

Manual de buenas prácticas para la inspección de líneas de transmisión de energía eléctrica en
Colombia mediante vehículos aéreos no tripulados UAV

Eduar Tomas Anaya Rojas

Nicolás Andrés Vargas Cáceres

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electricista

Director

Julián Gustavo Rodríguez Ferreira

PhD Astrofísica

Co-director

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

PhD Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis padres y mis abuelos por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de la vida.

A Paola por ser el pilar que me ha mantenido y apoyado incondicionalmente en todo momento. Al profesor Julián y el Profesor Ricardo quienes me han enseñado el gusto y el amor por la ciencia, la astronomía y la aeronáutica. Al semillero SCUA y sus integrantes con los que aprendimos a hacer ciencia mientras nos divertíamos intentando despegar cohetes y no estrellar nuestros aeromodelos.

-Eduar Anaya-

Este logro alcanzado lo dedico en primer lugar a Dios, quien me sigue llenando de fortaleza para seguir persiguiendo mis sueños cada día.

A mis padres Alfredo y Claudia, gracias por todo el apoyo brindado, cada esfuerzo y oración para que concluyera con éxito esta etapa de mi vida.

A mi amada Kathe, quien con su compañía y cariño ha hecho de mi una mejor persona, y a la que agradezco cada consejo, desvelo y motivación para finalizar mi vida profesional.

A mi hermano Juan, a cada uno de mis familiares y amigos, los cuales estuvieron presentes en este proceso.

Y finalmente agradezco de manera especial a los Ingenieros Manuel y Alejandra, quienes me han brindado la oportunidad de emprender rumbo en el ámbito laboral.

-Nicolás Vargas-

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad, los espacios y los docentes capacitados para crecer hasta ser profesionales. A nuestro director Julián Rodríguez y codirector Oscar Quiroga por el acompañamiento durante todo el desarrollo de este proyecto. Finalmente agradecemos al ingeniero Misael Acosta y a todo el personal de la empresa Proyectos Obras y Diseños PROYED SAS, quienes sin esperar nada a cambio nos abrieron las puertas de su empresa y todo su conocimiento para poder mejorar y finalizar este manual.

Tabla de Contenido

Introducción	15
Objetivos	17
1. Generalidades de la inspección de líneas de transmisión	18
1.1. Vehículos aéreos no tripulados para la inspección de líneas de transmisión	19
1.1.1. UAVs	19
1.1.2. Estación de control terrestre (GCS)	21
1.1.3. Unidad de comunicación	21
1.1.4. Carga útil	22
1.1.4.1. Cámara visual	22
1.1.4.2. Cámara térmica (IRT)	22
1.1.4.3. Escáner LiDAR	23
1.1.4.4. Sistemas multi-cámara	23
1.2. Principales marcas del mercado	23
1.3. Características al momento de elegir un UAV	24
1.4. Marco legal y regulatorio para la inspección de líneas mediante UAVs	26
1.4.1. Categorías	27
1.4.2. Prohibiciones	28

1.4.3. Permisos y requisitos para pilotar drones	28
1.4.3.1. Inscripción del explotador y del operador UAS de Clase B	29
1.4.3.2. Condiciones técnicas para UAS	29
1.4.3.3. Otros requisitos sobresalientes	29
1.5. Recomendaciones de seguridad sobre el uso de UAVs en inspección de líneas	30
1.5.1. Seguridad aeronáutica	30
1.5.2. Seguridad eléctrica	32
2. Fallas en la infraestructura eléctrica de transmisión detectables con UAVs	39
2.1. Falla en la servidumbre	39
2.2. Falla por fauna	42
2.3. Falla por efectos atmosféricos	43
2.4. Falla en elementos de la infraestructura	44
2.5. Falla en equipos de maniobra	44
2.6. Falla en los soportes de las redes	45
2.7. Falla por efectos de corrosión	45
2.8. Falla por puntos o elementos calientes	46
2.9. Falla por efecto corona	47
3. Técnicas de inspección de líneas eléctricas mediante UAVs	48
3.1. Inspección visual	49
3.2. Inspección termográfica	52

3.3. Inspección ultravioleta	55
3.4. Inspección por fotogrametría	57
3.5. Inspección por LiDAR	59
4. Protocolo al momento de la inspección, recolección y entrega de datos	61
4.1. Actividades previas a la inspección	61
4.2. Actividades de campo	62
4.2.1. Preparación de la misión	63
4.2.2. Revisión del sistema UAS	64
4.2.3. Capacidad de respuesta ante emergencias	64
4.2.4. Identificación de los métodos de inspección	66
4.2.5. Inicio de la inspección	67
4.2.5.1. Vuelo manual	68
4.2.5.2. Vuelo automático supervisado	68
4.3. Actividades posteriores a la inspección	69
4.3.1. Mantenimiento y almacenamiento del UAS	69
4.3.2. Análisis y tratamiento de los datos recolectados	69
5. Modelo de entrega de resultados	71
6. Demostración práctica como ejemplo para aplicar el contenido del manual	73
6.1. Actividades previas a la inspección	73

6.2. Actividades de campo	76
6.3. Actividades posteriores a la inspección	87
7. Conclusiones	90
Referencias Bibliográficas	92

Lista de Figuras

Figura 1.	Drone DJI Matrice 600.	20
Figura 2.	Ala Zagi desarrollada por el semillero SCUA.	21
Figura 3.	Corrientes para una línea de 500kV.	35
Figura 4.	Vista lateral con distancias mínimas de aproximación.	37
Figura 5.	Vista superior con distancias mínimas de aproximación.	37
Figura 6.	DJI Matrice 300 RTK.	50
Figura 7.	Evidencia de una inspección visual simple.	51
Figura 8.	Toma de evidencia en una inspección termográfica y visual.	53
Figura 9.	Cámara termográfica Zenmuse XT - DJI.	54
Figura 10.	Efecto corona en cadena de aisladores.	56
Figura 11.	Bosquejo simple del proceso fotogramétrico con sistemas UAV.	58
Figura 12.	Toma de evidencia para procesamiento fotogramétrico.	58
Figura 13.	Gráfico de la toma de información con LiDAR.	60
Figura 14.	DJI MAVIC 2 Enterprise Advance.	74
Figura 15.	Revisión previa del UAV.	75
Figura 16.	Revisión del UAV y sus componentes en campo.	78
Figura 17.	Revisión estática del UAV en vuelo.	79

Figura 18.	Estado de la telemetría, satélites y batería.	80
Figura 19.	Imagen cenital para georreferencia.	81
Figura 20.	Estado de estructuras tipo poste.	82
Figura 21.	Estado de los aisladores.	82
Figura 22.	Estado de los herrajes.	83
Figura 23.	Estado de las líneas.	84
Figura 24.	Imagen cenital termográfica.	85
Figura 25.	Imagen térmica de la línea.	85
Figura 26.	Imagen térmica de los aisladores y componentes eléctricos.	86
Figura 27.	Deltas de temperatura en los elementos.	87
Figura 28.	Aterrizaje del UAV.	88
Figura 29.	Almacenamiento del UAV.	89

Lista de Tablas

Tabla 1.	Valores del campo magnético en función de la distancia	34
Tabla 2.	Distancia horizontal entre conductores soportados en la misma estructura de apoyo.	36
Tabla 3.	Ancho de la zona de servidumbre de líneas de transmisión [m].	41
Tabla 4.	Matriz de riesgos para inspecciones en líneas de transmisión.	66

Definiciones

Aeronavegabilidad. Es la capacidad de una aeronave para cumplir con seguridad alguna función propuesta. Si reúne los requisitos necesarios, se otorga un certificado de aeronavegabilidad.

Certificado de explotador UAS. Expedido por una AAC que autoriza determinadas acciones a un explotador UAS.

Controlador. Es un dispositivo que toma una decisión con base en la comparación de la información medida con respecto a condiciones deseadas de operación. A dicha decisión se le denomina acción de control.

Cuadricóptero. Vehículo aéreo no tripulado propulsado por cuatro rotores.

Drone - Dron. Término genérico para referirse sin diferencia, a cualquier aeronave no tripulada.

Explotador UAS. Se le denomina a una persona natural o jurídica, propietario de la aeronave; esta persona puede pilotar u ofrecer su equipo para que otros pilotos realicen labores con este.

Hexacóptero. Vehículo aéreo no tripulado propulsado por seis rotores.

Seguridad operacional. Estado en el que los riesgos asociados a las actividades de aviación por operación de las aeronaves, se reducen y controlan a un nivel aceptable.

Telemetría. Datos de vuelo que se transmiten entre la aeronave y el sistema de control, como altitud, estado de las baterías, velocidad, entre otros.

Abreviaturas

AAC Autoridad de Aviación Civil de un Estado que hace parte del Convenio sobre Aviación Civil internacional suscrito en Chicago en 1944.

C2-link Enlace de comando y control.

GCS Estación de control terrestre o en inglés Ground Control Station.

IRT Termografía infrarroja o en inglés Infrared Thermography.

LiDAR Siglas en inglés para, Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging.

MTOW Peso (masa) máximo al despegue.

RTH Regreso al punto de origen o en inglés Return To Home.

UAEAC Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil.

UAS Sistemas de aeronaves no tripuladas. Esta incluye términos como UAV, UAS, RPA, RPAS, VANT, DRON o DRONE, sin diferenciar su principio de vuelo o tipo de propulsión.

UAV Vehículo aéreo no tripulado o en inglés Unmanned Aerial Vehicle.

VLOS Operación con visibilidad directa visual.

Resumen

Título: Manual de buenas prácticas para la inspección de líneas de transmisión de energía eléctrica en Colombia mediante vehículos aéreos no tripulados UAV.¹

Autor: Eduar Tomas Anaya Rojas, Nicolás Andrés Vargas Cáceres.²

Descripción: Este trabajo de investigación propone la elaboración de un manual para realizar la inspección de las líneas eléctricas de transmisión (alta y extra alta tensión) y sus componentes, con el fin de detectar algún tipo de falla e irregularidad en estos sistemas; dicha inspección será realizada por medio de sistemas UAV. Con base en el reglamento aeronáutico RAC-91 y la norma IEEE 2821-2020, se destacarán los aspectos relevantes, las exigencias y condiciones para poder operar un sistema UAV en Colombia; pero también, se encaminará el presente proyecto para obtener dicha guía y de tal modo garantizar una buena práctica al momento de llevar a cabo una inspección eléctrica. Al final, se propone un caso de estudio como ejemplo de aplicación de este trabajo y así poder fortalecer con la parte teórica todo el proceso en campo para cualquier tipo de inspección por medio de sistemas aéreos no tripulados.

Palabras clave: Inspección, líneas eléctricas, transmisión, sistemas UAV, RAC-91, IEEE 2821-2020.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Julián Gustavo Rodríguez Ferreira. Codirector: Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga.

Abstract

Title: Good practices manual for the inspection of electric power transmission lines in Colombia using unmanned aerial vehicles (UAVs).³

Author: Eduar Tomas Anaya Rojas, Nicolás Andrés Vargas Cáceres.⁴

Description: This research work proposes the development of a manual for the inspection of power transmission lines (high and extra high voltage) and their components, in order to detect any type of failure and irregularity in these systems; such inspection will be performed by means of UAV systems. Based on the aeronautical regulation RAC-91 and the IEEE 2821-2020 standard, the relevant aspects, requirements and conditions to operate a UAV system in Colombia will be highlighted; but also, the present project will be directed to obtain such guide and thus guarantee a good practice at the moment of carrying out an electrical inspection. At the end, a case study is proposed as an example of application of this work and thus be able to strengthen with the theoretical part the whole process in the field for any type of inspection by means of unmanned aerial system.

Key words: Inspection, power lines, transmission, UAV system, RAC-91, IEEE 2821-2020.

³ Degree work.

⁴ Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Julián Gustavo Rodríguez Ferreira. Codirector: Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga.

Introducción

La inspección de la infraestructura para la transmisión eléctrica, que incluye las torres y las servidumbres de líneas, ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas. Anteriormente, esta labor se realizaba desde tierra con telescopios y binoculares, o se realizaba desde aire, con el apoyo de una aeronave tripulada (helicóptero), lo que requería un mayor personal en campo y un mayor costo operativo (Florez and Carreño, 2001). Además, existían riesgos asociados a la seguridad de los trabajadores encargados de realizar las inspecciones y de los pilotos que sobrevolaban las líneas eléctricas.

En los últimos años, con la llegada de los vehículos aéreos no tripulados (UAV), también conocidos como drones, las inspecciones de líneas eléctricas aéreas se han vuelto más eficientes, rápidas y seguras. La tecnología de los UAV, junto con el desarrollo de cámaras avanzadas, entre otros equipos, ha facilitado la detección de fallas y su correspondiente mantenimiento, disminuyendo el costo operativo y el riesgo para el personal encargado de realizar las inspecciones.

A pesar de estas ventajas, en Colombia aún falta una normativa clara que regule el uso de UAV para la inspección de líneas eléctricas aéreas. El único referente reglamentario que se tiene son las restricciones del reglamento aeronáutico colombiano, que establece los requisitos y el correcto uso de esta tecnología. Por esta razón, en este trabajo de grado se desarrollará un manual que contempla las restricciones del reglamento aeronáutico colombiano, pero también se adaptarán los protocolos y recomendaciones que se mencionan en la norma IEEE Guide For Unmanned Aerial Vehicle-Based Patrol Inspection System For Transmission Lines 2821.

Este manual dará guía para realizar la inspección de líneas eléctricas aéreas mediante UAV, abarcando la identificación del equipo adecuado, sus partes y la carga útil para cada tipo de inspección, la normativa y protocolos vigentes que rigen estas tareas, las características de las principales fallas, los métodos y tecnologías actuales de inspección aplicables con UAV, el protocolo de la inspección, finalizando con el análisis preliminar de los datos obtenidos y la entrega de los resultados. Además, se incluye un caso de estudio que sirve como ejemplo para aplicar los procedimientos y protocolos establecidos en el manual en una inspección real. Con la implementación de este manual se espera que las empresas que realizan inspecciones de líneas eléctricas aéreas en Colombia puedan mejorar la eficiencia y la seguridad de sus operaciones, reduciendo los riesgos para el personal y optimizando el uso de los recursos disponibles.

Objetivos

Objetivo General

- Elaborar un manual para la inspección de líneas eléctricas aéreas mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), basado en la norma IEEE 2821 y los lineamientos de la Aeronáutica Civil colombiana.

Objetivos específicos

- Identificar los protocolos y procedimientos para la inspección de líneas eléctricas aéreas mediante UAV considerando el referente reglamentario y normativo aplicable en Colombia.
- Diseñar un manual para la inspección de líneas eléctricas aéreas mediante UAV que incluya las exigencias regulatorias, el protocolo para los trabajos de campo, así como el proceso de captura y entrega de la información recopilada para su posterior análisis.
- Desarrollar un caso de estudio como ejemplo de aplicación del manual a la labor de inspección de una línea de transmisión eléctrica aérea.

1. Generalidades de la inspección de líneas de transmisión

Mantener el buen estado de las redes de transmisión siempre ha sido un gran reto, el cual ha estado presente desde la implementación de las líneas de transmisión; es acá donde resulta de gran utilidad programar inspecciones rutinarias, para que se puedan prevenir daños e identificar fallas ya existentes. Hasta finales del año 2000, las labores de inspección en su mayoría solían realizarse con cuadrillas terrestres las cuales debían recorrer largas distancias, haciendo uso de implementos amplificadores de visión como binoculares, telescopios o simplemente dependiendo de su capacidad visual para detectar anomalías, donde solo en casos muy especiales y fortuitos o en tareas de mantenimiento se disponía de helicópteros tripulados, a causa de su elevado costo de operación (Florez and Carreño, 2001). Debido al difícil acceso, su peligrosidad a cortas distancias y su complejidad al momento de realizar operaciones cerca de su infraestructura, se empezaron a implementar nuevas tecnologías para facilitar las tareas de inspección, como las imágenes satélites o el uso de dispositivos UAV, siendo esta última la mas aceptada gracias a su versatilidad y facilidad de implementación y adaptación a las tareas de inspección visual cerca de torres y líneas de alta tensión.

Esta área de la ingeniería recoge conocimientos y tecnologías de diferentes campos o industrias, como son la electricidad, los sensores y los UAV, para hacer uso de estos elementos en conjunto, permitiendo realizar la inspección del tendido eléctrico por medio de los sensores integrados en los drones. Estas tareas de inspección, pilotaje, identificación de anomalías por medio de las diferentes tecnologías aplicadas y la entrega de resultados, se ven afectadas y reguladas por

distintas normas y leyes nacionales e internacionales. Al revisar el estado actual de la aplicación de estas tecnologías en Colombia, se evidencia una baja cantidad de empresas u organismos encargados de prestar estos servicios respecto a la cantidad de industrias e infraestructura eléctrica de alta tensión presente en el país, también es notable que al ser una tecnología emergente se desconocen las normativas y leyes aplicables a este campo de la industria.

1.1. Vehículos aéreos no tripulados para la inspección de líneas de transmisión

1.1.1. UAVs. Los vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés), son dispositivos capaces de sustentarse en el aire por diferentes medios de propulsión siendo controlados desde tierra, con el objetivo de permitir un acercamiento a zonas o infraestructuras elevadas o de difícil acceso y que por medio de su carga útil, ya sean cámaras o sensores, nos permitirá obtener información valiosa del objeto de estudio. Suelen estar compuestos por una controladora de vuelo, que en conjunto con sensores como giroscopio, barómetro, acelerómetro, brújula y GPS, permite un vuelo estabilizado y fluido. Estos suelen contar con sistemas de propulsión basados en motores sin escobillas para una mayor eficiencia. Se puede identificar en la norma IEEE 2821 (2020) tres tipos de UAV capaces de cumplir tareas relacionadas al campo de inspección:

Multirrotores: Son aeronaves no tripuladas con configuraciones comunes de 3, 4, 6 y 8 juegos de motores y hélices; siendo los cuadricópteros (4 hélices) los más comunes, una ventaja de un mayor número de hélices es la posibilidad de no perder completamente el control de la aeronave ante la falla de uno de los motores. Pese a ser muy versátiles en cuanto a tamaños y aplicaciones, su principal desventaja es su baja autonomía, la cual suele estar limitada a vuelos de alrededor de 30 minutos.

Figura 1

Drone DJI Matrice 600.



Nota. Adaptada de la página web DJI.

Avión de ala fija: Debido a su construcción, poseen un alto coeficiente aerodinámico que les otorga un mayor nivel de sustentación en vuelo, permitiéndoles una gran autonomía de vuelo por carga y velocidades longitudinales superiores a los otros sistemas UAV; pero se pierde la posibilidad de realizar vuelos estáticos o completamente estabilizados, razones por las que son ideales para cubrir distancias largas a la hora de inspeccionar líneas, para operaciones autónomas o de rutas programadas y aquellas que requieran cubrir un área muy extensa.

Figura 2

Ala Zagi desarrollada por el semillero SCUA.



Helicópteros: Los sistemas con esta configuración presentan características similares a los multirrotores, pero con una menor estabilidad y fiabilidad, por lo cual se usan con poca frecuencia, siendo relevados para tareas de monitoreo básico.

1.1.2. Estación de control terrestre (GCS). Este es el centro de comando desde donde se tendrá control de la aeronave al momento de realizar operaciones con ésta, suele estar compuesta por un radiocontrol y software para el control de vuelo capaz de recibir y enviar comandos a la aeronave y la carga útil, además de permitir planear misiones (IEEE, 2020).

1.1.3. Unidad de comunicación. Es la encargada de transmitir al operador información importante como telemetría y vídeo en tiempo real, la norma IEEE 2821 (2020) recomienda que sea por medio de un protocolo C2-link, para tener soporte de la comunicación con la aeronave ya sea por una red satelital o de telefonía; sin embargo, debido a las cortas distancias de vuelo

que se van a realizar, su elevado costo de implementación y el difícil acceso a esta tecnología en Colombia, los sistemas UAV más comunes presentan una conexión simple entre la aeronave y el GCS, ya sea directamente al radiocontrol o mediante un módulo receptor externo conectado a un ordenador. En la actualidad estas transmisiones normalmente se realizan en formatos digitales o analógicos en bandas de frecuencia de 2.4 GHz o 5.8 GHz dispuestas para el uso particular.

1.1.4. Carga útil. Se puede identificar como carga útil todo equipo diferente al necesario para el vuelo o control del UAV, cuya función es brindar características que ayuden a realizar tareas específicas en su campo de aplicación. En esta área de interés, para realizar la inspección y el monitoreo sobre estructuras y líneas de alta tensión, algunos elementos a identificar son:

1.1.4.1. Cámara visual. Es el accesorio más común equipado en cualquier tipo de UAV, al permitir la captura de imágenes estáticas o en movimiento (video) y gracias a la capacidad de la unidad de comunicación de enviar estas capturas al operador a su GCS en tiempo real, se convierte en una herramienta sumamente útil para identificar problemas que resaltan a simple vista. Sus principales características están dadas por la resolución de su sensor óptico y la capacidad del lente para enfocar o dar un aumento de la imagen, no siempre será mejor una alta resolución para realizar aumentos en la imagen del objeto a captar.

1.1.4.2. Cámara térmica (IRT). Estas cámaras se encargan de detectar las emisiones térmicas en el espectro infrarrojo, convirtiendo estas señales en imágenes; suelen adoptar escalas de colores para identificar los gradientes de temperatura, generalmente paletas de color frías o azules para identificar bajas temperaturas y por el contrario tonos rojizos o cálidos para

identificar altas temperaturas. Suelen funcionar en conjunto su sensor infrarrojo y una cámara visual para mejorar la calidad de las tomas entregadas al usuario, sus características más comunes son su resolución espacial, la cual está determinada por la capacidad o resolución del sensor y la distancia focal de la cámara; siendo lo anterior crucial a la hora de determinar una distancia efectiva para la toma de imágenes. También es conveniente resaltar la importancia de la calibración del sensor, para asegurar que se toman lecturas de temperatura correctas en cada uso (IEEE, 2020).

1.1.4.3. Escáner LiDAR. Está compuesto de un escáner láser, una cámara visual de alta resolución, una unidad de medición inercial (IMU) y un sistema de control computacional (IEEE, 2020). Su funcionamiento se basa en la adquisición de imágenes junto con grupos o nubes de puntos láser, que posteriormente pueden ser procesados para obtener modelos 3D con niveles de precisión lo suficientemente elevados para realizar mediciones de distancias y la identificación de vegetación o estructuras cercanas.

1.1.4.4. Sistemas multi-cámara. Son agrupaciones compuestas normalmente por 2, 3 o 5 cámaras, con el objetivo de realizar tomas fotográficas ortogonales, para procesarlas y crear mapas tridimensionales de las líneas de transmisión eléctrica (IEEE, 2020).

1.2. Principales marcas del mercado

DJI: DJI es una de las marcas líderes de China en drones para el sector industrial. Sus drones están equipados con cámaras de alta calidad e imágenes avanzadas, lo que los hace ideales para tareas de inspección y vigilancia. Además, ofrecen una amplia variedad de modelos para diferentes necesidades, desde drones compactos hasta modelos más grandes y potentes.

Parrot: Parrot es otra marca muy conocida en el mercado de drones industriales. Sus drones

son particularmente populares para la vigilancia agrícola, gracias a su cámara de alta resolución y tecnología de sensores. Además, Parrot ofrece una plataforma de software integrada que facilita la planificación de misiones y el procesamiento de datos.

Yuneec: Yuneec es una marca que ofrece drones para una amplia gama de aplicaciones, incluida la inspección y el monitoreo de infraestructuras. Sus drones cuentan con cámaras de alta resolución, lo que les permite capturar imágenes de alta calidad por un valor menor respecto a otras marcas del mercado.

Autel Robotics: Autel Robotics es una marca estadounidense conocida por sus drones de alta gama que son populares en aplicaciones industriales. Sus drones ofrecen un alto nivel de estabilidad y precisión, así como una buena autonomía. Además, cuentan con cámaras de alta calidad y tecnología de punta.

Intel: Intel es una marca que ofrece drones enfocados en el funcionamiento tipo enjambre. Aunque su principal objetivo es el espectáculo estos poseen características suficientes para tareas de inspección. Además, cuentan con software avanzado de procesamiento de datos, lo que facilita la interpretación de los datos capturados.

1.3. Características al momento de elegir un UAV

Capacidad de carga: Es importante que el dron tenga suficiente capacidad de carga para llevar la cámara y otros equipos necesarios para la inspección, como sensores y herramientas.

Autonomía de vuelo: La autonomía de vuelo es importante para realizar inspecciones de largos tramos de líneas de transmisión sin interrupción, lo que reduce la necesidad de cambiar baterías y aumenta la eficiencia del trabajo.

Estabilidad y precisión de vuelo: Es importante que el dron sea estable y preciso en su vuelo, especialmente en condiciones de viento, para garantizar la calidad de las imágenes y datos recopilados.

Resistencia a las condiciones climáticas: El dron debe ser capaz de soportar condiciones climáticas adversas, como lluvia y viento, para garantizar la seguridad de la operación y la calidad de los datos.

Funciones de la cámara o sensores: Es importante que la cámara tenga la resolución y las funciones adecuadas para capturar imágenes de alta calidad y detectar posibles fallas en las líneas de transmisión, además de cámaras térmicas para detectar sobrecalentamiento o radares LiDAR.

Software y análisis de datos: Es importante que el dron venga con un software de análisis de datos que pueda analizar de manera efectiva y precisa las imágenes y los datos recopilados.

Facilidad de uso y mantenimiento: El dron debe ser fácil de usar y mantener, con piezas y repuestos fácilmente disponibles.

Cumplimiento de las normas y reglamentos: Es importante que el dron cumpla con las normas y reglamentos locales y nacionales para garantizar un funcionamiento seguro y el cumplimiento de la ley.

Resistencia a interferencia electromagnética: Un aspecto importante a tener en cuenta al elegir un dron para la inspección de líneas eléctricas es su capacidad para resistir y minimizar las interferencias electromagnéticas de la red eléctrica. Para ello, se recomienda elegir un dron que tenga una estructura y materiales adecuados para reducir las interferencias electromagnéticas, así como una buena configuración de los sistemas de comunicación y control para minimizar la

posibilidad de interferencias. Además, es importante tener en cuenta que algunos drones pueden estar equipados con sensores y dispositivos que pueden ser susceptibles a interferencias electromagnéticas, lo que puede afectar la precisión y confiabilidad de los datos recopilados durante la inspección en alta tensión.

1.4. Marco legal y regulatorio para la inspección de líneas mediante UAVs

Aunque en Colombia no existe una normativa vigente a la hora de hacer inspección de líneas de alta tensión, lo que permite hacer este trabajo sin la necesidad de ningún certificado o requisito legal, se deben tener en cuenta las consideraciones del RETIE (2013), el cual brinda pautas para realizar inspección al momento del montaje o antes de la puesta en marcha, aún así es de gran utilidad para saber el estado en que deben encontrarse las líneas de transmisión, sus componentes, las distancias mínimas y las servidumbres asociadas a la línea, a continuación se listan los capítulos y artículos que presentan mayor importancia para el desarrollo de la actividad de inspección:

- Artículo 18. Trabajos en redes desenergizadas
- Artículo 19. Trabajos en tensión o con redes energizadas
- Capítulo 5. Requisitos para el proceso de transmisión
- Artículo 34. Demostración de conformidad de instalaciones eléctricas

Otra norma internacional que agrega valor a las inspecciones es la NETA Acceptance Testing Specifications (2003) producida por International Electrical Testing Association. En ella podemos identificar recomendaciones de seguridad para hacer inspecciones en alta tensión en líneas

y dispositivos en presencia de tensión. Para el propósito final de este manual, se tienen en consideración a lo largo del mismo las recomendaciones y protocolos brindados por las normativas ya mencionadas, pero en especial el protocolo ofrecido por la norma IEEE 2821 Guide for Unmanned Aerial Vehicle-Based Patrol Inspection System for Transmission Lines, a la hora de realizar las tareas de inspección. Además, es necesario identificar si el operador de red, electrificadora o entidad a cargo de la infraestructura a inspeccionar tiene algún requisito extra para poder realizar dicha tarea.

Ahora bien, al hacer uso de dispositivos aéreos no tripulados, se está ocupando el espacio aéreo que se encuentra regulado por la Aerocivil Colombiana, esta dispone en el apéndice 13 del RAC 91 REGLAS GENERALES DE VUELO Y DE OPERACIÓN (2018) de algunas limitaciones y requisitos que debemos seguir a cabalidad para evitar accidentes y multas por el mal uso de estos aparatos.

1.4.1. Categorías. Según lo indica el RAC 91 (2018) en su apéndice 13, las operaciones con dispositivos UAV que superen un peso de 250 gramos al momento de despegar están clasificadas según su nivel de riesgo en las categorías A, B y C. Al identificar las características de las principales actividades a realizarse en el campo de la inspección de líneas eléctricas, se evidencia que no se hace necesario un dispositivo UAV robusto, tampoco se realizan actividades diferentes a la toma de imágenes, videos o datos en diferentes espectros de emisión; pero al tener que realizar las labores de inspección a menos de 1 km de distancia de infraestructura crítica del país como lo son las torres de energía, antenas, puentes, etc. El dispositivo UAV a implementar está comprendido en la clase B, siendo necesarios algunos requisitos extra aparte del registro de la

aeronave ante la Aerocivil Colombiana.

1.4.2. Prohibiciones. La Aeronáutica Civil dispone de algunas restricciones al momento de realizar operaciones con dispositivos UAS, en pro de la seguridad y velando por evitar accidentes. Las limitaciones más relevantes se relacionan con el peso, distancias y altura de vuelo de la aeronave en cuestión. Para la clase B se destaca un peso máximo al momento del despegue de 150 kg, una velocidad máxima de 160 km/h , el vuelo debe presentarse siempre con línea de visión directa a la aeronave y nunca superando 750 metros de distancia horizontal o 123 metros de altura, con buenas condiciones de visibilidad y baja nubosidad (UAEAC, 2018).

Se prohíbe hacer operaciones o vuelos: a menos de 100 metros de altura sobre personas, multitudes o edificaciones, en propiedad privada sin el permiso del propietario, en un radio de 9 km alrededor de aeródromos, en un radio de 3 km de helipuertos, trabajos distintos a la toma de imágenes o video, donde se deba arrojar objetos desde la aeronave, que requieran operaciones autónomas, que transporten materiales explosivos o riesgosos excepto sus propias baterías, en un radio de 2 km de la ubicación del presidente de la república o de un jefe de estado, en un radio de 1 km de infraestructura crítica del país, a menos de 2,6 km de zonas fronterizas o que traspasen límites fronterizos; a excepción de las últimas cuatro prohibiciones, el operador podrá solicitar ante la UAEAC la aprobación de un permiso para casos especiales donde se requiera sobrepasar alguna de estas limitaciones (UAEAC, 2018).

1.4.3. Permisos y requisitos para pilotar drones. En el artículo 13, capítulo 3 del RAC 91 (2018) se establecen ciertos requerimientos para los pilotos, explotadores y los propios UAS, que son de obligatorio cumplimiento.

1.4.3.1. Inscripción del explotador y del operador UAS de Clase B. Se puede identificar como explotador cualquier persona, entidad o empresa que sea propietaria del UAS pero, no necesariamente será el encargado de pilotarlo, por otra parte el operador es quien está en facultad y cumplimiento de los requisitos para realizar operaciones con el dispositivo. Es necesario que ambos realicen su inscripción en las bases de datos de la UAEAC, donde les serán solicitados datos personales y de contacto básicos. Si se desea pilotar una aeronave de clase B como lo requiere esta actividad, el operador requiere una certificación de curso teórico práctico, además de inscribir todos los UAS que posea para su explotación.

1.4.3.2. Condiciones técnicas para UAS. Para que el dispositivo pueda ser usado sin problemas este debe encontrarse en buen estado, tanto estructural como de software y control. Se debe evitar realizar modificaciones al dispositivo. No generar interferencias con otros sistemas aeronáuticos y de radiofrecuencia. Contar con los manuales del fabricante. El UAV debe ser fácilmente visible a distancia ya sea de día o noche. Es necesario identificar la aeronave con una placa que posea los datos del explotador de ésta (UAEAC, 2018).

1.4.3.3. Otros requisitos sobresalientes. Algunos de los requisitos mas relevantes a tener en cuenta para poder desarrollar legalmente y sin percances la actividad de inspección eléctrica con UAV son:

- El explotador debe solicitar permiso para la ejecución de cualquier operación que requiera acercarse a menos de 1 km de la infraestructura crítica del país, si realiza una actividad diferente a la toma de datos o evidencia audiovisual con el UAV o si se desvía de alguna de las prohibiciones

o limitaciones impuestas para la clase A o B por la Aerocivil. Además, el dispositivo debe contar con una póliza o seguro para cubrir los daños o accidentes que puedan ser causado por el mismo durante su uso. El explotador debe hacer un manual de operaciones y mantenimiento propio que contemple las operaciones que se realizaran.

- El operador debe ser una persona mayor de edad, demostrar que realizó el curso teórico y práctico con cada UAV que va a operar, debe llevar un registro de todas sus horas de operación con UAS, donde especifique fechas y horas de vuelo. Evitar superar 10 horas de operación por día para prevenir accidentes por fatiga.

- Se deben realizar los mantenimientos que requiera el dispositivo UAS y sus componentes como lo indique el fabricante, usar los repuestos, piezas y accesorios propios de la marca o que esta recomiende. Estos trabajos de mantenimiento deben ser realizados por personal capacitado que conozca los manuales del fabricante y debe evitarse la alteración parcial o completa del diseño original del aparato si no se cuenta con aprobación del fabricante. El explotador debe realizar un registro histórico que consigne y documente cada mantenimiento, modificación, accidente y el estado general de la aeronave.

1.5. Recomendaciones de seguridad sobre el uso de UAVs en inspección de líneas

1.5.1. Seguridad aeronáutica. Como lo indica el RAC 91 en su apéndice 13 (2018), el principal objetivo de este es la seguridad, al seguir sus limitaciones y restricciones se reduce drásticamente la posibilidad de sufrir un accidente con el UAV, ya sea, lastimando a terceros, a los operadores o los bienes e inmuebles privados, hacer daño a la flora y fauna e incluso provocar accidentes aéreos con otras aeronaves tripuladas o no tripuladas. Resulta de vital importancia revisar

el estado del dispositivo UAS antes y después de cada operación, identificar si presenta fallas o averías. Las principales partes para tener en cuenta son:

- Baterías.
- Motores.
- Hélices o propelas.
- Chasis o cuerpo estructural.
- Tren de aterrizaje.
- Carga útil.

Además se debe revisar la potencia de las conexiones existentes entre el UAV y el GCS, como pueden ser la calidad de transmisión de video, telemetría y comandos en general (IEEE, 2020).

Al tener que realizar operaciones cerca a grandes elementos metálicos y emisores de campos electromagnéticos fuertes, es necesario, calibrar regularmente y revisar antes del vuelo y durante toda la operación, el estado de sensores que permiten la navegación de forma segura como pueden ser: giroscopio, barómetro, brújula y GPS.

Resulta de mucha ayuda tener un punto de regreso a casa (RTH) identificado por el UAS al momento de despegar, este será determinado por el GPS de la aeronave, permitiendo en caso de una desconexión imprevista o una falla de comunicación, que el UAV regrese al punto de partida. Para

que esta operación se pueda llevar a cabo sin accidentes o colisiones imprevistas, se recomienda que al momento de despegar se escoja en lo posible una zona con un radio de al menos 3 metros despejado de árboles, estructuras o edificaciones que puedan entorpecer el vuelo. Se debe evitar despegar o aterrizar el UAV en superficies irregulares, en movimiento o desde su mano.

Ante climas nublados, lluviosos o de tormenta es mejor evitar despegar el UAV; otro factor que puede reducir la calidad del vuelo son las emisiones solares, no es tan frecuente pero puede afectar los sistemas de posicionamiento del dispositivo.

Se debe verificar la capacidad de resistencia al viento en vuelo que presenta el UAV, siendo recomendable que este soporte ráfagas de viento de al menos 10m/s sin que su posición o estabilidad en vuelo se vean comprometidas (IEEE, 2020).

1.5.2. Seguridad eléctrica. Según el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) en la tabla 13.7 en Colombia establece las distancias de seguridad mínimas que deben mantenerse entre las líneas de alta tensión de corriente alterna y las personas, estas son:

- Líneas de alta tensión con una tensión nominal de más de 1 kV y hasta 72,5 kV: La distancia mínima de seguridad entre la línea y las personas debe ser de al menos 3 metros. Además debe estar señalizada y protegida para evitar el acceso no autorizado.
- Líneas de alta tensión con una tensión nominal de más de 72,6 kV y hasta 121 kV: La distancia mínima de seguridad entre la línea y las personas debe ser de al menos 3,3 metros, además debe estar señalizada y protegida para evitar el acceso no autorizado, y debe contar

con un sistema de protección de personas.

- Líneas de alta tensión con una tensión nominal de menos de 230 kV: La distancia mínima de seguridad entre la línea y las personas debe ser de al menos 4 metros, además debe estar señalizada y protegida para evitar el acceso no autorizado, y debe contar con un sistema de protección de personas.
- Líneas de alta tensión con una tensión nominal de menos de 500 kV: La distancia mínima de seguridad entre la línea y las personas debe ser de al menos 5,8 metros, además debe estar señalizada y protegida para evitar el acceso no autorizado, y debe contar con un sistema de protección de personas.

Es importante mencionar que estas distancias son mínimas, y en algunos casos específicos pueden ser necesarias distancias mayores para garantizar la seguridad de las personas, también se aclara que no existe una normativa vigente en Colombia para las distancias mínimas entre herramientas, accesorios aislados o en este caso dispositivos UAV y las líneas eléctricas.

Se evidencia en pruebas simuladas que para una línea de transmisión de 500kV UHV AC con una potencia típica comprendida entre 1000 y 2000 MW haciendo uso de la ley de Biot–Savart:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu I}{2\pi\sqrt{(x)^2 + (y)^2}} \quad (1)$$

Donde:

B es la intensidad del campo magnético

μ es la permeabilidad magnética del medio

I es la corriente

Al obtener un valor de corriente *I* en kA se puede asumir este valor como la distancia en metros.

$$\mathbf{d} = I \quad (2)$$

Tomando los datos obtenidos experimentalmente para la línea de 500kV se tiene:

Tabla 1

Valores del campo magnético en función de la distancia

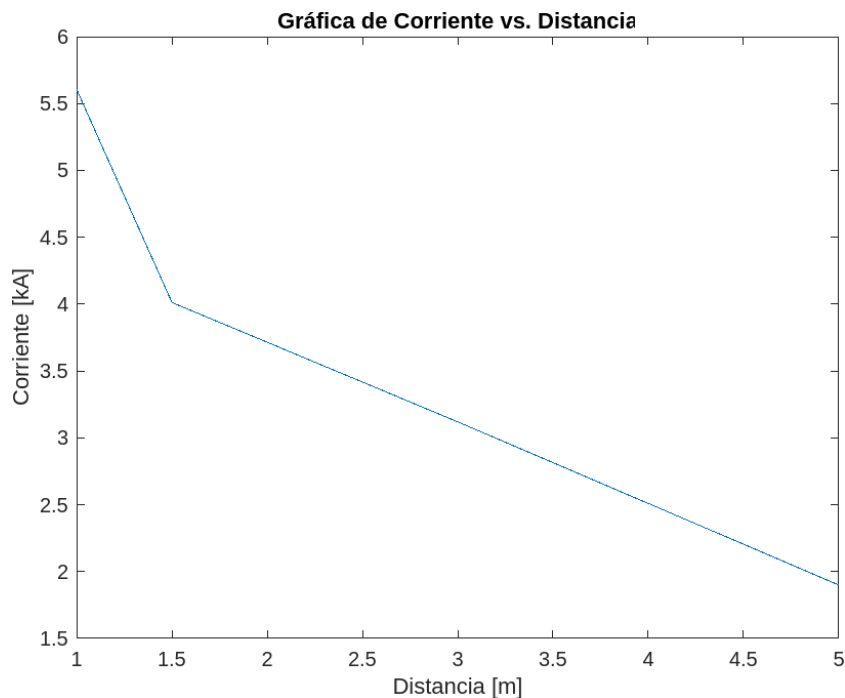
Distancia (m)	Campo (T)
1.0	1.121×10^{-6}
1.5	5.35×10^{-7}
3.0	2.08×10^{-7}
5.0	7.6×10^{-8}

Nota. Adaptada de (Mao et al., 2022).

Haciendo uso de la ley de Biot–Savart podemos obtener valores de corriente en kA los cuales nos servirán para identificar la distancia mínima de aproximación:

Figura 3

Corrientes para una línea de 500kV.



Se puede evidenciar de manera experimental un valor de 3kA para una distancia de 3 metros, una distancia mínima segura que corresponde según el nivel de tensión a la distancia de las cadenas de aisladores, para este caso de 500kV son 3 metros (Xu et al., 2022).

Es necesario seguir las regulaciones del RETIE para garantizar la seguridad de las personas, la protección del equipo y la propiedad. Por esto recomendamos seguir como nivel mínimo de aproximación del UAV con un conductor las distancias estipuladas en la tabla 13.4 de RETIE.

Tabla 2

Distancia horizontal entre conductores soportados en la misma estructura de apoyo.

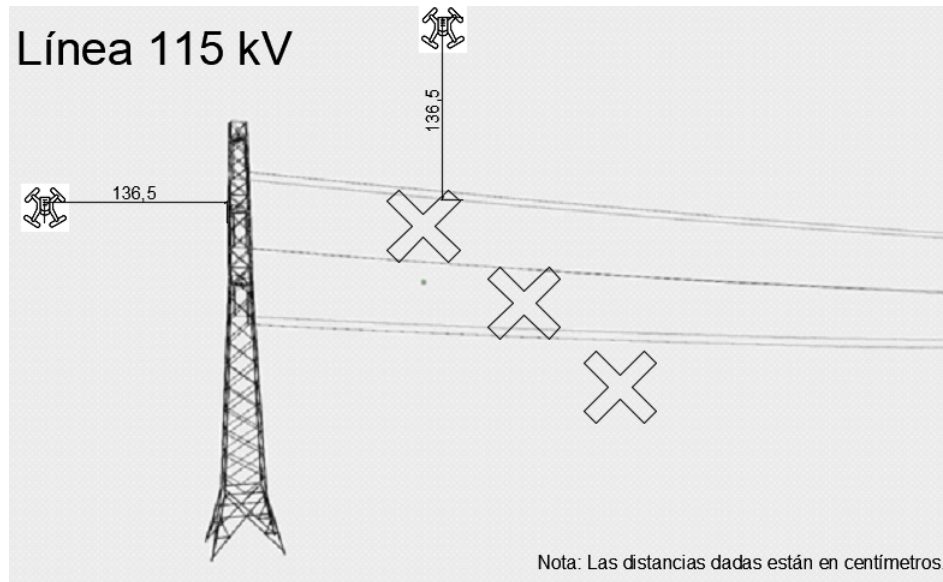
CLASE DE CIRCUITO Y TENSIÓN ENTRE LOS CONDUCTORES CONSIDERADOS	DISTANCIAS HORIZONTALES DE SEGURIDAD (cm)
Conductores de comunicación expuestos	15
	7,5
Alimentadores de vías férreas	
0 a 750 V (4/0 AWG o mayor calibre)	15
0 a 750 V (calibre menor de 4/0 AWG)	30
Entre 750 V y 8,7 kV	30
Conductores de suministro del mismo circuito	
0 a 8,7 kV	30
Entre 8,7 kV y 50 kV	30 más 1 cm por kV sobre 8,7 kV
Más de 50 kV	Debe atender normas internacionales
Conductores de suministro de diferente circuito	
0 a 8,7 kV	30
Entre 8,7 kV y 50 kV	30 más 1 cm por kV sobre 8,7 kV
Entre 50 kV y 814 kV	71,5 más 1 cm por kV sobre 50 kV

Nota. Adaptada de RETIE (Minminas, 2013) (p. 60).

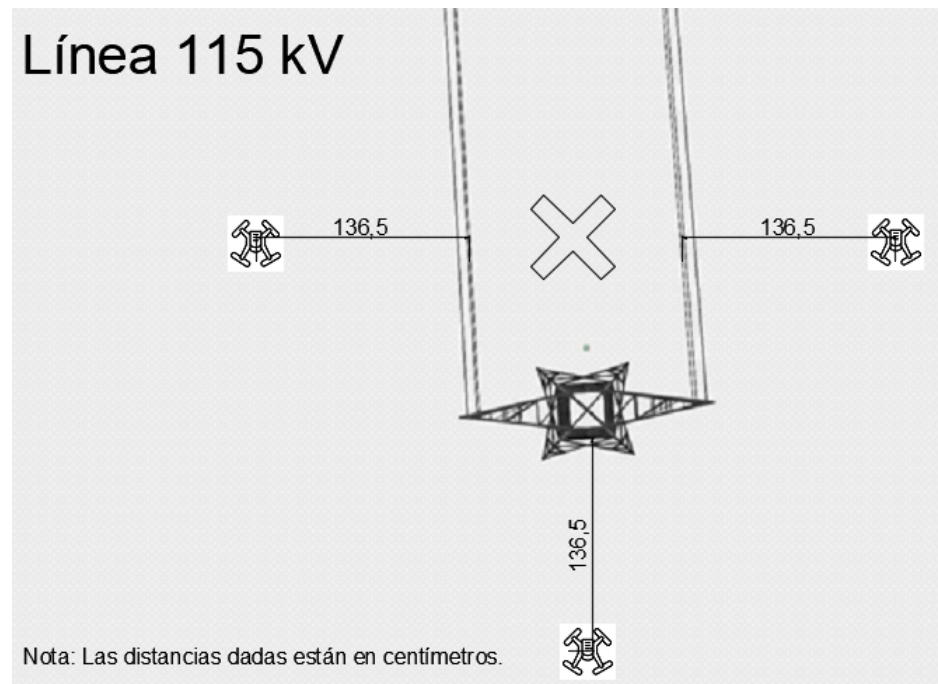
Se muestra un ejemplo con una línea de 115 kV, donde haciendo uso de la tabla anterior se identifican las distancias mínimas de aproximación del UAV, y las zonas por donde no se recomienda volar el dispositivo.

Figura 4

Vista lateral con distancias mínimas de aproximación.

**Figura 5**

Vista superior con distancias mínimas de aproximación.



Si se presenta un accidente donde el UAV colisione con una línea eléctrica, una torre u otra parte de la infraestructura eléctrica, no se debe acercarse a menos de las distancias mínimas permitidas y en caso de que la aeronave quede suspendida sobre estas, por ningún motivo los operadores deben intentar recuperarlo ellos mismos, es necesario llamar a las autoridades competentes para que estudien la situación y procedan a solucionar el problema adecuadamente sin poner en riesgo el bienestar de ninguna persona o la integridad del sistema eléctrico afectado.

2. Fallas en la infraestructura eléctrica de transmisión detectables con UAVs

Las líneas, torres y los diferentes componentes que conforman la infraestructura eléctrica de transmisión son de gran importancia, ya que si se llegara a presentar algún tipo de evento debido a una falla o un problema en los elementos que forman parte del sistema de transmisión; esto podría ocasionar pérdida parcial o total de algún componente, e incluso incurrir en algo más grave. Es por esto, por lo que se deben realizar trabajos de mantenimiento, control o vigilancia con cierta frecuencia y rigurosidad en los elementos que componen dicha infraestructura, para así promover el mantenimiento predictivo y preventivo, con el objetivo de que se garantice la seguridad, pero principalmente la continuidad del servicio de energía eléctrica sin ningún tipo de pérdida.

En esta sección se mencionarán las fallas que se producen comúnmente en la infraestructura eléctrica de transmisión, las cuales son detectables con ayuda de sistemas UAV, estas son:

2.1. Falla en la servidumbre

Antes de mencionar las fallas que pueden originarse en la servidumbre, se debe conocer qué es y qué requisitos tiene una servidumbre para garantizar su funcionalidad. El RETIE (Minminas, 2013) hace la siguiente mención: *”Toda línea de transmisión aérea con tensión nominal igual o mayor a 57,7 kV, debe tener una zona de seguridad o derecho de vía. Esta zona debe estar definida antes de la construcción de la línea...”*(p. 141). Lo anterior hace alusión a que una servidumbre es una zona de seguridad que se debe garantizar en toda línea eléctrica de transmisión, bien sea de alta o extra alta tensión; esta zona debe ser demarcada desde el principio de su construcción y debe hacerse por mutuo acuerdo con los propietarios de los predios o por términos judiciales.

Los requisitos RETIE que se deben tener presentes para mantener en buen estado los sistemas de transmisión son:

”- El propietario u operador de la línea debe hacer uso periódico de la servidumbre ya sea con el mantenimiento de la línea o poda de la vegetación y debe dejar evidencia de ello.

- Dentro de la zona de servidumbre se debe impedir la siembra o crecimiento natural de árboles o arbustos que con el transcurrir del tiempo comprometan la distancia de seguridad y se constituyan en un peligro para las personas o afecten la confiabilidad de la línea.

- No se deben construir edificios, edificaciones, viviendas, casetas o cualquier tipo de estructuras para albergar personas o animales. Tampoco se debe permitir alta concentración de personas en estas áreas de servidumbre, o la presencia permanente de trabajadores o personas ajenas a la operación o mantenimiento de la línea, ni el uso permanente de estos espacios como lugares de parqueo, o reparación de vehículos o para el desarrollo de actividades comerciales o recreacionales.”⁵

Lo mencionado anteriormente son los requisitos básicos para tener en cuenta al momento de la planeación y construcción de una línea de transmisión eléctrica con su respectiva zona de servidumbre. Pero hay algo muy importante en este proceso a su vez, y son las distancias mínimas para dicha zona de seguridad. En la Tabla 3 se presentan los valores mínimos de distancia que deben tener de ancho las servidumbres, esto depende del nivel de tensión y de la cantidad de circuitos que soporte la infraestructura de transmisión.

⁵ RETIE 2013, p. 141.

Tabla 3*Ancho de la zona de servidumbre de líneas de transmisión [m].*

TIPO DE ESTRUCTURA	TENSIÓN (kV)	ANCHO MÍNIMO (m)
Torres/postes	500 (2 Ctos.)	65
	500 (1 Cto.)	60
Torres/postes	400 (2 Ctos.)	55
	400 (1 Cto.)	50
Torres	220/230 (2 Ctos.)	32
	220/230 (1 Cto.)	30
Postes	220/230 (2 Ctos.)	30
	220/230 (1 Cto.)	28
Torres	110/115 (2 Ctos.)	20
	110/115 (1 Cto.)	20
Postes	110/115 (2 Ctos.)	15
	110/115 (1 Cto.)	15
Torres/postes	57.5/66 (1 o 2 Ctos.)	15

Nota. Adaptada de RETIE (Minminas, 2013) (p. 142).

Ahora que ya se conoce mejor acerca del tema de las servidumbres, se mencionarán algunos daños o fallas que se producen en este sistema. Como es bien sabido, la construcción y el montaje de los corredores de transmisión de energía eléctrica se deben realizar atravesando predios o lotes

que son de propiedad privada, o incluso lugares que son de difícil acceso. En algunos casos la servidumbre dispone de un espacio libre de vegetación u otras irregularidades, por lo cual es poco probable que suceda algún evento de falla en estas zonas; por otra parte, en zonas con abundante vegetación sucede lo contrario, y es más probable que ocurra algún tipo de falla por contacto con la vegetación u otras especies. Las irregularidades que pueden presentarse son, la construcción de algún tipo de edificación, el paso por una zona montañosa e inestable, entre otras. En Colombia, el hecho de posicionar las estructuras de las torres en sitios donde el suelo presentan inestabilidad es poco probable, pero puede generarse un deslizamiento de tierra; lo cual podría afectar dicha estructura llegando al caso de derrumbar la torre, con lo cual se presentaría la caída de las líneas de transmisión que estén soportadas en dicha torre. Debido a esto se recomienda programar jornadas de control y mantenimiento, que gracias al uso de sistemas UAV facilitan dichas tareas al personal encargado de estas labores y ayudan a prevenir futuras fallas.

2.2. Falla por fauna

En la mayoría de los casos, la fauna de un hábitat es la causante de fallas en la infraestructura eléctrica de transmisión. Esto ocurre gracias a que en ciertos lugares, la vegetación puede llegar a estar tan cerca de las redes eléctricas, que los animales que habitan en los árboles o pasean por ellos, entran en contacto con alguna línea, con lo cual se genera o se produce la falla eléctrica. Ahora bien, cabe la posibilidad de que se presenten fallas por fauna también, cuando algún tipo de ave se posa sobre las torres o postes; estas estructuras las cuales soportan las líneas de transmisión atraen a un gran número de aves por las siguientes razones:

- Aumenta el rango de visión y la velocidad de las aves mientras cazan.

- Los postes son buenas plataformas para cazar y perchar, especialmente en lugares con vegetación baja y terreno plano.

- La localización de los postes ayuda a las aves a delimitar sus territorios.

- Los postes brindan sombra o sol dependiendo de las necesidades del ave.

Estos animales despliegan sus alas ya sea para tomar vuelo o para estirarlas, pero a su vez entran en contacto con la línea; es evidente que esto también produce una falla eléctrica, lo que a su vez podría causar la muerte de dicha especie, sea ave o cualquier otro tipo de animal.

2.3. Falla por efectos atmosféricos

Los efectos atmosféricos son los causantes de otro porcentaje de las fallas a nivel nacional. Los fuertes vientos y las lluvias generan cierta incertidumbre sobre el estado y comportamiento de los sistemas eléctricos de transmisión, pero el evento que más causas de falla puede provocar, es la precipitación de descargas atmosféricas o rayos, los cuales pueden afectar el tramo de línea o la estructura de soporte. Cabe destacar que un rayo es una descarga transitoria de elevada intensidad, es decir, un rayo puede ser visto como una fuente de corriente. Existen diversas formas de clasificar los daños materiales causados por una descarga eléctrica, sin embargo, es posible agrupar las mayores afectaciones en tres clases de daños principalmente, estas son:

Daños por incendios: Representan la mayor amenaza por su severidad, ya que, además de producir pérdidas materiales, pueden comprometer la vida y seguridad tanto de las personas, como de los dispositivos bien sean eléctricos o electrónicos que se estén usando en cualquier labor en campo.

Daños por sobrecargas de energía: Rara vez las descargas atmosféricas impactan de ma-

nera directa dispositivos eléctricos o electrónicos; esta clase de daño es causado generalmente por impactos en las líneas de transmisión de energía, lo que causa un incremento en el voltaje de las mismas. Es por esto que es importante contar con sistemas de protección adecuados, tanto para las estructuras, como para las líneas, y así se garantice la continuidad en las operaciones.

Daños asociados a ondas de choque: Las descargas eléctricas atmosféricas generan ondas de choque al calentar el aire. Dichas ondas las percibimos como truenos, y pueden llegar a ser destructivas a distancias muy cercanas de alguna estructura o en el mismo suelo, produciendo zanjas o grietas.

2.4. Falla en elementos de la infraestructura

Los elementos de la infraestructura en los cuales se podría presentar algún tipo de falla son:

- **Conductores.** Las fallas comunes desarrolladas en los conductores se llevan a cabo debido a; una mal unión con otro elemento de la infraestructura; o también porque entra en contacto con el conductor algún otro elemento externo al sistema de transmisión, como por ejemplo las ramas de los árboles o la fauna que puede provocar cierto daño.

- **Aisladores.** Se pueden provocar fallas en los aisladores por el deterioro del material del cual estén fabricado, o por el hecho de ser vandalizados y presentar grietas.

- **Herrajes.** Las fallas en los herrajes se pueden provocar por efecto de la corrosión, deterioro o mal ensamblaje de los mismo en la infraestructura de transmisión.

2.5. Falla en equipos de maniobra

Una falla en equipos de maniobras podría desarrollarse en:

- **Cortacircuitos.** Las fallas en estos equipos pueden provocarse por una manipulación mal

desarrollada, el personal que efectúe mantenimientos debe poseer los mínimos conocimientos en el tema.

- **Fusibles.** Al igual que en los cortacircuitos las fallas en los fusibles pueden provocarse por una mal operación en ellos, o también por el hecho del cumplimiento de su vida útil.

2.6. Falla en los soportes de las redes

Los soportes de las redes de transmisión en las que se podría generar algún tipo de falla son:

- **Torres.** Las estructuras más afectadas son las torres metálicas, estas pueden presentar fallas por efectos de la corrosión. También pueden presentar fallas por tensión o rigidez de las estructuras. A su vez, al ser estructuras muy grandes y complejas de ubicar, también sufren fallas por la inestabilidad del terreno donde se encuentren ubicadas.

- **Postes.** Es poco probable que los sistemas de transmisión de energía eléctrica de alta o extra alta tensión se puedan posicionar sobre postes ya sea de concreto o metálicos; por ende son pocas las fallas que puedan generarse allí, de ser todo lo contrario, y se ubiquen dichos sistemas, pueden existir fallas por tensión o rigidez de la estructura.

2.7. Falla por efectos de corrosión

Debido a las condiciones ambientales y sobre todo a las variaciones de temperatura en gran parte del territorio colombiano, los componentes y las mismas estructuras encargadas de la transmisión de energía eléctrica, presentan afectaciones por un factor conocido como corrosión. Este factor no es un hecho trivial, por el contrario, se desarrolla como un fenómeno trascendental en la cotidianidad de la sociedad. A su vez, en el artículo presentando por (Romero et al., 2019) men-

cionan que la corrosión es una de las principales causas de deterioro y falla de la infraestructura eléctrica de transmisión, ya que como se mencionaba anteriormente, las torres y demás componentes se exponen a diferentes temperaturas, humedad y agentes contaminantes presentes en la atmósfera. En este mismo artículo se evidencia un estudio realizado por inspección visual y en el cual se implementan dos tipos de análisis de muestras en algunos componentes de una torre de transmisión de energía, los cuales presentan algún tipo de falla por corrosión; allí se expone la composición de cada uno de los elementos de ensamble y sujeción de la torre y línea de transmisión. Cabe mencionar que la corrosión puede ocasionar otro tipo de falla la cual sobrecalienta cualquier elemento o punto de la torre, o la misma línea de transmisión, donde probablemente se presente pérdida de energía eléctrica. Gracias al uso de sistemas UAV en la actualidad, es posible llegar a evidenciar efectos como este en mención a cualquier altura y desde varios ángulos, cosa que no se podía garantizar años atrás debido a que no se implementaban estas herramientas.

2.8. Falla por puntos o elementos calientes

Así como se mencionaba anteriormente, los puntos calientes en la infraestructura de transmisión pueden ser originados por fallas relacionadas por la corrosión, pero también se presentan debido a que existen desgastes o incluso malas conexiones entre los componentes de sujeción de las líneas de transmisión. Para detectar este tipo de falla se implementan actualmente, a parte del sistema UAV para llegar a alcanzar alturas estratégicas, las cámaras termográficas las cuales muestran evidencias captadas de la radiación infrarroja del espectro electromagnético, es decir, del calor que puede ser producido en cualquier parte o elemento de la infraestructura de transmisión eléctrica. Entre más fuerte sea el tono o color rojizo en la imagen captada, la presencia de temperatura es

mucho mayor o en otras palabras, será más caliente este punto; pero si su color es amarillo y azul, el punto o elemento tendrá menor temperatura y estará frío o a temperatura ambiente, respectivamente.

2.9. Falla por efecto corona

El efecto corona es un fenómeno causado por la ionización del aire que rodea a los conductores eléctricos, se manifiesta por medio de luminiscencia y esto se debe a la repulsión y atracción de iones a grandes velocidades, produciendo iones nuevos por colisión; estas moléculas de aire adquieren la capacidad de conducir corriente y algunos electrones que se transportaban por el conductor pueden ser conducidos por el aire, aumentando la temperatura del gas y tornando de color rojizo en casos leves o un color azulado para casos severos. Además es perceptible un olor a ozono (asociado a chispas eléctricas) y un zumbido silbante; el ozono llega a deteriorar el material dieléctrico en elementos a base de goma o plástico; y en materiales de cobre u otros metales puede causar corrosión. El ruido que provoca el efecto corona es un zumbido constante que se asocia a la interferencia de radio y en muchos casos son de pequeña intensidad que apenas son perceptibles. El método de inspección más usado con ayuda de sistemas UAV es el desarrollado con cámaras ultravioleta, en la Figura 10 se evidencia el efecto corona en una cadena de aisladores y cómo se percibe con la cámara ultravioleta; sin embargo, existe otro método de inspección el cual implementa ultrasonidos para la detección del efecto corona en las torres de transmisión, pero a diferencia del anterior, no se puede desarrollar usando sistemas UAV, ya que la misma aeronave produce ruido ocasionando que no se desarrolle bien este proceso.

3. Técnicas de inspección de líneas eléctricas mediante UAVs

Como se ha mencionado anteriormente; en Colombia, la labor de inspeccionar las torres y líneas de transmisión de energía eléctrica ha venido evidenciando un desarrollo durante las últimas décadas. El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha sido uno de los principales avances tecnológicos para esta labor, junto con la carga útil, la cual puede ser transportada por dicho vehículo para la toma de datos e imágenes al instante de realizar dicha labor de inspección. Cabe resaltar que esta tecnología se va desarrollando cada vez más rápido con el paso del tiempo, evidenciándose mejoras en los equipos y dispositivos, pero además garantizando durabilidad y confiabilidad en dichos equipos al momento de realizar cualquier tipo de inspección. En este apartado se mencionan los requerimientos mínimos que debe tener el personal para realizar cualquier tipo de inspección con sistemas UAV y también se detallan los métodos de inspección con algunas de las herramientas más destacadas para la detección de fallas eléctricas en la infraestructura de transmisión, con base en los sistemas UAV.

El personal calificado para desarrollar cualquier tipo de técnica de inspección debe tener las siguientes competencias o conocimientos mínimos en:

- *Regulación en el área local.* Cualquier piloto u operador de sistemas aéreos no tripulados debe conocer los requerimientos y condiciones básicas para el uso del espacio aéreo local; de no ser así, debe capacitarse y certificarse en el tema para evitar inconvenientes.

- *Funcionamiento del dron.* El piloto debe tener conocer completamente cada una de las partes del dron y funciones, así como también debe conocer cada sensor o carga útil a implementar

en cada labor.

- *Modos de vuelo.* Debido a los campos electromagnéticos, el modo de vuelo puede verse afectado en el dron, perdiendo a su vez la asistencia de sensores; por lo que el piloto debe estar alerta y realizar maniobras de vuelo, de ser necesario.

- *Distancias de seguridad.* El operador de la aeronave debe tener total claridad a cerca de las distancias mínimas de seguridad para que no se vean afectados tanto los sistemas de transmisión de energía, como los dispositivos y componentes del dron.

3.1. Inspección visual

Es la técnica más común e implementada en la industria, no solo es usada en el desarrollo de la inspección y detección de fallas en la infraestructura eléctrica; también es útil para la inspección de oleoductos y gasoductos, que son de interés para las petroleras. Al realizar la inspección visual, en el caso de la inspección de infraestructura eléctrica de transmisión, normalmente es posible detectar objetos fuera de lo común a simple vista, como por ejemplo la invasión de la servidumbre, daños en las cadenas de aisladores, herrajes averiados, entre otros; todo lo anterior es posible inspeccionarlo actualmente con ayuda de sistemas UAV, sensores y cámaras fotográficas o de video de alta resolución. Es de gran importancia mencionar que el personal calificado para esta labor debe ser un operador certificado como piloto de drones por al aerocivil, con conocimientos y experiencia en la inspección visual, o también como analista de imágenes. El operador será el responsable de elegir cada cámara para llevar a cabo la inspección; las mínimas especificaciones que deben cumplir las cámaras son, tener buena resolución y óptima distancia de proximidad.

En el artículo propuesto por (Meza et al., 2021) se evidencia la descripción de un UAV de la marca

DJI y sus respectivos sensores y equipo en general. La Figura 18 es tomada de la página web de la marca DJI ⁶ y muestra una aproximación de la estructura del sistema UAV descrito en el artículo sobre inspección inteligente (Meza et al., 2021) el cual es usado para realizar la inspección de líneas eléctricas de alta tensión.

Figura 6
DJI Matrice 300 RTK.



Nota. Adaptada de la página web DJI.

Un estudio realizado acerca del estado del arte para mostrar las técnicas más relevantes al momento de realizar inspecciones y análisis de la infraestructura eléctrica, menciona que es beneficioso este método de inspección visual implementando sistemas UAV, pues permite localizar objetos extraños con alta precisión y permite apreciar los defectos más sobresalientes en la infraestructura, pero también destaca que es complejo el procesamiento y modelos de detección por los fondos que se pueden apreciar en las imágenes captadas; este estudio es publicado en un artículo y es propuesto por (Yang et al., 2020). En la Figura 7 tomada también de la página web de la marca

⁶ <https://www.dji.com/matrice-300>. Último acceso: Diciembre 12 del 2022.

DJI ⁷, se muestra el CGS de la aeronave vista anteriormente y en la cual se aprecia cómo se realiza la inspección visual de la infraestructura eléctrica y sus componentes.

Figura 7

Evidencia de una inspección visual simple.



Nota. Adaptada de la página web DJI.

Otros trabajos y publicaciones de artículos como los expuestos por (Hallermann and Morgenthal, 2014) y (Menendez et al., 2016) presentan una valiosa información acerca de este método de inspección visual, las ventajas, sus limitaciones y allí describen características de aplicación, como los ángulos propicios para captar evidencia; en estos artículos se realizan además comparaciones con otros medios de inspección, es decir, inspección visual realizada por un robot trepador, sistemas UAV y personal en campo, que es este último el método con el cual se desarrollaba anteriormente la inspección en Colombia. En la actualidad aún se requiere de personal en campo para

⁷ <https://www.dji.com/matrice-300>. Último acceso: Diciembre 12 del 2022.

hacer esta labor de inspección, pero con la diferencia de que es menor el número de dicho personal, y a su vez presenta la ventaja de que se reducen los costos para realizar este proceso o método.

3.2. Inspección termográfica

En resumen, la inspección por termografía es la obtención de información a través de la temperatura de un objeto a distancia, dicha información es captada de la radiación infrarroja del espectro electromagnético. Al igual que la técnica anterior, la implementación de la termografía está abarcando gran parte del desarrollo en la industria; además, es un complemento a la inspección visual para realizar detecciones y análisis de fallas las cuales no hayan sido posibles identificar a simple vista. Como ya se mencionó, el personal encargado del sistema UAV debe ser un piloto certificado por la aerocivil, pero también debe ser certificado como termógrafo nivel 1, para poder llevar a cabo el análisis y la entrega de resultados. Los componentes que se pueden inspeccionar con esta técnica son los aisladores, soportes o herrajes y otros elementos; la falla que es posible detectar es la temperatura en dichos objetos, con lo cual se producen pérdidas de energía. Para la elección de una cámara termográfica idónea se deben tomar en cuenta los valores FOV e IFOV, estos significan:

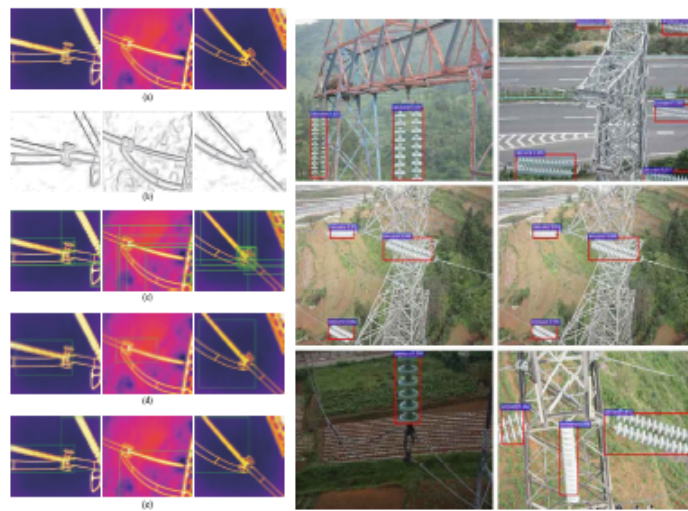
FOV: Es el campo de visión proyectado por la cámara termográfica y se representa mediante ángulos, por ejemplo $45^{\circ} \times 34^{\circ}$, este dato indica que el campo de visión se proyecta 45° en el horizontal y 34° en el vertical, y puede estar establecido para un conjunto de cámaras esta información. Influye en la inspección, ya que dependiendo de este valor se notará que para capturar algún objeto dentro de la imagen térmica se deberá retroceder, siendo el espacio que se tenga un factor muy importante.

IFOV: Hace referencia al objeto más pequeño que puede detectar el equipo termográfico a una distancia de 1 metro. En fichas técnicas de las cámaras se puede ver este dato en mrad, y este dato varía por cada una de las cámaras de un conjunto o serie en una marca.

Del artículo propuesto por (Yang et al., 2020) se presentan algunos modelos de procesamiento de la información obtenida al realizar inspección termográfica, al igual la Figura 8 es tomada del mismo artículo, y en ella se muestran imágenes captadas por una cámara termográfica y una cámara fotográfica o de video adaptadas en un UAV para la toma de evidencia en las cadenas de aisladores de las líneas de transmisión y así detectar puntos calientes en estos elementos.

Figura 8

Toma de evidencia en una inspección termográfica y visual.



Nota. Adaptada de (Yang et al., 2020).

Por otra parte, los artículos y trabajos como el de (Taqi and Beryozkina, 2019) exponen lo relacionado con el hardware y software usado para desarrollar la termografía y presenta resultados de un ejercicio en una inspección de líneas de transmisión; a su vez, en el trabajo desarrollado pero

enfocado en el componente UAV publicado por (Luque et al., 2014) se evidencia además de una comparación de medios de inspección, una descripción a fondo del UAV con característica de cuadricóptero y presenta los resultados de la información obtenida en la práctica. La Figura 9 tomada de la página web de la marca DJI ⁸, muestra una cámara termográfica adaptable a ciertas referencias de drones o sistemas UAV; además, en dicha página web se evidencian sus características y especificaciones.

Figura 9

Cámara termográfica Zenmuse XT - DJI.



Nota. Adaptada de la página web DJI.

En una gran variedad de herramientas o cámaras termográficas, la que se presenta en la figura anterior es simplemente un elemento de muchos que se pueden conseguir en el mercado

⁸ <https://www.dji.com/zenmuse-xt>. Último acceso: Diciembre 13 del 2022.

pero también con otras especificaciones y marcas comercializadoras. Anteriormente este método de inspección se realizaba con cámaras térmicas menos sofisticadas las cuales eran transportadas y utilizadas por el personal en campo o incluso cuando se tenía que rentar una aeronave tripulada, es decir, un helicóptero para poder llegar a zonas inaccesibles o simplemente para alcanzar la altura suficiente para la toma de evidencias o imágenes; es por esto que con el uso de sistemas UAV se resalta una ventaja significativa y es la reducción de costos para cualquier tipo de inspección.

3.3. Inspección ultravioleta

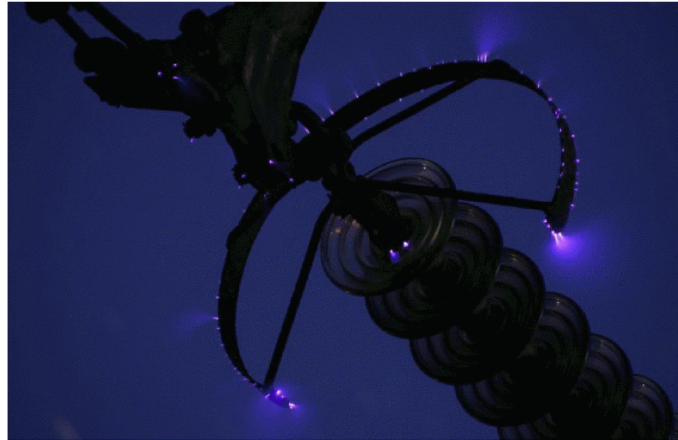
Este método de inspección puede parecer similar al de la termografía por las imágenes que se captan en la labor de detección; pero básicamente, la inspección con cámaras y filtros UV o ultravioleta cumple la función de obtener evidencias de imágenes en otros espectros de visión, es decir, con estos equipos adaptados a sistemas UAV son con los cuales se revisan los componentes de la infraestructura eléctrica de transmisión para detectar si se presenta falla por efecto corona; este tipo de falla es descrito en el capítulo anterior, el cual de manera general expone las fallas o problemas comunes en la infraestructura eléctrica. Los componentes que pueden ser inspeccionados en esta técnica son los herrajes, uniones entre conductores y otros elementos, y por último los aisladores. El personal idóneo para realizar esta labor además de ser piloto certificado en sistemas UAV, debe poseer conocimientos acerca de esta técnica de inspección ultravioleta, también debe conocer los filtros y elementos a implementar para la toma de evidencias.

Aunque son pocos los artículos y trabajos en los que se describe el método de inspección ultravioleta, (Constantin and Dinculescu, 2019) proponen un documento en el cual presentan los componentes a revisar en la inspección de sistemas eléctricos y menciona superficialmente la ins-

pección ultravioleta para mostrar la Figura 10, en la que se puede evidenciar el efecto corona en los componentes de una cadena de aisladores.

Figura 10

Efecto corona en cadena de aisladores.



Nota. Adaptada de (Constantin and Dinculescu, 2019).

Otros trabajos propuestos y que son de gran interés para revisar son los de (Moore et al., 2018) y (Rymer et al., 2018) en los que exponen las técnicas de detección del efecto corona implementando los sistemas UAV, modelos de análisis o software para la entrega de resultados y estudios prácticos realizados en infraestructura eléctrica de transmisión. La inspección ultravioleta también se desarrollaba anteriormente con cámaras y dispositivos menos sofisticados como los que existen actualmente, y que gracias al uso de sistemas UAV se pueden adaptar a estos; otro tipo de inspección que cabe resaltar en esta descripción, ya que sirve para la detección del efecto corona también, es la inspección con ultrasonido, pero este tipo de inspección no se puede llevar a cabo con sistemas UAV porque como se mencionaba anteriormente en la descripción de este tipo de falla, la aeronave produce ruido el cual no permite el buen trabajo para la captura de evidencias.

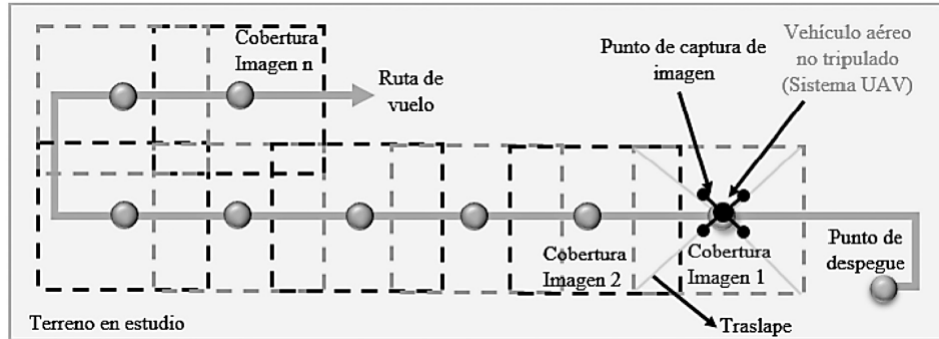
3.4. Inspección por fotogrametría

La inspección por el método de la fotogrametría es más compleja que la inspección por los métodos anteriormente enunciados, a su vez presenta un gran desarrollo de software y hardware para la adquisición de datos y procesamiento de la información en la actualidad. En el trabajo propuesto por (Arriola et al., 2017) se describe que un levantamiento fotogramétrico con sistemas UAV, se basa en la toma de imágenes fotográficas sobre una ruta de vuelo, que a su vez determina datos importantes como tiempo, posición y entre otros; cubriendo la totalidad del espacio o terreno a estudiar, además cumpliendo con cierto porcentaje de traslape entre imágenes para que posterior a esta labor, el procesamiento de dichas imágenes e información pueda entregar resultados eficientes y no se deba realizar nuevamente la toma de esta información por un mal trabajo o procedimiento. En la Figura 11 tomada del artículo citado anteriormente, el cual establece un sistema para la adquisición de datos y uso de la fotogrametría con sistemas UAV, se muestra cómo es el proceso para desarrollar esta labor. La fotogrametría es de utilidad en el trabajo de la inspección de la infraestructura eléctrica de transmisión, ya que con este método es posible la reconstrucción de las torres y toda o gran parte de la servidumbre, la cual puede presentar alguna falla por contacto con algún tipo de vegetación u otra especie; y también se pueda percibir alguna otra anomalía sobre la servidumbre, ya sea la construcción de edificaciones, entre otras. El artículo propuesto por (Jiang et al., 2017) muestra un arduo trabajo en el tema de la fotogrametría para la reconstrucción de torres de transmisión de energía eléctrica, de este artículo se extrae la Figura 12 y se evidencia que para la obtención de un modelo resultante se deben capturar varias imágenes de diferentes ángulos; en

este figura se aprecia una torre de energía eléctrica que está localizada en cierto terreno a estudiar.

Figura 11

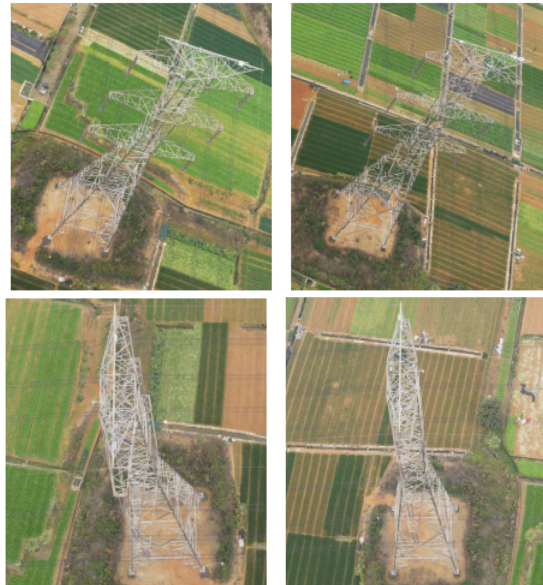
Bosquejo simple del proceso fotogramétrico con sistemas UAV.



Nota. Adaptada de (Arriola et al., 2017).

Figura 12

Toma de evidencia para procesamiento fotogramétrico.



Nota. Adaptada de (Jiang et al., 2017).

Es evidente que el personal calificado para desarrollar esta técnica debe tener conocimiento

y experiencia en el tema, además debe conocer muy bien los componentes, equipos y toda las herramientas a implementar en esta labor; a su vez, el operador debe tener una buena planificación de vuelo fotogramétrico.

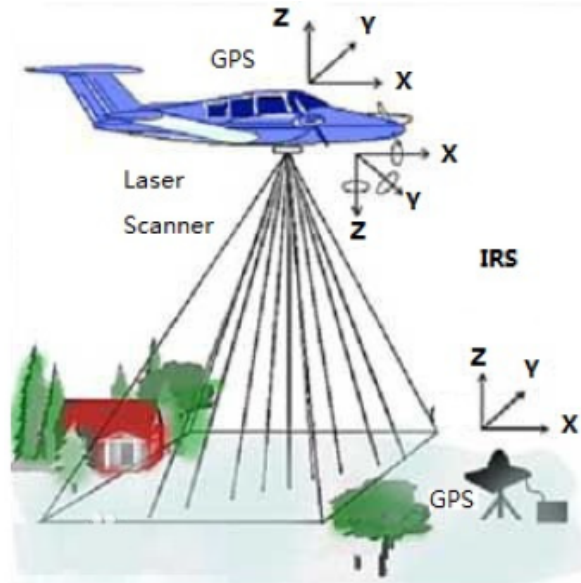
3.5. Inspección por LiDAR

De entrada es importante mencionar que la inspección por el método con LiDAR es más preciso que con el método por fotogrametría, sin embargo es un poco más costoso debido a la implementación de equipos especiales. LiDAR son las siglas de *Laser Imaging Detection and Ranging* lo que traduce como *sistema de medición y detección de objetos mediante láser*; este acrónimo está compuesto a su vez por otro acrónimo (*LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Entendiendo lo que son y traducen estas siglas, es simple saber cómo se lleva a cabo la inspección con este método, ya que es con un emisor de haces de rayos láser infrarrojos con el que se realiza la adquisición de datos y se reconstruye un mapa o modelo 3D por el procesamiento de la información recolectada; es por ello que es más costoso implementar esta inspección. La diferencia con la fotogrametría es que el uso de LiDAR permite obtener una nube de puntos, o en otras palabras, la información necesaria de cientos de puntos; lo que con la fotogrametría no se puede realizar, ya que en cada fotografía se obtiene información de ese punto en específico. En la publicación realizada por (Li and Guo, 2018) se describe sustancialmente la aplicación de este método en mención para la inspección de líneas eléctricas, y del cual se destaca o extrae la Figura 13 en la que se aprecia el proceso de la toma de datos con LiDAR antes de la implementación de los sistemas UAV; como se ve en la figura, las aeronaves tripuladas se solían usar para hacer estas labores, elevándose aún más el costo de esta inspección, ya que se debía

rentar dicha aeronave.

Figura 13

Gráfico de la toma de información con LiDAR.



Nota. Adaptada de (Li and Guo, 2018).

En la actualidad existen equipos y herramientas más sofisticadas para realizar este método de inspección, pero sobretodo con el uso de sistemas UAV, esta labor dejó de ser un proceso tedioso, a ser un trabajo que se puede desarrollar con facilidad siempre y cuando se tengan los recursos para adquirir los equipos. Seguramente la reconstrucción de modelos 3D de torres de transmisión eléctrica y la servidumbre con este método resulta más rápido y precisa para la detección de cualquier falla o anomalía que se pueda presentar.

4. Protocolo al momento de la inspección, recolección y entrega de datos

Tomando como guía el capítulo 8 de la norma IEEE 2821 (2020) y siguiendo la reglamentación presentada, para llevar a cabo de manera correcta las tareas de inspección y evitar accidentes, es necesario tener un protocolo a seguir, que nos permita guiarnos durante las actividades antes de partir a realizar la inspección, durante la tarea de inspección y finalmente con las acciones necesarias después de esta.

4.1. Actividades previas a la inspección

Podemos identificar algunas tareas preparativas y preventivas antes de ir al sitio de la inspección. Estas resultan de vital importancia ya que nos pueden ayudar a prevenir accidentes o recortar el tiempo de la misión.

- Preparar con antelación la solicitud de los permisos de vuelo ante la UAEAC con los soportes necesarios dependiendo el tipo de misión a realizar.
- Identificar la zona donde se realizará la inspección, el tipo de terreno, formas de acceso y demás características ambientales relevantes.
- Identificar los requisitos de la misión, para poder determinar el tipo de UAS y su carga útil adecuados para las tareas a realizar.
- De ser necesario planificar las rutas de vuelo para trabajos de fotogrametría, ortofotografía, LiDAR o cualquier tipo de vuelo automático.

- Tener disponibilidad de pilotos u operadores calificados para realizar la misión.
- Revisar el estado general del UAV, siendo imprescindible verificar el estado del firmware, actualizaciones pendientes, el buen estado de hélices, baterías y componentes del equipo.
- Revisar pronósticos del clima para las fechas estimadas a realizar la inspección, prefiriendo siempre que sea posible días soleados, bajos en neblina o lluvia.
- Hacer un estudio de riesgos y medidas de seguridad para la misión, en pro de prevenir accidentes, poseer una matriz de riesgos que abarque los posibles peligros que represente cada tarea de inspección resulta crucial a la hora de abordar un accidente.
- Revisar el nivel de las baterías de todo el equipo el día anterior a la misión, algunas baterías inteligentes se descargan al estar almacenadas por largos periodos para prevenir su degradación.
- Solicitar al encargado de la línea de transmisión la documentación de soporte necesaria para detallar y realizar las tareas de inspección, como pueden ser: diagramas unifilares, mapas georeferenciados, características puntuales de las líneas y demás soportes que brinden información detallada.

4.2. Actividades de campo

Ya en el lugar donde se realizará la tarea de inspección, procederemos siempre teniendo como prioridad la seguridad del UAS, la infraestructura eléctrica, los operadores y personal presente, junto con las personas y propiedades ajenas presentes al rededor del área de trabajo.

En la labor de inspección, se identifican tareas esenciales tanto para cables y conductores como para estructuras. Para los cables, se requiere una inspección visual y mecánica, comparando los datos con planos y especificaciones, buscando daños físicos en las secciones expuestas, inspeccionando las conexiones eléctricas atornilladas para detectar alta resistencia a través de estudios termográficos, verificando la puesta a tierra del blindaje, el soporte del cable y la terminación, y comprobando que las curvaturas del cable cumplan o superen el radio mínimo permitido. Para las estructuras, se requiere de igual forma una inspección visual y mecánica, comparar la estructura con planos y especificaciones, inspeccionar la condición física y mecánica de esta, verificar el anclaje, alineación y puesta a tierra, comprobar que los aisladores de soporte estén limpios y sin flameos o roturas, inspeccionar las conexiones eléctricas atornilladas y realizar también un estudio termográfico para identificar posibles puntos de corrosión o alta resistencia eléctrica (NETA, 2003).

4.2.1. Preparación de la misión. Al llegar al sitio, es necesario identificar las características de la zona de operación. De inmediato se obtiene información del clima, la velocidad del viento, la nubosidad y demás factores atmosféricos que puedan afectar las condiciones para un vuelo idóneo, si alguna de estas es desfavorable o no tolerable por el UAV, se puede tomar la decisión de aplazar la tarea de inspección por medio del dispositivo UAV.

Se deben localizar puntos de aterrizaje y despegue para la aeronave, que se encuentren despejados y planos, además de un sitio similar para el personal y el GCS, teniendo en cuenta las distancias y medidas de seguridad para trabajar con alta tensión.

Es recomendable estudiar la zona circundante al área a inspeccionar, para identificar posi-

bles obstáculos como edificaciones, árboles o antenas. Es importante que solo estén presentes las personas necesarias para desempeñar la inspección, en caso de no ser posible evacuar esa área, se debe informar a todos los presentes de la actividad a realizar.

4.2.2. Revisión del sistema UAS . Antes de desplegar el UAV y despegar, se deben revisar algunos puntos importantes:

- El estado de las propelas, la batería, la carga útil y de ser necesario su correcto ensamblaje con el UAV.
- Aunque al encender el dispositivo UAS este realice una auto revisión indicando si puede despegar, es recomendable de manera manual identificar el estado de la conexión entre el UAV y el GCS, que la cantidad de satélites detectados por el GPS permita un vuelo estabilizado, que los mapas y rutas de vuelo sean cargados de manera correcta.
- Al realizar tareas cerca de elementos que emiten altos niveles de interferencia electromagnética, es recomendable que al llegar a una nueva locación se calibren los instrumentos del sistema UAV, como pueden ser la unidad inercial (IMU), su brújula y el GPS, evitando vuelos erráticos debido a estas interferencias.
- Se debe verificar que el UAS haya sido capaz de identificar el punto RTH desde donde despegará, para que en caso de una desconexión se tenga la posibilidad de un regreso seguro de la aeronave.

4.2.3. Capacidad de respuesta ante emergencias. Esta actividad al poseer un nivel de riesgo considerable, es imprescindible que el operador del UAS y demás personal respon-

sable, tengan el conocimiento y la capacidad de responder ante cualquier contingencia o situación de emergencia que pueda surgir en el desarrollo de la inspección, como pueden ser pérdidas de señal, pérdida parcial o total del control de la aeronave, vientos fuertes e incluso accidentes con las propelas que puedan requerir primeros auxilios.

Basados en los riesgos identificados en la RAC-91, la IEEE 2821-2020 y que se presentan comúnmente, se consignan estos en la Tabla 4. Esta matriz de riesgos debería tenerse en cuenta, como mínimo, en el momento de desarrollar las labores de inspección en cualquier escenario que se presente. Si se presenta un accidente, se debe informar a las autoridades correspondientes, como lo son la Aerocivil, Policía Nacional, el ente encargado de la línea de transmisión eléctrica, la aseguradora que presta la póliza de riesgos al UAS y las demás entidades que puedan verse involucradas.

Tabla 4*Matriz de riesgos para inspecciones en líneas de transmisión.*

RIESGO	PROBABILIDAD	IMPACTO	SEVERIDAD	PREVENCIÓN	MITIGACIÓN
<i>Choques con líneas eléctricas</i>	Alta	Catastrófico	Extremamente grave	Evaluación previa del área a inspeccionar y uso de sensores de detección	Detección temprana de problemas antes del vuelo y aterrizaje de emergencia
<i>Daños mecánicos en el drone</i>	Media	Grave	Moderadamente grave	Mantenimiento preventivo y evaluación de condiciones ambientales	Reparación del dron y reemplazo de piezas
<i>Condiciones meteorológicas adversas</i>	Media	Grave	Moderadamente grave	Verificación constante de las condiciones climáticas	Cancelación de la misión o reprogramación del vuelo
<i>Interferencia electro-magnética</i>	Media	Moderado	Moderadamente grave	Verificación de la compatibilidad electromagnética	Regreso al punto de partida o aterrizaje de emergencia
<i>Problemas con la transmisión de datos</i>	Baja	Moderado	Ligeramente grave	Verificación de la capacidad de transmisión	Evaluación de los datos recolectados

Nota. Elaboración propia.

4.2.4. Identificación de los métodos de inspección. Es necesario identificar la ruta que seguirá el UAV, teniendo en cuenta los objetos a inspeccionar y el tipo de carga útil de la

aeronave, de esta forma podremos organizar la misión evitando vuelos redundantes o peligrosos. Para la toma de datos visuales se requiere que la aeronave vuele de manera estable permitiendo obtener imágenes claras, se recomienda hacer fotografías desde al menos dos lados del objeto y desde un ángulo superficial, siempre y cuando sea posible maniobrar el UAV sin peligro a colisionar con otras estructuras, son comunes en la inspección de puestas a tierra, torres, aisladores, anclajes y demás componentes que permiten sostener la línea eléctrica. Si se desea recorrer largas distancias con un ala fija o un drone, es necesario configurar la velocidad de la aeronave y la distancia al objetivo a inspeccionar de manera que se puedan obtener datos útiles, ya sea para fotografía o nubes de puntos con LiDAR. Se deben respetar siempre con cualquier tipo de UAV las distancias mínimas permitidas para acercarse a líneas de alta tensión o si el fabricante del UAV dispone alguna restricción adicional para trabajar cerca a campos electromagnéticos fuertes.

4.2.5. Inicio de la inspección. Existen distintos modos de vuelo para operar los dispositivos UAS, los más comunes son vuelo manual, vuelo automático supervisado y vuelo autónomo, siendo este último donde el operador programa la ruta de la misión y sus características para que la aeronave la realice por sí misma con intervención o supervisión humana mínima. Debido a que aún no está completamente desarrollada, no existen suficientes protocolos de seguridad para llevarlas a cabo y la Aerocivil Colombiana las cataloga dentro de la clase C, para operaciones experimentales o académicas, no está concebida en Colombia para su explotación comercial.

Para los dos primeros modos de vuelo, los pilotos deben estar pendientes en todo momento de la posición de la aeronave, desde su despegue, mientras opera y hasta que aterrice, permitiendo que en caso de que ocurra una falla, un accidente u otro imprevisto siempre pueda cancelar la

inspección y retornar la aeronave a tierra. Además, los pilotos deben cerciorarse antes de despegar, que el nivel de batería de todos los componentes del UAS les permita realizar la misión y aterrizar conservando energía para un aterrizaje de emergencia, evitando que la aeronave pueda desplomarse sobre la infraestructura eléctrica, propiedad privada o vegetación ocasionando un accidente.

4.2.5.1. Vuelo manual. En este modo de vuelo el operador tiene control total sobre el UAV, aunque algunos dispositivos posean sensores para evitar colisiones, el operador debe estar pendiente en todo momento de la trayectoria de este, para facilitar el trabajo, es recomendable tener a cargo de la aeronave dos pilotos, uno encargado del control de la aeronave y otro para manipular la carga útil, algunas marcas permiten el uso de un segundo mando para realizar esta tarea de forma mas cómoda.

4.2.5.2. Vuelo automático supervisado. En el modo automático, se establece la ruta de vuelo y la misión en el sistema de control de la estación terrestre. Para establecer la ruta de vuelo se utilizan coordenadas creando un trayecto de puntos que debe seguir la aeronave con ayuda del GPS. Luego, el UAV realiza una auto-verificación antes de comenzar el vuelo. Una vez establecida la ruta de vuelo y verificado el sistema, el UAV volará automáticamente a lo largo de la ruta establecida, llegando a la posición designada, donde la carga útil tomarán automáticamente fotografías mediante el obturador o datos con un escáner LiDAR. En caso de emergencia, el operador tiene la opción de terminar el vuelo manualmente en cualquier momento. Una vez completada la misión, el UAV regresará automáticamente y aterrizará en el lugar designado.

4.3. Actividades posteriores a la inspección

Una vez realizadas las tareas en campo, se hace necesario un trabajo extra enfocado en los datos recolectados y la disposición del UAS. Se mencionan los más generales o destacables para cualquier inspección.

4.3.1. Mantenimiento y almacenamiento del UAS. Una vez finalizada la inspección con el UAS es necesario hacer una revisión de su estado general, identificando fallas o la necesidad de realizar mantenimiento o remplazo de algún componente. Se procede a revisar el estado de carga de las baterías, identificando que sea el adecuado para almacenar el dispositivo, de no ser así se deben cargar o estabilizar a niveles seguros según recomiende el fabricante, posteriormente se dispondrá el dispositivo en su caja, equipaje o donde se tenga previsto almacenarlo de forma que se evite la exposición al sol, humedad o polvo.

Es recomendable tener una bitácora para registrar los vuelos o misiones realizadas con el UAS, permitiendo llevar un historial completo del desempeño de la aeronave, facilitando la programación de mantenimientos periódicos y un estimado de la vida útil de las baterías y demás componentes del sistema. Logrando mantener las condiciones de seguridad y reduciendo posibles riesgos de accidentes.

4.3.2. Análisis y tratamiento de los datos recolectados. Los datos obtenidos mediante la inspección deben ser analizados con cautela, si se presentan anomalías, fallas o inconsistencias, deben ser registradas y debidamente notificadas. Los archivos para ortofotografía, LiDAR y cualquier otro tipo de reconstrucción tridimensional, primero deben ser procesados por

software que permita visualizar su contenido. Se puede contar con programas basados en inteligencia artificial o por personal capacitados para realizar el análisis de datos e identificar las anomalías en los sistemas eléctricos, con el objetivo de generar un reporte según los resultados obtenidos. Permitiendo que se decida en caso de ser necesario, enviar equipos o cuadrillas a reparar, ejecutar mantenimientos o reemplazar componentes dependiendo de la prioridad de cada caso.

5. Modelo de entrega de resultados

Después de haber finalizado el proceso de inspección y recolección de toda la información. Se procede a realizar una selección óptima de datos, y de allí poder resaltar el estado actual del objeto inspeccionado. Según la técnica aplicada en el momento de la inspección, debe contarse con el personal calificado y certificado para llevar a cabo el proceso de análisis de toda la información. Es decir, si se realiza una inspección termográfica, el personal que podrá realizar el análisis de la información debe estar certificado como termógrafo nivel 1 y debe contar con conocimientos avanzados en el tema.

La entrega de los resultados puede realizarse en cualquier modelo de ficha o formato en el que el agente encargado de la inspección presente con claridad y simplicidad toda la información relevante, parte de esa información debe ser:

- Ubicación del lugar a ser inspeccionado.
- Fecha de realización.
- Información general. También puede suministrarse localización georeferenciada, distancias a recorrer, entre otra información.

En la descripción de los hallazgos, se puede presentar la siguiente información:

- Diagnóstico.
- Pronóstico.

- Control de diagnóstico.

A su vez, se podría presentar el referente técnico por anomalías, en el que se detalla únicamente la norma o reglamento donde indique como debe ser el estado normal del objeto a inspeccionar.

Se debe complementar con registro fotográfico de las anomalías y demás irregularidades que se presenten. Y para concluir se deben suministrar las recomendaciones y sugerencias para que el dueño y operador del sistema de transmisión sepa qué se debe realizar para mitigar cualquier riesgo o futura falla.

También se puede tomar como referencia el formato 34.2 del RETIE (2013) pág. 202. En el cual se presente el formato para dar dictamen a la inspección y verificación de las líneas de transmisión. El std. 2821 (2020) propone o plasma la entrega de los resultado en evidencias fotográficas. En sí no se puede dar mucha profundidad en el tema del análisis porque para eso se requeriría un trabajo mucho más extenso y con enfoques profundos en cada una de las técnicas, fallas y demás tecnologías que abarcan el trabajo con sistemas UAV.

Nota. Se elaboro el manual a modo de guía para las tareas de inspección en lineas eléctricas siguiendo los parámetros consignados en este documento. Este archivo se entrego como material extra a la universidad.

6. Demostración práctica como ejemplo para aplicar el contenido del manual

Este manual ha sido diseñado para establecer un protocolo de inspección de líneas de transmisión mediante el uso de drones o UAVs, con el objetivo de minimizar los riesgos asociados a la operación de este tipo de infraestructuras. Con la finalidad de poner en práctica los protocolos y recomendaciones presentados en este manual, se llevará a cabo una demostración práctica en Yondó, Antioquia. Para ello, se contará con la colaboración de la empresa Proyectos Obras y Diseños PROYED SAS, que cuenta con varios años de experiencia en el campo de la inspección de líneas de transmisión, el equipo necesario y con todos los requisitos legales para llevar a cabo estas actividades.

Además, Proyed SAS ha sido un aliado invaluable en la elaboración de este manual, brindando retroalimentación, consejos y compartiendo sus conocimientos para mejorar la calidad del mismo, es por esto que están dispuestos a seguir el protocolo propuesto en el manual para validar su eficiencia y capacidad de mitigar riesgos. Su colaboración y compromiso han sido fundamentales en la realización de esta demostración práctica. Para esta demostración se toma como guía el capítulo 4 de este manual, por lo cual se dividirá en 3 secciones, actividades previas, de campo y posteriores a la inspección.

6.1. Actividades previas a la inspección

Como se indica en el manual, se procede con una lista de chequeo para garantizar el éxito de la misión a realizar. PROYED SAS organiza esta información en forma de bitácora, donde disponen de la bitácora o plan de vuelo y una ficha técnica de cada UAV, cuentan con pilotos certi-

ficados, aeronaves registradas ante la Aerocivil, con expertos certificados en el análisis y detección de fallas por medios visuales, termográficos y ultrasónicos. Para esta actividad contaremos con la ayuda de los pilotos de la empresa, un drone tipo cuadricóptero de marca DJI modelo MAVIC 2 Enterprise Advance.

Figura 14
DJI MAVIC 2 Enterprise Advance.



Nota. Adaptada de la página web DJI.

La lista de preparación debe ser revisada por el personal a cargo de la inspección antes de ser realizada o de estar en campo, se deja firmado por quien revisó estos parámetros, confirmando y dando paso a la tarea de inspección en campo. Su listado de verificación consta de los siguientes aspectos:

- Actualización y revisión del firmware del radiocontrol y del UAV.

- Actualización de las aplicaciones requeridas.
- Mapas descargados y actualizados.
- Baterías cargadas en su totalidad.
- Radiocontrol cargado, de ser requerido tableta o teléfono cargado.
- Tarjeta de almacenamiento con espacio suficiente para la adquisición de datos.
- Verificación de hélices, cargador y punto de despegue.

Figura 15

Revisión previa del UAV.



Para poder llevar a cabo la inspección de manera óptima, se verifica con anterioridad el pronóstico del clima identificando espacios con buen clima que permitan realizar las tareas, se

solicita al operador de red o entidad encargada de la línea informes, planos unifilares, mapas georreferenciados y demás información que sea de utilidad para la actividad, también se tramitan los permisos requeridos ante la Aerocivil y la entidad encargada de las líneas.

6.2. Actividades de campo

Habiendo realizado con éxito la lista de comprobación previa, confirmando que todos los parámetros son adecuados para ir a campo, es momento de dirigirse al sitio de la inspección. PROYED SAS tiene una lista de verificación de seguridad para el momento de la misión, la cual debe ser revisada antes de despegar la aeronave o dar inicio a las tareas de inspección que involucren un UAV, donde destacan:

- Inspección del estado del drone, donde se procede a inspeccionar el UAV de forma visual en busca de abolladuras golpes o desperfectos.
- Baterías totalmente cargadas, es necesario inspeccionar el nivel de carga de las baterías antes de despegar para evitar accidentes en vuelo.
- Baterías insertadas correctamente, el no insertar adecuadamente la o las baterías en el UAV podría ocasionar una falla en vuelo, algunas marcas como DJI emiten avisos visuales en el radiocontrol para informar esto al operador.
- Estado de las hélices, se revisa el estado general de cada hélice, buscando quiebres, dobleces o cualquier otro desperfecto, además se debe comprobar que están correctamente aseguradas al UAV.

- Retirar el protector del gimbal, la cámara del dron DJI Mavic Enterprise Advanced y muchas otras gamas de esta marca tienen un plástico protector en el estabilizador de la cámara, este cumple la función de protegerla de caídas o golpes, pero debe ser removido antes de encender el UAV para evitar daños en los servomotores del estabilizador.
- Tarjeta SD, se revisa que la tarjeta para el almacenamiento de la información cuente con espacio suficiente para llevar a cabo las tareas de inspección programadas y se verifica que se encuentre correctamente instalada en el UAV.
- Verificaciones en el radiocontrol, se procede a encender el radiocontrol, configurar el brillo de su pantalla según se requiera, ajustar las antenas en la posición correcta, de ser necesario, conectar dispositivos como tableta o celular verificando que su aplicación funcione correctamente.
- Encendido del dron, se verifica que no salten alarmas indicando fallas y que el control enlace correctamente con el UAV.
- Calibración de sensores, se revisa el estado de calibración de la brújula y la IMU, de ser necesario se calibran según lo indique el UAV.
- Ubicación de la pista de despegue y aterrizaje, es necesario identificar una zona horizontal sin huecos o fallas que permita el despegue del UAV.
- Configurar la altura de regreso a casa según lo requiera cada inspección.
- Revisar el estado del GPS y la cantidad de satélites detectados para un vuelo óptimo.

- Ubicar el dron en el punto escogido para el despegue y aterrizaje.
- Identificar que el UAV haya definido un punto de origen para el retorno a casa.
- Revisar que el área de vuelo esté libre de personas y animales.

Figura 16

Revisión del UAV y sus componentes en campo.



La lista anterior, corresponde a los preparativos para el despegue de la aeronave, al momento de iniciar el despegue y las tareas de inspección, PROYED SAS también sigue un protocolo para el vuelo seguro donde se tiene la siguiente lista de verificación:

- Revisión de las condiciones climáticas de la zona.

- Verificación de la ausencia de otras aeronaves en el área de trabajo, esto incluye tripuladas como aviones y no tripuladas.
- Verificar que el área de despegue se encuentre despejada verticalmente de árboles, líneas eléctricas, torres o cualquier otro obstáculo.
- Avisar a todas las personas implicadas del despegue, incluyendo operarios, demás personal de la cuadrilla y vecinos del área de trabajo.
- Realizar el despegue de la aeronave, mantenerla al menos 20 segundos en el aire de manera estática para identificar fallas.

Figura 17

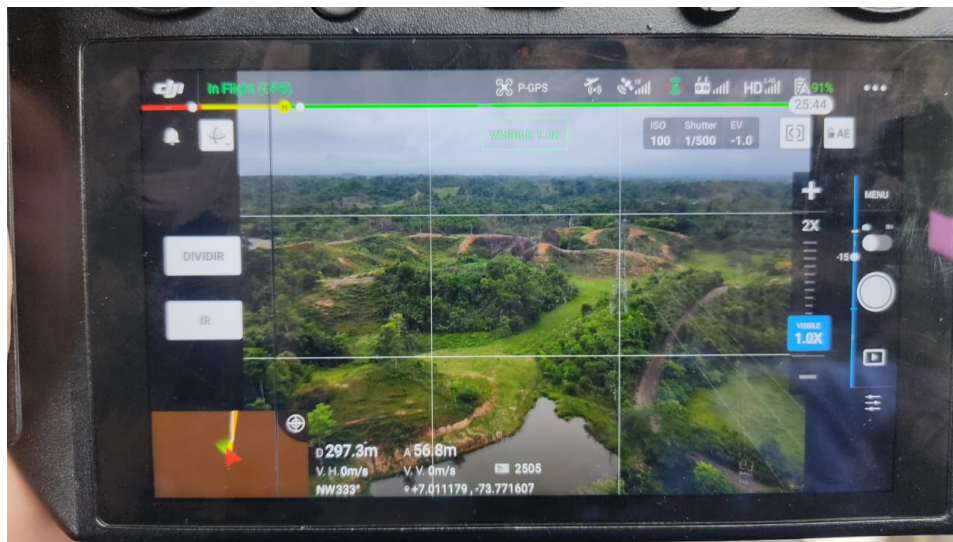
Revisión estática del UAV en vuelo.



- Monitorear la carga y tiempo de vuelo de la batería al momento de despegar.
- Monitorear en todo momento el nivel de descarga de la batería y el tiempo de vuelo restante.
- Monitorear en todo momento la potencia de señal de transmisión de video y telemetría.

Figura 18

Estado de la telemetría, satélites y batería.



- El operador debe mantenerse en la zona de despegue del UAV.

Esta demostración se realizó en una línea de 34.5kV, la cual posee una longitud de 10km y estructuras en postes de concreto de 12m de altura. PROYED SAS siempre inicia su recopilación de información con una fotografía cenital georreferenciada de la estructura a analizar.

Figura 19

Imagen cenital para georreferencia.



Se continúa con la inspección y toma de información según lo requiere la misión o a petición del operador de la línea. En esta ocasión se inspeccionan en forma visual las estructuras, herrajes, aisladores y el estado general de la línea.

Figura 20

Estado de estructuras tipo poste.

**Figura 21**

Estado de los aisladores.



Figura 22

Estado de los herrajes.



Figura 23

Estado de las líneas.



Para finalizar se realizan tomas con la cámara termográfica en los componentes eléctricos, para posteriormente hacer un análisis profundo y detectar fallas eléctricas que no se ven a simple vista.

Figura 24

Imagen cenital termográfica.

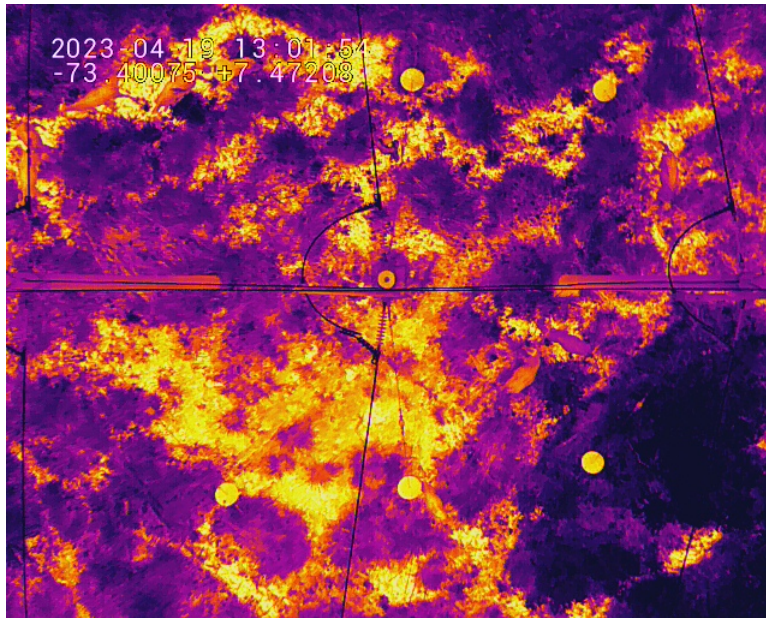
**Figura 25**

Imagen térmica de la línea.

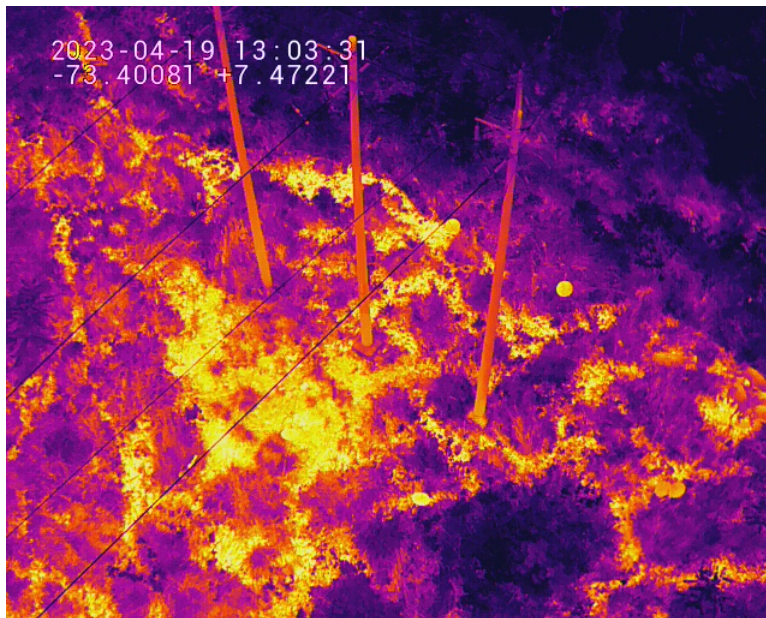
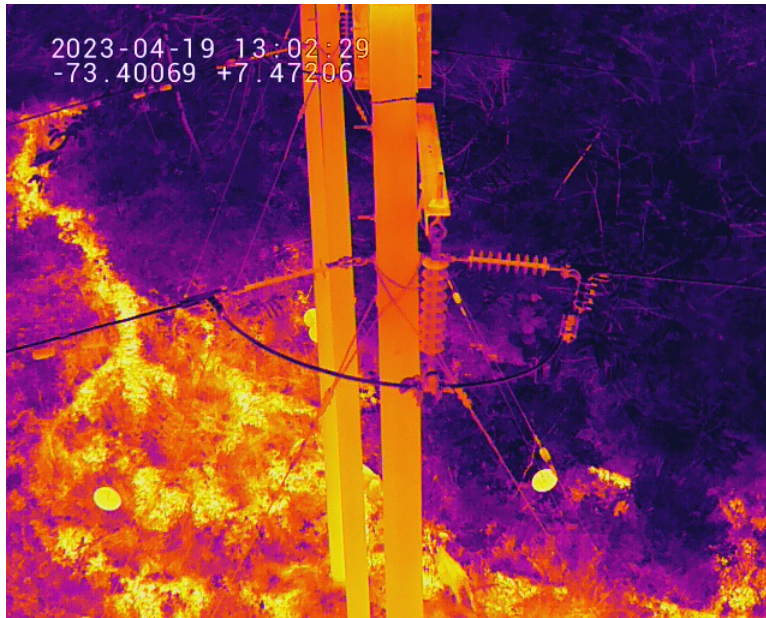


Figura 26

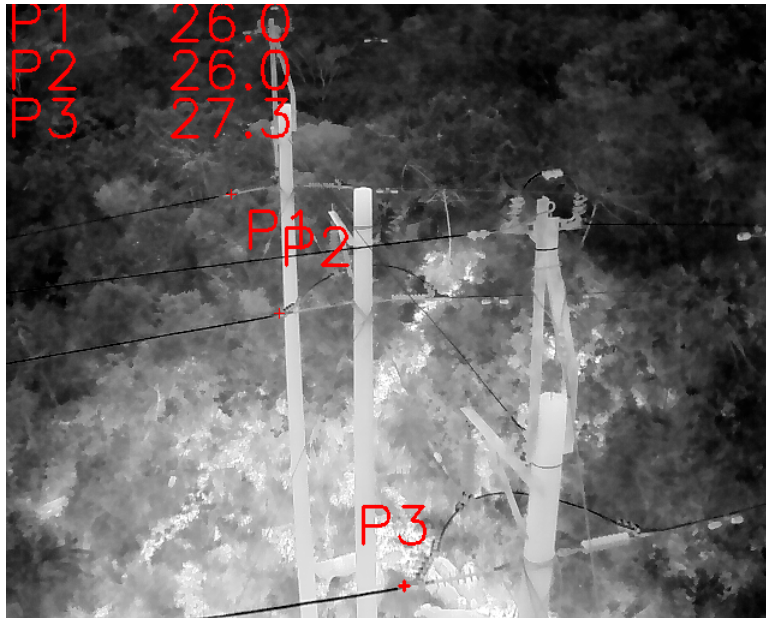
Imagen térmica de los aisladores y componentes eléctricos.



Para facilitar el análisis posterior de las temperaturas se hacen deltas de comparación entre elementos iguales instalados en la red, esto permite encontrar variaciones elevadas de temperatura en los componentes estudiados.

Figura 27

Deltas de temperatura en los elementos.



6.3. Actividades posteriores a la inspección

Una vez se han finalizado las tareas referentes a la inspección, PROYED SAS aplica su última bitácora para el almacenaje del UAV y la información. Para esto se tienen los siguientes pasos para verificar:

- Aterrizar en el puesto designado para el aterrizaje y apagar el UAV.

Figura 28

Aterrizaje del UAV.



- Colocar el plástico protector al estabilizador de la cámara.
- Retirar y almacenar las baterías.
- Apagar el radiocontrol, retirar, luego apagar tableta o celular si se utilizaron y almacenarlos.
- Retirar hélices y almacenarlas.
- Desconectar todos los cables para almacenarlos.
- Recoger y almacenar el UAV.

- Recoger y almacenar la superficie de aterrizaje y los demás accesorios del UAV.

Figura 29

Almacenamiento del UAV.



Según las peticiones del cliente, PROYED SAS puede entregar la información de manera ordenada en formatos tipo tabla describiendo cada fotografía y sus características sobresalientes o realizar un análisis minucioso para entregar un reporte completo de posibles fallas y averías en la estructura.

En esta ocasión solo se presentaron inconvenientes menores con la presencia de animales cerca al lugar de trabajo como se observa en la Figura 19, a pesar de esto se lleva a cabo la inspección y en un análisis preliminar de la información solo se evidencia suciedad en los aisladores, ver Figura 21.

7. Conclusiones

En la creación de este manual se estableció un protocolo básico estándar para la inspección de líneas de transmisión eléctrica, mediante el uso de sistemas UAV en Colombia, de acuerdo con protocolos, estándares y reglamentaciones de seguridad nacionales e internacionales.

La demostración práctica realizada con la ayuda de la empresa Proyed SAS nos permitió validar las recomendaciones y técnicas presentadas en el manual, así como identificar mejoras y ajustes que se pueden implementar durante futuras inspecciones. Hemos verificado que este protocolo es efectivo y seguro, lo que resulta en una mayor eficiencia y menor riesgo en la realización de estas tareas; asimismo, esta experiencia nos ha brindado una mejor comprensión de los desafíos que comprende la labor de inspección y mantenimiento de las líneas de transmisión, pero también nos ha permitido fortalecer las habilidades y capacidades en esta área.

Debido a que esta es un área de aplicación reciente en Colombia y en el mundo, se propone para trabajos futuros la profundización en el campo de pruebas de seguridad con dispositivos UAV, optimizar los métodos para la toma de datos y detección de fallas, además de mejorar los procesos para el análisis especializado y el diagnóstico de las líneas y estructuras eléctricas.

En conclusión, al desarrollar la estructuración del manual y la realización de la demostración práctica se evidenció la importancia, pero también la necesidad de contar con protocolos y técnicas adecuadas para la inspección de líneas de transmisión eléctrica con sistemas UAV. Gracias a esto, se pueden efectuar labores con más eficiencia y menos riesgo tanto para el personal como para el dispositivo; y se generó una colaboración fructífera con la empresa Proyed SAS, lo

cual demuestra la importancia de la cooperación interinstitucional para lograr objetivos comunes en materia de seguridad y confiabilidad en el sector eléctrico.

Referencias Bibliográficas

- Arriola, V., Barahona, C. A., Miller, G. C., and Rimolo, D. R. (2017). Diseño de un sistema de adquisición de datos para fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (uav). *Tecnología En Marcha*, 29(4):92–101.
- Constantin, A. and Dinculescu, R.-N. (2019). Uav development and impact in the power system. In *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, pages 1–5.
- Florez, P. and Carreño, C. (2001). Mantenimiento de líneas de transmisión - estudio para la aplicación del software tim de la eprí en colombia.
- Hallermann, N. and Morgenthal, G. (2014). Visual inspection strategies for large bridges using unmanned aerial vehicles (uav). In *Proc. of 7th IABMAS, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, pages 661–667.
- IEEE (2020). Ieee guide for unmanned aerial vehicle-based patrol inspection system for transmission lines. *IEEE Std 2821-2020*, pages 1–49.
- Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., and Yang, L. (2017). Uav-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line. *Remote Sensing*, 9(3).
- Li, X. and Guo, Y. (2018). Application of lidar technology in power line inspection. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 382(5).

- Luque, Vega, L. F., Castillo, Toledo, B., Loukianov, A., and Gonzalez, Jimenez, L. E. (2014). Power line inspection via an unmanned aerial system based on the quadrotor helicopter. In *MELECON 2014 - 2014 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pages 393–397.
- Mao, X., Xiang, B., Liu, Z., and Tu, S. (2022). Simulation analysis and experimental research on the safety distance of uav inspection on transmission lines. *AIP Advances*, 12(2):025009.
- Menendez, O. A., Perez, M., and Auat Cheein, F. A. (2016). Vision based inspection of transmission lines using unmanned aerial vehicles. In *2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pages 412–417.
- Meza, M., Gómez, A., A., and Prado, M. (2021). Inspección inteligente de líneas de alta tensión con drones. *Tecnología En Marcha*, pages 62–69.
- Minminas (2013). Reglamento técnico de instalaciones eléctricas - retie. Ministerio de Minas y Energía de Colombia.
- Moore, A. J., Schubert, M., and Rymer, N. (2018). Technologies and operations for high voltage corona detection with uavs. In *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, pages 1–5.
- NETA (2003). Neta acceptance testing specifications for electrical power distribution equipment and systems.

- Romero, B., Minchala, J. M., Angulo, N., Carrasquero, E., and Gil, L. E. (2019). Corrosive deterioration of assembly components in an electrical transmission tower. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 23(90):12.
- Rymer, N., Moore, A. J., and Schubert, M. (2018). Inexpensive, lightweight method of detecting coronas with uavs. In *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 452–457.
- Taqi, A. and Beryozkina, S. (2019). Overhead transmission line thermographic inspection using a drone. In *2019 IEEE 10th GCC Conference Exhibition (GCC)*, pages 1–6.
- UAEAC, U. (2018). Reglas generales de vuelo y de operación-rac 91. bogotá, colombia.
- Xu, L., Guo, H., Fu, Y., Wang, Z., Li, Z., Hua, Z., Li, P., Luo, C., Wang, P., Wei, Y., Chen, B., and Liu, S. (2022). Research of 3d trajectory hovering points determination method of uav patrol inspection transmission tower. *Journal of Physics: Conference Series*, 2378(1):012088.
- Yang, L., Fan, J., Liu, Y., Li, E., Peng, J., and Liang, Z. (2020). A review on state-of-the-art power line inspection techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(12):9350–9365.