

Avances en la implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la inspección y mantenimiento preventivo de redes de distribución eléctrica.

Edinson Acevedo Carrero y Oscar Alexander Merchan Peñaranda

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Director

Edison Andres Soto Rios

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Bucaramanga

2026

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	17
1.1. Objetivo general.....	17
1.2. Objetivos específicos	17
2. Metodología de búsqueda y selección de literatura	18
3. Marco teórico	23
3.1. Redes de distribución eléctrica: conceptos básicos	23
3.2. Mantenimiento e inspección en redes de distribución	25
3.3. VANT: definición y clasificación.....	27
3.4. Tipos de VANT y sensores aplicados al sector eléctrico.....	29
3.4.1. VANT de ala fija	30
3.4.2. VANT de ala rotatoria o multirrotor	31
3.4.3. Plataformas híbridas (VTOL).....	32
3.4.4. Cámaras RGB de alta resolución.....	34
3.4.5. Cámaras termográficas infrarrojas	34
3.4.6. Sensores LiDAR.....	35
3.4.7. Sensores ultravioletas (UV).....	35
3.4.8. Sistemas de georreferenciación y adquisición de datos	35
3.4.9. Reflectores o focos de búsqueda	36
3.5. Normativas y regulaciones aplicables.....	37
3.5.1. RAC 100: marco aeronáutico para operación de UAS en Colombia	37

3.5.2. Clasificación de las operaciones con UAS según la RAC 100	38
3.5.3. Tipos de contacto visual y condiciones operacionales	39
3.5.4. Normativa del sector eléctrico: RETIE y NTC 2050	40
3.5.5. Implicaciones regulatorias para la inspección y el mantenimiento con VANT	40
4. Características y aplicaciones de VANT en mantenimiento de distribución	42
4.1. Aplicaciones por tipo de activo/inspección	42
4.1.1. Inspección de postes, estructuras y apoyos	43
4.1.2. Inspección de conductores, conexiones y herrajes	43
4.1.3. Inspección de aisladores y accesorios de aislamiento	44
4.1.4. Inspección del corredor y vegetación circundante	45
4.1.5. Inspección de transformadores, equipos de maniobra y subestaciones	46
4.2. Sensores y datos utilizados	46
4.2.1. Información visual RGB	46
4.2.2. Información termográfica	47
4.2.3. Datos LiDAR y modelado 3D	48
4.2.4. Sensores UV y detección de efecto corona	48
4.2.5. Georreferenciación, fotogrametría y bases de datos	49
4.3. Limitaciones operativas básicas observadas	50
4.3.1. Autonomía y cobertura de misión	50
4.3.2. Calidad de imagen y condiciones ambientales	52
4.3.3. Necesidad de trayectorias y posiciones de inspección bien definidas	52
4.3.4. Distancias de seguridad frente a infraestructura energizada	53
4.3.5. Limitaciones específicas de ciertos sensores	55

4.3.6. Requerimientos de experiencia operativa.....	55
5. Comparación con métodos tradicionales	57
5.1. Criterios de comparación	57
5.1.1. Inspección tradicional.....	59
5.1.2. Inspección con uso de VANT.....	60
5.2. Ventajas y desventajas	61
6. Beneficios y limitaciones en la implementación.....	64
6.1. Beneficios identificados.....	64
6.1.1. Beneficios económicos	66
6.1.2. Beneficios regulatorios	67
6.1.3. Beneficios estratégicos y sectoriales	67
6.1.4. Beneficios en aseguramiento y gestión del riesgo.....	68
6.2. Limitaciones y riesgos reportados	68
7. Experiencias y perspectivas de integración.....	71
7.1. Casos/experiencias en empresas de distribución	72
7.2. Lecciones aprendidas y perspectivas futuras de integración	76
8. Conclusiones	79
9. Recomendaciones.....	82
Referencias bibliográficas.....	84

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. VANT de ala fija, ventajas y desventajas	31
Tabla 2. VANT multirrotor, ventajas y desventajas	32
Tabla 3. Comparación general entre VANT de ala fija y multirrotor.....	51
Tabla 4. Distancia horizontal entre conductores soportados en la misma estructura de apoyo....	54
Tabla 5. Comparación métodos de inspección	62
Tabla 6. Uso de VANT en empresas del sector eléctrico	74

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ejemplo de plataforma híbrida (VTOL).....	33
Figura 2. Implementación uso de VANT en empresas de distribución	76

Glosario

Activo eléctrico: conjunto de elementos físicos que conforman un sistema eléctrico, como conductores, transformadores, postes y equipos asociados.

Altura de operación (AGL): altura de vuelo de un VANT medida respecto al nivel del terreno (Above Ground Level).

Autonomía de vuelo: tiempo máximo que un VANT puede operar en el aire con una sola carga de batería.

Banda espectral: rango de longitudes de onda captadas por un sensor, utilizado para análisis visual, térmico o multiespectral.

Calidad de energía: conjunto de características de la energía eléctrica que determinan su aptitud para alimentar equipos sin causar perturbaciones.

Capacidad de carga útil (Payload): peso máximo que un VANT puede transportar, incluyendo sensores, cámaras y otros dispositivos.

CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas): entidad encargada de regular los servicios públicos de energía eléctrica y gas en Colombia, estableciendo tarifas, calidad del servicio y condiciones de operación.

Cobertura operativa: área o longitud de red que puede ser inspeccionada en un intervalo de tiempo determinado bajo condiciones específicas.

Cobertura de inspección: extensión de red eléctrica que puede ser evaluada en un periodo determinado.

Corredor eléctrico: franja de terreno donde se ubican las líneas de distribución o transmisión, incluyendo su zona de servidumbre.

Desenergización: proceso de desconexión de un circuito eléctrico para permitir la ejecución segura de trabajos.

Diagnóstico de activos: evaluación del estado operativo de los componentes eléctricos a partir de datos recolectados en campo.

Dron / VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado): aeronave operada sin piloto a bordo, utilizada para tareas de inspección, monitoreo y captura de datos.

Eficiencia operativa: capacidad de realizar una actividad con el menor uso posible de recursos, tiempo y costos.

Falla incipiente: defecto en un componente que aún no ha generado una interrupción, pero que puede evolucionar a una falla mayor.

Fotogrametría: técnica que permite obtener medidas y modelos 3D a partir de imágenes capturadas desde diferentes ángulos.

Frecuencia de inspección: periodicidad con la que se realizan evaluaciones a la infraestructura eléctrica.

Georreferenciación: proceso de asignar coordenadas geográficas a datos capturados para su ubicación espacial precisa.

GIS (Sistema de Información Geográfica): herramienta que permite almacenar, analizar y visualizar datos georreferenciados.

Inspección tradicional: método de evaluación de infraestructura eléctrica mediante recorridos en campo realizados por personal técnico.

Inspección remota: evaluación de activos sin contacto directo, utilizando tecnologías como drones o sensores.

Inteligencia artificial aplicada: uso de algoritmos para el análisis automatizado de imágenes y datos, permitiendo la identificación de patrones y fallas.

Interferencia electromagnética (EMI): perturbación causada por campos eléctricos que afectan el desempeño de equipos electrónicos, incluyendo VANT.

LiDAR (Light Detection and Ranging): tecnología que utiliza pulsos láser para generar modelos tridimensionales del terreno y estructuras.

Mantenimiento correctivo: acción realizada después de que ocurre una falla para restablecer el funcionamiento del sistema.

Mantenimiento preventivo: conjunto de actividades programadas para evitar fallas en los equipos.

Mantenimiento predictivo: estrategia basada en datos y monitoreo continuo para anticipar fallas antes de que ocurran.

Modelo digital del terreno (MDT): representación tridimensional de la superficie terrestre sin objetos.

Modelo digital de superficie (MDS): representación tridimensional que incluye vegetación, edificaciones y estructuras.

Normativa aeronáutica (RAC): reglamento Aeronáutico de Colombia que regula la operación de aeronaves, incluyendo VANT.

Nube de puntos: conjunto de datos espaciales generados por sensores LiDAR que representan superficies en 3D.

Payload sensor: conjunto de sensores instalados en el VANT para la captura de datos específicos.

Pérdida de señal (link loss): interrupción en la comunicación entre el VANT y la estación de control.

Planificación de misión: definición previa de rutas, altitudes, parámetros de captura y condiciones de vuelo.

Punto caliente (Hot spot): zona con temperatura anormal que indica posible falla en un componente eléctrico.

Riesgo operativo: probabilidad de ocurrencia de eventos que afecten la seguridad o eficiencia de una operación.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): sistema utilizado para supervisar y controlar procesos industriales de forma remota.

Sensor: dispositivo que detecta y mide variables físicas como temperatura, distancia o radiación.

Telemetría: transmisión remota de datos desde el VANT hacia la estación de control.

Termografía: técnica de inspección basada en la detección de calor para identificar anomalías.

Topografía: estudio de las características físicas del terreno.

Zona de servidumbre: área legalmente establecida para la instalación y mantenimiento de infraestructura eléctrica.

Resumen

Título: Avances en la implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la inspección y mantenimiento preventivo de redes de distribución eléctrica *

Autor: Edinson Acevedo Carrero, Oscar Alexander Merchan Peñaranda **

Palabras Clave: VANT, drones, redes de distribución eléctrica, inspección, mantenimiento preventivo.

Descripción: La presente monografía documenta los avances en la implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la inspección y el mantenimiento preventivo de redes de distribución eléctrica. El estudio parte de la necesidad de optimizar los métodos tradicionales de inspección, los cuales suelen implicar altos costos operativos, tiempos prolongados de recorrido, dificultades de acceso y exposición del personal a condiciones de riesgo. En este contexto, los VANT se presentan como una alternativa tecnológica capaz de mejorar la eficiencia, la seguridad y la calidad de la información obtenida en campo.

La investigación se desarrolló mediante un enfoque cualitativo, de tipo documental y descriptivo, basado en la revisión y análisis de literatura técnica, científica y normativa relacionada con el uso de drones en infraestructura eléctrica. A partir de esta revisión, se abordaron las características de las redes de distribución, los enfoques de mantenimiento e inspección, la clasificación de los VANT, los sensores utilizados y el marco regulatorio aplicable, con énfasis en la normatividad colombiana vigente.

Los resultados muestran que los VANT ofrecen ventajas significativas en términos de seguridad del personal, accesibilidad a zonas de difícil ingreso, reducción de tiempos de inspección y obtención de datos visuales, térmicos y espaciales de alta utilidad para la toma de decisiones. No obstante, también se identificaron limitaciones relacionadas con la autonomía de vuelo, las condiciones meteorológicas, la necesidad de personal capacitado, el procesamiento de datos y las restricciones regulatorias. Se concluye que los VANT constituyen una herramienta de alto potencial para fortalecer el mantenimiento preventivo en redes de distribución, siempre que su implementación se realice de manera planificada, segura y articulada con los procesos técnicos de las empresas del sector.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Edison Andres Soto Rios. Doctor en Ingeniería

Abstract

Title: Advances in the Implementation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the Inspection and Preventive Maintenance of Electric Distribution Networks*

Author: Edinson Acevedo Carrero, Oscar Alexander Merchan Peñaranda**

Key Words: UAV, drones, electric distribution networks, inspection, preventive maintenance.

Description: This monograph documents the progress in the implementation of unmanned aerial vehicles (UAVs) for the inspection and preventive maintenance of electric distribution networks. The study is based on the need to optimize traditional inspection methods, which usually involve high operating costs, long inspection times, difficult access conditions, and significant exposure of personnel to hazardous environments. In this context, UAVs emerge as a technological alternative capable of improving efficiency, safety, and the quality of field data collection.

The research was conducted through a qualitative, descriptive, and documentary approach, based on the review and analysis of technical, scientific, and regulatory literature related to the use of drones in electrical infrastructure. This review addressed the characteristics of distribution networks, maintenance and inspection approaches, UAV classification, the sensors used, and the applicable regulatory framework, with emphasis on current Colombian regulations.

The results show that UAVs provide significant advantages in terms of personnel safety, accessibility to hard-to-reach areas, reduction of inspection times, and acquisition of visual, thermal, and spatial data useful for decision-making. However, limitations were also identified, including restricted flight autonomy, weather sensitivity, the need for qualified personnel, data processing requirements, and regulatory constraints. It is concluded that UAVs constitute a high-potential tool for strengthening preventive maintenance in distribution networks, provided that their implementation is carried out in a planned, safe, and technically integrated manner within utility company processes.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor: Edison Andrés Soto Ríos. PhD Engineering.

Introducción

La operación adecuada de las redes de distribución eléctrica constituye un factor esencial para garantizar la continuidad, calidad y confiabilidad del servicio de energía. Estas redes, conformadas por conductores de media y baja tensión, transformadores, estructuras de soporte y equipos de maniobra y protección, se encuentran expuestas de manera permanente a la intemperie, al envejecimiento de los materiales, a la contaminación y a la interacción con la vegetación, factores que incrementan la probabilidad de fallas y afectan el desempeño del sistema (Ramírez Castaño, 2009). En este contexto, la inspección y el mantenimiento preventivo adquieren una importancia estratégica, ya que permiten identificar anomalías antes de que evolucionen hacia interrupciones del servicio, deterioro acelerado de los activos o mayores costos de operación.

Tradicionalmente, la inspección de redes de distribución se ha realizado mediante recorridos pedestres de cuadrillas técnicas, observación visual directa y, en algunos casos, apoyo con vehículos de elevación o equipos portátiles de diagnóstico. Aunque estos métodos han demostrado utilidad en la práctica, presentan limitaciones importantes, entre ellas el tiempo requerido para recorrer circuitos extensos, la dificultad de acceso en zonas rurales o con topografía compleja y la exposición del personal a riesgos eléctricos, mecánicos y de trabajo en altura. Luque-Vega et al. (2014) señalan que la inspección pedestre puede resultar lenta, tediosa y subjetiva, mientras que otras alternativas, como la inspección aérea tripulada, pueden implicar altos costos operativos y riesgos adicionales. Estas restricciones evidencian la necesidad de explorar soluciones tecnológicas que permitan optimizar los procesos de inspección y fortalecer los esquemas de mantenimiento preventivo.

En este escenario, los vehículos aéreos no tripulados (VANT), también conocidos como drones o UAV, han emergido como una herramienta tecnológica de creciente interés para la inspección de infraestructura eléctrica. Su capacidad para aproximarse a los activos, acceder a puntos de difícil observación y portar distintos tipos de sensores ha ampliado las posibilidades de captura de información en campo. La literatura reporta aplicaciones de los VANT principalmente en inspección visual, termográfica, reconstrucción tridimensional y monitoreo del corredor eléctrico, con resultados favorables en seguridad, calidad de datos y eficiencia operativa (Luque-Vega et al., 2014; Yang et al., 2020). En particular, Ulloa-Loor y Romero-Bedón (2023) muestran que el uso de drones equipados con cámaras infrarrojas permite obtener termografías georreferenciadas y facilitar la detección temprana de conexiones calientes, equipos sobrecargados y aislamientos deteriorados, lo que representa una ventaja importante para el mantenimiento preventivo.

Sin embargo, pese a estos avances, la implementación de VANT en redes eléctricas todavía enfrenta desafíos técnicos, operativos y regulatorios. Entre ellos se encuentran la autonomía de vuelo, la dependencia de las condiciones meteorológicas, la necesidad de personal capacitado, el procesamiento de grandes volúmenes de datos y las restricciones asociadas a la operación segura cerca de infraestructura crítica o energizada (Hassanalian y Abdelkefi, 2017; Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2024). A ello se suma que una parte importante de la literatura disponible se concentra en líneas de transmisión o en desarrollos tecnológicos específicos, mientras que existe menor cantidad de estudios que analicen de forma integral su aplicación en redes de distribución y su articulación con los procesos convencionales de mantenimiento. Esta ausencia de una visión integrada aplicada al segmento de distribución justifica la necesidad del presente estudio.

A partir de este panorama, la presente monografía se orienta por la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los principales avances en la implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la inspección y el mantenimiento preventivo de las redes de distribución eléctrica? En consecuencia, el objeto de estudio se centra en el uso de los VANT como herramienta de apoyo al mantenimiento preventivo en redes de distribución, considerando sus aplicaciones, beneficios, limitaciones y perspectivas de integración dentro de la gestión de activos eléctricos.

En coherencia con lo anterior, el propósito de este trabajo es documentar los avances en la implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para la inspección y el mantenimiento de redes de distribución eléctrica, a partir de la revisión y análisis de literatura científica, técnica, normativa y de experiencias recientes. Este propósito responde a la necesidad de sistematizar el conocimiento existente sobre una tecnología emergente que ha mostrado resultados prometedores, pero que aún requiere ser examinada desde una perspectiva que articule el componente técnico, operativo y regulatorio.

La fundamentación de esta investigación radica en su aporte teórico, técnico y práctico. Desde el punto de vista académico, la monografía contribuye a organizar y analizar el conocimiento disponible sobre el uso de VANT en redes de distribución eléctrica. Desde el punto de vista técnico, ofrece un marco de referencia útil para ingenieros, empresas distribuidoras y tomadores de decisiones interesados en valorar la incorporación de drones dentro de sus estrategias de inspección y mantenimiento. Desde la perspectiva social y laboral, el estudio resulta pertinente porque el uso de VANT puede contribuir a disminuir la exposición del personal a entornos de riesgo, mejorar la oportunidad de detección de fallas y, en consecuencia, favorecer la continuidad y calidad del servicio que reciben los usuarios. Por ello, esta investigación beneficia tanto al sector

eléctrico, al aportar criterios para la modernización de sus procesos, como a la sociedad, al promover alternativas orientadas a fortalecer la confiabilidad del suministro energético.

Finalmente, la monografía se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, descriptivo y documental, sustentado en la revisión y análisis de fuentes científicas, técnicas y normativas relacionadas con la inspección y el mantenimiento de redes eléctricas mediante VANT. A partir de este enfoque, se identificaron las principales aplicaciones, ventajas, limitaciones y perspectivas de integración de esta tecnología, con el fin de ofrecer una visión estructurada que permita comprender su estado actual y su potencial de incorporación en las redes de distribución eléctrica.

Nota: Para la elaboración de esta monografía se empleó ChatGPT, herramienta de inteligencia artificial generativa desarrollada por OpenAI, únicamente como apoyo en la revisión de redacción, ortografía, gramática, coherencia y organización del documento. Su uso no sustituyó la búsqueda bibliográfica, el análisis técnico, la interpretación de la información ni la formulación de conclusiones. La responsabilidad académica, técnica y autoral del contenido corresponde exclusivamente a los autores

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Documentar el avance de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para la inspección y mantenimiento de redes de distribución eléctrica.

1.2. Objetivos Específicos

Describir las características y aplicaciones de los Vehículos Aéreos No Tripulados en el mantenimiento de redes de distribución eléctrica.

Comparar los métodos tradicionales de inspección con los basados en VANT, destacando ventajas y desventajas.

Identificar los beneficios y limitaciones para la implementación de VANT en empresas de distribución eléctrica.

Analizar experiencias y proponer perspectivas futuras para la integración de esta tecnología en el mantenimiento preventivo de redes eléctricas.

2. Metodología de búsqueda y selección de literatura

La presente monografía se desarrolló mediante una revisión documental de literatura científica, técnica y normativa relacionada con la implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en actividades de inspección y mantenimiento preventivo de redes eléctricas, con énfasis en redes de distribución. El proceso de búsqueda tuvo como propósito identificar publicaciones que abordaran aplicaciones, sensores, plataformas, ventajas, limitaciones, experiencias de integración, reglamentación y aspectos regulatorios asociados al uso de VANT en infraestructura eléctrica.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos disponibles a través de los recursos institucionales de la Universidad Industrial de Santander, principalmente ScienceDirect e IEEE Xplore, y se complementó con búsquedas en Google / Google Académico, SpringerLink, Nature y Repositorios Institucionales de Universidades para localizar documentos técnicos, normativos, trabajos académicos y fuentes complementarias relevantes. Adicionalmente, se consultaron documentos normativos y técnicos oficiales, como la RAC 100 de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), la NTC 2050 y la IEEE Std 2821-2020.

El periodo principal de búsqueda comprendió publicaciones entre 2014 y 2025, debido a que en este intervalo se identificaron trabajos representativos sobre inspección de líneas eléctricas mediante UAV, sensores RGB, termografía, LiDAR, detección ultravioleta, fotogrametría, navegación y mantenimiento asistido. No obstante, se incluyeron documentos normativos, libros técnicos y referencias base por fuera de este rango cuando aportaban fundamentos conceptuales necesarios para el desarrollo de la monografía, como el caso de textos sobre redes de distribución

eléctrica, empresas del sector eléctrico que han realizado la implementación de VANT para actividades de inspección de redes o documentos regulatorios vigentes.

Para la búsqueda se emplearon combinaciones de palabras clave en español e inglés, dado que la mayor parte de la literatura científica se encuentra publicada en inglés. Entre los términos utilizados se incluyeron: UAV, drone, unmanned aerial vehicle, VANT, power line inspection, electric distribution network, distribution lines, preventive maintenance, thermal inspection, infrared thermography, LiDAR, corona detection, ultraviolet sensor, photogrammetry, asset management, power grid inspection y electrical infrastructure inspection. Las ecuaciones de búsqueda se adaptaron a las restricciones de cada base de datos, procurando mantener combinaciones simples y replicables.

En ScienceDirect se emplearon cadenas como:

- “UAV” AND “power line inspection” AND “maintenance”
- “drone” AND “electric distribution network” AND “inspection”
- “UAV” AND “infrared thermography” AND “power lines”
- “LiDAR” AND “UAV” AND “power line inspection”
- “UAV” AND “corona detection” AND “power lines”

En IEEE Xplore se utilizaron búsquedas orientadas a inspección técnica y sensores, tales como:

- “UAV” AND “power line inspection”
- “unmanned aerial vehicle” AND “transmission line inspection”
- “UAV” AND “thermal inspection” AND “power line”
- “UAV” AND “LiDAR” AND “power lines”

- “UAV” AND “corona detection”

En Google / Google Académico se realizaron búsquedas complementarias con expresiones como:

- “drones inspección redes eléctricas distribución”
- “VANT mantenimiento preventivo redes eléctricas”
- “UAV power line inspection thermography”
- “UAV LiDAR power line inspection”
- “corona detection UAV power lines”
- “Empresas del sector eléctrico que usan VANT para inspecciones”
- “RAC 100 UAS Colombia”
- “RETIE 2024 distancias partes energizadas”

El proceso de selección se desarrolló en cuatro etapas. En la primera etapa se identificaron documentos a partir de títulos, palabras clave y resúmenes. En la segunda etapa se eliminaron resultados duplicados y documentos no relacionados directamente con infraestructura eléctrica. En la tercera etapa se revisaron los textos completos de las fuentes preseleccionadas, priorizando aquellas que presentaran aplicaciones directas de VANT en inspección o mantenimiento de líneas eléctricas, redes de distribución, redes de transmisión, subestaciones, sensores o planificación de misiones. Finalmente, en la cuarta etapa se organizó la información seleccionada en una matriz bibliográfica, considerando autor, año, tipo de documento, base de datos o fuente, tecnología estudiada, tipo de sensor, aplicación, principales resultados, limitaciones reportadas y aporte a la monografía.

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- Publicaciones científicas, técnicas, normativas o académicas relacionadas con VANT, UAV o drones aplicados a infraestructura eléctrica.
- Documentos que abordaran inspección visual, termográfica, LiDAR, ultravioleta, fotogrametría, georreferenciación, inteligencia artificial, mantenimiento asistido o planificación de rutas.
- Estudios aplicados a redes de distribución, líneas de transmisión o infraestructura eléctrica comparable, siempre que sus resultados fueran transferibles al contexto de distribución.
- Documentos publicados en español o inglés.
- Normas, guías técnicas y reglamentos vigentes aplicables al contexto colombiano o internacional.
- Revistas o publicaciones en páginas de empresas del sector eléctrico.

Los criterios de exclusión fueron:

- Documentos enfocados exclusivamente en aplicaciones de drones en sectores no eléctricos, sin relación técnica con inspección de infraestructura.
- Publicaciones sin acceso al texto completo o sin información suficiente sobre metodología, sensores, resultados o aplicación.
- Documentos duplicados entre bases de datos.
- Fuentes comerciales sin aporte técnico relevante, salvo cuando se utilizaron únicamente para ilustrar características de cargas útiles o equipos específicos.

- Estudios que abordaran drones recreativos o aplicaciones no relacionadas con mantenimiento, inspección o gestión de activos eléctricos.

A partir de este proceso se conformó el conjunto final de referencias utilizadas en la monografía, integrado por artículos científicos, guías técnicas, normas, trabajos académicos, documentos regulatorios y fuentes técnicas complementarias. Estas referencias permitieron estructurar el marco teórico, describir las aplicaciones de los VANT en redes eléctricas, comparar los métodos tradicionales con las inspecciones basadas en drones, identificar beneficios y limitaciones, y analizar experiencias y perspectivas de integración de esta tecnología en el mantenimiento preventivo de redes de distribución eléctrica.

3. Marco teórico

La incorporación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en los procesos de inspección y mantenimiento de redes de distribución eléctrica responde a la convergencia entre diferentes áreas del conocimiento, entre ellas la ingeniería de distribución, la gestión del mantenimiento, la teledetección, la fotogrametría, la visión por computador y la regulación aeronáutica. En este sentido, el presente capítulo desarrolla los fundamentos conceptuales necesarios para comprender el papel que actualmente desempeñan los VANT como herramienta de apoyo al mantenimiento preventivo. Para ello, primero se abordan las características esenciales de las redes de distribución; posteriormente se revisan los enfoques de mantenimiento e inspección; luego se presenta el concepto de VANT, sus principales clasificaciones y los sensores aplicados al sector eléctrico; y, finalmente, se expone el marco normativo que regula su operación, con énfasis en Colombia.

3.1. Redes de distribución eléctrica: conceptos básicos

El sistema eléctrico de potencia comprende, de manera general, las etapas de generación, transmisión, distribución y uso final de la energía. Dentro de esta estructura, la red de distribución constituye el último eslabón del sistema y tiene como función transportar la energía desde las subestaciones receptoras hasta los usuarios finales, procurando condiciones adecuadas de seguridad, continuidad y calidad del servicio (Ramírez Castaño, 2009). Desde esta perspectiva, la distribución no solo representa la fase más próxima al usuario, sino también una de las más sensibles desde el punto de vista operativo, dado que es allí donde las fallas e interrupciones tienen un impacto más visible en la prestación del servicio.

De acuerdo con Ramírez Castaño (2009), el sistema de distribución está conformado, de forma típica, por subestaciones receptoras, circuitos primarios en media tensión, transformadores de distribución y circuitos secundarios en baja tensión. La Figura 1.1. presentada en Ramírez Castaño, (2009) ubica los sistemas de distribución dentro de la estructura general del sistema eléctrico de potencia, mostrando su relación con las etapas de transmisión, subtransmisión, distribución primaria y distribución secundaria. Esta representación permite comprender que la red de distribución no funciona de manera aislada, sino como parte de una cadena jerárquica en la cual los niveles de tensión se reducen progresivamente hasta adecuarse a las condiciones de consumo residencial, comercial e industrial.

Estos elementos suelen organizarse en configuraciones radiales, aunque en zonas urbanas densas pueden emplearse esquemas en anillo o mallados con el propósito de incrementar la confiabilidad del suministro. El mismo autor señala que una parte importante de la inversión total del sistema eléctrico se concentra precisamente en la distribución, razón por la cual su planeamiento, diseño, construcción, operación y mantenimiento requieren especial atención.

Las redes de distribución pueden clasificarse según su forma constructiva en **aéreas** y **subterráneas**. Las redes aéreas emplean conductores generalmente desnudos soportados por postes, crucetas, aisladores y herrajes, y presentan ventajas como menor costo inicial, facilidad de inspección visual, menor complejidad para la localización de fallas y tiempos más cortos de construcción. Sin embargo, también son más vulnerables a descargas atmosféricas, contaminación, vandalismo, caída de árboles y otros factores ambientales. Las redes subterráneas, por su parte, ofrecen mejor integración con el entorno urbano y, en ciertos casos, mayor confiabilidad, aunque implican mayores costos de instalación y reparación, además de mayores exigencias técnicas para el diagnóstico de fallas (Ramírez Castaño, 2009).

Estas redes también pueden clasificarse según su nivel de tensión en **redes primarias** y **redes secundarias**, y de acuerdo con su localización geográfica en urbanas, rurales o suburbanas. Esta clasificación no es únicamente descriptiva, ya que condiciona aspectos como la longitud de los circuitos, el tipo de carga, la facilidad de acceso a los activos y la estrategia de mantenimiento más adecuada. En redes rurales, por ejemplo, la dispersión geográfica de los activos, la topografía accidentada y la interacción permanente con la vegetación incrementan la complejidad de las labores de inspección y dificultan la localización temprana de defectos (Ramírez Castaño, 2009).

En consecuencia, las redes de distribución están sujetas a condiciones de operación que favorecen el deterioro progresivo de sus componentes. La exposición a la intemperie, el envejecimiento de materiales, la corrosión, la contaminación y la proximidad de la vegetación incrementan la probabilidad de fallas en conductores, aisladores, herrajes y transformadores. Por ello, fortalecer la observabilidad de los activos y consolidar esquemas de mantenimiento preventivo y predictivo se convierte en una necesidad técnica y operativa.

3.2. Mantenimiento e inspección en redes de distribución

El mantenimiento en redes de distribución tiene como propósito conservar la integridad funcional de los activos, reducir la ocurrencia de fallas y asegurar la continuidad del servicio. En términos generales, pueden diferenciarse tres enfoques de mantenimiento. El primero es el **mantenimiento correctivo**, ejecutado una vez se presenta la falla. El segundo es el **mantenimiento preventivo**, basado en actividades programadas orientadas a reducir la probabilidad de falla. El tercero corresponde al **mantenimiento predictivo**, que utiliza mediciones, inspecciones y diagnósticos para anticipar anomalías antes de que se conviertan en fallas efectivas. Aunque estas categorías son ampliamente aceptadas en la teoría del

mantenimiento, en redes de distribución el mantenimiento preventivo continúa ocupando un lugar central, complementado de manera creciente por técnicas de monitoreo y diagnóstico basado en condición (Ramírez Castaño, 2009).

Las labores de inspección en redes aéreas incluyen recorridos visuales de líneas y estructuras, verificación del estado de crucetas, herrajes, aisladores y transformadores, inspección de equipos de maniobra y control de vegetación en los corredores de línea. Tradicionalmente, estas tareas son ejecutadas por cuadrillas de campo que se desplazan a pie o en vehículo y que, en algunos casos, se apoyan en vehículos de elevación, cámaras portátiles o equipos de termografía. Este modelo ha sido históricamente funcional, pero presenta limitaciones operativas significativas: elevados tiempos de recorrido, altos costos de desplazamiento, dificultad para acceder a zonas rurales o de topografía compleja y una mayor exposición del personal a riesgos eléctricos, mecánicos y de trabajo en altura. Además, la inspección visual convencional depende fuertemente de la experiencia del operador, lo que introduce subjetividad en la detección de defectos (Luque-Vega et al., 2014).

En este contexto, las técnicas de **inspección remota** han adquirido una relevancia creciente. La termografía infrarroja, por ejemplo, se emplea para identificar puntos calientes, fallas de conexión y otras condiciones anómalas a partir de la distribución térmica de los equipos. En el caso específico de redes de distribución, Ulloa-Loor y Romero-Bedón (2023) muestran que el uso de drones equipados con cámaras infrarrojas permite obtener termografías georreferenciadas, mejorar la eficiencia de exploración y facilitar la detección temprana de conexiones calientes, equipos sobrecargados y aislamientos deteriorados.

La Figura 2 presentada en Ulloa-Loor y Romero-Bedón, (2023) complementa esta idea al mostrar la aplicación conjunta de inspección visual y termográfica mediante VANT. La imagen

evidencia, por una parte, la aproximación segura del dron a la infraestructura eléctrica y, por otra, la capacidad de la termografía para identificar anomalías térmicas y detalles constructivos en elementos de conexión y soporte, los cuales podrían pasar desapercibidos en una inspección convencional desde tierra. Esta posibilidad de capturar información térmica con alta resolución y sin exponer directamente al personal constituye una de las principales ventajas de los VANT frente a las estrategias tradicionales.

En la misma línea, Luque-Vega et al. (2014) señalan que la inspección con UAV puede ser más rápida que la inspección pedestre y alcanzar niveles de precisión comparables e incluso superiores a los de ciertos esquemas de inspección aérea tripulada, siempre que la plataforma, los sensores y el procesamiento se adapten a la tarea. En consecuencia, la inspección de redes eléctricas está evolucionando desde enfoques basados en observación directa y recorridos manuales hacia esquemas de adquisición intensiva de datos mediante sensores y plataformas remotas, entre los cuales los VANT se consolidan como una alternativa con alto potencial para el mantenimiento preventivo y predictivo.

3.3. VANT: definición y clasificación

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT), también conocidos como drones o UAV (Unmanned Aerial Vehicles), son aeronaves capaces de operar sin piloto a bordo y de ser controladas a distancia o mediante distintos niveles de autonomía. Desde una perspectiva más amplia, el término **sistema de aeronave no tripulada (UAS)** o **sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)** no solo hace referencia a la aeronave, sino también a la estación de control, los enlaces de comunicación y la carga útil. En Colombia, este concepto es recogido por la **RAC 100**,

que establece el marco regulatorio vigente para la operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2024).

En el sector eléctrico, los VANT han adquirido importancia como plataformas de observación técnica, debido a que permiten aproximarse a la infraestructura, mantener posiciones de inspección, portar sensores diversos y reducir la exposición del personal a ambientes peligrosos. Constantin y Dinculescu (2019) destacan que los drones ofrecen una aproximación práctica y valiosa en actividades de inventario, mantenimiento, actualización de información técnica e inspección de redes de transmisión y distribución, especialmente por su capacidad de acceder a zonas difíciles y proporcionar nuevos ángulos de observación. Asimismo, señalan que estas plataformas pueden utilizarse para inspección visual, monitoreo de vegetación, análisis térmico, levantamientos LiDAR y análisis ultravioleta, entre otros.

Las Figuras 1, 2 y 3 presentadas en Constantin y Dinculescu, (2019) muestran diferentes aplicaciones de los VANT en infraestructura eléctrica. La Figura 1 presenta la inspección visual del entorno de la red y la identificación de vegetación cercana a la infraestructura, aspecto relevante para la gestión del corredor eléctrico. La Figura 2 evidencia la captura de imágenes detalladas de torres, conductores y cadenas de aisladores, lo que facilita la identificación de defectos físicos o anomalías estructurales. Por su parte, la Figura 3 muestra la detección del efecto corona mediante tecnologías especializadas. En conjunto, estas imágenes ilustran la versatilidad de los VANT como plataformas de inspección multisensor y confirman que su valor en el sector eléctrico radica en la posibilidad de integrar distintos sensores y enfoques de diagnóstico sobre una misma infraestructura.

Desde el punto de vista técnico, Hassanalian y Abdelkefi (2017) presentan una revisión amplia de UAV clasificados según su peso, misión, alcance, configuración aerodinámica y método

de despegue. Su trabajo es particularmente útil porque permite ubicar las plataformas más adecuadas para tareas de inspección eléctrica dentro de una taxonomía clara y actualizada. Para aplicaciones en redes de distribución, interesan principalmente las plataformas de pequeño y mediano tamaño, con buena maniobrabilidad, bajo peso y capacidad de portar sensores ópticos, térmicos y de georreferenciación.

El empleo de VANT en el sector eléctrico se inserta, además, en un proceso más amplio de transformación digital. Yang et al. (2020) explican que un sistema moderno de inspección de líneas puede analizarse en términos de tres componentes principales: las plataformas de inspección, los sensores y los métodos de procesamiento. Esta estructura es útil porque demuestra que el valor de los drones no depende exclusivamente de la aeronave, sino de la integración entre plataforma, carga útil y capacidad de análisis de datos. Desde esta perspectiva, el sistema UAV debe entenderse como una solución integral y no solo como una aeronave.

Más recientemente, la evolución de los drones en el sector eléctrico ha comenzado a trascender la inspección para incorporar tareas de **mantenimiento asistido**. Gonçalves et al. (2023), por ejemplo, presentan un drone-robot para limpieza de cadenas de aisladores, basado en un hexacóptero con módulo robótico de limpieza, cámara RGB de alta resolución, cámara de profundidad y sistema de control. Este desarrollo muestra que el papel de los VANT puede evolucionar desde la simple observación hacia intervenciones de mantenimiento de bajo nivel, con implicaciones importantes para el futuro de la gestión de activos eléctricos.

3.4. Tipos de VANT y sensores aplicados al sector eléctrico

La selección del tipo de VANT depende del alcance de la misión, el nivel de detalle requerido, las condiciones del terreno, la autonomía necesaria y la carga útil a transportar. En

aplicaciones eléctricas, y particularmente en redes de distribución, es posible distinguir tres familias principales de plataformas: VANT de ala fija, VANT de ala rotatoria o multirrotor y plataformas híbridas. Asimismo, la carga útil instalada en la aeronave define en gran medida el tipo de información que puede capturarse durante la inspección, ya sea visual, térmica, tridimensional, ultravioleta o georreferenciada

3.4.1. VANT de ala fija

Los VANT de ala fija se caracterizan por su mayor autonomía, velocidad de vuelo y capacidad de cubrir áreas extensas. Estas características los hacen apropiados para la inspección de corredores largos, levantamientos de grandes superficies y tareas donde se privilegia la cobertura espacial. Sin embargo, presentan limitaciones importantes cuando se requiere inspección detallada de un activo específico, ya que no pueden mantenerse en vuelo estacionario y exigen áreas de despegue y aterrizaje más amplias. Por ello, suelen ser más adecuados para líneas de transmisión o levantamientos fotogramétricos amplios que para inspección detallada de activos puntuales en distribución (Hassanalian y Abdelkefi, 2017). La IEEE Std 2821-2020 también destaca que este tipo de plataforma ofrece alta velocidad de vuelo, larga autonomía y gran cobertura, aunque con desventajas asociadas a la imposibilidad de mantenerse en vuelo estacionario y a la necesidad de mayores distancias de seguridad respecto del objetivo.

La comparación presentada en la Tabla 1 permite identificar las principales fortalezas y restricciones de los VANT de ala fija. Su configuración aerodinámica favorece el alcance operativo, la estabilidad en vuelo y la duración de la misión, lo que los convierte en una alternativa adecuada para inspecciones de grandes extensiones de red. No obstante, estas ventajas se acompañan de limitaciones relevantes, como menor maniobrabilidad, imposibilidad de realizar

vuelo estacionario y mayor complejidad en las maniobras de despegue y aterrizaje. En consecuencia, este tipo de plataforma resulta especialmente útil cuando la prioridad es la cobertura espacial y no la observación cercana y detallada de un componente específico.

Tabla 1.

VANT de ala fija, ventajas y desventajas

Ventajas	Desventajas
Alcance operativo	Costoso
Estabilidad con vientos fuertes	Baja maniobrabilidad
Duración de vuelo	Sin vuelo estacionario
	Despegue y aterrizaje complejos

Nota. Adaptado de *Ala fija o multirrotor ¿qué dron debe escoger para sus tareas de topografía aérea?*, por DJI Enterprise, 2020, <https://enterprise.dji.com/es>.

3.4.2. *VANT de ala rotatoria o multirrotor*

Los VANT multirrotor, como cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros, se distinguen por su capacidad de despegue y aterrizaje vertical, vuelo estacionario y alta maniobrabilidad. Estas cualidades los convierten en la plataforma más adecuada para inspecciones cercanas de postes, crucetas, aisladores, transformadores y demás componentes propios de las redes de distribución. Su principal ventaja es la posibilidad de aproximarse con precisión a un elemento específico, capturar imágenes desde distintos ángulos y mantener posiciones estables durante la inspección (Hassanalian y Abdelkefi, 2017). Además, La IEEE Std 2821-2020 resalta que los multicópteros poseen estructura simple, bajo costo, alta flexibilidad, corta distancia de seguridad al objetivo y excelente capacidad de mantenerse en vuelo estacionario, lo que explica su amplia adopción en inspección detallada. Este tipo de plataforma es, además, la base habitual de sistemas de inspección

termográfica y de algunos desarrollos de mantenimiento asistido, debido a su capacidad para portar sensores diversos y operar con precisión en entornos complejos.

En la Tabla 2 se muestran las características que hacen de los VANT multirrotor una plataforma especialmente adecuada para inspecciones de proximidad. La facilidad de uso, la automatización, la maniobrabilidad, la versatilidad, la posibilidad de emplear cargas útiles intercambiables y su portabilidad explican su amplia aplicación en inspecciones detalladas de redes de distribución. Sin embargo, su principal restricción continúa siendo el tiempo de vuelo, generalmente menor que el de los VANT de ala fija. Por ello, este tipo de plataforma resulta especialmente apropiado para inspecciones de corta o media duración, donde se requiere observación cercana y estabilidad sobre un punto específico del activo.

Tabla 2.

VANT multirrotor, ventajas y desventajas

Ventajas	Desventajas
Fácil de usar	Tiempo de vuelo
Automatización	
Maniobrabilidad	
Versatilidad	
Cargas útiles intercambiables	
Portabilidad	

Nota. Adaptado de *Ala fija o multirrotor ¿qué dron debe escoger para sus tareas de topografía aérea?*, por DJI Enterprise, 2020, <https://enterprise.dji.com/es>.

3.4.3. Plataformas híbridas (VTOL)

Las plataformas híbridas combinan la capacidad de despegue vertical de los multirrotores con la eficiencia de vuelo de las alas fijas. Su interés radica en que permiten recorrer distancias mayores sin renunciar completamente a la capacidad de observación puntual. Aunque su uso

todavía no es tan extendido como el de los multirrotores, representan una línea de desarrollo promisoría para aplicaciones donde se requiere equilibrio entre cobertura y detalle, especialmente en escenarios de corredores largos con necesidad de inspección localizada (Hassanalian y Abdelkefi, 2017).

La Figura 1 ilustra la configuración típica de una plataforma híbrida VTOL, en la cual se combinan características aerodinámicas de ala fija con rotores adicionales que permiten el despegue y aterrizaje vertical. Esta arquitectura busca aprovechar la autonomía y eficiencia de crucero de las alas fijas, sin renunciar completamente a la flexibilidad operativa asociada a los sistemas de despegue vertical. En consecuencia, los VANT híbridos resultan de especial interés en aplicaciones donde se requiere cubrir trayectos extensos y, al mismo tiempo, conservar cierto nivel de versatilidad para la aproximación y observación de activos específicos.

Figura 1.

Ejemplo de plataforma híbrida (VTOL)



Nota. Tomada de *Mitsubishi Fixed-wing VTOL UAV front view at JASDF Gifu Air Base*

[Fotografía], por Hunini, https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page.

En cuanto a las cargas útiles, los VANT empleados en el sector eléctrico suelen integrar distintos sensores, cada uno con aplicaciones específicas. La elección de la carga útil depende del fenómeno que se desea observar, del tipo de activo inspeccionado y del nivel de detalle requerido para el diagnóstico.

3.4.4. Cámaras RGB de alta resolución

Las cámaras RGB permiten realizar inspecciones visuales detalladas de componentes físicos y detectar defectos visibles, corrosión, deformaciones, contaminación, daños mecánicos y presencia de vegetación cercana a las líneas. Luque-Vega et al. (2014) destacan que la combinación de cámara visible y cámara térmica es especialmente útil en inspecciones cualitativas y como base para evolucionar hacia esquemas cuantitativos de monitoreo. De manera similar, la IEEE Std 2821-2020 señala que las cámaras visuales constituyen la carga útil más frecuente en inspección aérea de líneas, debido a su capacidad para registrar fotografías y video de alta resolución que posteriormente permiten analizar defectos y fallas en estructuras, conductores y servidumbres.

3.4.5. Cámaras termográficas infrarrojas

Las cámaras termográficas permiten detectar puntos calientes, fallas de conexión y sobrecalentamientos en conductores, transformadores y otros equipos. Su principal valor radica en que revelan anomalías que no siempre son visibles a simple vista. Ulloa-Loor y Romero-Bedón (2023) muestran que la termografía embarcada en drones mejora la eficiencia de la inspección y facilita la generación de mapas térmicos georreferenciados de la red. En la misma línea, la IEEE Std 2821-2020 reconoce a las cámaras termográficas infrarrojas como una de las cargas útiles típicas para la inspección aérea de líneas, especialmente en plataformas multirrotor y helicópteros.

3.4.6. *Sensores LiDAR*

Los sensores LiDAR generan nubes de puntos tridimensionales de alta precisión, útiles para reconstruir el corredor de línea, estimar distancias de seguridad, modelar la geometría de conductores y vegetación y detectar riesgos asociados a invasión del corredor. Li y Guo (2018) explican que esta tecnología permite restaurar con precisión la información espacial 3D del entorno de línea y apoyar el análisis técnico de la infraestructura. La IEEE Std 2821-2020 también reconoce al escáner LiDAR 3D como una de las cargas útiles típicas en inspección de líneas, especialmente útil en ala fija, helicópteros y multicopteros según el tipo de misión.

3.4.7. *Sensores ultravioletas (UV)*

Las cámaras ultravioletas permiten identificar fenómenos de corona y descargas parciales en aisladores y conductores. Constantin y Dinculescu (2019) destacan que este tipo de sensor puede ayudar a localizar fallas eléctricas específicas y reducir actividades redundantes de mantenimiento, como el lavado innecesario de aisladores. Aunque su aplicación es más especializada que la de las cámaras RGB y térmicas, constituye una herramienta valiosa en inspecciones avanzadas. La IEEE Std 2821-2020 también menciona a los escáneres ultravioleta dentro de las cargas útiles empleadas en aplicaciones específicas.

3.4.8. *Sistemas de georreferenciación y adquisición de datos*

Además de los sensores principales, los VANT pueden integrar GPS, unidades de medición inercial, barómetros, enlaces de radiofrecuencia y sistemas de adquisición sincronizada. Arriola-Valverde et al. (2016) demuestran que es posible registrar imágenes junto con latitud, longitud, altura, cabeceo (pitch), alabeo (roll), quiniada (yaw), fecha y hora, y almacenar esta información

en formatos estándar como CSV para su posterior procesamiento fotogramétrico. Este principio es plenamente transferible a la inspección de corredores y activos de redes eléctricas, ya que permite asociar cada captura con una referencia espacial y temporal precisa. Asimismo, los autores muestran que, para generar reconstrucciones 3D precisas, es necesario combinar la georreferenciación capturada desde el UAV con procesamiento de imágenes y, en ciertos casos, con puntos de control en tierra.

3.4.9. Reflectores o focos de búsqueda

Otra carga útil de interés para operaciones con VANT en el sector eléctrico corresponde a los reflectores o focos de búsqueda, utilizados principalmente en misiones nocturnas o en condiciones de baja visibilidad. Este tipo de carga útil amplía las capacidades del dron más allá de la captura de imágenes, ya que permite iluminar de manera dirigida el área de inspección, mejorar la visibilidad de estructuras, conductores y equipos, y facilitar la verificación visual de activos cuando la iluminación natural resulta insuficiente. En aplicaciones de inspección eléctrica, su utilidad se asocia con el apoyo a recorridos en subestaciones, la revisión de activos ubicados en zonas rurales o de difícil acceso y la localización visual de puntos específicos del corredor eléctrico (DJI Enterprise, s.f.).

En conjunto, la literatura reciente muestra una tendencia hacia la integración multisensor, donde cámaras RGB, térmicas, LiDAR, UV y sistemas de georreferenciación se combinan para ofrecer diagnósticos más completos y precisos (Yang et al., 2020). Esta integración permite que una misma plataforma VANT capture diferentes tipos de información durante una misión de inspección, reduciendo la necesidad de emplear múltiples vuelos o equipos independientes.

3.5. Normativas y regulaciones aplicables

El uso de VANT en la inspección y el mantenimiento de redes de distribución está condicionado por normas aeronáuticas, eléctricas y de seguridad operacional. En Colombia, el marco principal lo constituye **la RAC 100 – Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS**, expedida por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC). Esta reglamentación define el ámbito de aplicación, los requisitos para el registro de UAS, la certificación de pilotos, la autorización de vuelo y la clasificación de las operaciones en categorías **abierta, específica y certificada**, así como los tipos de contacto visual —VLOS, EVLOS y BVLOS— y las condiciones aplicables a distintos escenarios operacionales (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2024).

3.5.1. *RAC 100: marco aeronáutico para operación de UAS en Colombia*

La RAC 100 constituye el marco regulatorio vigente para la operación de sistemas de aeronaves no tripuladas en Colombia. Esta norma establece los requisitos para el registro de los UAS, los criterios para la certificación de idoneidad de pilotos, las condiciones para la autorización de operaciones y las obligaciones generales del explotador del sistema. Además, define el concepto de operación con UAS en función del nivel de riesgo y del entorno en que se desarrolla, lo que resulta fundamental en aplicaciones del sector eléctrico, donde la infraestructura inspeccionada suele considerarse crítica.

3.5.2. *Clasificación de las operaciones con UAS según la RAC 100*

Uno de los aportes más importantes de la RAC 100 es la clasificación de las operaciones con UAS en tres categorías: abierta, específica y certificada (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2024):

3.5.2.1. Categoría abierta. La categoría abierta corresponde a operaciones de menor riesgo, generalmente sin ánimo de lucro y bajo condiciones operacionales restrictivas. En esta categoría se controlan variables como el peso de la aeronave —hasta 25 kg de peso máximo de operación—, la proximidad a personas, el entorno de operación y la ejecución del vuelo en condiciones VLOS. Por sus características, está pensada para operaciones relativamente sencillas y de baja complejidad.

3.5.2.2. Categoría específica. La categoría específica incluye operaciones comerciales, institucionales o aquellas que superan los límites de la categoría abierta. Requiere un mayor nivel de control regulatorio, incluyendo autorización de vuelo, registro del sistema y la intervención de un piloto UAS certificado. Para la inspección de redes eléctricas, esta categoría resulta especialmente relevante, dado que muchas misiones se desarrollan sobre infraestructura crítica o en entornos con riesgo operacional elevado.

3.5.2.3. Categoría certificada. La categoría certificada se refiere a operaciones de mayor complejidad y riesgo, con exigencias comparables a las de la aviación tripulada. En esta categoría se exigen condiciones más estrictas, tales como certificación de tipo, aeronavegabilidad y requisitos adicionales para garantizar la operación segura del sistema.

3.5.3. Tipos de contacto visual y condiciones operacionales

La RAC 100 también define distintas modalidades de operación según el contacto visual con la aeronave:

3.5.3.1. Visibilidad en línea de vista (VLOS, por sus siglas en inglés). La operación VLOS corresponde a aquella en la que el piloto mantiene contacto visual directo con la aeronave durante toda la misión.

3.5.3.2. Visibilidad en línea de vista extendida (EVLOS, por sus siglas en inglés). La operación EVLOS corresponde a vuelos con contacto visual extendido, apoyados por observadores u otros medios que permiten ampliar el rango de supervisión visual de la aeronave.

3.5.3.3. Visibilidad más allá de la línea de vista (BVLOS, por sus siglas en inglés). La operación BVLOS corresponde a vuelos más allá del alcance visual directo del piloto, por lo que implica mayores exigencias técnicas, operacionales y regulatorias.

Adicionalmente, la norma establece disposiciones para vuelos nocturnos, operaciones en zonas urbanas, vuelos autónomos y otros escenarios especiales, así como obligaciones

relacionadas con la planificación del vuelo, la verificación del entorno, el aseguramiento del enlace de mando y control y el reporte de incidentes.

3.5.4. Normativa del sector eléctrico: RETIE y NTC 2050

Desde el punto de vista del sector eléctrico colombiano, la operación y el mantenimiento de redes deben ajustarse además al **Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)** y a la **Norma Técnica Colombiana NTC 2050**, que establecen requisitos orientados a proteger a personas, animales y bienes frente a riesgos de origen eléctrico. En consecuencia, cualquier operación con VANT cercana a conductores energizados o infraestructura crítica debe considerar este marco normativo de manera complementaria a la regulación aeronáutica.

3.5.5. Implicaciones regulatorias para la inspección y el mantenimiento con VANT

La implementación de programas de inspección y mantenimiento con VANT en redes de distribución debe considerar simultáneamente: el cumplimiento de la RAC 100 y demás reglamentos aeronáuticos aplicables a la operación de VANT; la observancia del RETIE, la NTC 2050 y la normativa eléctrica vigente; y la elaboración de procedimientos internos que definan distancias mínimas, coordinación con centros de operación, gestión del riesgo, autorización de vuelo, tratamiento de datos y protocolos de seguridad.

La **IEEE Std 2821-2020** complementa este marco desde una perspectiva técnica, al proponer lineamientos para sistemas UAV de inspección de líneas, incluyendo la arquitectura general del sistema, las cargas útiles, el desempeño de las plataformas, los criterios para la planificación de rutas, las posiciones de toma y las condiciones de seguridad en campo. En particular, la guía señala que la planificación de una ruta de inspección puede realizarse antes o

durante la misión, pero que para esquemas automáticos o autónomos se requiere definir previamente coordenadas y alturas de torres, altitudes de vuelo, distancias de seguridad horizontales y verticales, obstáculos cercanos y posiciones fotográficas de cada objetivo, incluso mediante bibliotecas de rutas. Aunque está enfocada en líneas de transmisión, constituye un referente metodológico valioso para la inspección de infraestructura eléctrica en general.

En síntesis, el marco normativo no solo actúa como restricción, sino como un conjunto de condiciones necesarias para incorporar los VANT de manera segura y sostenible a la inspección y el mantenimiento preventivo de redes de distribución. Por ello, la adopción de esta tecnología debe evaluarse no solo desde su potencial técnico, sino también desde su viabilidad operacional, regulatoria y de gestión del riesgo.

4. Características y aplicaciones de VANT en mantenimiento de distribución

El uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en mantenimiento de redes eléctricas ha evolucionado desde simples recorridos de observación visual hasta sistemas más integrados de captura, transmisión y análisis de datos. En el contexto de las redes de distribución, estas plataformas han demostrado utilidad para inspeccionar activos de difícil acceso, reducir tiempos de recorrido, aumentar la cobertura de observación y mejorar la calidad de la información obtenida en campo. En términos generales, sus aplicaciones pueden analizarse desde tres perspectivas: el tipo de activo o inspección sobre el cual se emplean, los sensores y datos que permiten capturar y, finalmente, las limitaciones operativas básicas que condicionan su uso en condiciones reales (Constantin y Dinculescu, 2019; Yang et al., 2020).

4.1. Aplicaciones por tipo de activo/inspección

Las aplicaciones de los VANT en el sector eléctrico pueden clasificarse según el activo inspeccionado o según el objetivo técnico de la misión. Constantin y Dinculescu (2019) señalan que los drones pueden emplearse en inventario de activos, actualización del estado técnico de equipos, mantenimiento, construcción, reparaciones, monitoreo de emisiones y, de manera más específica, en inspección de torres, postes, líneas, subestaciones, turbinas eólicas y sistemas solares. Aunque su enfoque es amplio e incluye transmisión y otros segmentos energéticos, esta clasificación es útil para el caso de redes de distribución, donde los activos suelen estar más dispersos y en entornos de acceso variable.

4.1.1. Inspección de postes, estructuras y apoyos

Una de las aplicaciones más directas de los VANT es la inspección de postes, crucetas, herrajes, retenidas y demás elementos de soporte de la red. En este tipo de inspección, el interés principal es identificar deformaciones, inclinaciones, corrosión, daños mecánicos, elementos flojos o deterioro estructural. La ventaja del VANT radica en que puede aproximarse a la estructura desde ángulos que normalmente no son visibles desde el suelo y capturar evidencia fotográfica detallada sin necesidad de que el personal realice trabajos en altura o movilice equipos especiales. Esta lógica de observación cercana y desde múltiples perspectivas ha sido ampliamente resaltada en aplicaciones de inspección estructural con UAV, donde la alta resolución de imagen y la georreferenciación permiten documentar de forma más eficiente zonas críticas y de difícil acceso (Hallermann y Morgenthal, 2014).

La Figura 2 presentada en Nguyen et al., (2018) se evidencian condiciones estructurales que pueden comprometer la estabilidad o confiabilidad de la red. El poste de madera con agrietamiento longitudinal representa un defecto que puede reducir su capacidad mecánica y aumentar el riesgo de falla estructural. Este tipo de evidencia visual resulta útil para priorizar actividades de mantenimiento, programar reemplazos o realizar verificaciones en campo con mayor oportunidad.

4.1.2. Inspección de conductores, conexiones y herrajes

Los conductores y sus accesorios constituyen otro grupo de activos de alta relevancia. Los VANT permiten revisar el estado aparente de conductores, empalmes, conectores, grapas, amortiguadores y otros elementos, y detectar defectos visibles o térmicos en conexiones y puntos de unión. En el caso de la inspección termográfica, Ulloa-Loor y Romero-Bedón (2023) muestran

que el uso de drones equipados con cámaras infrarrojas permite detectar sobrecalentamientos, conexiones calientes y condiciones anómalas de operación en redes eléctricas, lo cual resulta especialmente útil para orientar el mantenimiento preventivo. De forma similar, Luque-Vega et al. (2014) describen un sistema con cámara térmica infrarroja y cámara RGB orientado a la inspección cualitativa de uniones en líneas eléctricas, basado en la comparación de temperatura entre juntas para detectar fallas.

4.1.3. Inspección de aisladores y accesorios de aislamiento

Los aisladores son uno de los activos donde los VANT han mostrado alto valor práctico. La inspección visual puede revelar contaminación, fisuras, roturas, pérdida de piezas o rastros de descargas. En aplicaciones más avanzadas, la inspección térmica o ultravioleta permite detectar fenómenos asociados a fallas incipientes, puntos calientes o descargas parciales. Constantin y Dinculescu (2019) destacan que, dependiendo de la carga útil del dron, es posible detectar defectos en conductores, aisladores y otros componentes, y que el uso de cámaras UV puede ayudar a identificar el efecto corona, útil para localizar ciertas fallas eléctricas y reducir actividades redundantes de mantenimiento.

Más aún, el trabajo de Gonçalves et al. (2023) demuestra que los drones ya no solo se emplean para inspeccionar aisladores, sino que pueden servir como plataforma para su limpieza asistida, lo que abre una nueva línea de desarrollo en mantenimiento de activos. Las Figuras 11 y 18 presentadas en Gonçalves et al., (2023) se evidencia esta transición de los VANT desde plataformas de inspección hacia herramientas de mantenimiento asistido. En la Figura 11 se presentan los principales componentes del prototipo de dron-robot propuesto por Gonçalves et al. (2023), entre ellos la cámara RGB, la cámara de profundidad, el sistema de control, el tanque y la

hidrolavadora. En la Figura 18 se muestra una prueba de campo del mismo sistema durante la limpieza de una cadena de aisladores energizada. Este desarrollo evidencia que los VANT pueden integrarse no solo a tareas de inspección, sino también a procesos específicos de mantenimiento, especialmente en actividades donde resulta conveniente reducir la exposición del personal a trabajos en altura o a condiciones de riesgo eléctrico.

4.1.4. Inspección del corredor y vegetación circundante

Otra aplicación importante corresponde a la inspección del corredor de línea y de la vegetación cercana a la infraestructura. En este caso, el objetivo es identificar árboles sobrecrecidos, invasión del corredor, construcciones no autorizadas, obstáculos, cruces con otras infraestructuras y cambios en el entorno que puedan comprometer la seguridad o la continuidad del servicio. La IEEE Std 2821-2020 señala que la inspección de la servidumbre puede realizarse mediante cámaras RGB, cámaras térmicas, escáneres LiDAR o sistemas de fotografía oblicua, dependiendo del nivel de detalle requerido y del tamaño del área a cubrir. Del mismo modo, Li y Guo (2018) indican que el uso de escáneres LiDAR en inspección de líneas puede dividirse en monitoreo del corredor y monitoreo del estado de partes de la torre, siendo el primero especialmente útil para detección de objetos peligrosos, vegetación, edificaciones ilegales y medición de distancias de seguridad. Aunque estos trabajos se centran más en transmisión, sus principios son transferibles a redes de distribución, particularmente en tramos rurales y periurbanos.

4.1.5. *Inspección de transformadores, equipos de maniobra y subestaciones*

Los VANT también pueden emplearse en inspección de transformadores, seccionadores, reconectadores y otros equipos de maniobra, así como en patios de subestación. En estos activos, la inspección visual permite verificar estado general, presencia de suciedad, corrosión o daños físicos, mientras que la termografía facilita la detección de conexiones anómalas o sobrecalentamientos. Constantin y Dinculescu (2019) incluyen expresamente la inspección de subestaciones y otros activos eléctricos dentro de las aplicaciones típicas de UAV en sistemas de potencia, destacando además que el valor de esta tecnología radica en permitir acceso seguro a activos energizados y en obtener nuevos tipos de datos útiles para la gestión técnica.

4.2. Sensores y datos utilizados

El valor técnico de los VANT en inspección y mantenimiento depende, en gran medida, de los sensores embarcados y de la calidad de los datos que estos pueden generar. En este sentido, los principales tipos de información capturada corresponden a imágenes a color, imágenes térmicas, datos LiDAR, información ultravioleta y datos georreferenciados de posición y altitud. Yang et al. (2020) señalan que los sistemas modernos de inspección de líneas se estructuran alrededor de tres componentes: plataformas, sensores y métodos de procesamiento, y sostienen que ningún sensor aislado satisface por sí solo todas las demandas de inspección, por lo que la tendencia apunta a la integración multisensor.

4.2.1. *Información visual RGB*

Las cámaras RGB son la carga útil más extendida en los procesos de inspección aérea. Permiten capturar imágenes y video de alta resolución para identificar defectos visibles, geometría

de los activos, estado general de estructuras, presencia de vegetación o interferencias con el corredor. La IEEE Std 2821-2020 indica que las cámaras RGB son el sensor más frecuente en inspección aérea y se utilizan para registrar fotografías de torres, líneas y servidumbres para análisis posterior de defectos. De manera complementaria, Hallermann y Morgenthal (2014) muestran que las imágenes UAV georreferenciadas pueden almacenarse en bases de datos y relacionarse con ubicaciones específicas de la estructura, favoreciendo la inspección documentada y la reconstrucción tridimensional.

4.2.2. Información termográfica

La termografía infrarroja es uno de los aportes más valiosos de los VANT al mantenimiento preventivo. Este tipo de información permite identificar variaciones anómalas de temperatura asociadas a sobrecargas, malos contactos, deterioro de componentes o fallas incipientes. Taqi y Beryozkina (2019) reúnen referencias en las que se emplean drones para el diagnóstico térmico de infraestructura eléctrica y destacan que la combinación entre UAV y cámara térmica permite realizar inspecciones rápidas y sin contacto directo. Ulloa-Loor y Romero-Bedón (2023), por su parte, muestran que la termografía georreferenciada en redes eléctricas permite mapear térmicamente la infraestructura y detectar con mayor oportunidad equipos sobrecargados y conexiones calientes. La IEEE Std 2821-2020 también resalta que el éxito de este tipo de inspección depende de la correcta identificación del objetivo, la precisión del sensor y la calidad de la imagen, y recomienda evitar la radiación solar directa sobre el objetivo al capturar imágenes térmicas.

4.2.3. Datos LiDAR y modelado 3D

Los sensores LiDAR permiten obtener nubes de puntos de alta precisión y reconstruir en tres dimensiones el corredor de línea, la geometría de conductores, el perfil del terreno y la vegetación cercana. Li y Guo (2018) explican que esta tecnología es especialmente útil para el monitoreo del corredor y la condición de partes de torre, además de permitir mediciones finas de distancias y modelado 3D. La IEEE Std 2821-2020 complementa esta visión al señalar que el escaneo LiDAR se utiliza en inspección de servidumbres, levantamiento de mapas 3D y medición de distancias seguras respecto de vegetación y construcciones. En áreas extensas, la guía sugiere usar aeronaves de ala fija con escáneres LiDAR o fotografía oblicua; en áreas pequeñas que requieren mayor resolución, considera más apropiados los multicopteros a menor altura.

4.2.4. Sensores UV y detección de efecto corona

En aplicaciones más especializadas, las cámaras o sensores ultravioletas permiten detectar emisiones de corona y descargas parciales en conductores o estructuras de aislamiento. Rymer et al. (2018) muestran que la detección UV tiene utilidad para inspecciones de alta tensión, pero también enfrenta limitaciones de rango y campo de visión. En su estudio, plantean que los sensores UV compactos son ligeros y económicos, pero requieren mejoras en el alcance para operar con distancias seguras en un UAV. Moore et al. (2018) añaden que la detección de fallas en las bandas visible, infrarroja de onda larga y ultravioleta es complementaria y que, aunque el análisis de datos visibles y térmicos puede ser inicialmente más costoso, el análisis de efecto corona en la franja ultravioleta es más susceptible de automatización.

El experimento presentado en la Figura 2 de Moore et al., (2018) valida el uso de sensores UV compactos embarcados en UAV para la detección de emisiones asociadas al efecto corona.

Durante el vuelo, el sensor registró una señal UV que aumentó cuando el UAV se aproximó a la fuente emisora, mientras que la cámara de efecto corona confirmó visualmente la presencia de flujo de fotones UV. Este experimento demuestra que los sensores UV embarcados en VANT pueden emplearse para localizar puntos de emisión asociados al efecto corona, siempre que la trayectoria de vuelo permita muestrear adecuadamente el espacio cercano a los componentes eléctricos. No obstante, Moore et al. (2018) aclaran que la prueba se realizó con una fuente de corona de intensidad superior a la de una corona real, con el fin de que el sensor pudiera registrar la señal a una distancia aproximada de 6 m. Esto evidencia la importancia del alcance del sensor, la distancia de operación y la planificación de la trayectoria en este tipo de inspecciones.

4.2.5. Georreferenciación, fotogrametría y bases de datos

Además de las imágenes y señales ópticas, los VANT capturan datos de posición, orientación y tiempo, mediante GPS, IMU, barómetros y otros subsistemas. Arriola-Valverde et al. (2016) muestran que es posible registrar junto a cada imagen datos como latitud, longitud, altura, cabeceo (pitch), alabeo (roll), quiñada (yaw), fecha y hora, y organizarlos para procesamiento posterior. Hallermann y Morgenthal (2014) también resaltan que las imágenes y videos obtenidos con UAV pueden georreferenciarse y almacenarse en bases de datos dedicadas, de modo que los resultados de la inspección queden vinculados a la ubicación exacta del daño o activo observado. Este tipo de información es especialmente útil cuando se busca seguimiento temporal de defectos, reconstrucción 3D o trazabilidad de hallazgos de mantenimiento. En esa misma línea, Jiang et al. (2017) describen un sistema de fotogrametría oblicua con UAV, doble cámara, GNSS a bordo y estación maestra GNSS, diseñado para reconstrucción 3D de líneas y

torres, con superposiciones elevadas y trayectoria planificada según altura de vuelo, velocidad y geometría del activo.

Las tomas oblicuas de la presentadas en la Figura 5 de Jiang et al., (2017) muestran cómo la fotogrametría con UAV permite capturar una estructura eléctrica desde diferentes orientaciones. En las imágenes (a,b) se presenta una vista oblicua de una torre de transmisión capturada en dirección paralela a la vía, mientras que en las imágenes (c,d) se muestra una toma transversal de la misma infraestructura. Esta combinación de perspectivas permite obtener mayor información geométrica sobre la estructura, los conductores, las crucetas y el entorno inmediato, facilitando la reconstrucción tridimensional y el análisis posterior de la infraestructura fuera del sitio de inspección.

4.3. Limitaciones operativas básicas observadas

A pesar de sus ventajas, el uso de VANT en mantenimiento e inspección de redes eléctricas presenta limitaciones operativas que deben ser consideradas desde el diseño de la misión. Estas limitaciones no anulan el valor de la tecnología, pero sí condicionan su efectividad, la seguridad del vuelo y la calidad de los datos obtenidos. En general, las principales restricciones observadas en la literatura se relacionan con autonomía, calidad de imagen, estabilidad del vuelo, seguridad de aproximación, procesamiento de datos y exigencias de pilotaje (Constantin y Dinculescu, 2019; Yang et al., 2020).

4.3.1. Autonomía y cobertura de misión

Una de las limitaciones más conocidas es la autonomía, especialmente en multicopteros. La IEEE Std 2821-2020 compara plataformas de uso común y señala que los multicopteros ofrecen

gran maniobrabilidad y buena capacidad de vuelo estacionario, pero a costa de una autonomía reducida. Esto obliga a planificar misiones más cortas, dividir tramos largos en varias operaciones o priorizar activos críticos cuando el tiempo de vuelo es limitado. En contraste, las plataformas de ala fija ofrecen mayor alcance, pero menor capacidad de inspección detallada. Jiang et al. (2017) reportan, por ejemplo, una autonomía práctica de 20 minutos para un sistema multirrotor usado en fotogrametría de líneas, después de considerar consumo en despegue, aterrizaje y viento.

La matriz comparativa de la Tabla 3 resume el contraste operativo entre VANT de ala fija y multirrotor. Mientras los primeros sobresalen en alcance operativo, estabilidad ante vientos fuertes y duración de vuelo, los segundos se destacan por facilidad de uso, automatización, maniobrabilidad, versatilidad, cargas útiles intercambiables y portabilidad. Esta comparación permite entender por qué la selección de la plataforma depende del tipo de misión: el ala fija resulta conveniente cuando se prioriza la cobertura espacial, mientras que el multirrotor es más adecuado cuando se requiere inspección cercana, precisa y flexible sobre activos específicos.

Tabla 3.

Comparación general entre VANT de ala fija y multirrotor

Comparación	Ala fija	Multirrotor
Alcance Operativo	✓	
Estabilidad con vientos fuertes	✓	
Duración de vuelo	✓	
Fácil de usar		✓
Automatización		✓
Maniobrabilidad		✓
Versatilidad		✓
Cargas útiles intercambiables		✓
Portabilidad		✓

Nota. Adaptado de *Ala fija o multirrotor ¿qué dron debe escoger para sus tareas de topografía aérea?*, por DJI Enterprise, 2020, <https://enterprise.dji.com/es>.

4.3.2. Calidad de imagen y condiciones ambientales

La calidad de los datos capturados depende fuertemente de las condiciones ambientales. Hallermann y Morgenthal (2014) señalan que factores como el viento, las condiciones de iluminación y el desenfoque por movimiento influyen directamente en la utilidad de las imágenes y videos para inspección técnica. Del mismo modo, la IEEE Std 2821-2020 recomienda verificar que la velocidad del viento esté dentro de la capacidad del UAV antes del despegue y mantener condiciones que favorezcan estabilidad de vuelo y seguridad en el aterrizaje. En el caso de la termografía, además, la radiación solar directa puede afectar la captura adecuada de temperatura.

4.3.3. Necesidad de trayectorias y posiciones de inspección bien definidas

La calidad de una inspección con VANT no depende solo del sensor, sino también de la trayectoria de vuelo. La IEEE Std 2821-2020 señala que, cuando se emplean inspecciones automáticas o autónomas, la ruta debe definirse con antelación considerando coordenadas y alturas de torres, altitudes de vuelo, distancias de seguridad, obstáculos y posiciones fotográficas de cada objetivo, recomendando incluso la creación de bibliotecas de rutas estandarizadas. Asimismo, Xu et al. (2022) muestran que la determinación de puntos de posicionamiento alrededor de torres y aisladores es un factor clave tanto para la seguridad como para la cobertura efectiva del objetivo.

La ruta de vuelo presentada en la Figura A.1 de IEEE Std 2821-2020, (2020) evidencia la necesidad de planificar la inspección mediante puntos y trayectorias previamente definidos. La distribución de posiciones sucesivas alrededor de la estructura permite cubrir componentes críticos, como crucetas, cadenas de aisladores, conductores y zonas próximas a la torre. Este tipo de planificación resulta fundamental para evitar omisiones durante la inspección, mantener

distancias seguras frente a la infraestructura energizada y garantizar que las imágenes se capturen desde ángulos adecuados para su posterior análisis.

4.3.4. Distancias de seguridad frente a infraestructura energizada

Otra limitación crítica es la necesidad de mantener distancias de seguridad respecto de conductores y estructuras energizadas. Xu et al. (2022) señalan que, en un caso de torre de 500 kV, la distancia segura entre UAV y línea resultó del orden de 2 m al considerar la interferencia electromagnética, y de 3 m cuando además se buscó cobertura completa y seguridad en la inspección de cadenas de aisladores. De manera similar, Mao et al. (2022) concluyen, a partir de simulaciones y ensayos en líneas de ± 500 kV, que la distancia mínima segura de operación fue del orden de 3 m, observándose perturbaciones de control, transmisión de datos y estabilidad del sistema cuando el dron se aproximó más al conductor.

En el contexto colombiano, Vargas Cáceres y Anaya Rojas, (2023) complementan esta discusión al señalar que el RETIE establece distancias mínimas de seguridad entre líneas de alta tensión de corriente alterna y las personas, las cuales aumentan con el nivel de tensión. De manera específica, la Tabla 3.10.5. b. del Libro 3 del RETIE 2024, denominada *Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas en corriente alterna*, establece valores mínimos de aproximación para diferentes rangos de tensión (Ministerio de Minas y Energía, 2024). Según dicha tabla, estas distancias corresponden a 3 m para tensiones mayores a 1 kV y hasta 72,5 kV, 3,3 m para para tensiones mayores a 72,6 kV y hasta 121 kV, 4 m para tensiones menores de 230 kV y 5,8 m para tensiones menores de 500 kV. No obstante, Vargas Cáceres y Anaya Rojas, (2023) aclaran que en Colombia no existe una normativa específica que defina distancias mínimas entre herramientas, accesorios aislados o dispositivos UAV y las líneas eléctricas. Por esta razón,

proponen tomar como referencia mínima las distancias establecidas en el RETIE y ajustarlas según el nivel de tensión, la geometría de la infraestructura, el objetivo de la inspección y las condiciones particulares de operación.

Adicionalmente, Vargas Cáceres y Anaya Rojas, (2023) muestran, para el caso de una línea de 115 kV, que es posible utilizar las distancias horizontales de seguridad del RETIE como criterio de apoyo para identificar zonas de aproximación y sectores en los que no se recomienda volar el UAV. Este aporte resulta relevante porque sugiere que la distancia segura no debe entenderse como un valor fijo universal, sino como un criterio técnico que depende del nivel de tensión, la geometría de la estructura, la posición relativa del UAV y el objetivo de la inspección.

Tabla 4.

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 (1) 7,5 (2)
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 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 (3)	
0 a 8,7 kV	30
Entre 8,7 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 *Libro 3 Instalaciones objeto del RETIE* (p. 30), por Ministerio de Minas y Energía, 2024.

Aunque los estudios experimentales citados se desarrollan principalmente en líneas de transmisión y no deben extrapolarse de manera automática a redes de distribución, sí ponen en evidencia que el campo electromagnético, el nivel de tensión, la geometría del activo y la posición del UAV respecto del conductor son variables críticas en la planeación de la misión. En consecuencia, la definición de distancias seguras debe abordarse como parte de la gestión del riesgo operacional, articulando criterios normativos, condiciones del entorno y procedimientos específicos de inspección.

4.3.5. Limitaciones específicas de ciertos sensores

Algunos sensores presentan limitaciones operativas particulares. En el caso de los sensores UV, Rymer et al. (2018) muestran que el campo de visión de los detectores puntuales aumentados con reflector es limitado y que para inspeccionar volúmenes alrededor de torres puede ser necesario programar múltiples trayectorias o vuelos, uno por cada zona de interés. Moore et al. (2018) agregan que, aunque la detección UV tiene buenas perspectivas de automatización, el análisis de datos visibles e infrarrojos sigue siendo más intensivo en interpretación y requiere mayor esfuerzo inicial. Esto significa que la elección del sensor no solo depende del fenómeno a observar, sino también de los recursos disponibles para el análisis posterior.

4.3.6. Requerimientos de experiencia operativa

Finalmente, la operación de drones cerca de torres, líneas y estructuras estrechas exige habilidades específicas del piloto. Constantin y Dinculescu (2019) subrayan que para pilotar un UAV cerca de torres, líneas y estructuras se requiere coordinación ojo-mano, práctica en orientación espacial, reflejos rápidos ante ráfagas de viento y una buena percepción de profundidad

para distinguir componentes estrechos. Esta limitación es importante porque recuerda que la incorporación de VANT no elimina la necesidad de personal capacitado; por el contrario, desplaza parte de la exigencia desde el trabajo físico en campo hacia la operación segura, la interpretación de datos y la planificación técnica de la misión.

5. Comparación con métodos tradicionales

Las inspecciones de líneas eléctricas han sido fundamentales para la identificación y localización de fallas en el sistema eléctrico colombiano, contribuyendo directamente a la confiabilidad del servicio. Desde la expansión del sistema eléctrico nacional a partir de la década de 1960, se ha evidenciado la necesidad de fortalecer los procesos de operación y mantenimiento de la infraestructura eléctrica (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2015). Posteriormente, como respuesta a la crisis energética ocurrida entre 1991 y 1992, se promulgó la Ley 143 de 1994, la cual estableció la reorganización del sector eléctrico mediante la separación de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica (Congreso de Colombia, 1994).

Para la presente monografía, el análisis se enfoca en las redes de distribución eléctrica, las cuales representan un desafío significativo en términos de inspección y mantenimiento, especialmente en sistemas aéreos ubicados en zonas de difícil acceso y con alta dispersión geográfica (UPME, 2015).

5.1. Criterios de comparación

Para evaluar la viabilidad del uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la inspección de redes de distribución eléctrica, es necesario establecer criterios que permitan comparar esta tecnología con los métodos tradicionales de inspección. Estos criterios facilitan un análisis objetivo en términos operativos, técnicos y económicos, y son ampliamente utilizados en estudios de gestión de activos e inspección de infraestructura eléctrica (Iberdrola, 2023; Enel Group, 2023).

Los principales criterios de comparación considerados son:

Seguridad operativa: Evalúa el nivel de riesgo al que se expone el personal técnico durante la inspección, siendo uno de los factores más relevantes en actividades como trabajos en altura y en condiciones energizadas (Enel Colombia, 2021).

Tiempo de inspección: Se refiere al tiempo requerido para realizar la inspección de un tramo de red, incluyendo desplazamientos, preparación y ejecución. El uso de VANT ha demostrado reducir significativamente estos tiempos en comparación con métodos tradicionales (National Grid, 2023).

Cobertura y acceso: Analiza la capacidad de inspeccionar zonas de difícil acceso, como áreas rurales, montañosas o con vegetación densa, donde los drones presentan ventajas operativas frente a las inspecciones terrestres (Eletrobras, 2022).

Calidad y precisión de la información: Considera el nivel de detalle en la detección de fallas, incluyendo el uso de tecnologías como cámaras de alta resolución, sensores termográficos y sistemas LiDAR, que permiten diagnósticos más precisos (Iberdrola, 2023).

Costos operativos: Incluye costos asociados a mano de obra, transporte, equipos, mantenimiento y logística. Diversos estudios evidencian que el uso de drones puede reducir estos costos al disminuir la necesidad de recursos físicos y desplazamientos (Enel Group, 2023).

Impacto en la continuidad del servicio: Evalúa si es necesario realizar interrupciones del servicio para ejecutar la inspección, siendo los VANT una alternativa que permite realizar inspecciones en condición energizada (Enel Colombia, 2021).

Frecuencia de inspección: Determina la posibilidad de realizar inspecciones periódicas de forma eficiente, lo cual se ve favorecido por la rapidez y flexibilidad operativa de los VANT (National Grid, 2023).

5.1.1. Inspección tradicional

La inspección tradicional de redes de distribución eléctrica se fundamenta en la ejecución de recorridos en campo, en los cuales el personal técnico realiza la verificación directa, estructura por estructura, dentro del área de influencia del circuito. Este método, ampliamente utilizado en la operación y mantenimiento de sistemas eléctricos, presenta limitaciones asociadas a riesgos operativos, altos costos logísticos y extensos tiempos de ejecución (Gómez & López, 2018; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2012). Adicionalmente, la calidad y confiabilidad de la información obtenida dependen en gran medida de la inspección visual asistida mediante instrumentos ópticos como binoculares, así como de la ejecución de maniobras de ascenso y descenso sobre las estructuras, lo que incrementa la variabilidad en los resultados y la probabilidad de omisión de fallas incipientes (Iberdrola, 2023).

Desde el punto de vista operativo, estas actividades requieren el uso de equipos especializados como escaleras dieléctricas, sistemas certificados de protección contra caídas para trabajo en alturas y dispositivos de diagnóstico como cámaras termográficas. El transporte, manipulación e instalación de dichos equipos generan incrementos en los tiempos de intervención y en la carga operativa del personal en campo (Ministerio de Trabajo, 2015; Enel Colombia, 2021).

En términos logísticos, la inspección tradicional típicamente involucra el desplazamiento mediante un vehículo tipo pick-up, conformado por una cuadrilla estándar compuesta por técnicos electricistas y auxiliares. Si bien el vehículo facilita el acceso inicial a través de la red vial disponible, en múltiples escenarios es necesario complementar el recorrido mediante desplazamientos a pie, debido a las condiciones de accesibilidad de la infraestructura. Esto implica la exposición del personal a terrenos con alta cobertura vegetal, zonas inundables, topografía irregular o de difícil tránsito, así como a riesgos biológicos propios del entorno (UPME, 2015).

Adicionalmente, en ciertos casos la inspección requiere la ejecución de trabajos en condiciones energizadas o la realización de maniobras de desenergización programada, con el fin de garantizar una evaluación técnica adecuada de los activos. Estas condiciones implican la implementación de procedimientos operativos específicos, así como el despliegue de recursos adicionales, lo cual impacta directamente en la eficiencia operativa, los costos asociados y la continuidad del servicio eléctrico (Congreso de Colombia, 1994; Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, s.f.).

5.1.2. Inspección con uso de VANT

A partir del año 2015 se iniciaron diversas pruebas piloto que marcaron el inicio de la incorporación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la industria energética. Desde entonces, esta tecnología ha experimentado un rápido desarrollo, evidenciando sus capacidades operativas y ventajas en la ejecución de inspecciones en redes de distribución eléctrica, particularmente en términos de eficiencia, seguridad y cobertura (Iberdrola, 2023; Organización de Aviación Civil Internacional, 2015).

En la actualidad, el mercado de drones presenta un alto nivel de madurez tecnológica y mayor accesibilidad, lo que ha facilitado su adopción progresiva por parte de las empresas de distribución eléctrica. Los VANT modernos integran múltiples sensores y sistemas de captura, como cámaras de alta resolución, sensores termográficos y filtros especializados, que permiten realizar diagnósticos rápidos y precisos del estado de la infraestructura. Asimismo, la incorporación de técnicas de procesamiento de imágenes apoyadas en inteligencia artificial ha potenciado la identificación temprana de fallas, contribuyendo a la implementación de estrategias

de mantenimiento predictivo y al incremento de la confiabilidad del sistema eléctrico (Enel Group, 2023; National Grid, 2023).

Por otra parte, los avances en tecnologías de almacenamiento energético han permitido mejorar significativamente la autonomía de vuelo, incrementando la distancia operativa y la velocidad de desplazamiento sin comprometer la calidad de los datos adquiridos. Adicionalmente, la disponibilidad de sistemas de carga rápida y baterías intercambiables optimiza la continuidad operativa, permitiendo la inspección eficiente de redes extensas y de alta complejidad (Colomina & Molina, 2014).

Finalmente, el uso de sensores avanzados como LiDAR (Light Detection and Ranging) se ha consolidado como una de las principales innovaciones en este campo, ya que permite no solo mejorar la estabilidad y navegación del VANT, sino también generar modelos tridimensionales (3D) de alta precisión de la infraestructura eléctrica y su entorno. Estas capacidades posicionan a los VANT como una herramienta clave para el futuro de las inspecciones y el mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, en los sistemas de distribución eléctrica (Colomina & Molina, 2014; Iberdrola, 2023).

5.2. Ventajas y desventajas

Con el propósito de evaluar de manera objetiva las estrategias empleadas en la inspección de redes de distribución eléctrica, es necesario establecer un análisis comparativo entre los métodos tradicionales basados en recorridos en campo y las técnicas emergentes soportadas en vehículos aéreos no tripulados (VANT). Este análisis permite identificar las diferencias en términos de desempeño operativo, eficiencia técnica y viabilidad económica, considerando las condiciones reales de ejecución en sistemas eléctricos de distribución.

Para ello, se definen criterios de evaluación asociados a variables clave como la seguridad operativa, los tiempos de intervención, la cobertura y accesibilidad a la infraestructura, la calidad y resolución de la información recolectada, los costos de implementación y operación, así como el impacto sobre la continuidad del servicio. Estos criterios permiten establecer una base homogénea de comparación, facilitando la valoración de las ventajas y desventajas inherentes a cada método.

En este contexto, el cuadro comparativo presentado en la Tabla 5 sintetiza las principales características de ambos enfoques de inspección, permitiendo evidenciar las fortalezas y limitaciones de los métodos tradicionales frente al uso de VANT, y proporcionando un soporte técnico para la toma de decisiones en la implementación de estrategias de mantenimiento en redes de distribución eléctrica.

Tabla 5.

Comparación métodos de inspección

Criterio	Inspección tradicional	Inspección con VANT
Seguridad operativa	Alta exposición del personal a riesgos eléctricos, trabajo en alturas y condiciones ambientales adversas.	Minimiza la exposición del personal al riesgo al realizar inspecciones de forma remota.
Tiempo de ejecución	Elevado, debido a desplazamientos, acceso limitado y maniobras en campo.	Reducido, permite cubrir grandes áreas en menor tiempo.
Cobertura y acceso	Limitado en zonas de difícil acceso (montañosas, vegetación densa, humedales).	Alta capacidad de acceso a zonas complejas y de difícil tránsito.
Calidad de la información	Dependiente de inspección visual directa; puede ser subjetiva.	Alta precisión mediante imágenes de alta resolución y sensores (termografía, LiDAR).
Detección de fallas	Limitada para fallas incipientes o no visibles a simple vista.	Mayor capacidad de detección temprana (puntos calientes, daños estructurales, vegetación).
Costos operativos	Altos a largo plazo (mano de obra, transporte, logística).	Moderados; reduce costos operativos recurrentes.
Costos iniciales	Bajos (equipos convencionales).	Altos (adquisición de drones, sensores y software).
Impacto en el servicio	Puede requerir desenergización o maniobras especiales.	Generalmente no requiere interrupciones del servicio.

Frecuencia de inspección	Limitada por costos y tiempos de ejecución.	Alta, permite inspecciones más frecuentes y programadas.
Requerimientos técnicos	Personal técnico con experiencia en campo.	Personal capacitado en operación de drones y análisis de datos.
Condiciones operativas	Dependiente de condiciones climáticas (lluvia, descargas atmosféricas cercanas).	Dependiente de condiciones climáticas (viento, lluvia).
Registro de información	Limitado, generalmente manual o fotográfico básico.	Digital, georreferenciado y apto para análisis posterior.

Nota. Adaptado de Iberdrola (2023), National Grid (2023), Enel Colombia (2021), Enel Group (2023) y Colomina y Molina (2014).

6. Beneficios y limitaciones en la implementación

La incorporación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en las actividades de inspección y mantenimiento de redes de distribución eléctrica representa un avance significativo en la modernización de los procesos operativos del sector. Esta tecnología ha permitido optimizar la recolección de información en campo, mejorar la seguridad del personal y aumentar la eficiencia en la detección de fallas, contribuyendo al fortalecimiento de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo (Iberdrola, 2023; Enel Colombia, 2021).

No obstante, la implementación de VANT no está exenta de desafíos. Su adopción implica considerar aspectos técnicos, económicos y regulatorios que pueden influir en su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo. Factores como la inversión inicial, la capacitación del personal, las limitaciones operativas propias de los equipos y el cumplimiento de la normativa aeronáutica vigente son elementos clave que deben ser evaluados de manera integral (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, s.f.).

En este contexto, el presente capítulo tiene como propósito analizar de manera estructurada los principales beneficios y limitaciones asociados a la implementación de VANT en redes de distribución eléctrica, con el fin de proporcionar una visión técnica que sirva como base para la toma de decisiones en su adopción dentro de las empresas del sector.

6.1. Beneficios identificados

La implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la inspección de sistemas de distribución eléctrica ha generado múltiples beneficios a nivel operativo, técnico y económico, consolidándose como una herramienta clave en los procesos de mantenimiento moderno (Iberdrola, 2023; Enel Colombia, 2021).

Uno de los principales beneficios es la mejora significativa en la seguridad operativa, ya que reduce la exposición del personal a riesgos asociados con trabajos en altura, proximidad a líneas energizadas y desplazamientos en terrenos de difícil acceso. Al realizar inspecciones de manera remota, se minimizan accidentes laborales y se fortalecen las condiciones de trabajo en campo (Enel Colombia, 2021).

Desde el punto de vista operativo, los VANT permiten una optimización de los tiempos de inspección, logrando cubrir mayores extensiones de red en menor tiempo en comparación con los métodos tradicionales, lo que incrementa la eficiencia en la ejecución de actividades de mantenimiento (National Grid, 2023).

En términos técnicos, se destaca la alta calidad y precisión de la información recolectada, gracias al uso de cámaras de alta resolución, sensores termográficos y tecnologías como LiDAR. Estas herramientas facilitan la detección temprana de fallas, lo cual es fundamental para la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo (Iberdrola, 2023).

Adicionalmente, el uso de VANT contribuye a la reducción de costos operativos, al disminuir la necesidad de movilización de grandes cuadrillas, equipos especializados y recursos logísticos. Aunque la inversión inicial puede ser elevada, los beneficios económicos se evidencian en el mediano y largo plazo mediante la optimización de recursos y la reducción de intervenciones correctivas (Enel Group, 2023).

Otro aspecto relevante es la digitalización y trazabilidad de la información, ya que los datos obtenidos pueden ser almacenados, procesados y analizados posteriormente mediante software especializado. Esto permite generar históricos, comparar condiciones operativas en el tiempo y mejorar la toma de decisiones basada en datos.

Finalmente, los VANT facilitan la inspección en zonas de difícil acceso, como áreas rurales, montañosas o con vegetación densa, donde los métodos tradicionales presentan limitaciones significativas (Enel Group, 2023).

En conjunto, estos beneficios posicionan a los VANT como una tecnología estratégica para la modernización de los sistemas de distribución eléctrica, alineada con tendencias de automatización, digitalización y mejora continua en la gestión de activos.

La implementación de tecnologías como los vehículos aéreos no tripulados (VANT) en sistemas de distribución eléctrica no solo responde a mejoras operativas, sino que también puede verse favorecida por diversos incentivos de carácter económico, regulatorio y estratégico, especialmente en el contexto colombiano (Comisión de Regulación de Energía y Gas, s.f.).

6.1.1. Beneficios económicos

6.1.1.1. Reducción de costos operativos. La implementación de VANT permite disminuir los costos asociados a la operación tradicional, tales como el despliegue de cuadrillas, transporte y viáticos. Asimismo, la detección temprana de fallas contribuye a reducir la necesidad de intervenciones correctivas, generando ahorros en el mediano y largo plazo (Enel Group, 2023).

Adicionalmente, la mejora en la gestión del mantenimiento favorece el aumento de la vida útil de los activos eléctricos.

6.1.2. Beneficios regulatorios

6.1.2.1. Marco normativo para operación de drones. En Colombia, la operación de VANT está regulada por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil mediante el Reglamento Aeronáutico de Colombia (RAC 100), el cual establece las condiciones para el uso de aeronaves no tripuladas en actividades industriales, facilitando su implementación en entornos empresariales bajo condiciones controladas (UAEAC, s.f.).

6.1.2.2. Cumplimiento de estándares de seguridad. El uso de VANT contribuye a la reducción de accidentes laborales al minimizar la exposición del personal a trabajos en altura y condiciones de riesgo, lo cual se alinea con los lineamientos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en Colombia (Ministerio de Trabajo, 2015). Esto también puede disminuir la exposición a sanciones y responsabilidades legales derivadas de incidentes operativos.

6.1.3. Beneficios estratégicos y sectoriales

6.1.3.1. Transformación digital del sector eléctrico. El uso de VANT está alineado con las políticas de modernización y digitalización promovidas por el Ministerio de Minas y Energía, orientadas a mejorar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad del sistema eléctrico.

Esta tecnología fortalece la gestión de activos mediante el uso de datos, facilita la toma de decisiones y contribuye a la transición hacia modelos de operación más inteligentes.

6.1.3.2. Sostenibilidad y reducción del impacto ambiental. El uso de drones reduce la necesidad de desplazamientos terrestres, disminuyendo el consumo de combustible y las emisiones asociadas. Asimismo, limita la intervención física en el entorno, contribuyendo a la conservación de ecosistemas y mejorando la percepción corporativa en términos de responsabilidad ambiental.

6.1.4. Beneficios en aseguramiento y gestión del riesgo

La implementación de VANT permite fortalecer la gestión del riesgo operativo mediante la reducción de incidentes laborales, el monitoreo continuo de la infraestructura y la identificación temprana de condiciones críticas.

Esto contribuye a la disminución de fallas de alto impacto y a una menor exposición a pérdidas operativas, mejorando la confiabilidad del sistema eléctrico (Iberdrola, 2023).

6.2. Limitaciones y riesgos reportados

A pesar de los múltiples beneficios asociados al uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la inspección de redes de distribución eléctrica, su implementación presenta diversas limitaciones y riesgos que deben ser considerados para garantizar su correcta integración en los procesos operativos del sector.

Desde el punto de vista técnico, una de las principales limitaciones es la autonomía de vuelo, la cual depende de la capacidad de las baterías y restringe el tiempo de operación continua. Esto implica la necesidad de realizar pausas para el reemplazo o recarga de baterías, afectando la eficiencia en inspecciones de grandes extensiones (Colomina & Molina, 2014).

Otra limitación relevante es la dependencia de las condiciones ambientales, ya que factores como fuertes vientos, lluvia o baja visibilidad pueden afectar la estabilidad del vuelo, la calidad de los datos recolectados e incluso impedir la operación del equipo (Iberdrola, 2023). Estas condiciones son particularmente críticas en zonas rurales o de difícil acceso, donde la variabilidad climática es mayor.

En el ámbito operativo, se identifican retos asociados a la necesidad de personal especializado, tanto en la operación de los VANT como en el procesamiento e interpretación de la información recolectada. Esto implica procesos de capacitación, certificación y actualización constante, generando costos adicionales para las empresas.

Desde la perspectiva económica, la inversión inicial requerida para la adquisición de equipos, sensores especializados (como cámaras termográficas o sistemas LiDAR), software de procesamiento y capacitación del personal puede representar una barrera de entrada, especialmente para empresas con recursos limitados (Enel Group, 2023).

En el ámbito regulatorio, la operación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en Colombia está sujeta al cumplimiento de lo establecido por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil en el Reglamento Aeronáutico de Colombia (RAC 100), el cual define requisitos relacionados con el registro de las aeronaves, la certificación de los operadores y las condiciones de seguridad para la operación (UAEAC, s.f.). Asimismo, esta normativa establece restricciones de vuelo en zonas sensibles, tales como instalaciones militares y áreas estratégicas, lo que puede limitar la flexibilidad operativa y generar retrasos en la ejecución de inspecciones si no se gestionan adecuadamente.

Asimismo, en el contexto colombiano, las consideraciones asociadas a la seguridad nacional y la protección de información estratégica, enmarcadas en disposiciones como la Ley 599

de 2000, implican que la ubicación y operación de ciertas actividades militares no sean de acceso público. Esta condición introduce un nivel de incertidumbre en la planificación de misiones con VANT, incrementando el riesgo de restricciones operativas o interferencias durante su ejecución (Congreso de Colombia, 2000).

Adicionalmente, existen riesgos operativos asociados al uso de esta tecnología, tales como fallas en los sistemas de navegación, pérdida de señal o interferencias electromagnéticas, especialmente en entornos con infraestructura eléctrica energizada. Estos eventos pueden derivar en la pérdida del equipo o en incidentes que afecten la operación.

Finalmente, la gestión y procesamiento de grandes volúmenes de datos representa un desafío significativo, ya que requiere infraestructura tecnológica adecuada, almacenamiento y herramientas de análisis que permitan convertir la información recolectada en insumos útiles para la toma de decisiones (Iberdrola, 2023).

En conjunto, estas limitaciones y riesgos evidencian la necesidad de una adecuada planificación, gestión técnica y cumplimiento normativo para asegurar una implementación eficiente y segura de los VANT en la inspección de redes de distribución eléctrica.

7. Experiencias y perspectivas de integración

La implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en empresas de distribución eléctrica ha sido adoptada progresivamente como una estrategia para optimizar los procesos de inspección, mantenimiento y gestión de activos. A nivel internacional, distintos estudios han evidenciado mejoras en la eficiencia operativa, reducción de tiempos de inspección y mayor precisión en la identificación de fallas mediante el uso de drones en infraestructura eléctrica (Zhang & Kovacs, 2012; Lu et al., 2018).

En América Latina, empresas del sector han comenzado a integrar esta tecnología en actividades como la inspección de líneas, el monitoreo de vegetación en corredores eléctricos y la evaluación de infraestructura posterior a eventos climáticos. Estas aplicaciones han demostrado ampliar la cobertura de inspección y mejorar la calidad de la información recolectada, reduciendo a su vez la exposición del personal a condiciones de riesgo (CEPAL, 2020).

En el caso de Colombia, la implementación de VANT adquiere una relevancia particular debido a las características geográficas y climáticas del país. La diversidad de ecosistemas, que incluye zonas selváticas, regiones montañosas y áreas de difícil acceso, representa un desafío significativo para los métodos tradicionales de inspección (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015).

En este contexto, los VANT se posicionan como una solución eficiente para acceder a áreas complejas sin intervención directa del personal, facilitando la inspección en condiciones donde el acceso terrestre es limitado. Su aplicación ha sido validada en múltiples estudios relacionados con monitoreo de infraestructura y teledetección aplicada (Colomina & Molina, 2014).

Las experiencias en el sector indican que la implementación de esta tecnología debe realizarse de manera progresiva, iniciando con proyectos piloto que permitan validar su viabilidad

técnica, operativa y económica (International Energy Agency [IEA], 2019). Asimismo, resulta fundamental la capacitación del personal y la integración de los datos en sistemas de gestión de activos.

En este sentido, los VANT no deben considerarse un reemplazo total de los métodos tradicionales, sino una herramienta complementaria que fortalece los procesos de inspección y mantenimiento.

De cara al futuro, se proyecta una mayor integración de los VANT con tecnologías como la inteligencia artificial y el análisis de datos, lo que permitirá avanzar hacia esquemas de mantenimiento predictivo más robustos (Lu et al., 2018). Asimismo, la evolución tecnológica y la reducción de costos facilitarán su adopción a mayor escala en el sector eléctrico.

En conjunto, las experiencias actuales y las perspectivas de desarrollo posicionan a los VANT como una tecnología estratégica para la modernización de los sistemas de distribución eléctrica.

7.1. Casos/experiencias en empresas de distribución

La implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en empresas de distribución eléctrica ha sido adoptada progresivamente como una solución tecnológica para optimizar los procesos de inspección y mantenimiento de la infraestructura. Desde un enfoque práctico, esta adopción responde a la necesidad de mejorar la eficiencia operativa y la gestión de activos en sistemas eléctricos cada vez más extensos y complejos, donde los métodos tradicionales presentan limitaciones evidentes.

A nivel internacional, diferentes experiencias han demostrado que la integración de VANT en la inspección de redes permite mejorar significativamente los procesos de supervisión,

principalmente mediante el uso de sensores avanzados y herramientas de captura de información de alta precisión (Lu et al., 2018). Sin embargo, más allá de la tecnología empleada, el valor real radica en la capacidad de estas herramientas para transformar la manera en que se ejecutan las actividades de mantenimiento.

En el contexto latinoamericano, la adopción de drones se ha orientado principalmente a resolver problemáticas operativas asociadas a la cobertura y accesibilidad de las redes eléctricas. En Colombia, por ejemplo, empresas como Enel Colombia han comenzado a integrar esta tecnología en actividades específicas de inspección, evidenciando mejoras en la recolección de información y en la reducción de riesgos para el personal (Enel Colombia, 2021).

No obstante, desde una perspectiva crítica, la implementación de VANT no debe entenderse únicamente como una tendencia tecnológica, sino como una herramienta que debe adaptarse a las condiciones reales del sistema eléctrico. En regiones como Colombia, donde existen zonas selváticas, áreas montañosas y territorios de difícil acceso, el uso de drones no solo representa una mejora operativa, sino una necesidad para garantizar la viabilidad de los procesos de inspección.

Asimismo, la experiencia en campo permite evidenciar que los VANT son particularmente útiles en actividades como la inspección de redes rurales, el control de vegetación y la evaluación de infraestructura tras eventos climáticos. Estas aplicaciones no solo optimizan los tiempos de intervención, sino que también mejoran la calidad de la información disponible para la toma de decisiones.

Sin embargo, es importante resaltar que los resultados obtenidos dependen en gran medida de la forma en que se implemente la tecnología. Aspectos como la capacitación del personal, la integración de los datos en los sistemas de gestión existentes y el cumplimiento de la normativa

aeronáutica, definida por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, son determinantes para el éxito de estas iniciativas.

En este sentido, se considera que los VANT no deben reemplazar completamente los métodos tradicionales, sino complementarlos. Su implementación debe responder a una planificación técnica adecuada, donde se evalúen las condiciones del entorno, los objetivos de inspección y los recursos disponibles.

Finalmente, más que una solución aislada, el uso de VANT debe entenderse como parte de un proceso de transformación más amplio, orientado hacia la digitalización y modernización del sector eléctrico. Bajo esta perspectiva, su integración con tecnologías como la analítica de datos y la inteligencia artificial representa una oportunidad para evolucionar hacia modelos de mantenimiento más eficientes y predictivos.

A continuación, en la Tabla 6 se presentan empresas del sector eléctrico en donde han implementado el uso de VANT para las labores de inspección de redes de distribución de energía eléctrica.

Tabla 6.

Uso de VANT en empresas del sector eléctrico

Empresa	Región	Uso de drones	Dónde se aplican	Mejoras implementadas
National Grid	Internacional	Inspección de líneas, torres y subestaciones	Reino Unido y EE.UU. (redes de transmisión)	Inspección autónoma BVLOS, uso de IA, reducción de helicópteros, centros de control remoto
Iberdrola	Internacional	Inspección de redes y parques eólicos, termografía, LiDAR	Europa, EE.UU., Latinoamérica	Mantenimiento predictivo con IA, digitalización, integración con analítica de datos
State Grid Corporation of China	Internacional	Inspección automatizada de líneas	Zonas montañosas y	Drones autónomos, estaciones de carga, análisis automatizado

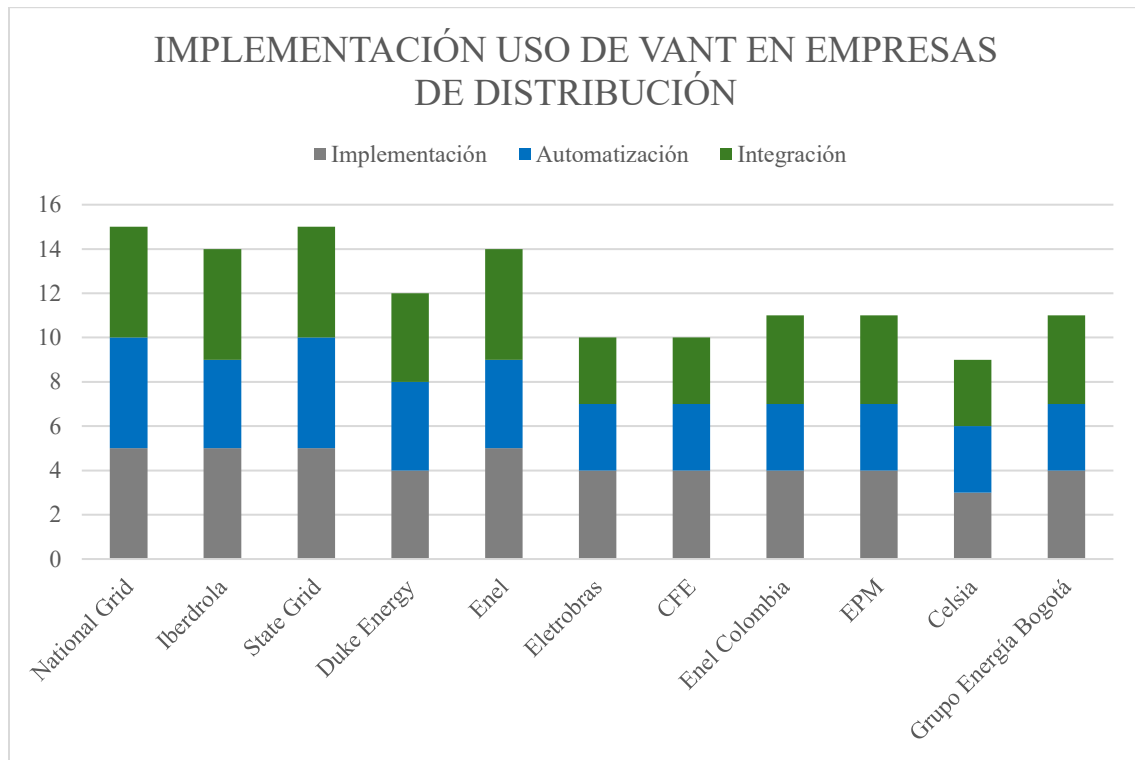
			rurales de China	
Duke Energy	Internacional	Inspección post-desastres, vegetación	EE.UU. (zonas afectadas por huracanes)	Respuesta rápida, integración con operación en tiempo real
Enel	Latinoamérica	Inspección de redes y generación	Colombia, Chile, Brasil, Perú	Robotización, analítica de datos, mantenimiento predictivo
Eletrobras	Latinoamérica	Inspección de líneas en selva	Amazonía brasileña	Sustitución de helicópteros, mayor cobertura
Comisión Federal de Electricidad	Latinoamérica	Inspección y emergencias	México (zonas afectadas por eventos naturales)	Protocolos de respuesta rápida
Enel Colombia	Colombia	Inspección de centrales y redes	Colombia	Reducción de riesgos, mayor precisión de datos, atención de contingencias
EPM	Colombia	Inspección en zonas montañosas	Antioquia	Reducción de trabajo en alturas, mayor cobertura
Celsia	Colombia	Inspección de activos y vegetación	Valle del Cauca, Tolima	Optimización del mantenimiento
Grupo Energía Bogotá	Colombia	Inspección de transmisión	Colombia	Integración GIS, trazabilidad

Nota. Adaptado de *National Grid (2023)*, *Iberdrola (2023)*, *Enel Colombia (2021)* y *Enel Group (2023)*.

En la Figura 2, se observa que las empresas internacionales presentan mayores niveles de automatización e integración tecnológica, destacándose el uso de inteligencia artificial y operaciones autónomas. En contraste, las empresas latinoamericanas y colombianas evidencian una adopción progresiva, enfocada principalmente en la optimización operativa y la reducción de riesgos, con oportunidades de mejora en la automatización y analítica avanzada.

Figura 2.

Implementación uso de VANT en empresas de distribución



Nota. Adaptado de *National Grid (2023)*, *Iberdrola (2023)*, *Enel Colombia (2021)* y *Enel Group (2023)*.

7.2. Lecciones aprendidas y perspectivas futuras de integración

A partir de las experiencias reportadas en la implementación de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la inspección de redes de distribución eléctrica, es posible identificar una serie de lecciones aprendidas que resultan clave para su adecuada integración en los procesos operativos del sector.

Una de las principales lecciones es que la adopción de VANT debe abordarse como una herramienta complementaria a los métodos tradicionales de inspección, y no como un reemplazo

total. La combinación de ambas metodologías permite aprovechar las ventajas de cada enfoque, optimizando la cobertura, la precisión de la información y la eficiencia operativa (Lu et al., 2018).

Asimismo, se ha evidenciado la importancia de la capacitación y certificación del personal, tanto en la operación de los VANT como en el procesamiento e interpretación de los datos recolectados. La correcta formación del recurso humano es fundamental para garantizar la seguridad de las operaciones y la calidad de los resultados obtenidos, en línea con los lineamientos establecidos por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil para la operación de aeronaves no tripuladas (UAEAC, s.f.).

Otra lección relevante es la necesidad de asegurar la integración de la información generada por los VANT con los sistemas de gestión existentes, tales como plataformas de gestión de activos, sistemas de información geográfica (SIG) y herramientas de mantenimiento. Sin esta integración, el valor de los datos recolectados se ve limitado y no se aprovecha plenamente su potencial en la toma de decisiones (International Energy Agency [IEA], 2019).

Desde el punto de vista operativo, se destaca la importancia de realizar una planificación adecuada de las misiones de vuelo, considerando variables como condiciones climáticas, autonomía de los equipos, características del terreno y restricciones regulatorias. Una planificación deficiente puede afectar la eficiencia de la inspección y aumentar los riesgos asociados a la operación.

En cuanto a las perspectivas futuras, se proyecta una evolución significativa en la integración de los VANT con tecnologías emergentes. Una de las principales tendencias es la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial y visión computacional, que permitirán automatizar la detección de fallas y reducir la dependencia del análisis manual, tal como se ha evidenciado en aplicaciones recientes dentro del sector energético (Zhang & Kovacs, 2012).

Finalmente, la evolución de la normativa y la reducción progresiva de los costos tecnológicos favorecerán una mayor adopción de los VANT en el sector eléctrico, consolidándolos como una herramienta estratégica para la modernización de los sistemas de distribución.

En conjunto, las lecciones aprendidas y las perspectivas futuras evidencian que el uso de VANT continuará expandiéndose, impulsando procesos más seguros, eficientes y basados en datos, en línea con las tendencias de transformación digital del sector eléctrico (IEA, 2019).

8. Conclusiones

- ✓ La revisión realizada permite concluir que los vehículos aéreos no tripulados (VANT) se están consolidado como una herramienta tecnológica con alto potencial para la inspección y el mantenimiento preventivo de redes de distribución eléctrica, debido a su capacidad para acceder a zonas de difícil alcance, reducir la exposición del personal a condiciones de riesgo y mejorar la calidad de la información obtenida durante las inspecciones.
- ✓ Frente a los métodos tradicionales de inspección, los VANT ofrecen ventajas significativas en términos de seguridad, flexibilidad operativa, rapidez de despliegue y posibilidad de capturar datos georreferenciados. No obstante, su implementación no implica la sustitución total de las metodologías convencionales, sino más bien su complemento dentro de esquemas de mantenimiento más modernos y eficientes.
- ✓ La revisión permitió establecer que los VANT tipo multirrotor constituyen actualmente la plataforma con mayor aplicabilidad para redes de distribución eléctrica debido a su capacidad de vuelo estacionario, precisión de maniobra y facilidad para inspeccionar estructuras individuales. En contraste, las plataformas de ala fija presentan mejores desempeños cuando se requiere cubrir grandes corredores eléctricos, aunque con menor precisión en inspecciones de detalle.
- ✓ La incorporación de cámaras RGB de alta resolución, sensores termográficos y tecnologías LiDAR incrementa la capacidad para identificar defectos incipientes que difícilmente pueden detectarse mediante inspección visual convencional. La información obtenida mediante VANT presenta además ventajas adicionales al quedar georreferenciada y almacenada

digitalmente, facilitando el seguimiento histórico de los activos y fortaleciendo los programas de mantenimiento predictivo.

- ✓ La literatura revisada muestra que uno de los principales aportes de los VANT es la posibilidad de avanzar desde una inspección basada únicamente en observación visual hacia una inspección sustentada en datos térmicos, espaciales y geométricos, lo cual fortalece la toma de decisiones y la planeación del mantenimiento preventivo y predictivo.
- ✓ A pesar de sus ventajas operativas, la implementación de VANT continúa condicionada por factores técnicos y regulatorios, entre ellos la autonomía de vuelo (generalmente entre **30 y 55 minutos** por batería en equipos comerciales), las restricciones establecidas por el RAC 100, las condiciones meteorológicas y la necesidad de personal certificado para la operación y el procesamiento de la información recolectada.
- ✓ Las características geográficas de Colombia convierten a los VANT en una alternativa especialmente favorable para la inspección de redes de distribución. Sin embargo, en determinadas regiones del país la presencia de infraestructura estratégica y las condiciones de orden público pueden limitar su operación, por lo que la planeación de las misiones debe contemplar tanto el cumplimiento del marco regulatorio aeronáutico como un análisis previo de las condiciones de seguridad del territorio.
- ✓ Finalmente, se concluye que la evolución de los VANT en el sector eléctrico apunta hacia una integración progresiva de procesamiento computarizado de imágenes, inteligencia artificial, sistemas multisensores y, en algunos casos, mantenimiento asistido, lo que sugiere que su papel a futuro no se limitará a la inspección, sino que podría extenderse a procesos más avanzados de diagnóstico e intervención sobre los activos.

- ✓ La revisión bibliográfica permitió establecer que la implementación de VANT representa una alternativa técnicamente viable y más eficiente que los métodos tradicionales para la inspección de redes eléctricas. De acuerdo con indicadores reportados por la industria, una cuadrilla convencional inspecciona entre 1.6 y 3.2 kilómetros de línea por jornada, mientras que un VANT puede inspeccionar entre 8 y 16 kilómetros en el mismo periodo, lo que representa un incremento de productividad cercano al 400 %.
- ✓ Desde el punto de vista económico, aunque la implementación de VANT requiere una inversión inicial asociada a la adquisición de equipos, sensores especializados, software y capacitación del personal, su adopción permite reducir los costos operativos en el mediano y largo plazo. Esta disminución se atribuye principalmente a la optimización de los desplazamientos, la reducción del uso de vehículos y personal en campo, así como a la disminución de los tiempos de ejecución de las inspecciones. La literatura reporta reducciones en los costos operativos de entre el 30 % y el 60 %, especialmente en programas de inspección periódica y en redes ubicadas en zonas rurales o de difícil acceso.

9. Recomendaciones

- ✓ Se recomienda que las empresas de distribución eléctrica interesadas en implementar VANT inicien con proyectos piloto focalizados, orientados a activos o problemáticas específicas, como inspección termográfica de conexiones, revisión de infraestructura en zonas rurales o evaluación de vegetación en corredores críticos.
- ✓ Es conveniente priorizar, en una primera etapa, el uso de multirrotores equipados con cámaras de alta resolución y termográficas, dado que esta combinación presenta actualmente el mejor equilibrio entre aplicabilidad, facilidad operativa, calidad de información y costo relativo para redes de distribución.
- ✓ La implementación de VANT debe ir acompañada de la definición de protocolos operativos claros, que incluyan planificación de rutas, distancias mínimas de seguridad, criterios de captura de imágenes, gestión de riesgos, coordinación con centros de operación y lineamientos para el tratamiento y almacenamiento de datos.
- ✓ Se recomienda fortalecer la capacitación del personal no solo en pilotaje, sino también en interpretación de imágenes térmicas, fotogrametría, análisis de datos georreferenciados y cumplimiento normativo. La adopción exitosa de esta tecnología depende en gran medida de la formación integral del recurso humano responsable de operarla y aprovecharla.
- ✓ Resulta necesario que las empresas integren los datos obtenidos mediante VANT a sus sistemas de gestión de mantenimiento, de modo que la información recopilada no quede únicamente como registro visual, sino que pueda convertirse en insumo para priorización de intervenciones, seguimiento del estado de activos y construcción de historiales técnicos.

- ✓ Desde el punto de vista regulatorio, se recomienda que toda operación con VANT en infraestructura eléctrica se desarrolle en estricto cumplimiento de la RAC 100, así como de las disposiciones del RETIE y demás normas aplicables, especialmente cuando se trate de operaciones cercanas a redes energizadas o instalaciones críticas.
- ✓ Finalmente, se recomienda avanzar en el estudio de tecnologías complementarias como sensores LiDAR, sensores UV, procesamiento computarizado de imágenes, inteligencia artificial y mantenimiento asistido con drones, ya que estas líneas representan una oportunidad importante para la modernización del mantenimiento preventivo y la transformación digital del sector eléctrico.

Referencias bibliográficas

- Ahmed, F., Mohanta, J., y Keshari, A. (2024). Power Transmission Line Inspections: Methods, Challenges, Current Status and Usage of Unmanned Aerial Systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(2), 54. <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02061-y>
- Anaya Lagos, R., Sierra Murillo, A., y Giraldo Angulo, R. C. (2023). *Propuesta para la implementación de drones para el mejoramiento de las inspecciones técnicas de redes eléctricas de media tensión en la zona rural del sur de Cundinamarca*. Bogotá: Corporación Universitaria UNITEC.
- Arriola-Valverde, S., Barahona-Contreras, A., Miller Granados, C., y Rimolo-Donadio, R. (2016). Diseño de un sistema de adquisición de datos para fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Revista Tecnología en Marcha*, 29(4), 92-101. <https://doi.org/https://doi.org/10.18845/tm.v29i4.3040>
- Billinton, R., y Allan, R. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*. Springer Science & Business Media.
- Constantin, A., y Dinculescu, R.-N. (2019). UAV development and impact in the power system. *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, (págs. 1-5). <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759745>
- DJI Enterprise. (30 de 12 de 2020). *Ala fija o multirrotor ¿qué dron debe escoger para sus tareas de topografía aérea? [Imagen]*. DJI Enterprise: <https://enterprise.dji.com/es>
- Duo, C., Li, Y., Gong, W., Li, B., Qi, G., y Zhang, J. (2024). UAV-aided distribution line inspection using double-layer offloading mechanism. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 18(13), 2353-2372. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/gtd2.13207>

- Gonçalves, R., De Oliveira, M., Rocioli, M., Souza, F., Gallo, C., Sudbrack, D., . . . Homma, R. (2023). Drone–Robot to Clean Power Line Insulators. *Sensors*, 23(12), 5529. <https://doi.org/10.3390/s23125529>
- Hallermann, N., y Morgenthal, G. (2014). Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Proc. of 7th IABMAS, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, 661-667.
- Hassanalain, M., y Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>
- Hunini. (17 de 11 de 2024). *Mitsubishi Fixed-wing VTOL UAV front view at JASDF Gifu Air Base [Fotografia]*. Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page
- IEEE Std 2821-2020. (25 de Noviembre de 2020). *IEEE Guide for Unmanned Aerial Vehicle-Based Patrol Inspection System for Transmission Lines*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9271964>
- Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., y Yang, L. (2017). UAV-Based Oblique Photogrammetry for Outdoor Data Acquisition and Offsite Visual Inspection of Transmission Line. *Remote Sensing*, 9(3), 278. <https://doi.org/10.3390/rs9030278>
- Li, X., y Guo, Y. (2018). Application of LiDAR technology in power line inspection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 382(5), 052025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/382/5/052025>
- Luque-Vega, L. F., Castillo-Toledo, B., Loukianov, A., y Gonzalez-Jimenez, L. E. (2014). Power line inspection via an unmanned aerial system based on the quadrotor helicopter.

- MELECON 2014 - 2014 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, (págs. 393-397). <https://doi.org/10.1109/MELCON.2014.6820566>
- Mao, X., Xiang, B., Liu, Z., y Tu, S. (2022). Simulation analysis and experimental research on the safety distance of UAV inspection on transmission lines. *AIP Advances*, 12(2), 025009. <https://doi.org/10.1063/5.0083674>
- Mendu, B., y Mbuli, N. (2025). State-of-the-Art Review on the Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Power Line Inspections: Current Innovations, Trends, and Future Prospects. *Drones*, 9(4), 265. <https://doi.org/10.3390/drones9040265>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*.
- Moore, A. J., Schubert, M., y Rymer, N. (2018). Technologies and Operations for High Voltage Corona Detection with UAVs. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8585759>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered Maintenance*. Industrial Press INC.
- Nguyen, V., Jenssen, R., y Roverso, D. (2018). Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 107-120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.016>
- Ramírez Castaño, S. (2009). *Redes de distribución de energía*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7095>
- Rymer, N., Moore, A. J., y Schubert, M. (2018). Inexpensive, Lightweight Method of Detecting Coronas with UAVs. *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 452-457. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453385>

- Taqi, A., y Beryozkina, S. (2019). Overhead Transmission Line Thermographic Inspection Using a Drone. *2019 IEEE 10th GCC Conference & Exhibition (GCC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GCC45510.2019.1570521870>
- Ulloa-Loor, A. E., y Romero-Bedón, F. R. (2023). Estudio del uso de drones para el análisis termográfico en redes de distribución eléctrica. *Polo del Conocimiento*, 9(1), 49-62. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i1.6367>
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2024). *RAC 100 - Operación de Sistemas de Aeronaves no Tripuladas UAS*.
- Vargas Cáceres, N. A., y Anaya Rojas, E. T. (2023). *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. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14828>
- Wang, E., Meng, X., Yu, J., Wang, J., y Yin, L. (2025). An unmanned intelligent inspection technology based on improved reinforcement learning algorithm for power large-area multi-scene inspection. *Scientific Reports*, 15(1), 24933. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10121-y>
- Xu, L., Guo, H., Fu, Y., Wang, Z., Li, Z., Hua, Z., . . . 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. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2378/1/012088>
- Yang, L., Fan, J., Liu, Y., Li, E., Peng, J., y Liang, Z. (2020). A Review on State-of-the-Art Power Line Inspection Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(12), 9350-9365. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3031194>

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). UAV applications review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712.