

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

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

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

Autores

Eduar Tomas Anaya Rojas

Nicolás Andrés Vargas Cáceres

Coautores

Julián Gustavo Rodríguez Ferreira
PhD Astrofísica

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga
PhD Tecnología

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga
2023



Tabla de Contenido

1	Generalidades de la inspección	7
1.1	Vehículos aéreos no tripulados para la inspección de líneas de transmisión	7
1.1.1	UAVs	7
1.1.2	Estación de control terrestre (GCS)	9
1.1.3	Carga útil	9
1.2	Marco legal y regulatorio para la inspección de líneas mediante UAVs	9
1.2.1	Categorías	10
1.2.2	Prohibiciones	10
1.2.3	Permisos y requisitos para pilotar drones	10
1.3	Recomendaciones de seguridad sobre el uso de UAVs en inspección de líneas	12
1.3.1	Seguridad aeronáutica	12
1.3.2	Seguridad eléctrica	12
2	Protocolo de inspección con UAV	16
2.1	Actividades previas a la inspección	16
2.2	Actividades de campo	18
2.2.1	Preparación de la misión	18
2.2.2	Revisión del sistema UAS	20
2.2.3	Capacidad de respuesta ante emergencias	23
2.2.4	Identificación de los métodos de inspección	24
2.2.5	Inicio de la inspección	24

2.3	Actividades posteriores a la inspección	30
2.3.1	Mantenimiento y almacenamiento del UAS	30
2.3.2	Tratamiento y entrega de los datos recolectados	31
3	Entrega de resultados	33
3.1	Recomendaciones	33
3.2	Modelo para la entrega de resultados	35
	Bibliografía	36

Vehículos aéreos no tripulados para la inspección de líneas de transmisión

UAVs

Estación de control terrestre (GCS)

Carga útil

Marco legal y regulatorio para la inspección de líneas mediante UAVs

Categorías

Prohibiciones

Permisos y requisitos para pilotar drones

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

Seguridad aeronáutica

Seguridad eléctrica

1. Generalidades de la inspección

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 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 1.1: 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 1.2: 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 según IEEE 2821 de 2020.

Figura 1.3: Radiocontrol DJI.



Nota. Adaptada de la página web DJI.

1.1.3 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.

1.2 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, 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

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 de algunas limitaciones y requisitos que debemos seguir a cabalidad para evitar accidentes y multas por el mal uso de estos aparatos.

1.2.1 Categorías

Según lo indica el RAC 91 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, vídeos 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.

1.2.2 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.

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 vídeo, 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 según RAC 91.

1.2.3 Permisos y requisitos para pilotar drones

En el artículo 13, capítulo 3 del RAC 91 se establecen ciertos requerimientos para los pilotos, explotadores y los propios UAS, que son de obligatorio cumplimiento.

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.

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.

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.

1.3 Recomendaciones de seguridad sobre el uso de UAVs en inspección de líneas

1.3.1 Seguridad aeronáutica

Como lo indica el RAC 91 en su apéndice 13, 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 vídeo, telemetría y comandos en general.

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 según IEEE 2821 de 2020.

1.3.2 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:

1.3 Recomendaciones de seguridad sobre el uso de UAVs en inspección de líneas

Cuadro 1.1: Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas en corriente alterna.

Tensión nominal del sistema (Fase-Fase)	Límite de aproximación seguro (parte móvil expuesta) [m]	Límite de aproximación seguro (parte fija expuesta) [m]	Límite de aproximación restringida [m]	Límite de aproximación técnica [m]
50 V - 300 V	3.0	1.0	Evitar contacto	Evitar contacto
301 V - 750 V	3.0	1.0	0.30	0.025
751 V - 15 kV	3.0	1.5	0.7	0.2
15.1 kV - 36 kV	3.0	1.8	0.8	0.3
36.1 kV - 46 kV	3.0	2.5	0.8	0.4
46.1 kV - 72.5 kV	3.0	2.5	1.0	0.7
72.6 kV - 121 kV	3.3	2.5	1.0	0.8
138 kV - 145 kV	3.4	3.0	1.2	1.0
161 kV - 169 kV	3.6	3.6	1.3	1.1
230 kV - 242 kV	4.0	4.0	1.7	1.6
345 kV - 362 kV	4.7	4.7	2.8	2.6
500 kV - 550 kV	5.8	5.8	3.6	3.5

Nota. Adaptada del RETIE (p. 62)

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.

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.

Cuadro 1.2: 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 (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

1.3 Recomendaciones de seguridad sobre el uso de UAVs en inspección de líneas

volar el dispositivo.

Figura 1.4: Vista lateral con distancias mínimas de aproximación.

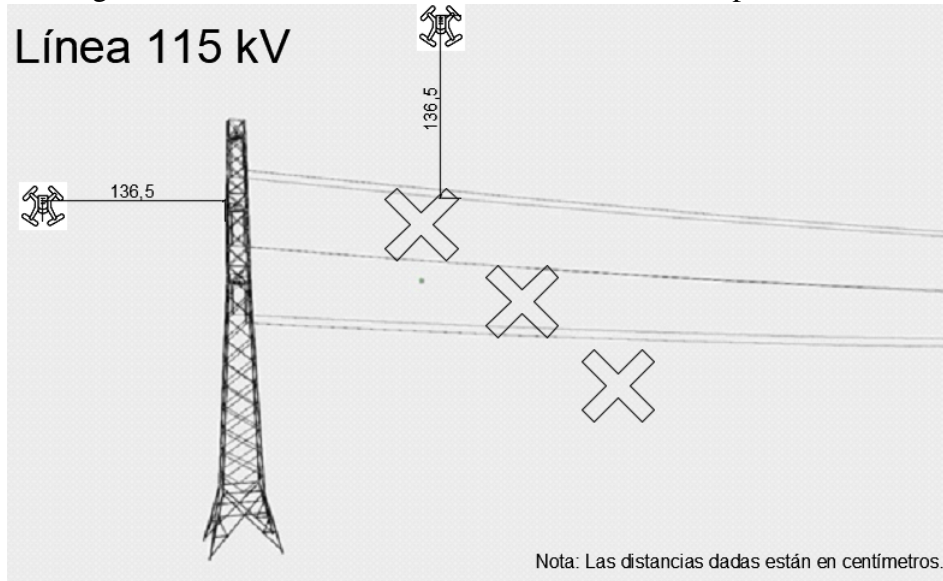
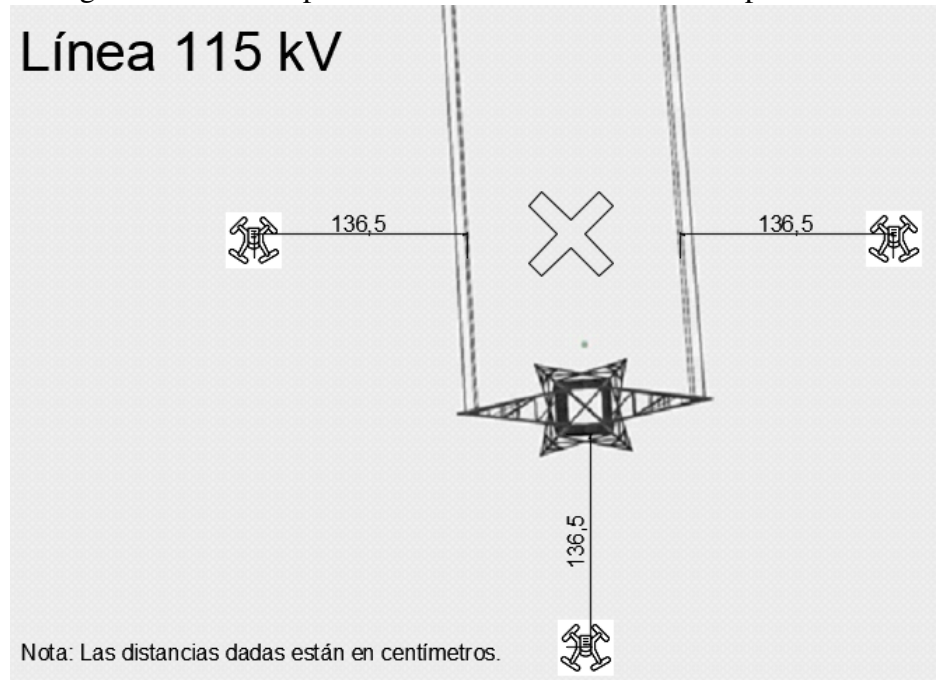


Figura 1.5: Vista superior con distancias mínimas de aproximación.



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 acercar a menos de las distancias mínimas permitidas

1.3 Recomendaciones de seguridad sobre el uso de UAVs en inspección de líneas

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.

Actividades previas a la inspección

Actividades de campo

- Preparación de la misión
- Revisión del sistema UAS
- Capacidad de respuesta ante emergencias
- Identificación de los métodos de inspección
- Inicio de la inspección

Actividades posteriores a la inspección

- Mantenimiento y almacenamiento del UAS
- Tratamiento y entrega de los datos recolectados



2. Protocolo de inspección con UAV

Tomando como guía el capítulo 8 de la norma IEEE 2821, las recomendaciones de la empresa PROYED SAS y siguiendo la reglamentación presentada, para llevar a cabo de manera correcta las tareas de inspección y evitar accidentes, se crea un protocolo para realizar las labores de inspección abarcando las tareas previas, las tareas en campo durante la inspección y finalizando con las actividades posteriores a la recolección de información.

2.1 Actividades previas a la inspección

A continuación identificaremos algunas tareas preparativas y preventivas antes de ir al sitio de la inspección. Estas resultan de vital importancia ya que nos ayudan 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, almacenamiento suficiente para la toma de datos, mapas descargados, el buen estado de hélices, baterías y componentes del equipo.

Figura 2.1: Revisión previa del UAV.



- Revisar pronósticos del clima para las fechas estimadas a realizar la inspección, prefiriendo siempre que sea posible días soleados, sin 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.

Figura 2.2: Nivel de batería.



- 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.

2.2 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 según RETIE. 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 según NETA.

2.2.1 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.

Todo el personal involucrado en la tarea de la inspección debe contar con el equipo de protección personal acorde, como son casco y botas dieléctricas, gafas de seguridad con filtro UV, protección auditiva y ropa ignífuga.

Figura 2.3: Personal con elementos de protección personal.



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 posibles obstáculos como edificaciones, otras aeronaves, 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.

Figura 2.4: Zona de despegue y aterrizaje.



2.2.2 Revisión del sistema UAS

Antes de desplegar el UAV y despegar, se deben revisar algunos puntos importantes:

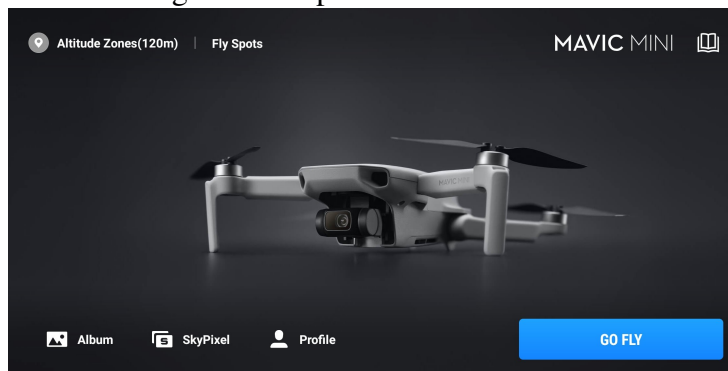
- El estado de las propelas, la batería, la tarjeta de memoria, la carga útil y de ser necesario su correcto ensamblaje con el UAV.
- Retirar los protectores de hélices o del estabilizador del UAV antes de encenderlo.
- Encender los dispositivos en el siguiente orden: primero el radiocontrol y tableta o dispositivo móvil si se requieren, seguido por el dispositivo UAV y finalmente si son necesarios accesorios adicionales como GPS externo.

Figura 2.5: Revisión previa del UAV.



- Ajustar el brillo de las pantallas a un nivel que permita observarlas sin problema, ajustar las antenas del radiocontrol y los accesorios en su posición indicada para funcionamiento.
- Iniciar las aplicaciones o programas necesarios para el control del UAV y la toma de datos.

Figura 2.6: Aplicación de vuelo DJI.



- 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.

- Ubicar el UAV sobre la superficie de despegue, se debe verificar que el dispositivo haya sido capaz de identificar el punto RTH desde donde despegará y ajustar la altura del regreso según la zona identificando los obstáculos más altos presentes, para que en caso de una desconexión se tenga la posibilidad de un regreso seguro de la aeronave.

Figura 2.7: Correcta ubicación del UAV.



- Avisar a todo el personal del despegue de la aeronave, despegar y mantener un vuelo estático para identificar que todo funcione correctamente.

Figura 2.8: Vuelo estático previo.



- Verificar en todo momento las estadísticas del dispositivo, como son el nivel de batería, señal, GPS y demás sensores.

Figura 2.9: Datos en pantalla.



2.2.3 Capacidad de respuesta ante emergencias

Al poseer un nivel de riesgo considerable, es imprescindible que el operador del UAS y demás personal responsable, 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 2.1. 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.

Cuadro 2.1: Matriz de riesgos para inspecciones en líneas de transmisión.

RIESGO	PROBABILIDAD	IMPACTO	SEVERIDAD	PREVENCIÓN	MITIGACIÓN
<i>Choques con líneas eléctricas</i>	Alta	Catastrófico	Extremadamente 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 dron</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 electromagnética</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.

2.2.4 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 dron, 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.

2.2.5 Inicio de la inspección

Existen distintos modos de vuelo para operar los dispositivos UAS, los más comunes son vuelo manual y vuelo automático supervisado. 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.

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. Los pasos recomendados para tomar las evidencias visuales con dispositivos UAV tipo drone son:

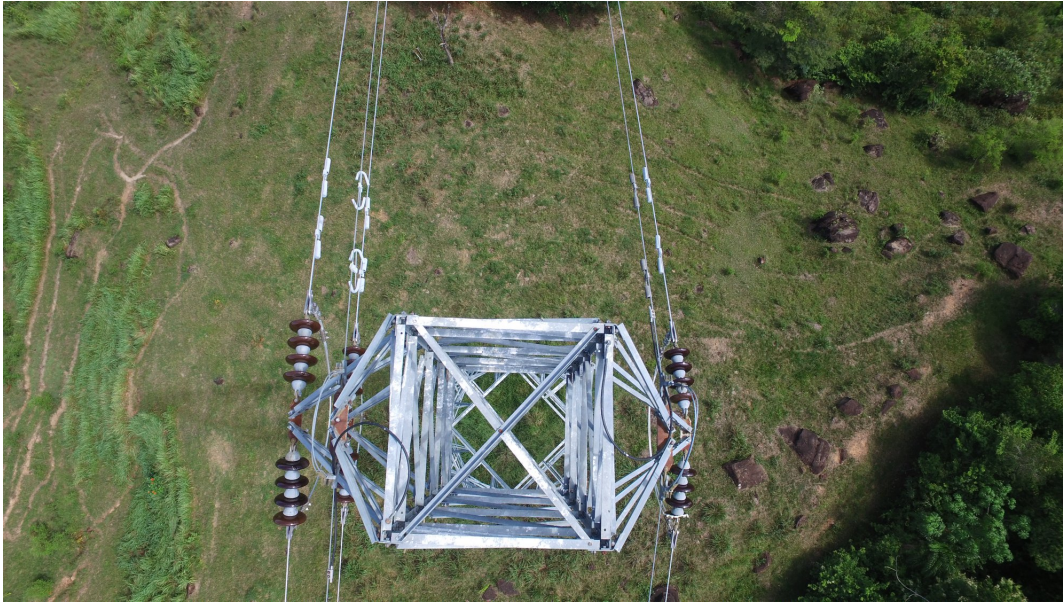
- El piloto eleva el drone a una altura prudente según la altura de la estructura a inspeccionar, respetando siempre las distancias de seguridad y las alertas de proximidad emitidas por el UAV.

Figura 2.10: Acercamiento a la estructura.



- Tomar un registro fotográfico georreferenciado de las estructuras en posición cenital.

Figura 2.11: Fotografía de referencia cenital.



- Tomar un registro fotográfico de cada elemento como aisladores, herrajes, conductores, cables de guarda y demás que posea. Se deben realizar fotografías en posición: superior central, lateral izquierda y derecha, hacia las bases o cimentaciones y finalmente de la estructura completa.

Figura 2.12: Fotografía ángulo superior.



Figura 2.13: Fotografía lateral 1.



Figura 2.14: Fotografía lateral 2.



Figura 2.15: Fotografía Cimentación.



Figura 2.16: Fotografía estructura completa.



- Se debe realizar una inspección detallada de la estructura identificando irregularidades como imperfecciones, defectos, falsos contactos, fijación de equipo, roturas, rupturas, presencia de colmenas, nidos o guaridas de insectos o animales, vegetación y ramas de árboles cercanas, que puedan interferir con el normal funcionamiento de los equipos, sin alterar o modificar el estado de estos.

Figura 2.17: Falla en aislador.



- Tomar registro fotográfico y de vídeo del cable de guarda y los conductores, dirigiéndose hacia la siguiente estructura a inspeccionar si se requiere, verificando el nivel de servidumbre que debe tener la vegetación sobre el tramo inspeccionado según los lineamientos del RETIE o los exigidos por la empresa dueña de la línea.

Figura 2.18: Vegetación cerca a las líneas.



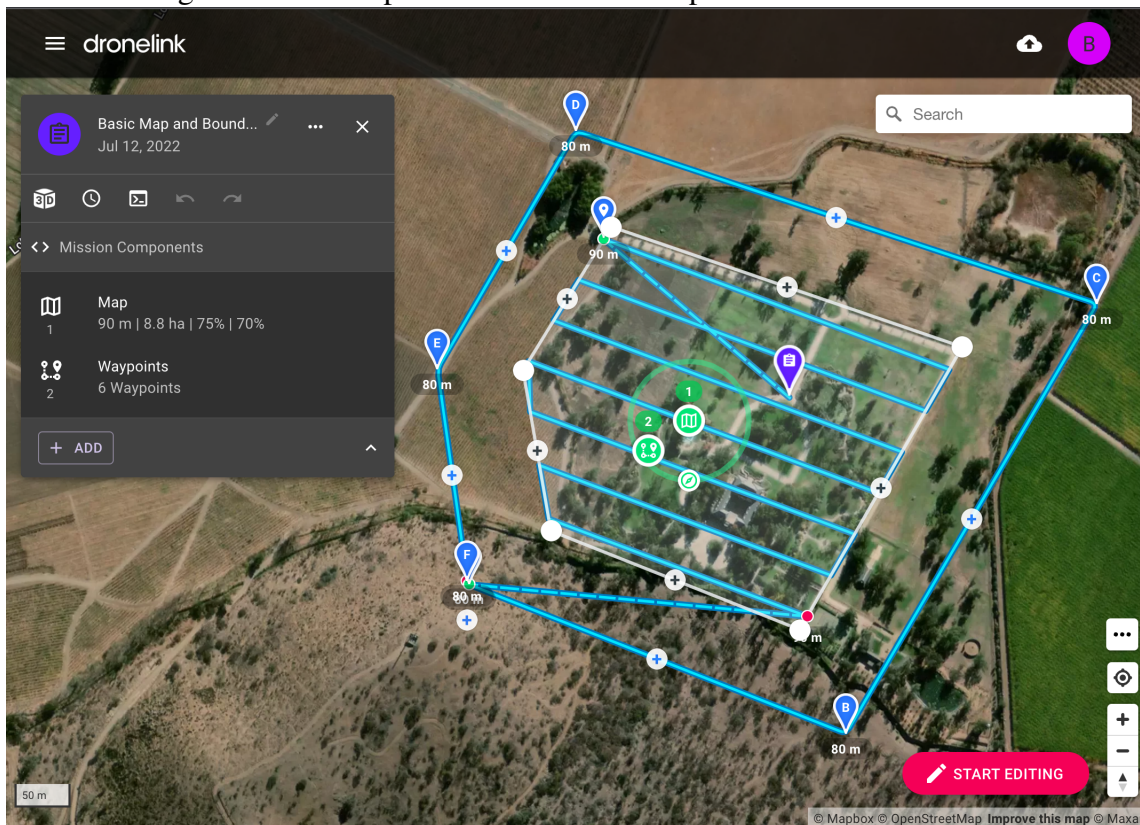
- Al finalizar la toma de fotografías y vídeos, se procede a aterrizar el dron en el punto designado para esto.
- Apagar el dron, luego el radiocontrol y demás dispositivos o accesorios.
- Retirar las baterías, memoria, hélices y demás accesorios como tableta o celular.
- Registrar el vuelo y las tareas realizadas en la bitácora de la empresa.

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 tomará 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.

Figura 2.19: Ruta para vuelo autónomo supervisado con Dronelink.



2.3 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.

2.3.1 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.

Figura 2.20: Almacenamiento del UAV.

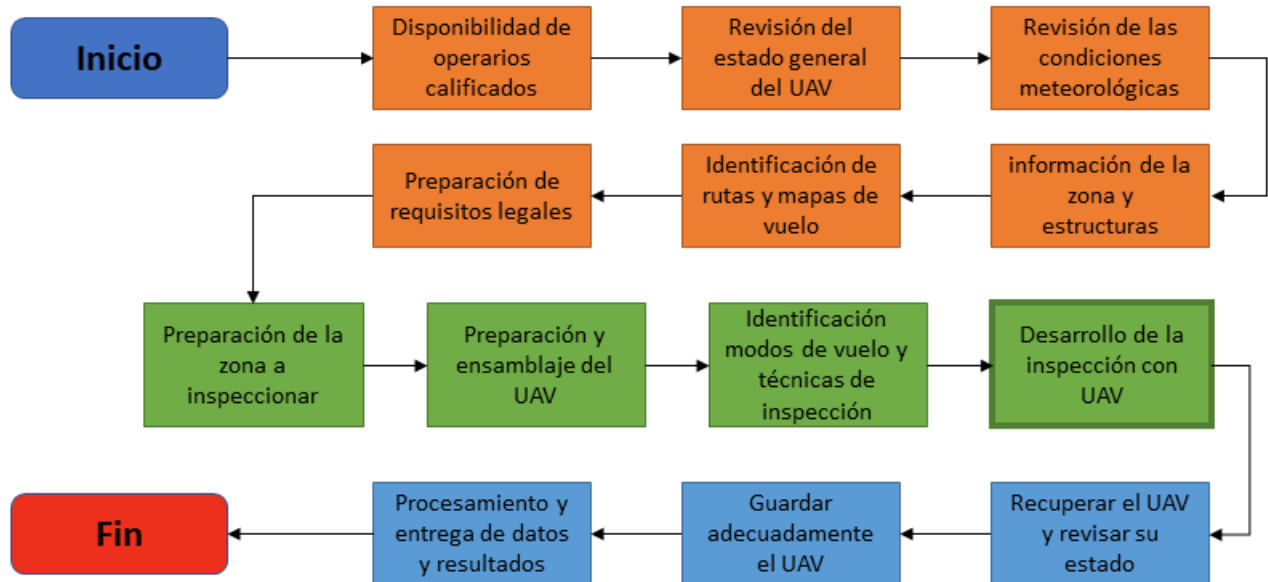


Es recomendable tener una bitácora para registrar los vuelos o misiones realizadas con el UAS, permitiendo llevar un historial completo del desempeño de la aeronave, facilitando la programación de mantenimientos periódicos y un estimado de la vida útil de las baterías y demás componentes del sistema.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

2.3.2 Tratamiento y entrega 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.

Figura 2.21: protocolo de inspección con UAV.





3. Entrega de resultados

3.1 Recomendaciones

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.

Se puede tomar como referencia el formato 34.2 del RETIE 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 de 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.

3.2 Modelo para la entrega de resultados

Figura 3.1: Formato modelo para la entrega de resultados.

FICHA DE RESULTADOS DE LA INSPECCION ELECTRICA					
				SEDE:	
				FICHA No	FECHA:
1.1 LOCALIZACION		2.0 INFORMACION GENERAL			
		2.1 DATOS GENERALES			
		2.2 USO ACTUAL		2.3 INFRAESTRUCTURA INTERNA	
3.0 DESCRIPCION DE LOS HALLAZGOS					
3.1 DIAGNOSTICO		3.2 PRONOSTICO		3.3 CONTROL DE DIAGNOSTICO	
4. REGISTROS					
4.1 REFERENTE TECNICO POR ANOMALIAS			4.2 REGISTRO FOTOGRAFICO		
5. RECOMENDACIONES ADICIONALES					
ELABORO		REVISO		APROBO	
NOMBRE		NOMBRE		NOMBRE	
C.C.		C.C.		C.C.	
FIRMA		FIRMA		FIRMA	



Bibliografía

NETA Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Distribution Equipment and Systems. (2003).

UAEAC, UA. (2018). Reglas generales de vuelo y de operación-RAC 91. Bogotá, Colombia.

IEEE. (2020). IEEE Guide for Unmanned Aerial Vehicle-Based Patrol Inspection System for Transmission Lines (IEEE Std 2821-2020), 1-49. doi:10.1109/IEEESTD.2020.9271964

Minminas. (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE. (Edición Última versión).