámica: ±90 ° Inclinación: -120 ° a +45 °
	Rango mecánico	Panorámica: ±105 ° Inclinación: -135 ° a +60 ° Giro: ±45 °
Batería de vuelo	Capacidad	5880 mAh
inteligente	Voltaje	26,1 voltios
TB30	Tipo de batería	Li-ion 6S
	Energía	131,6 Wh
	Peso neto	Aprox. 685 gramos

Continuación tabla IV.

Batería de vuelo	Temperatura de funcionamiento	-20 ° a 50 °C (-4 ° a 122 °F)
inteligente	Temperatura de almacenamiento	20 ° a 30 °C (68 ° a 86 °F)
TB30	Temperatura de carga	-20 ° a 40 °C (-4° a 104 °F) (Cuando la temperatura es inferior a 10 °C (50 °F), la función de autocalentamiento se activará automáticamente. La carga a baja temperatura puede acortar la vida útil de la batería)
	Sistema químico	LiNiMnCoO ₂

Fuente: DJI. (s.f). *Especificaciones serie matriz-30*. Consultado el 20 abril 2022. Recuperado de <https://www.dji.com/matrice-30/specs>.

Tabla V. Características de dron DJI serie 30, comunicación

Parte	Característica	Valor
Empresa O3	Frecuencia de funcionamiento	2,4000-2,4835 GHz, 5,725-5,850 GHz
	Distancia máxima de transmisión (sin obstrucciones, sin interferencias)	15 kilómetros (FCC); 8 km (CE/SRRC/MIC)
	Distancia máxima de transmisión (con interferencia)	Interferencia fuerte (paisaje urbano, línea de visión limitada, muchas señales en competencia): 1,5-3 km (FCC/CE/SRRC/MIC) Interferencia media (paisaje suburbano, línea de visión abierta, algunas señales en competencia): 3-9 km (FCC); 3-6 km (CE/SRRC/MIC)

Continuación tabla V.

Parte	Característica	Valor
Empresa O3	Distancia máxima de transmisión (con interferencia)	Interferencia débil (paisaje abierto abundante línea de visión, pocas señales en competencia): 9-15 km (FCC); 6-8 km (CE/SRRC/MIC)
	Potencia del transmisor (EIRP)	2,4 GHz: <33 dBm (FCC); <20 dBm (CE/SRRC/MIC) 5,8 GHz: <33 dBm (FCC); <14 dBm (CE); <23dBm (SRRC)
Wifi	Protocolo	WiFi 6
	Frecuencia de funcionamiento	2,4000-2,4835 GHz; 5,150-5,250 GHz; 5.725-5.850 GHz
	Potencia del transmisor (EIRP)	2,4 GHz: <26 dBm (FCC); <20 dBm (CE/SRRC/MIC) 5,1 GHz: <26 dBm (FCC); <23 dBm (CE/SRRC/MIC)
		5,8 GHz: <26 dBm (FCC/SRRC); <14 dBm (CE)
Bluetooth	Protocolo	Bluetooth 5.1
	Frecuencia de operación	2,4000-2,4835 GHz
	Potencia del transmisor (EIRP)	<10dBm

Fuente: DJI. (s.f). *Especificaciones serie matriz-30*. Consultado el 20 abril 2022. Recuperado de <https://www.dji.com/matrice-30/specs>.

Tabla VI. Características de dron DJI serie 30, ópticas

Parte	Característica	Valor
Zoom de cámara	Sensor	CMOS de 1/2", Píxeles efectivos: 48M
	Lente	Distancia focal: 21-75 mm (equivalente: 113-405 mm) Apertura: f/2.8-f/4.2 Enfoque: 5 m a ∞
	Compensación de exposición	± 3 ev (usando 1/3 ev como longitud de paso)
	Velocidad de obturación electrónica	Modo automático: Foto: 1/8000-1/2 s Foto: 1/8000-1/2 s Vídeo: 1/8000-1/30 s Modo M: Foto: 1/8000-8 s Vídeo: 1/8000 -1/30 s
	Rango ISO	100-25600
	máx. Resolución de video	3840×2160
	Tamaño máximo de foto	8000×6000
Cámara ancha	Sensor	CMOS de 1/2", Píxeles efectivos: 12M
	Lente	DFOV: 84 ° Distancia focal: 4,5 mm (equivalente: 24 mm) Apertura: f/2,8 Enfoque: 1 m a ∞
	Compensación de exposición	± 3 ev (usando 1/3 ev como longitud de paso)
	Velocidad de obturación electrónica	Modo automático: Vídeo: 1/8000-1/2 s Vídeo: 1/8000-1/30 s Modo M: Foto: 1/8000-8 s Foto: 1/8000-1/30 s
	Rango ISO	100-25600
	máx. Resolución de video	3840×2160

Continuación tabla VI.

	Tamaño de la foto	4000×3000
<hr/>		
	Cámara térmica	
	Lente	DFOV: 61 ° Distancia focal: 9,1 mm (equivalente: 40 mm) Apertura: f/1,0 Cámaras térmicas Enfoque: 5 m a ∞
	Precisión de medición de temperatura infrarroja [$\pm 2^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2\%$ (usando el valor mayor)
	Resolución de video	Modo de superresolución de imagen infrarroja: 1280 × 1024 Modo normal: 640 × 512
	Tamaño de la foto	Modo de superresolución de imagen infrarroja: 1280 × 1024 Modo normal: 640 × 512
	Tamaño de píxel	12 um
	Método de medición de temperatura	Medidor puntual, Medición de área
	Rango de medición de temperatura	Modo de alta ganancia: -20° a 150°C (-4° a 302 °F) Modo de baja ganancia: 0° a 500°C (32° a 932 °F)
	Alerta de temperatura	Soportado
	Paleta	Blanco vivo/Negro vivo/Tinte/Hierro rojo/Hierro caliente /Ártico/Médico/Fulgurita/Arco iris 1/Arco iris 2
	Resolución	1920×1080
	DFOV	161 °
	Cuadros por segundo	30 fps

Continuación tabla VI.

Módulo láser	Longitud de onda	905 nm
	Potencia máxima del láser	3,5 mW
	Ancho de pulso único	6 ns
	Precisión de la medición	$\pm (0,2 \text{ m} + D \times 0,15 \%)$
		D es la distancia a una superficie vertical
	Rango de medición	3-1200 m (0,5×12 m de superficie vertical con 20 % de reflectividad)

Fuente: DJI. (s.f). *Especificaciones serie matriz-30*. Consultado el 20 abril 2022. Recuperado de <https://www.dji.com/matrice-30/specs>.

Tabla VII. Características de dron DJI serie 30, navegación

Parte	Característica	Valor
Sistemas de visión	Rango de detección de obstáculos	Adelante: 0,6-38 m Arriba/Abajo/Atrás/Lateralmente: 0,5-33 m
	campo de visión	65° (H), 50° (V)
	Entorno operativo	Superficies con patrones claros e iluminación adecuada (> 15 lux)
Sistemas de detección de infrarrojos	Rango de detección de obstáculos	0,1 a 10 m
	campo de visión	30°
	Entorno operativo	Obstáculos grandes, difusos y reflectantes (reflectividad >10 %)
Luces auxiliares	Distancia de iluminación efectiva	5 metros
	Tipo de iluminación	60 Hz, brillo sólido
Control remoto	Pantalla	Pantalla táctil LCD de 7,02 pulgadas, con una resolución de 1920×1200 píxeles y alto brillo de 1200 cd/m ²

Continuación tabla VII.

Control remoto	Pantalla	Pantalla táctil LCD de 7,02 pulgadas, con una resolución de 1920×1200 píxeles y alto brillo de 1200 cd/m ²
	Batería interna	<p>Tipo: Li-ion (6500 mAh a 7,2 V)</p> <p>Tipo de carga: Admite estación de batería o cargador USB-C potencia nominal máxima de 65 W (voltaje máximo de 20 V)</p> <p>Tiempo de carga: 2 horas</p> <p>Sistema químico: LiNiCoAlO₂</p>
	Batería externa (batería inteligente WB37)	<p>Capacidad: 4920 mAh</p> <p>Voltaje: 7,6 V</p> <p>Tipo de batería: Li-ion</p> <p>Energía: 37,39 Wh</p> <p>Sistema químico: LiCoO₂</p>
	Tiempo de funcionamiento	<p>Batería interna: aprox. 3 horas 18 min</p> <p>Batería Interna + Batería Externa: Aprox. 6 horas</p>
	Clasificación de protección de ingreso	IP54
	GNSS	GPS+Galileo+BeiDou
	Temperatura de funcionamiento	-20 ° a 50 °C (-4 ° a 122 °F)

Fuente: DJI. (s.f.). *Especificaciones serie matriz-30*. Consultado el 20 abril 2022. Recuperado de <https://www.dji.com/matrice-30/specs>.

Tabla VIII. Características de dron DJI serie 30, estación de batería inteligente BS30

Parte	Característica	Valor
Estación de batería inteligente BS30	Dimensiones	353×267×148 mm
	Peso neto	3,95 kg
	Tipo de batería compatible	Batería de vuelo inteligente TB30 Batería inteligente WB37
	Aporte	100-240 VCA, 50/60 Hz
	Producción	Puerto de batería TB30: 26,1 V, 8,9 A (admite hasta dos salidas simultáneamente) Batería inteligente WB37: 8,7 V, 6 A
	Potencia de salida	525W
	Puerto USB-C	e
	Puerto USB-A	máx. potencia de salida de 10 W (5 V, 2 A)
	Consumo de energía (cuando no está cargando)	< 8W
	Potencia de salida (al calentar la batería)	Aprox. 30W
	Temperatura de funcionamiento	-20 ° a 40 °C (-4 ° a 104 °F)
	Clasificación de protección de ingreso	IP55 (con la tapa bien cerrada)
	Tiempo de carga	Aprox. 30 min (cargando dos baterías TB30 del 20 % al 90 %) Aprox. 50 min (cargando dos baterías TB30 de 0 % a 100 %)
	Funciones de protección	Protección anti-reflujo Protección contra cortocircuitos Protección contra sobrevoltaje Protección contra sobrecorriente Protección contra la temperatura

Fuente: DJI. (s.f.). *Especificaciones serie matriz-30*. Consultado el 20 abril 2022. Recuperado de <https://www.dji.com/matrice-30/specs>.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Variables

Las variables estudiadas y operadas durante el proceso de esta investigación fueron:

Tabla IX. **Variables en estudio**

Variable	Descripción	Indicadores
Mantenimiento predictivo	El mantenimiento predictivo es una actividad que utiliza herramientas y técnicas de análisis de datos claves para detectar anomalías en el funcionamiento y posibles defectos en los equipos, de modo que puedan solucionarse antes de que sobrevenga el fallo	Cantidad de averías detectadas y clasificación de severidad
Localización de fallas	Acción mediante la cual se ubica el lugar exacto de una falla y posible causa de una avería catastrófica que amerite reparación por haber dejado indisponible la línea de transmisión	Tiempos en horas hombre para detectar la raíz de la falla y su ubicación
Recolección de data	Actividad o acción mediante la cual se registran parámetros que posteriormente puede ser revisados o analizados o en su defecto almacenar para acciones históricas o de respaldo	Tipo de información generada, clasificación de la información

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.2. Fase 1. Recopilación de la información

Se eligió la línea de transmisión del tramo tres de la EPR, que es una línea que tiene algunas características particulares como lo son: que es una línea de transmisión del sistema troncal de la red en 230 KV del SNI (Sistema Nacional Interconectado) de Guatemala y además es la línea del nodo de interconexión regional que hace la unión del SNI con el sistema eléctrico de Honduras.

Para la realización de la investigación se acudió a solicitar información de carácter institucional del departamento de líneas de transmisión de: Empresa Propietaria de la Red, S. A., Sucursal Guatemala del proyecto SIEPAC de uno de los cinco tramos de línea que existen en Guatemala, obteniendo información adicional de las indisponibilidades que tuvo la línea de transmisión en el periodo de estudio mediante una clasificación ya definida dentro del ámbito de operación de un sistema eléctrico de transmisión tanto nacional como regional.

Con la información mencionada y también recopilada de la empresa EPR se obtuvo la correspondiente a un año calendario específicamente 2019, que sustentan la investigación y encierran las tres variables utilizadas.

Dentro de la información proporcionada y recopilada se encuentra la contemplada en el plan anual de trabajo de la empresa, (PAT) de las cuales son actividades programadas y contempladas en la planificación de ese año, adicional existe información generada durante fallas o mantenimientos correctivos que se detectaron en las actividades programadas.

Estas actividades no programadas pasan a ser parte de la información generada durante ese periodo de análisis y que están inmersas dentro del rol de la actividad de operación y mantenimiento que también se usó para la realización

de la investigación. La información generada y recopilada contemplada en programación anual que fue recolectada se puede mencionar:

- Inspección de brecha de forma pedestre
- Inspección de estructura, conductor, y herrajes, de cada sitio de torre
- Revisión aérea de línea de transmisión (helicóptero)

La información generada a raíz de contingencias o fallas acontecidos en el periodo de investigación podemos mencionar:

- Inspecciones de brecha de forma pedestre por falla
- Inspección de brecha con dron por falla

Con la información recopilada en su mayoría en un formato digital, pero en formatos no tabulados y en un 100 % en el formato PDF, se procede a realizar el correspondiente procesamiento de esta.

3.3. Fase 2. Procesamiento de la información

Se clasifica la información recolectada para la parte de indisponibilidades que la línea sufrió durante el periodo de estudio y que da un panorama de las causas que generaron esas aperturas de línea la cual se realizó con la estadística anual tanto nacional como regional del tramo de línea en estudio.

A su vez se obtuvo las causas y tiempos de indisponibilidad de la línea cuando las aperturas se deben a fallas en la línea o falla en el sistema eléctrico así también aquellas aperturas que son requeridas por mantenimientos programado por mejoras o correctivos, como también mantenimiento de

emergencia por corrección de elementos que pueden generar un daño mayor si no son atendidos de una forma correcta.

Tabla X. Estadística año 2019, aperturas de la líneas por tipo

Tipo de indisponibilidad	Cantidad
Forzado	1
Mantenimiento	5
Fuerza mayor	11
Instrucción del OS/OM	83

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

Se aclara que, por ser una línea de interconexión, las indisponibilidades pueden darse por cualquiera de los dos entes operadores del sistema o sistema eléctrico que comparte la línea como en este caso es Guatemala y Honduras.

Tabla XI. Tiempos y causas de aperturas año 2019

Fecha desconexión	Fecha conexión	Tiempo indisponible (min)	Causa índices	Descripción
2/02/2019 04:58	2/02/2019 07:00	121	Fuerza mayor	recepción de disparo por sobre voltaje en sistema de honduras
3/02/2019 06:48	3/02/2019 08:03	75	Fuerza mayor	recepción de disparo por sobre voltaje en sistema de honduras
3/03/2019 10:24	3/03/2019 11:19	55	Fuerza mayor	recepción de disparo por sobre voltaje en sistema de honduras
14/03/2019 09:35	14/03/2019 14:44	309	Mantenimiento	mantenimiento solicitado por honduras

Continuación tabla XI.

16/03/2019 06:08	17/03/2019 21:55	2387	Mantenimiento	mantenimiento programado por EPR
18/03/2019 07:38	18/03/2019 15:35	477	Mantenimiento	mantenimiento solicitado por honduras
24/03/2019 07:25	24/03/2019 17:32	607	Fuerza mayor	recepción de disparo por sobre voltaje en sistema de honduras
13/04/2019 07:08	13/04/2019 18:12	665	Mantenimiento	mantenimiento programado por EPR
21/04/2019 04:00	21/04/2019 08:43	282	Fuerza mayor	recepción de disparo por sobre voltaje en sistema de honduras
15/07/2019 18:01	15/07/2019 19:16	75	Fuerza mayor	falla temporal en fase a
16/09/2019 11:51	16/09/2019 14:11	141	Fuerza mayor	apagón en honduras y nicaragua genera evento en el ser
23/09/2019 14:53	23/09/2019 15:10	17	Fuerza mayor	falla temporal en las fase s y t
13/10/2019 15:35	13/10/2019 19:59	264	Fuerza mayor	recepción de disparo por sobre voltaje en sistema de honduras
14/10/2019 12:20	15/10/2019 13:16	1496	Fuerza mayor	fallas sostenida en la fase b
16/11/2019 07:53	16/11/2019 17:16	563	Mantenimiento	mantenimiento programado por EPR
16/11/2019 17:27	16/11/2019 17:31	4	Forzado	recepción de disparo por sobre voltaje en sistema de honduras
17/11/2019 15:19	17/11/2019 16:06	47	Fuerza mayor	la línea es abierta de forma manual

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

En esta fase de la investigación la información recolectada con antelación por parte de EPR por medio de su personal que visita cada sitio de torre de forma pedestre, llenando formatos impresos que posteriormente son digitalizados en formato PDF y de los cuales se me fueron proporcionados y utilizados en la investigación. Con la información ya mencionada y en el formato indicado se

procesó mediante la tabulación en hojas de Excel para poder ser fácil de usar y analizar con la finalidad de resaltar indicadores de la actividad de mantenimiento predictivo rutinario.

Estos formatos estandarizados por EPR para sus actividades de mantenimiento rutinario predictivo tienen la finalidad que mediante ellos se puedan detectar anomalías en los elementos que conforman una torre, brecha y los conductores de una línea de transmisión. La finalidad de la información recolectada por la empresa es evidenciar daños, anomalías o deterioros de algún elemento para programar mejoras, cambios o reparaciones.

Los elementos que se inspeccionaron mediante los formatos que le generan información a la empresa EPR y que a la vez sustentan esta investigación mediante la tabulación de lo contenido en ellos son:

- Brecha
- Cadenas de aisladores y conductores
- Amortiguadores
- Cajas de empalme OPGW (si aplica)
- Sistema de puesta a tierra
- Obra civil
- Estructura

Se presenta en las tablas de la XII a la XVI, el modelo de los cuadros de la información que se levanta en cada sitio de torre, mismos que fueron extraídos del formato usado por la empresa el cual se presenta en anexos.

Tabla XII. Información recolectada para inspección de brecha

Brecha	Vano		Vano atrás	
	adelante		SI	NO
SI	NO	SI	NO	
Requiere brecha bajo la línea:				
Requiere brecha a los lados dentro del derecho de vía:				
Requiere corte de árboles a 45°.				
Construcciones bajo de línea:				
Construcciones a los lados de la línea y dentro derecho de vía:				
Se encuentran enmontadas las bases de la torre:				
Bejucos en la estructura:				
Requiere limpieza el sitio de torre:				
Tipo de vegetación existente en el vano a menos de 10 metros				
Tipo de vegetación existente en el vano a más de 10 metros				
Topografía del terreno donde se ubica la estructura:				

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

Tabla XIII. Información recolectada para cadenas de aisladores, conductores y amortiguadores

Cadenas de suspensión	Fase superior		Fase media		Fase inferior	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Cadenas de aisladores dañadas:						
Requieren limpieza las cadenas de aisladores:						
Requieren verticalidad las cadenas de suspensión:						
Cadenas de remate	Fase superior		Fase media		Fase inferior	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Cadena de aisladores vano adelante dañada:						
Cadena de aisladores vano atrás dañada:						

Continuación tabla XIII.

Requieren limpieza las cadenas de aisladores:						
Cuello muerto se encuentra normal:						
Jumper del cuello muerto se encuentra normal:						
Conductores		Fase superior		Fase media		Fase inferior
	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Conductor de fase dañado:						
Falta conexión a torre						
Conductor de Guarda dañado:						
Conductor del OPGW dañado:						
Daño en Herrajes						
Existe libranza del conductor al suelo						
Si no existe libranza indicar distancia del suelo al conductor en metros.						
AMORTIGUADORES		Fase superior		Fase media		Fase inferior
	V. Adte	V. Atrás	V. Adte	V. Atrás	V. Adte	V. Atrás
No. de amortiguadores en conductores de fase:						
No. de amortiguadores en conductor de guarda:						
No. de amortiguadores en conductor OPGW:						

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

Tabla XIV. Información recolectada para cajas de OPGW

CAJA DE EMPALME OPGW	SI	NO
Cuenta con sus herrajes completos de anclaje a la Torre		
Presenta daños visual de vandalismo o corrosión		

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

Tabla XV. Sistema de puesta a tierra y obra civil

Sistema de puesta a tierra	SI	NO	Ubicación de las puestas a tierra			
			Pata A	Pata B	Pata C	Pata D
En mal estado						
Piezas faltantes						
Valor de la medición de puesta a tierra:						
Obra civil	SI	NO	Pila A	Pila B	Pila C	Pila D
Problemas de estabilidad						
Pilas dañadas:						
Pilas erosionadas:						
Deslaves del sitio de torre:						
Asentamiento de pilas						
Hay deslizamientos en un radio de 20 m del centro de la torre:						
Tipo de protección en el sitio de torre y pilas:						

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

Tabla XVI. Información recolectada para estructura

Estructura	SI	NO
Limpieza y resane de perfiles:		
Piezas oxidadas:		
Torque (ajuste de pernos):		
Faltan perfiles y pernos:		
Pintura a pernos:		
Malla Anti-escalamiento dañada:		
Pernos de escalamiento:		
Existe placa de peligro:		
Existe placa de identificación del proyecto:		
Existe placa de numeración:		
La torre se aprecia inclinada:		

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

Cabe mencionar que no se presentan datos tabulados en formato tabla dado que la información procesada corresponde a 164 torres inspeccionadas contenidas en el tramo de línea en estudio.

Por lo anterior, en el siguiente capítulo se presentarán los resúmenes en cuadros por cada elemento inspeccionado, así como los indicadores si se detectó o no alguna anomalía, los tiempos utilizados en promedio por torre, así como el tiempo total utilizado para realizar el total de la inspección del tramo de línea.

3.4. Fase 3. Análisis y comparación de la información

En esta fase se aborda lo concerniente al objetivo específico dos de la investigación, partiendo de un evento de apertura de la línea del día 15 de julio

del año 2019 según se puede constatar en los registros de la tabla XI contenida en el presente documento.

Mediante el mencionado evento de falla ocurrido en la línea en el periodo de estudio se comparan los resultados generados de localización de dicha falla, específicamente localizar el punto exacto de la falla dado que la misma fue una falla de carácter temporal y fue posible cerrar la línea y mantenerla con la continuidad del servicio.

Cabe mencionar que la actividad de inspección de la línea en este evento es ideal para la comparación de la información dado que se realizaron actividades mediante las dos formas que permiten su comparación. Las acciones realizadas con el único objetivo de detectar la ubicación exacta y la causa de la falla fueron.

Se procedió a la contratación de una empresa que se dedica a temas de inspección de líneas de transmisión y ejecución de brecha con los alcances de recorrer todo el eje de la línea de forma pedestre para la detección de árboles y objetos extraños que hayan podido ocasionar la falla de fase a tierra ocurrida. La mencionada inspección se realizó desde la torre identificada con el número 94 a 96 y de la 111 hasta la identificada con el número 146, con algunos vanos no revisados, el recorrido de dicha inspección consistió en 7.1 kilómetros lineales.

De igual forma se realizó la contratación de una inspección mediante vuelo de dron con los mismos objetivos que son: revisar la brecha u objetos extraños que hayan podido generar o ser causa de la falla ocurrida. En esta revisión se obtuvieron videos del recorrido sobre todo el eje de la línea iniciando en la torre numerada con 110 hasta la identificada con el número 140, en esta revisión se cubrió una distancia lineal total de 14.57 kilómetros.

Resumiendo, en esta fase se procedió a comparar la información generada en ambas revisiones. Una mediante el método tradicional de revisión mediante la forma pedestre y la otra haciendo uso de tecnología de drones para realizar la misma tarea con la misma finalidad de determinar la causa o el objeto que pudo haber generado la falla o en su defecto detectar objetos cercanos a la línea que en un futuro pueda generar de nuevo una falla de fase a tierra.

Con la mencionada comparación se persigue mediante este ejercicio real presentar en el capítulo cuatro los resultados de ambas revisiones y así poder establecer los beneficios de poder localizar mantenimientos correctivos haciendo uso de drones para esta actividad.

3.5. Fase 4. Análisis de la tecnología a incorporar

Esta fase toma un rumbo exploratorio teniendo en cuenta que la misma indagó desde una perspectiva innovadora, considerando que se pretende integrar y promover la explotación de las tecnologías para simplificar tareas de operación buscando reducción en temas de seguridad para las personas, consumo de energía e impacto en el ambiente.

Para esta última parte, así como todo el contenido de esta, persiguió alcanzar un objetivo propuesto como lo es conocer las ventajas de transmisión de data en corto tiempo para Inspección y localización de fallas para lo cual se abordó de la siguiente forma.

Investigó un problema poco estudiado, ya que en el país aún es escasa la implementación de uso de drones para tareas de mantenimiento en líneas de transmisión, y se ha abordado muy poco por las instituciones que deberían favorecer su uso o las empresas de transporte de energía eléctrica.

Se realizó una revisión histórica corta de la evolución de los equipos de dron, con la finalidad de determinar las características de transmisión de información recolectada en sus vuelos, y con estas características, así como otras relacionados a la eficiencia de los vuelos, determinar cuál sería el equipo actual a usarse para la tarea de mantenimiento en líneas de transmisión. Adicional se analizó la tendencia de mejoras que tiene esta tecnología a superar las limitantes actuales.

Como se ha venido mencionando, los resultados alcanzados tanto de esta fase como de otras de la investigación se presentan en el siguiente capítulo.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Mantenimiento predictivo rutinario

Para la presente investigación lo que se busca es demostrar lo que se detecta en proceso de mantenimiento predictivo rutinario de una forma pedestre y determinar la viabilidad de esas mismas detecciones se pueden hacer con el uso de drones.

4.1.1. De forma pedestre

En la realización de la actividad de inspección pedestre fue necesario el recurso humano, así como insumos materiales necesarios para poderse llevar a cabo a satisfacción, los cuales se describen brevemente a continuación:

Tabla XVII. Recursos propios en mantenimiento predictivo

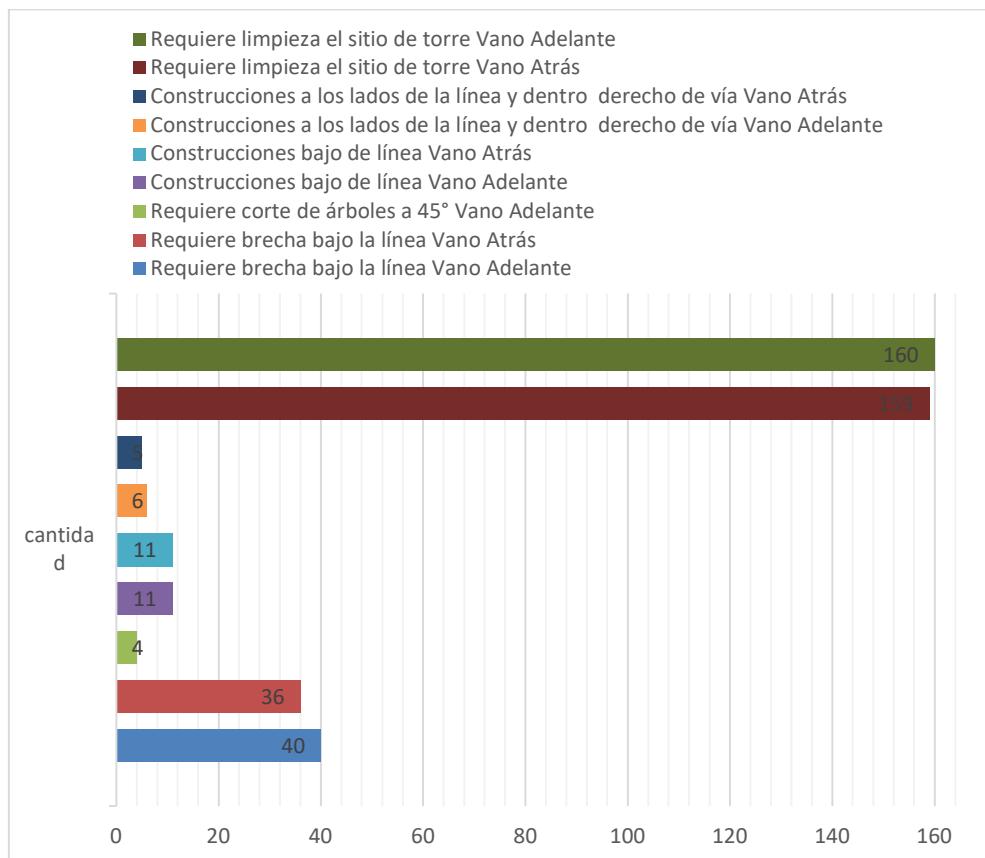
cantidad	humano	cantidad	materiales
2	linieros	2	vehículos
1	ayudante	2	cámaras fotográficas
2	pilotos	2	desktop

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Los resultados obtenidos de este mantenimiento predictivo rutinario para esta inspección pedestre de las torres contenidas en la línea son detallados a continuación.

Cabe mencionar que los resultados están basados en 164 inspecciones y los reportados representan únicamente los que, sí necesitan una atención dentro del total inspeccionados, se aclara que en la tabulación de la información donde se reportan hallazgos representan un valor de 1 y donde la evaluación en la inspección fue satisfactoria representan un valor de cero. Para la parte de brecha extraída de los formularios de inspección se presentan los que ameritan una atención.

Figura 4. Hallazgos relacionados a brecha



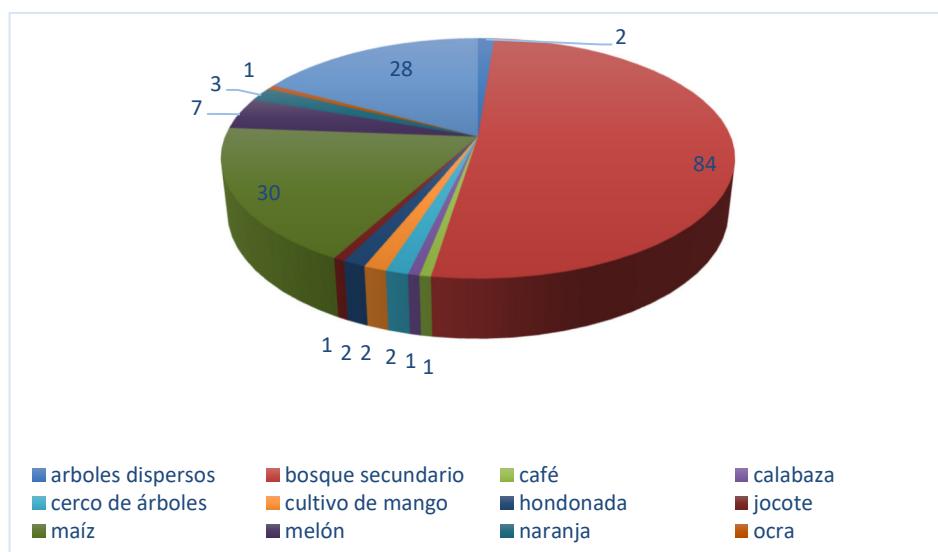
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

De lo reportado se traduce en limpieza a los sitios de torre por maleza y vegetación que crecen en el sitio de la torre, luego está la poda de árboles que pueden convertirse en fallas de la línea tanto en el eje de esta como a los lados del eje.

Hay datos que se convierten paralelamente en información y que toman otro cauce como lo son las construcciones debajo del eje de la línea dado que esto genera temas legales de servidumbre que se salen de parte puramente operativa y mantenimiento a los activos.

De igual manera en la inspección se genera otro tipo de información relacionado a temas de brecha, siendo estas el tipo de terreno en el que se encuentra construida la torre y el tipo de vegetación tanto cercana a sitio de la torre como en el eje de esta.

Figura 5. Tipo de vegetación existente en el vano a menos de 10 m



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 6. **Tipo de vegetación existente en el vano a más de 10 m**

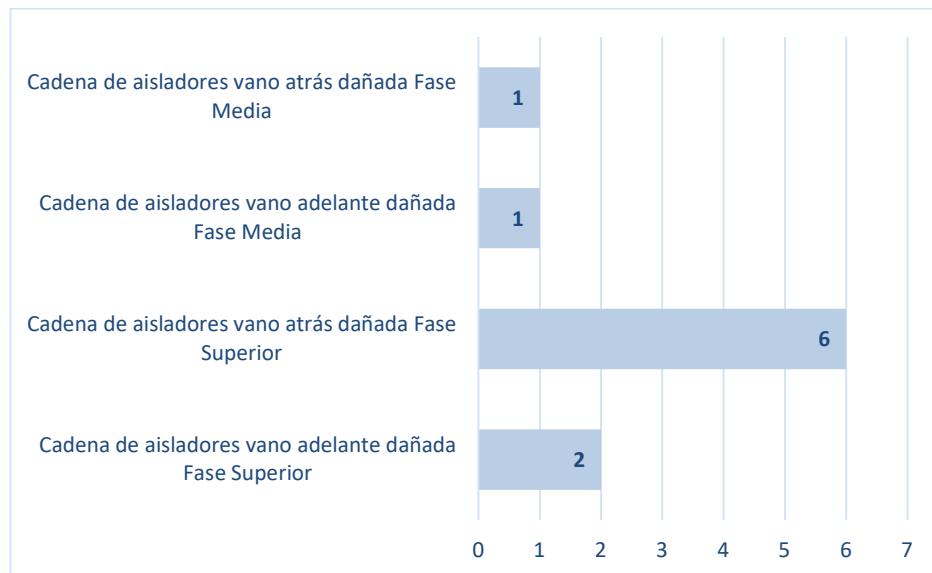


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Como se mencionó esta última información, aunque no representan hallazgos que ameriten una acción correctiva si representa recolección de data útil para tener presente, disponible y tabulada para toma de decisiones o respaldo necesario como conocimiento de los activos.

Los otros elementos contenidos en las inspecciones que forman parte del formulario base usado se encuentran las cadenas de aisladores tanto de suspensión como de remate, se presentan los resultados de los hallazgos detectados que ameritan una acción correctiva.

Figura 7. **Daños en aisladores de cadenas de remate detectados**

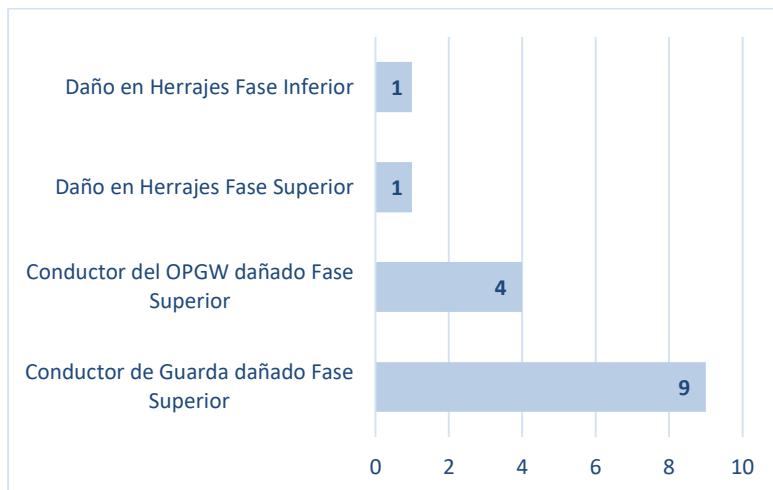


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En relación con cadenas de aisladores en configuración de suspensión, únicamente se detectó un hallazgo para cadenas de aisladores dañadas Fase Media.

Se prosigue con la presentación de resultados, con base a los datos extraídos del formato se muestran ahora la información de los conductores en donde se encontraron y reportaron hallazgos.

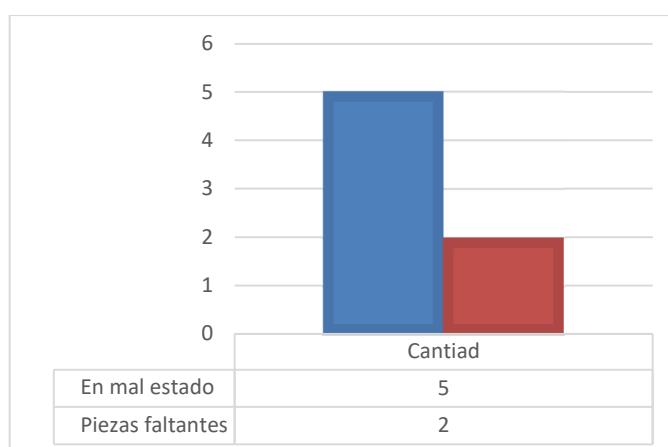
Figura 8. **Daños detectados en inspección para conductores**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Continuando con la presentación de información se muestra lo concerniente a la parte de sistema de puesta a tierra.

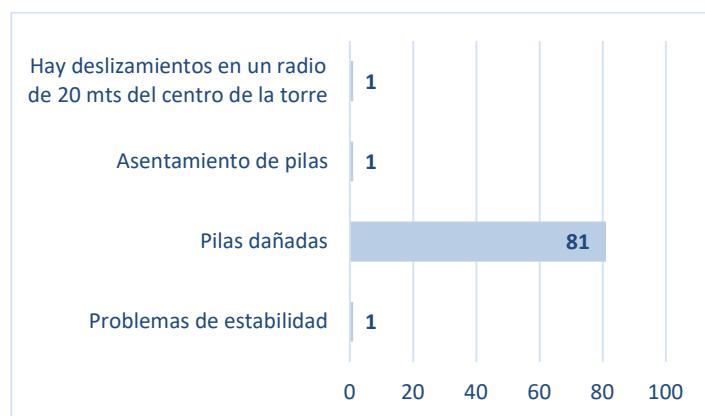
Figura 9. **Daños detectados en inspección para puesta a tierra**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

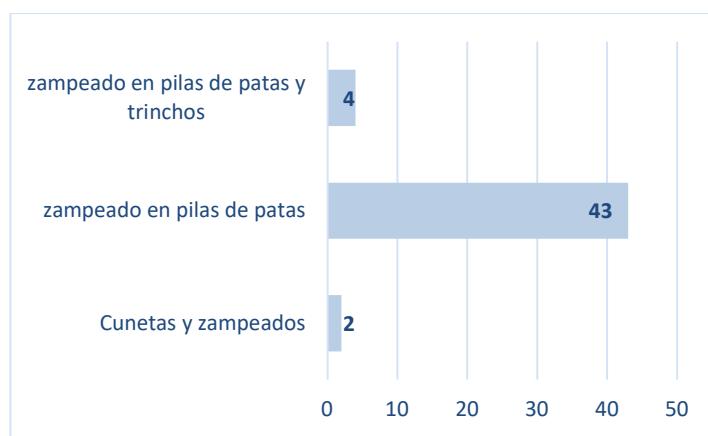
Se continúa con los elementos de soporte de la estructura que no son más que las bases o pilas de la torre sintetizadas como obra civil según formulario de inspección.

Figura 10. Daños detectados en inspección para obra civil



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

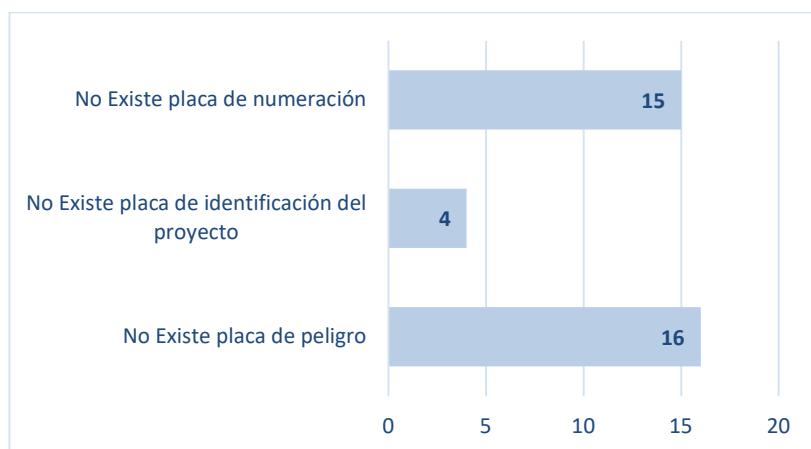
Figura 11. Tipo de protección recomendada para sitio de torre y pila



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Por último, en relación con la inspección pedestre mediante el formulario llenado en campo queda presentar los resultados de lo detectado a lo que es la estructura, que no es más que la torre de acero galvanizado con todas sus piezas y elementos.

Figura 12. Daños detectados en inspección para estructura



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Dentro de los trabajos programados en la parte de mantenimiento predictivo se contempla una inspección mediante vuelo con helicóptero que consiste en una pasada en un ángulo en paralelo cuando la topografía del terreno lo permite y a la velocidad mínima que la aeronave tenga la capacidad de hacerlo con el objetivo de detectar a simple vista humana y sin ningún otro apoyo de captura de información el estado de la brecha y posibles obstáculos para la línea de transmisión.

A continuación, se presenta un resumen en tabla de la poca data que genera un tipo de inspección aérea mediante sobrevuelo realizado en el año 2019 y que sirvió como referencia para la presente investigación.

Tabla XVIII. Resumen de hallazgos mediante inspección aérea

No	de torre	a torre	Hallazgos
1	1	11	OK
2	11	14	Revisar barrera de árboles
3	14	15	OK
4	15	16	Casetta de bomba de agua, revisar barrera de árboles
5	16	17	Siembra de mangos
6	17	19	OK
7	19	21	Brecha, revisar barrera de árboles
8	21	22	OK
9	22	23	Brecha, OK
10	23	24	Brecha, revisar barrera de árboles
11	24	25	Casa y establo
12	25	26	Brecha detectada por LIDAR y realizada por personal EPR, siembra de mangos
13	26	28	OK
14	28	29	Casa, lotificación, brecha, cancha a un lado, si hay casa
15	29	30	Vivienda
16	30	33	OK
17	33	35	Revisar brecha
18	35	42	OK
19	42	43	Revisar casa
20	43	45	Revisar brecha
21	45	46	OK
22	46	47	Revisar brecha cerca de la torre 45
23	47	52	OK
24	52	53	Problemas debajo de la línea
25	53	59	OK
26	59	60	Brecha detectada por LIDAR y realizada por personal EPR, OK
27	60	63	OK
28	63	64	Árbol de mango y brecha, cortar árbol de mango
29	64	69	OK
30	69	70	Brecha, revisar brecha
31	70	71	OK
32	71	72	Revisar brecha
33	72	74	OK
34	74	75	Revisar brecha
35	75	76	OK
36	76	77	Revisar brecha
37	77	78	OK
38	78	79	Revisar árbol por viento cerca de torre 78

Continuación tabla XVIII.

39	79	80	Revisar brecha
40	80	81	Revisar brecha de pinos
41	81	84	Revisar brecha
42	84	85	OK
43	85	86	Revisar pino
44	86	87	Vivienda, revisar casa cerca de torre 86
45	87	88	OK
46	88	89	Brecha detectada por LIDAR y realizada por personal EPR, Revisar árboles por viento
47	89	90	OK
48	90	91	Brecha, revisar árboles
49	91	93	OK
50	93	94	Viviendas, deslizamiento T 93
51	94	95	OK
52	95	96	Cunetas T 95
53	96	97	OK
54	97	98	árboles bajos
55	98	99	Talud T 98, gasolinera
56	99	101	OK
57	101	102	Brecha detectada por LIDAR y realizada por personal EPR, revisar casa
58	102	103	OK
59	103	104	Brecha a futuro
60	104	107	OK
61	107	108	Cunetas T 107, control de escorrentía
62	108	110	OK
63	110	111	Trinchos T 109 en riesgo, objeto en conductor
64	111	112	Objeto en conductor
65	112	113	Brecha, hacer brecha pegada a torre 111
66	113	114	Brecha detectada por LIDAR y realizada por personal EPR
67	114	115	Bodega, revisar del lado de 2ºcircuito
68	115	117	OK
69	117	118	Trinchos T 117
70	118	123	OK
71	123	124	Turi centro, no hay
72	124	125	OK
73	125	127	Revisar brecha
74	127	128	Trinchos T 127
75	128	129	OK
76	129	130	Brecha, Brecha detectada por LIDAR y realizada por personal EPR, pinos
77	130	133	Brecha, OK

Continuación tabla XVIII.

78	133	134	Brecha, revisar brecha
79	134	135	Brecha y vivienda, revisar brecha, no hay vivienda
80	135	136	Revisar brecha
81	136	137	Hay una vivienda, algo lejos, revisar
82	137	138	Revisar brecha
83	138	139	Brecha detectada por LIDAR y realizada por personal EPR
84	139	140	Árboles fuera DV riesgo, brecha detectada por LIDAR y realizada por personal EPR, Revisar brecha
85	140	141	Revisar brecha
86	141	142	Hay una vivienda
87	142	144	Revisar brecha
88	144	145	OK
89	145	146	Hay una vivienda
90	146	147	Revisar brecha
91	147	148	Brecha, OK
92	148	150	Revisar brecha
93	150	151	OK
94	151	152	Galera
95	152	154	OK
96	154	155	Revisar casa y establo
97	155	156	Revisar brecha cerca torre 154
98	156	161	OK
99	161	162	Pinos contra pendiente
100	162	163	Mantenimiento de brecha
101	163	164	Establo/cunetas/taludes T162

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

4.1.2. Usando dron

Para la información que se presenta en estos resultados se resalta que las inspecciones se hicieron puntuales a determinadas torres algunas en el mismo tramo de línea en estudio. Unas cuantas son del periodo de tiempo más reciente al del periodo de la inspección pedestre.

Se inspeccionaron los mismos elementos que en la forma pedestres resaltando que la data generada en esta forma todo es digital y en formatos de imagen y videos que pueden ser consultados en cualquier momento.

Se presentan resultados gráficos que dan detalle de lo revisado y algunos hallazgos detectados que se resaltan. En el tema de brecha estos son los resultados.

Figura 13. Vista para información de inspección de brecha en un segmento de la línea



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Chiquimula, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torres 80 y 81. 2021). Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

En la siguiente imagen que se presenta y con mayor detalle el video generado de la inspección que por razones obvias no puede ser presentado en esta investigación impresa entrega información de si se requiere o no trabajos de brechas en el segmento de torres inspeccionadas. Se presenta una imagen ejemplo del grado de detalle relacionada a la información arrojada para brecha.

Figura 14. Grado de detalle en inspección de brecha en un segmento de la línea



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Chiquimula, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 80. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Para la imagen que se presenta es posible determinar si se requiere limpieza en el sitio de torre vano adelante o atrás, como también tipo de

vegetación existente en el vano a menos de 10 metros, como se obtiene en la inspección pedestre. En una revisión en formato digital de la imagen es posible hacer acercamientos para obtener mucho más grado de detalle.

Figura 15. Vista para información de brecha en sitio de torre y tipo de vegetación



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Cabañas, tramo 2 del proyecto SIEPAC, torre 198. 2019).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

El siguiente resultado muestra una imagen donde se puede determinar al igual que la inspección pedestre si se requiere brecha bajo la línea vano adelante o atrás, así como si requiere corte de árboles a 45° vano adelante o atrás.

Figura 16. **Vista para información de brecha debajo de la línea y cortes a 45 ° de árboles**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Santa Rosa, tramo 1 del proyecto SIEPAC, torres 10 a 12. 2019). Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Para la siguiente imagen se puede determinar si existen construcciones bajo de línea vano adelante o atrás, construcciones a los lados de la línea y dentro derecho de vía vano adelante o atrás, como también tipo de vegetación existente en el vano a más de 10 metros de la torre al igual que se hace en la inspección pedestre.

Figura 17. Vista para información de construcciones y tipo de vegetación bajo la línea



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Estanzuela, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torres 21 a 23. 2021). Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Siguiendo con la presentación de resultados y mostrando los mismos elementos que se revisan y registran en el formato de inspección utilizado en la forma pedestre, toca la parte de las cadenas de aisladores tanto en disposición de suspensión como de remate.

La imagen muestra vista general de una cadena para poder evaluar si en la cadena está dañado el aislador, requiere limpieza el aislador o requiere ajuste de verticalidad.

Figura 18. **Cadena de suspensión para información de inspección**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Chiquimula, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 80. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

La imagen que se muestra en breve muestra el grado de detalle que se puede conseguir en la inspección con dron para una cadena de suspensión en una torre y en formato digital se logra mucho más detalle que la imagen mostrada.

Figura 19. **Grado de detalle en inspección de cadenas de suspensión**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Chiquimula, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 80. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

De igual manera se exponen los resultados de imágenes de inspección de cadenas de remate para detectar los mismos hallazgos del formato de inspección de forma pedestre en una vista general y el grado de detalle que se obtiene de los elementos.

Figura 20. **Vista para información de inspección de cadena de remate**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Rio Hondo, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 2. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Figura 21. **Vista de grado de detalle en inspección de cadena de remate**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Estanzuela, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 25. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Siguiendo el orden de los elementos revisados en el formato de inspección pedestres se presentan los resultados en imágenes obtenidas mediante dron de los correspondientes a los conductores que involucra al conductor de guarda, al cable OPGW y el conductor de aluminio. Para determinar si los conductores están dañados, para guarda y OPGW si existe o no conexión a las torres, daños a los herrajes de cualquier conductor.

Figura 22. **Vista para información de inspección de conductor de guarda**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Rio Hondo, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 2. 2021).
Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Figura 23. **Vista para información de inspección de conductor OPGW**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Chiquimula, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 80. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Figura 24. **Vista para información de inspección de conductor**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Rio Hondo, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 2. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Para la parte de los conductores es posible obtener un mayor detalle en la inspección mediante videos ya sean desde un ángulo de visión sobre los conductores o de forma perpendicular a los mismos. Este grado de detalle de video en un barrido sobre todo el vano de los conductores desde una torre hasta la otra también brinda información paralela del estado de la brecha en todo el vano revisado, se muestran dos imágenes para resaltar este detalle en la inspección realizada.

Figura 25. Inspección de conductores vista sobre ellos



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Rio Hondo, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torres 79 a 80. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Figura 26. Inspección de conductores vista perpendicular a ellos



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Rio Hondo, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torres 79 a 80. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Las dos siguientes imágenes revelan el detalle de los resultados de inspeccionar la parte más baja de la torre como lo es la parte de obra civil en la cual se puede evaluar si existen problemas de estabilidad, pilas dañadas, pilas erosionadas, deslaves en el sitio de la torre o deslizamiento en un radio de al menos 20 metros del centro de la torre.

Figura 27. **Vista para información de inspección de obra civil**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Rio Hondo, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 2. 2021).
Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Figura 28. **Grado de detalle en inspección de obra civil**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Estanzuela, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 24. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Se presentan los resultados para la parte de inspección mediante dron para la estructura mostrando imagen de vista general, así como grado de detalle obtenido.

Figura 29. **Vista para información de inspección de estructura**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Rio Hondo, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 2. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Figura 30. **Grado de detalle en inspección de estructura**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Chiquimula, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 80. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Ya por último se presentan dos ejemplos de hallazgos detectados mediante inspección con el uso de drones. El primero la presencia de contaminación en la estructura mediante nidos de aves en la ménsula del conductor inferior y la segunda un daño en una cadena de suspensión en el aislador polimérico a consecuencia de una descarga electro atmosférica mediante falla de fase a tierra.

Figura 31. **Hallazgo en estructura, contaminación por nido de aves**



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Rio Hondo, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torre 2. 2021).

Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

Figura 32. Hallazgo en cadena de aislador en suspensión, daño por descarga electro atmosférica



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Chiquimula, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torres 80. 2021). Colección particular del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

4.1.3. Análisis de uso de drones para mantenimientos predictivos

Partiendo de que la presente investigación no pretende hacer una comparación de ambas formas de realizar mantenimientos predictivos en líneas de transmisión, ni mucho menos sacar las ventajas y desventajas de realizar la actividad de una forma o de otra.

Tampoco busca establecer o determinar una comparación financiera de cuál es la forma más económica o en cual se generaría un ahorro significativo. Lo que se pretende es demostrar que la tecnología actual aunado con el crecimiento y desarrollo tiene la viabilidad de incorporarse con múltiples beneficios para tareas de inspección de líneas de transmisión.

Debe aclararse que el formato de inspección pedestre también aporta información mediante imágenes de fotografías tomadas en sitio de elementos de la torre y hallazgos detectados mediante el llenado del formato.

Figura 33. **Ejemplo de imágenes en informe de inspección pedestre**

Torre 123 polimérico de fase superior se encuentra picado por ave vano atrás—fisuras en pata C D.



Fuente: [Fotografía de EPR]. (Camotán, tramo 3 del proyecto SIEPAC, torres 123. 2019). Extraída de informe de inspección del departamento de líneas de transmisión EPR. Guatemala.

De las inspecciones pedestres se puede resaltar que a pesar de que genera información a consecuencia de realizar la tarea, mucha de esa información lleva el sesgo de la persona que la está realizando y la información que plasmada en el formato se queda con ese criterio. Luego esa información, aunque después sea procesada no tiene la característica de ser validada por otro criterio dado que para realizar eso se requeriría nuevamente ir a sitio y corroborar que la información levantada es correcta a la plasmada en un documento.

Para la inspección pedestre y propiamente del formato de inspección se puede resaltar que él mismo es llenado a mano de hojas previamente impresas y el informe que se genera no es puramente digital, sino que son escaneados para convertirse en un formato PDF y las imágenes que contiene el mismo son previamente impresas y posteriormente digitalizada en formato PDF. De lo anterior se puede establecer que la información que genera una inspección pedestre en la actualidad no es 100 % digital y la información digitalizada no es digerible para ciertas actividades o análisis que potencialicen el uso de esta.

Otro aspecto a resaltar en lo relacionado a las inspecciones pedestres es que la información o informes individuales generados por sí solos no presentan información digerible para sacar estadísticas, resúmenes, repeticiones o cualquier otro análisis numérico, para lograr esto se debe procesar esta de la forma como se hizo en esta investigación, tabular toda la información de cada informe para posterior poderse hacer análisis que involucren todas las inspecciones

En lo que concierne inspecciones mediante sobrevuelos con helicóptero se puede determinar que los mismos, aunque son rápidos abarcan todo el tramo de la línea, no generan una información detallada únicamente dan información de aspectos puntuales como lo son mal estado de brecha, construcciones bajo

la línea y muy poca información sobre elementos propios de la torre y conductores así como aisladores. Cómo información digital tampoco genera videos, fotografías o tablas con característica de análisis o estadística.

De haber tabulado la información se obtuvo todo lo ya detallado en esta investigación y se dan otros aportes que posterior pueden ser muy valiosos si ha futuro se realizan comparaciones de qué forma pueden ser más eficiente, más rápido o económico. En la columna 1 de la tabla XIX se da el tiempo usado para inspeccionar una torre, la columna 2 indica la cantidad de torres que usan ese tiempo para su inspección.

Tabla XIX. Tiempos usados para inspección de una torre

Tiempo en horas de inspección	Cantidad de torres
0.50	1
0.67	40
0.83	24
1.33	1
1.50	10
1.00	88
Total	164

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Tabla XX. Indicadores de tiempos de inspección de torres

Mediciones de tiempos	Tiempo en horas
Mínimo para inspección de una torre	0.50
Máximo para inspección de una torre	1.50

Continuación tabla XX.

Promedio por torre según el total	0.92
Total, de horas de inspección de todas las torres de la línea	151.50

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Para la parte de inspecciones mediante drones se mencionan puntos relevantes sin caer en una comparación cuantitativa de lo observado en las dos formas de realizar la actividad de mantenimiento predictivo en una inspección rutinaria de la mencionada línea.

Se resaltan aspectos que de igual forma son valederos en el análisis del objetivo dos planteado en esta investigación relacionados con la información que se captura (almacena) en una inspección y es que al tener información en digital tanto en imágenes como en videos estas tienen una gran relevancia y puede revisarse muy detalladamente como, por ejemplo, realizando aumentos a las imágenes para apreciar mejores detalles. Deteniendo en pausa, adelantar o retroceder un video al momento que se desee o en algún momento de interés de las grabaciones con que se cuenta.

Se puede resaltar o hacer uso de la expresión que una imagen dice más que mil palabras llevándolo al contexto del grado de detalle y la repetibilidad de revisar un punto, un elemento o un instante de tiempo.

Aunque la inspección puramente con dron tampoco genera información ya tabulada la información capturada y posteriormente analizada con carácter de generación de informes ya digitalizados alimentados con la información capturada puede convertir la información en digital hablando de información tabulada y ordenada.

4.2. Localizar mantenimientos correctivos

Para esta sección se tuvo una apertura de línea en el tramo en estudio de esta investigación el día 15 de julio, el tipo de falla y características de esta que no son objeto de discusión en este documento daban indicios que la causa de la falla era un objeto extraño que tocó el conductor de la línea y se generó una falla de fase a tierra, que duró una hora y 15 minutos en restablecer la disponibilidad de la línea.

Con el objetivo de determinar cuál fue la causa real de la falla se realizaron contrataciones de personal externo para realizar inspección de la forma pedestre y también con un dron.

4.2.1. Localización de falla por inspección pedestre

En esta actividad se inspeccionaron 7,104 metros lineales, 25 torres y 17 vanos de conductor con los siguientes resultados.

Informe: un documento impreso de 36 hojas conteniendo 59 fotografías de tamaño máximo media página de hoja tamaño carta, de las cuales 38 fotografías detallan únicamente la placa de identificación de la torre como constancia que llegaron al punto de la torre. 21 fotografías dan una vista general de la brecha de vanos de hasta 816 metros de longitud.

Adicional el informe contiene una hoja resumen que se presenta en la siguiente tabla donde indica los hallazgos detectados.

Por último, se presentan las conclusiones del informe de aceptación a nivel interno de los trabajos y entregable las cuales fueron transcritas.

Como resultado del patrullaje pedestre en los vanos conforme a la tabla siguiente, del tramo 3, no se evidencia muestras de ramas o árboles quemados por arco eléctrico o de otro tipo de daños, en el tramo 3, sin embargo, sé se detectaron árboles en crecimiento y recomienda entre otros aspectos los siguiente: Recuperar la Brecha para evitar fallas futuras derivado del crecimiento de árboles.

Tabla XXI. Resultados de inspección pedestre para localización de falla

Vano	Hallazgo	Recomendación para brecha	Existencia de falla reciente por quema/acercamiento o pérdida de libranza eléctrica en aire	Existe	Requiere
				Si/No	Si/No
94	95	Árboles jóvenes en poca cantidad y cultivos	Aún está definida	NO	SI
95	96	Árboles jóvenes en poca cantidad	esta en una hondonada no hay brecha	NO	SI
111	112	Árboles varios	se recomienda recuperar brecha	NO	SI
124	125	Árboles jóvenes en poca cantidad y cultivos	se recomienda recuperar brecha	NO	SI
127	128	Árboles jóvenes en poca cantidad y cultivos	se recomienda recuperar brecha	NO	SI

Continuación tabla XXI.

128	129	Árboles jóvenes en poca cantidad y cultivos	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
129	130	Árboles jóvenes en poca cantidad y cultivos	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
130	131	Árboles jóvenes en mediana cantidad	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
131	132	Árboles jóvenes en mediana cantidad	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
132	133	Árboles jóvenes en mediana cantidad	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
133	134	Árboles jóvenes en mediana cantidad	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
136	137	Árboles pinos mediana cantidad	existe un parte en hondonada y se recomienda recuperar la brecha	NO		SI
138	139	vegetación variada entre árboles y cultivos	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
139	140	Árboles jóvenes en poca cantidad	se recomienda delimitar el área de la brecha pues los árboles están dentro de la servidumbre de paso	NO	SI	SI

Continuación tabla XXI.

140	141	Árboles pinos mediana cantidad	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
141	142	Árboles Jóvenes en poca cantidad	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
142	143	poca vegetación	se recomienda delimitar el área de la brecha pues los árboles están dentro de la servidumbre de paso	NO	SI	SI
143	144	Árboles Jóvenes en poca cantidad	se recomienda recuperar brecha	NO	SI	SI
145	146	Árboles pinos mediana cantidad	Definir brecha en área de vegetación de árboles	NO	SI	SI

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

Por la inspección y el informe con la información que se detalla se realizó una inversión de \$ 914.43.

4.2.2. Localización de falla por inspección con dron

Para esta actividad se contrató la inspección de vanos de torres mediante dron para determinar cuál fue la causa real de la falla solicitando la revisión de la torre 115 a la 140 del tramo tres. Los resultados obtenidos son los siguientes.

Revisión mediante dron de los vanos de las torres de la 110 hasta la 140 con 14,062 metros lineales según la tabla siguiente con entregable de 15 videos con una duración en tiempo total de 1:04:24 de información visual, de los cuales se puede sacar la misma información que la obtenida mediante inspección pedestre.

Tabla XXII. Resumen en video recabado en inspección con dron

Vano		Distancia [m]	Video
110	111	646.823	1 y 2
111	112	289.769	3
112	113	488.16	3
113	114	421.95	3
114	115	749.71	3 y 4
115	116	277.04	4
116	117	323.1	5
117	118	756.08	5
118	119	193.96	6
119	120	549	6
120	121	209.08	6
121	122	686.92	6
122	123	674.548	6
123	124	716.572	7 y 8
124	125	398.88	7 y 8
125	126	305	7 y 8
126	127	721.86	7 y 8
127	128	112.403	9
128	129	655.237	9
129	130	642.64	9
130	131	441.86	9
131	132	140.998	9
132	133	204.942	10

Continuación tabla XXII.

133	134	307.43	11
134	135	663.89	11
135	136	262.74	11
136	137	574.37	12
137	138	573.08	13 y 14
138	139	257.93	14
139	140	816.63	14 y 15

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Para esta contratación se transcriben las conclusiones de los trabajos contenidas en informe interno de aceptación de los trabajos y entregable.

Se obtuvieron en total 15 videos que cubren de las torres 110 a la 140, en los mismos no se evidencian muestras de ramas o árboles quemados por arco eléctrico o de otro tipo de daños. Los videos referidos se comparten mediante un enlace.

Por la inspección y el informe con la información que se detalla se realizó una inversión de \$ 1,054.31.

En este ejercicio en ninguna de las dos formas de revisión pudo ser posible encontrar una evidencia de la falla ocurrida, por lo que la cual se caracterizó como una falla temporal notificando a los entes regulatorios.

4.2.3. Análisis de uso de drones para mantenimientos correctivo

Para esta investigación en lo concerniente a la localización de una falla catalogado como mantenimiento correctivo dado que la falla fue real y sacó de servicio la línea de transmisión fue necesarios recorrer la línea en la ubicación que las protecciones indicaron que sucedió la falla con la finalidad de que si existían objetos extraños o árboles cercanos a los conductores se procediera a su corte o corrección de brecha.

Cabe mencionar que en la información a la que se tuvo acceso para esta investigación y en el periodo de tiempo del estudio solo existió esta falla que ameritó su revisión.

En este caso en particular no se encontró en ninguna de las dos formas, tanto pedestre como con dron una causa real que haya generado la falla. Sin embargo, el ejercicio fue muy enriquecedor para la investigación dado que arrojan aspectos que resaltan y aportan conocimiento.

El uso de drones para una tarea específica como en este caso, que se trataba de revisar objetos extraños o árboles muy cercanos de los conductores, por mala brecha o por acciones de la naturaleza que fuera el causal que haya existido una falla de fase a tierra, tiene mucha practicidad dado que se requiere un vuelo sobre los conductores a una velocidad moderada que de información visual de lo que se está buscando.

Por lo tanto, los vuelos de misión con dron para esta actividad abarcan mucho terreno de revisión en poco tiempo, situación que con una inspección pedestre requiere de más.

Como ya se mencionó la característica del volumen de información que se genera con una inspección mediante drones es mayor que la que se genera con una inspección pedestre. Aunado a ello también se repite otro aspecto que diferencia y potencializa una forma sobre la otra, como lo es el sesgo del criterio de la persona que realiza la inspección no puede ser validado o cotejada dado que la información que se genera no tiene ese carácter de revisión o validación, como si lo tiene la información que se genera con dron.

El formato video para este tipo de misión es el más adecuado dado que es más rápido y almacena todo lo que la cámara del dron capta y el piloto de dron decide revisar.

4.3. Recolección data en inspección y localización de fallas

El dron de alta gama predominante hasta la fecha es el DJI matrice 300 con muchas mejoras a su predecesor el matrice 200 que carecía de sensores avanzados para tareas de aproximación a los elementos de inspección.

Las características de tiempo de vuelo y navegación han ido evolucionando con el pasar del tiempo y las mejoras son notables, sin embargo, lo que en esta investigación persigue es revisar las mejoras en temas de transmisión de la data y tareas de automatización.

Para nadie es secreto que la mejora constante en lo relacionado a la tecnología lleva un ritmo acelerado en todas las áreas y la parte de drones no es la excepción, por lo que en este apartado se analizará lo más reciente hasta la fecha de la realización de esta investigación.

Tal vez en un corto tiempo la tecnología analizada para un lector ya sea obsoleta y no sería de extrañarse dado que la visión de avance en este tipo de equipos es hacia la mejora en temas de tiempo de vuelo y sobre todo la autonomía y automatización en tareas de carácter rutinarias y específicas.

Se describen las características más notorias y las más avanzadas que pueden ser de mucha utilidad al incorporar drones para tareas de inspección y localización de fallas en una línea de transmisión.

Como resultado de una revisión de la tecnología actual de drones con características de transmisión de la data generada a un punto remoto y la autonomía en tareas que pueden ser pregrabadas para realizar actividades de inspección de torres en la parte de actividad rutinarias, así como tareas en misiones de reconocimiento y localización de fallas.

Se presenta la información del dron de DJI matrice 30 que posee muchas de esas características y que es lo más reciente en tema de tecnología de drones con que se cuenta y pensado para tareas como las descritas.

Como primera parte se muestran las características principales en la parte de visión para este dron para el cual existen dos versiones el M30 y el M30T donde su diferencia es en el segundo modelo que trae incorporado una cámara térmica muy adecuada y con muy buenos resultados para la inspección de torres de líneas de transmisión. Posterior se dan características de redundancia que posee que lo hacen muy versátil y sobre todo seguro.

Figura 34. **Características ópticas del dron DJI M30**

• **TELÉMETRO LASER**

3 a 1200 m | rango de medición
 $\pm (0,2 \text{ m} + D \cdot 0,15\%)$ D es la
Distancia a una superficie vertical



• **CAMARA GRAN**

ANGULAR

1/2" CMOS 12 MP
Distancia focal equivalente: 24 mm
Video 4k a 30 fps

• **CÁMARA CON ZOOM**

1/2" CMOS 48 MP
Zoom óptico de 5x – 16 x
Zoom digital de 200x

• **CÁMARA TÉRMICA
(Solo M30T)**

640 x 512 alta resolución
Distancia focal equivalente: 40 mm
Imágenes R-JPG

Fuente: DJI (2022). *Matrice 30*. Consultado el 28 de septiembre de 2022. Recuperado de
<https://www.dji.com/matrice-30>.

Figura 35. **Capacidad de redundancia para dron DJI M30**



Fuente: DJI (2022). *Matrice 30*. Consultado el 28 de septiembre de 2022. Recuperado de
<https://www.dji.com/matrice-30>.

Lo innovador en el tema de drones que se ve por primera vez es la nueva base de DJI Dock construida para vuelo de drones automáticos y repetibles las 24 horas los 7 días de la semana, de día o de noche incluso en lluvia, donde se necesite, altamente compacta para una fácil instalación y configurable en un corto tiempo. Todos sus componentes principales son modulares y de fácil mantenimiento.

La versión del dron M30 Dock tiene la capacidad de: al aterrizar puede recargarse y despegar nuevamente en tan solo 25 minutos para ejecutar misiones programadas, lo que lo hace muy funcional en tareas de misión de búsqueda de una falla ocurrida.

En la parte de alcance ofrece un radio de operación de 7 kilómetros y su ventaja es que puede cubrir una amplia gama de tareas repetitivas de inspección y monitoreo pensado para una variedad de escenarios de los cuales se adapta muy bien a tareas de inspección de líneas de transmisión.

Tabla XXIII. Versión de base de la serie Matrice 30

Característica	Detalles
Operaciones sin parar	La versión de base Dock de la serie M30 tiene un rendimiento de nivel insignia con una resistencia máxima al viento de 15 m/s, protección de entrada IP55 y funciona en temperaturas que van desde -30 °C a 50 °C gracias a su aire acondicionado TEC.
Cobertura de área amplia	Completamente cargado, el M30 vuela durante 40 minutos y puede realizar misiones e inspecciones hasta a 7 km de su base.
Detalles del objetivo al alcance de su mano	La versión de base de la serie M30 integra cámaras de gran angular, zoom y térmicas (solo M30T) con un telémetro láser, que en conjunto pueden capturar los datos aéreos que necesita, cuando los necesita.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Figura 36. **Componentes de base o muelle DJI Dock**



Fuente: DJI (2022). *Matrice 30*. Consultado el 28 de septiembre de 2022. Recuperado de <https://www.dji.com/matrice-30>.

Figura 37. **Paquete de base DJI Dock del M30 o M30T**



Fuente: DJI (2022). *Matrice 30*. Consultado el 28 de septiembre de 2022. Recuperado de <https://www.dji.com/matrice-30>.

Las bases DJI pesan menos de 100 kg y ocupan menos de 1 metro cuadrado, la configuración requiere fijación a tierra, acceso a energía e Internet, y una configuración rápida a través del control remoto DJI RC Plus. Los DJI Docks están repletos de hardware altamente integrado, lo que mejora la funcionalidad.

Las ventajas y novedades de M30 Dock se complementan con la nueva versión de *software* DJI FlightHub 2, con control completo en la nube. Puede realizar planificación de rutas y gestión de misiones desbloqueando la funcionalidad completa de DJI Dock desde la nube. Puede programar misiones, crear y editar rutas de vuelo y administrar los datos recopilados.

La siguiente tabla resume los principales beneficios y características que se obtienen con el nuevo *software* que lo hace ampliamente innovador en la idea de incorporar esta tecnología a tarea de inspecciones de línea de transmisión

Tabla XXIV. Beneficios que ofrece *software* FlightHub 2

Beneficios	Descripción
Control completo de la nube	Con FlightHub 2, desbloquee la funcionalidad completa de DJI Dock desde la nube. Programe misiones, cree y edite rutas de vuelo y administre los datos recopilados.
Conciencia en tiempo real	Transmita en vivo en alta definición en cualquier momento para verificar su DJI Dock o su dron.
Planificación de la misión	Planifique rutas de vuelo complejas de forma remota a través de FlightHub 2.
Gestión de planes de vuelo	Edite, administre y envíe rutas de vuelo a sus DJI Docks y realice un seguimiento del progreso y los resultados del vuelo.
Gestión y almacenamiento de medios	Revise las imágenes, videos, mapas y panoramas etiquetados geográficamente recopilados por los drones. Los datos recopilados por los drones se pueden cargar y almacenar automáticamente para su uso posterior.

Continuación tabla XXIV.

Operación y mantenimiento integrales	Supervise la salud y el estado de sus DJI Docks y drones, todo de forma remota desde la nube.
--------------------------------------	---

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

4.3.1. Análisis de las ventajas de transmisión de data en corto tiempo para inspección y localización de fallas

Si se habla de la data recolectada, en la actualidad el compartir información en la nube es lo más común, cualquier tipo de información y volumen de esta puede ser compartida y de fácil acceso para los usuarios que se deseé.

En relación con el tiempo de acceso a la información capturada en un proceso normal de inspección con la tecnología convencional, se estaría dependiendo de que el usuario que recopiló la información del dron, la comparta a los demás usuarios al tener un punto de conexión con la nube, solo así los demás usuarios podían acceder a la información recolectada.

Este proceso puede padecer atrasos dado que dependería del usuario y para realizar esta actividad podrían ocurrir muchos factores que puedan evitar que la información llegue de forma ágil a otros usuarios. Con un sistema como el que ofrece la base *dock* aunado a la plataforma del *software FlightHub 2*, este proceso es automatizado y el único retardo de la información recolectada sería el tiempo de conexión y subida de la información una vez el dron M30 aterrice en su base después de una misión finalizada.

La versatilidad ofrecida con la nueva tecnología relacionada a la gestión y almacenamiento de medios ofrece la ventaja de revisar la información recolectada como imágenes, videos, mapas y panoramas etiquetados geográficamente lo cual es recopilado por los drones.

Esta característica suma un gran valor a la parte de transmisión de datos en tiempos muy cortos enfocado a la aplicación que se desea de inspecciones de elementos de una línea de transmisión, así como lo es vuelos de misión en búsqueda de una falla ocurrida donde los tiempos cortos son fundamentales para atender una emergencia o una acción correctiva en los activos y mantener el servicio del fluido eléctrico esencial para un país y su población.

CONCLUSIONES

1. La incorporación de tecnología de drones para las tareas de operación y mantenimiento traducidas en inspección y localización de fallas en la actividad de transporte de energía eléctrica posee un potencial ilimitado de ventajas que al implementarlo comercialmente brinda múltiples beneficios que suman valor a la innovación y actualización de este sector, aunado a los elementos de seguridad de las personas y reducción de tiempos para las tareas, modernización y digitalización, por lo tanto, incorporarlos para realizar estas tareas tiene una alta viabilidad su uso.
2. El uso de drones para mantenimientos predictivos rutinarios, de las torres de líneas de transmisión y sus elementos que las conforman, generan un volumen alto de información con alta definición de imágenes y videos de los elementos, que posteriormente pueden ser analizados y tabulados para generar informes más ágilmente y con la misma o más información que los que se generan de forma pedestre en la actualidad y con ello obtener indicadores y estadísticas que finalmente nos muestre el estado real de los activos.
3. Una inspección mediante vuelo con dron para una localización de falla con carácter de mantenimiento correctivo es más rápido comparado con una inspección pedestre, generando mucha más información útil para revisar posteriormente con mayor detalle si fuese necesario.

4. En la actividad de transporte de energía eléctrica localizar una falla que genere indisponibilidad del activo es de vital importancia, por lo que garantizar que la obtención de la data recolectada sea transmitida a la nube, con fáciles accesos de parte de las personas que realicen tomas de decisiones en un corto tiempo es muy ventajoso para programar trabajos de corrección y con ello recuperar el fluido eléctrico y la disponibilidad del activo.

RECOMENDACIONES

1. Incorporar drones en tareas de inspección de líneas de transmisión es un tema poco estudiado, ya que en el país aún es escasa la implementación de su uso para estas tareas de mantenimiento, por lo que se insta a futuros profesionales continuar con la investigación enfocados en temas tales como: de costo beneficio, eficiencia en las actividades, retorno de la inversión, seguridad de las personas y muchas otras.
2. Invertir en tecnología de drones con capacidad de cámara térmica, lo que sumará muchos más beneficios como lo es la detección de puntos calientes con lo cual eleva la confiabilidad de un sistema eléctrico de transporte.
3. Continuar con la metodología de inspección predictiva que hasta la fecha ha dado buenos resultado se propone un procedimiento automatizado de vuelo de misión para inspección de torres y sus elementos, en el mismo orden que se rellena el formato de revisión, con el propósito de seguir la secuencia que actualmente tiene el formato de inspección, con la finalidad de que al repetir los videos e imágenes se pueda llenar el formato actual solo que ya en una plataforma digital.
4. Digitalizar los formatos de inspección pedestre dado que es conveniente trasladarlos a una plataforma como Excel u otra aplicación superior, donde se pueda alimentar el formato mediante un dispositivo móvil para que la misma sea almacenada y procesada de forma automática, con ello se evitaría contar con información que no es de fácil procesamiento.

5. Equipar para otras investigaciones dónde fomentan el uso de drones en tareas de inspección de líneas de transmisión u otra aplicación de estos vehículos para tareas autónomas, con una cantidad adecuada de baterías, para lograr una mayor eficiencia en la recolección de datos.

REFERENCIAS

1. Araya, L. (2020). *Mantenimiento basado en la confiabilidad en los sistemas de transmisión en redes eléctricas de alta tensión para COLBUN S.A.* (Tesis de maestría). Universidad de Talca Chile, Chile.
2. Castillejo, A. (2019). *Diseño e implementación de un sistema para la gestión de una flota de drones para la inspección de plantas fotovoltaicas* (Tesis de maestría). Universidad de Sevilla, Sevilla.
3. Correa, M. (2016). *Desarrollo de un método de localización de fallas en sistemas HVDC de transmisión de energía basado en las componentes resistivas del sistema* (Tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
4. Department of Defense (2010). *Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms*. Estados Unidos: Autor.
5. Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*. Costa Rica: Autor.
6. Empresa Propietaria de la Red. (2020). *Gestión de operación y mantenimiento EPR*. Costa Rica: Autor.
7. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. (2020). *Línes de transporte de energía eléctrica*. Madrid, España: Autor.

8. Huerta, E. B. (2014). *Localización de fallas en líneas de transmisión* (Tesis de maestría). Universiada Autónoma de Nuevo León, México.
9. Jenssen, R., Roverso, D., y Nguyen, V. (enero, 2019). Intelligent Monitoring and Inspection of Power Line Components Powered by UAVs and Deep Learning. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 6(1), 11-21. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8610301>.
10. Lemus, H. A. (2013). *Elaboración de manual de procedimiento para mantenimiento de líneas de transmisión de ETCEE-INDE* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlod de Guatemala, Guatemala.
11. León, H. (2018). *Diseño de Hexacóptero autónomo para mantenimiento en línea eléctricas* (Tesis de licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.
12. Martínez, E. (febrero 2015). Piloto de RPAS multicóptero. *Guía de referencia*, 1(1), 249-250.
13. Meza-Mora, J. A., Gómez-Astúa, A., y Prado-Mora, A. (diciembre 2021). Inspección inteligente de líneas de alta tensión con drones. *Tecnología en Marcha*, 34(4), 62-69.
14. Orellana, P. J. (2018). *Propuesta de la integración de drones, como recurso en el plan de mantenimiento de la sección de líneas de transmisión del sistema central de la empresa de transporte y*

control de energía eléctrica del INDE (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlod de Guatemala, Guatemala.

15. Structuralia. (2020). *Introducción y normativa de los drones*. Madrid, España: Autor.
16. Zhou, Z., Xiong, F., Zhang, Y., Zhang, C., Umer, T., y Xu, C. (enero, 2018). Energy-Efficient Industrial Internet of UAVs for Power Line Inspection in Smart Grid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(1), 2705-2714. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8259479>.

APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla dinámica generada de formatos de inspección

Hallazgos detectados	Cantidad de torres
Suma de Requiere brecha bajo la línea Vano Adelante	40
Suma de Requiere brecha bajo la línea Vano Atrás	36
Suma de Requiere corte de árboles a 45° Vano Adelante	4
Suma de Construcciones bajo de línea Vano Adelante	11
Suma de Construcciones bajo de línea Vano Atrás	11
Suma de Construcciones a los lados de la línea y dentro derecho de vía Vano Adelante	6
Suma de Construcciones a los lados de la línea y dentro derecho de vía Vano Atrás	5
Suma de Requiere limpieza el sitio de torre Vano Adelante	160
Suma de Requiere limpieza el sitio de torre Vano Atrás	159
Suma de Cadena de aisladores vano adelante dañada Fase Superior	2
Suma de Cadena de aisladores vano adelante dañada Fase Media	1
Suma de Cadena de aisladores vano atrás dañada Fase Superior	6
Suma de Cadena de aisladores vano atrás dañada Fase Media	1
Suma de Conductor de Guarda dañado Fase Superior	9
Suma de Conductor del OPGW dañado Fase Superior	4
Suma de Daño en Herrajes Fase Superior	1
Suma de Daño en Herrajes Fase Inferior	1
Suma de Piezas faltantes	2
Suma de En mal estado	5
Suma de Problemas de estabilidad	1
Suma de Pilas dañadas	81
Suma de Asentamiento de pilas	1

Continuación apéndice 1.

Suma de Hay deslizamientos en un radio de 20 m del centro de la torre	1
Suma de Existe placa de peligro	16
Suma de Existe placa de identificación del proyecto	4
Suma de Existe placa de numeración	15

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

ANEXOS

Anexo 1. Primera parte de formato de inspección de líneas de transmisión de forma pedestre

Borrador de informe Inspección torres alta Tensión

Fecha:				Tramo No.		Hora Ini.		Hora Fin.
--------	--	--	--	-----------	--	-----------	--	-----------

Torre No:				Código:	
-----------	--	--	--	---------	--

BRECHA	Vano Adelante		Vano Atrás		
	SI	NO	SI	NO	
Requiere brecha bajo la línea:					
Requiere brecha a los lados dentro del derecho de vía:					
Requiere corte de árboles a 45°:					
Construcciones bajo de línea:					
Construcciones a los lados de la línea y dentro derecho de vía:					
Se encuentran enmontadas las bases de la torre:					
Bejucos en la estructura:					
Requiere limpieza el sitio de torre:					
Tipo de vegetación existente en el vano a menos de 10 metros					
Tipo de vegetación existente en el vano a mas de 10 metros					
Topografía del terreno donde se ubica la estructura:	PLANO				

CADENAS DE SUSPENSIÓN	Fase Superior		Fase Media		Fase Inferior	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Cadenas de aisladores dañadas:						
Requieren limpieza las cadenas de aisladores:						
Requieren verticalidad las cadenas de suspensión:						
CADENAS DE REMATE	Fase Superior		Fase Media		Fase Inferior	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Cadena de aisladores vano adelante dañada:						
Cadena de aisladores vano atrás dañada:						
Requieren limpieza las cadenas de aisladores:						
Cuello muerto se encuentra normal:						
Jumper del cuello muerto se encuentra normal:						

CONDUCTORES	Fase Superior		Fase Media		Fase Inferior	
	SI	NO	SI	NO	SI	NO
Conductor de fase dañado:						
Falta conexión a torre						
Conductor de Guarda dañado:						
Conductor del OPGW dañado:						
Daño en Herrajes						
Existe libranza del conductor al suelo						
Si no existe libranza indicar distancia del suelo al conductor en metros.						

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.

Anexo 2. Segunda parte de formato de inspección de líneas de transmisión de forma pedestre

AMORTIGUADORES	Fase Superior		Fase Media		Fase Inferior	
	V. Adte	V. Atrás	V. Adte	V. Atrás	V. Adte	V. Atrás
No. de amortiguadores en conductores de fase:			1	1	1	1
No. de amortiguadores en conductor de guarda:						
No. de amortiguadores en conductor OPGW:						
CAJA DE EMPALME OPGW	SI	NO				
Cuenta con sus herrajes completos de anclaje a la Torre						
Presenta daños visual de vandalismo o corrosión						
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	SI	NO	Ubicación de las puestas a tierra			
En mal estado			Pata A	Pata B	Pata C	Pata D
Piezas faltantes						
Valor de la medición de puesta a tierra:						
OBRA CIVIL	SI	NO	Pila A	Pila B	Pila C	Pila D
Problemas de estabilidad						
Pilas dañadas:						
Pilas erosionadas:						
Deslaves del sitio de torre:						
Asentamiento de pilas						
Hay deslizamientos en un radio de 20 mts: del centro de la torre:						
Tipo de protección en el sitio de torre y pilas:						
ESTRUCTURA	SI	NO				
Limpieza y resane de perfiles:			Nombre del Supervisor			
Piezas oxidadas:						
Torque (ajuste de pernos):			Firma del Supervisor			
Faltan perfiles y pernos:						
Pintura a pernos:			Vo. Bo. Ing. Supervisor			
Malla Anti escalamiento dañada:						
Pernos de escalamiento:						
Existe placa de peligro:						
Existe placa de identificación del proyecto:						
Existe placa de numeración:						
La torre se aprecia inclinada:						
OBSERVACIONES y Hallazgos:						

Fuente: Empresa Propietaria de la Red. (2019). *Información 2019*.