



Modelo para el Cálculo de Tiempos de Inspección Incorporando UAV en Circuitos de Transmisión de Energía Eléctrica

Daniel Camilo Montoya Sierra

Juan Camilo Peña Noreña

Artículo de investigación presentado para optar al título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Asesor

Noé Alejandro Mesa Quintero, Magíster (MSc) en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita

Montoya Sierra y Peña Noreña [1]

Referencia

Estilo IEEE (2020)

- [1] D. C. Montoya Sierra y J. C. Peña Noreña, “Modelo para el Cálculo de Tiempos de Inspección Incorporando UAV en Circuitos de Transmisión de Energía Eléctrica”, Trabajo de grado especialización, Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.
-



Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Cohorte XVIII.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

RESUMEN

La inspección de líneas de transmisión es una actividad de mantenimiento indispensable para determinar su condición. Tradicionalmente, las inspecciones se realizan de manera pedestre, desde piso o con ascenso a los apoyos, lo que implica un proceso lento, especialmente en zonas de difícil acceso. Esta investigación evalúa el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) en la inspección de estos activos, en términos de optimización de tiempos respecto a la inspección pedestre.

La metodología propuesta incluye el desarrollo de un algoritmo en Python para extraer y procesar la información de geocalización y la fecha de captura de las imágenes obtenidas por los UAV. Los resultados demuestran que el uso de UAV puede disminuir en promedio el tiempo de inspección en un 43,3% y el tiempo de desplazamiento entre torres en un 52,6%, en comparación con los métodos pedestres. Los resultados fueron obtenidos a partir de inspecciones realizadas en campo para en tres líneas de transmisión de una empresa del sector eléctrico de Colombia.

Las conclusiones del estudio resaltan la eficacia de los UAV en la mejora de los tiempos de inspección y propone estudiar esta tecnología en términos de seguridad y eficiencia económica.

***Palabras clave* — Algoritmo Python, Energía eléctrica, Inspección, Líneas de transmisión, Mantenimiento basado en condición, UAV (Vehículos Aéreos No Tripulados).**

ABSTRACT

Transmission line inspection is an essential maintenance activity to determine its condition. Traditionally, inspections are carried out on foot, from the ground, or by ascending to the supports, which involves a slow process, especially in hard-to-reach areas. This research evaluates the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in inspecting these assets, in terms of time optimization compared to pedestrian inspection.

The proposed methodology includes the development of a Python algorithm to extract and process geolocation information and capture dates of images obtained by UAVs. The results demonstrate that the use of UAVs can decrease the inspection time on average by 43.3% and the travel time between towers by 52.6%, compared to pedestrian methods. The results were obtained from field inspections on three transmission lines of a Colombian electric sector company.

The study's conclusions highlight the efficacy of UAVs in improving inspection times and propose further examination of this technology in terms of safety and economic efficiency.

***Keywords* — Python Algorithm, Electrical Power, Inspection, Transmission Lines, Condition-Based Maintenance, UAV (Unmanned Aerial Vehicles).**

I. INTRODUCCIÓN

La transmisión de energía eléctrica es una de las actividades que hacen parte de los cuatro eslabones de la cadena para la prestación del servicio de energía eléctrica: generación, transmisión, distribución y comercialización [1]. La transmisión consiste en transportar energía eléctrica a través de un conjunto de líneas, módulos de conexión y transformación, interconectando la generación convencional y renovable con la distribución [2]. Mantener una alta disponibilidad y confiabilidad del sistema de transmisión es esencial para el control de costos operativos y el bienestar económico del sistema [3].

Las compañías transportadoras de energía eléctrica realizan operaciones de mantenimiento para preservar o restaurar el estado deseado de su sistema realizando actividades de inspección, mantenimiento planificado e inmediato [4]. La inspección tiene como objetivo verificar el estado de los elementos de la línea eléctrica para definir qué componentes deben mantenerse o reemplazarse, esta es una etapa muy importante para mantener alta eficiencia y seguridad en las líneas de transmisión y sus componentes [4] [5]. La torre de transmisión es uno de los componentes esenciales del sistema de transmisión de energía, es vital para soportar los conductores de la línea de transmisión, regular la tensión mecánica y mantener las distancias de seguridad eléctrica [6]. Normalmente la torre se compone de las siguientes partes principales: el cuerpo de la torre, los brazos transversales, las cadenas de aisladores, pararrayos y equipos auxiliares adicionales [7]. Las torres de transmisión son sistemas complejos; sus elementos se complementan entre sí para asumir la función de soporte que garantiza la actividad de transporte de energía eléctrica, algunas partes se ven fácilmente afectadas por el impacto ambiental y el envejecimiento, causando fallas, indisponibilidad y baja confiabilidad en el sistema [8]. Por lo tanto, es necesario inspeccionar periódicamente las torres de transmisión para asegurar su funcionamiento normal [9].

La inspección de las líneas de transmisión es realizada por linieros que se van desplazando a pie por el trazado de la línea y en ocasiones se encuentran en zonas con entornos naturales complejos o peligrosos [10]. Además, el método de inspección mediante observaciones visuales humanas es de alto riesgo, baja eficiencia y requiere de largos periodos de operación [11]. Por ejemplo, en algunos análisis realizados, se indica que la toma de la información con el método de inspección

tradicional para una torre de una línea de transmisión puede llegar a tardar un día entero [12], debido a las irregularidades de los terrenos por los que se debe desplazar el personal ejecutor y los cuidados que se debe tener al momento de realizar el ascenso a la estructura para inspeccionar los componentes (cables, tornillería, herrajes, etc.), pues está expuesto a riegos eléctricos, caídas, lesiones corporales, animales, entre otros [13].

Para optimizar los tiempos de inspección y disminuir los riesgos, se ha propuesto el uso de vehículos aéreos no tripulados, UAV (por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicles), con los cuales se han tenido resultados prometedores [14] [15] e identificado diferentes aplicaciones de los UAV en inspecciones de líneas de transmisión de energía, actualmente se utilizan para realizar levantamientos topográficos y fotogrametría en líneas de transmisión [16] y se han desarrollado procesos estandarizados. En china se realizó la definición de los requisitos técnicos y un proceso estándar para la recolección autónoma de nubes de puntos, su procesamiento y análisis, en la inspección de líneas de transmisión usando UAV [17]. La IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) definió una guía en la cual se establece requisitos para sistemas de inspección con UAV en líneas de transmisión y analiza sus funciones principales [18].

En esta investigación se presenta un método para calcular el tiempo de inspección con el uso de UAV en líneas de transmisión de energía eléctrica en Colombia, en 85,4 kilómetros de longitud, 172 torres ubicadas en diferentes regiones del país y contextos operativos variados. La metodología consta de un proceso de recolección de información con UAV, depuración y cálculo de tiempos con un algoritmo desarrollado en Python.

II. METODOLOGÍA

En la inspección con el uso de UAV a los activos de transmisión que son objeto de esta investigación, se aplicó una estrategia compuesta por tres actividades: preoperacionales, levantamiento de información y análisis, en la (**Fig. 1**) se presenta un flujo del proceso de inspección empleado.

Preoperacionales: realizadas para verificar que todos los elementos, equipos y recursos necesarios en la ejecución de la actividad cumplen con los requerimientos técnicos y específicos de la regulación colombiana, además de verificar condiciones meteorológicas y sociales seguras, para el sobrevuelo del UAV.

Levantamiento de información: registro fotográfico que se realiza a los componentes apoyo-vano, en el que se debe considerar la disposición de las torres o postes, el tipo de aislamiento y los demás componentes del conjunto, seguir una secuencia optimizada, que permita el uso eficiente de las baterías, respetando las distancias mínimas de seguridad, con el fin de prevenir cualquier posible interferencia por electromagnetismo o contacto con los activos.

Análisis: la información obtenida en campo es almacenada y dispuesta para la evaluación de la condición de los activos registrados, a fin de determinar las acciones de mantenimiento correctivo a las que haya lugar según cada caso específico.

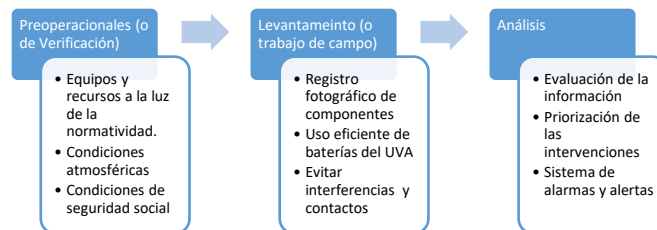


Fig. 1. Flujo del proceso de inspección

Nota: fuente elaboración Propia.

Para la extracción y el tratamiento de la información que permite el análisis del tiempo de inspección con el uso de UAV, se creó un código de Python que ingresa a los metadatos de cada

registro fotográfico y toma la información de geolocalización, fecha y hora de la captura de las imágenes en formato .jpg resultantes de cada actividad.

La extracción de la información por medio del código de Python tiene como flujo la secuencia la (Fig. 2), con el cual, después de la captura de la información en campo y su almacenamiento, se importan los módulos, pandas, os y PIL, se obtiene la ruta del directorio actual y se almacena en la variable “path”. A partir de esto se crea una lista para guardar los nombres de los archivos, recorrer el directorio y sus subdirectorios con la función “os.walk”, y agregar los nombres de los archivos a la lista.

Posteriormente se crea un “dataframe” vacío con las columnas ‘Imagen’, ‘Latitud_N’, ‘Longitud_W’, ‘Altitud’ y ‘Fecha’; este importa el módulo “ExifTags” de “PIL”, que permite acceder a los metadatos de las imágenes. Por último, se corre la lista con un “bucle for” con la que se abre cada imagen y se almacena en la variable “img”, obtiene los metadatos de la imagen y los almacena en un diccionario, crea y concatena un “dataframe” temporal, usando la lista “values” como fila y las columnas del “dataframe” original, guarda el “dataframe” resultante en un archivo de Excel, especificando la ruta donde se quiere guardar.

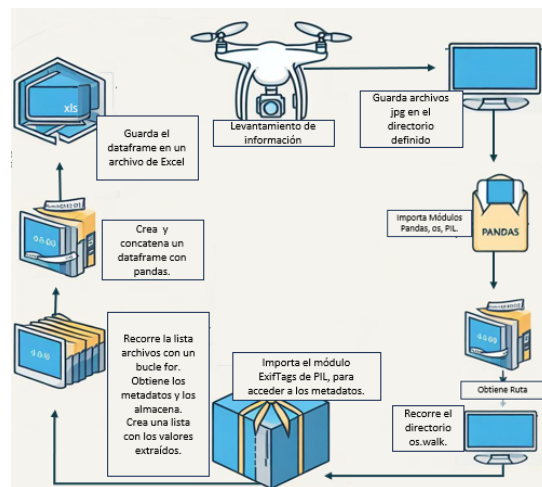


Fig. 2. Flujo de secuencia de extracción de la información

Nota: fuente elaboración Propia.

Cálculo de tiempos y distancia

Para la identificación del activo inspeccionado se toman las coordenadas extraídas de cada foto, mientras que para el cálculo del tiempo de inspección se usa la fecha y hora de la captura. El tiempo transcurrido entre la primera y la última foto asociada a cada conjunto apoyo-vano determinan el tiempo de inspección; para calcular el tiempo de desplazamiento entre cada conjunto se toma la fecha y hora de la captura de cada registro y se calcula el tiempo transcurrido entre la última foto asociada al conjunto apoyo-vano y la primera del activo siguiente.

Para determinar los rendimientos y tiempos de inspección desde piso, en circuitos de transmisión, y escalada de la torre, en líneas de alta tensión, se realizó el cálculo estadístico de registros históricos de actividades de inspección pedestre.

Para determinar la longitud de los vanos entre apoyos, se realizó un algoritmo en Python usando librerías disponibles para el cálculo de distancias geodésicas y el manejo de datos. Esta herramienta lee el archivo Excel con las coordenadas obtenidas en los metadatos de los registros fotográficos, almacenándolos en un DataFrame, crea un diccionario que contiene nombres y coordenadas (X, Y) de cada uno de los apoyos, organiza estos puntos usando la fecha y hora de cada registro, y después define una función que calcula la distancia entre un punto de referencia N y el siguiente N+1, luego el punto N+1 y el punto N+2, hasta cubrir todos los puntos, estableciendo la distancia de cada vano.

Para esta investigación se usaron los datos de actividades de inspección con el uso de UAV y de manera pedestre, en tres líneas de transmisión ubicadas en diferentes zonas de Colombia:

- Zona norte: contexto agresivo en términos de corrosión, con 82 conjuntos torre-vano, a 500 kV.
- Zona oriental: sector montañoso, con 55 apoyos con sus vanos, a 230 kV.
- Zona del Eje Cafetero: región montañoso, con 35 torres y vanos, a 500 kV.

III RESULTADOS

En la actividad de análisis a los datos obtenidos en las inspecciones con UAV de las tres líneas de transmisión usadas en esta investigación, se realizó el tratamiento y extracción de 23.813 registros fotográficos (metadatos), en promedio 138 por conjunto torre-vano. Con esta información se geolocalizó cada registro, como se presenta en la (**Fig. 3**).

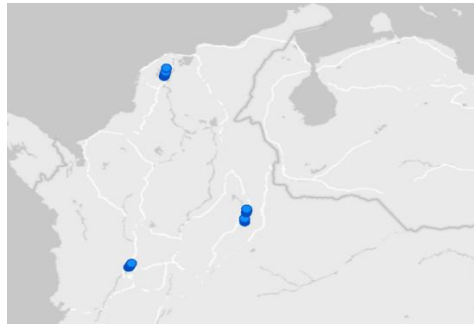


Fig. 3. Geolocalización de los registros fotográficos

Nota: fuente elaboración Propia

En la **TABLA I**, se presentan los resultados obtenidos en los cálculos realizados del tiempo de inspección de las líneas de transmisión analizadas en este trabajo (85.4 kilómetros), la comparación entre la actividad realizada de manera pedestre respecto a la ejecutada con uso de UAV y los porcentajes de rendimiento calculados con la incorporación de esta tecnología.

TABLA I. RESULTADOS DE LAS INSPECCIÓN PEDESTRE Y CON UAV

Tipo de inspección	Rendimiento promedio diario (Torres)	Tiempo de inspección (Minutos)	Tiempo de desplazamiento entre torres (minutos)
Inspección pedestre	6,7	39,6	22,6
Inspección UAV	11,9	22,1	10,7
% Rendimiento	78%	43,33%	52,65

El uso de las coordenadas de los registros fotográficos permitió graficar la geolocalización de cada foto, estableciendo el patrón de vuelo ejecutado en cada activo, identificando dos tipos principales, de suspensión y retención.

En la (**Fig. 4**), se presenta el patrón de vuelo identificado en la inspección de las torres de suspensión, el cual tiene 3 concentraciones principales de puntos y otros con mayor dispersión a cada uno de los vanos, también se puede observar la interfaz diseñada para ver los tiempos calculados en cada activo.



Fig. 4. Geolocalización de los registros fotográficos en una torre de suspensión

Nota: fuente elaboración Propia

En la (**Fig. 5**) se muestra el patrón de vuelo identificado en la inspección de las torres de retención, en el cual se pueden observar 6 concentraciones principales de puntos en forma “I” y otros con mayor dispersión a cada uno de los vanos.



Fig. 5. Geolocalización de los registros fotográficos en una torre de retención

Nota: fuente elaboración Propia

IV. DISCUSIÓN

La investigación realizada propone un modelo para calcular los tiempos de inspección de líneas de transmisión Incorporando UAV, sus resultados demuestran la reducción de tiempos de inspección y desplazamiento entre torres, potenciando oportunidades de investigación en aspectos como el análisis de posibles eficiencias financieras, optimización de costos y la exploración de nuevas aplicaciones para la tecnología UAV en diferentes campos del sector eléctrico en Colombia.

En esta investigación se logró concluir que el uso de UAV en inspecciones de líneas de transmisión, reduce los riesgos asociados a la seguridad de los linieros, por lo que se propone realizar un trabajo futuro con un enfoque detallado en este aspecto, incorporando medidas de seguridad que cubran nuevos riesgos como la ergonomía de los pilotos, y aspectos sociopolíticos que puedan impactar la ejecución de las actividades. En las inspecciones realizadas para esta investigación se realizaron comunicaciones formales a las autoridades y comunidades del área de influencia, y se tramitaron ingresos y acompañamientos a las zonas privadas.

En este trabajo se identifica una potencial integración entre el uso de UAV en inspecciones de líneas de transmisión y nuevas tecnologías para el análisis de las imágenes y videos recolectados, para identificar fallas y posibles deterioros en la condición de los activos de manera oportuna. En otros estudios se evidencia el uso de esta tecnología emergente empleando inteligencia artificial [5] [19], usando los grandes volúmenes de datos de imágenes y videos de las inspecciones realizadas, para desarrollar modelos predictivos que identifican patrones de deterioro y anticipen posibles fallos en la infraestructura. Esto no solo optimiza los procesos de mantenimiento, reduciendo el tiempo y los costos asociados, sino que también contribuye significativamente a la seguridad y la fiabilidad de las redes de transmisión eléctrica.

V. CONCLUSIONES

El rendimiento diario de inspección de los conjuntos torre-vano, de las líneas de transmisión analizadas en este trabajo creció en un 78% con la inclusión de UAV en la actividad.

El tiempo de inspección promedio de cada torre de transmisión usando UAV disminuyó en un 43,3% comparado con la actividad realizada de manera pedestre.

Los tiempos de desplazamiento entre las torres, de las líneas de transmisión analizadas en este trabajo durante las actividades de inspección, tuvieron una reducción del 52,6%.

El uso de UAV en las actividades de inspección realizadas en este trabajo, representan un total de 113 horas de reducción en el tiempo de exposición al riesgo eléctrico y de caída de altura al personal ejecutor, producto de no ascender a las torres.

Los algoritmos diseñados para este trabajo fueron efectivos y permitieron realizar los cálculos propuestos.

REFERENCIAS

- [1] S. d. S. P. Domiciliarios, «Diagnóstico de la actividad de transmisión de energía eléctrica 2021,» Bogotá, 2022.
- [2] M. C. M. M. H. I. D. Sebastian Zapata, «Investigating the concurrence of transmission grid expansion and the dissemination of renewables,» *Energy*, vol. 2076, 2023.
- [3] M. a. M. E. Mahdavi, «Evaluating the effect of load growth on annual network losses in TNEP considering bundle lines using DCGA,» *Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng.*, vol. 3, n° 4, pp. 1-9, 2011.
- [4] S. Y. Nof, Handbook of industrial Robotics, 2nd Edition Endorsed by the robotic industries association, 1999.
- [5] X. a. M. X. a. J. H. a. C. J. Liu, «Data analysis in visual power line inspection: An in-depth review of deep learning for component detection and fault diagnosis,» *Annual Reviews in Control*, vol. 50, pp. 253-277, 2020.
- [6] B. a. V. A. a. C. M. a. G.-A. D. Conde, «Geometrical issues on the structural analysis of transmission electricity towers thanks to laser scanning technology and finite element method,» *Remote sensing*, vol. 7, n° 9, pp. 11551-11569, 2015.
- [7] Z. a. J.-b. L. a. L. J. a. A.-r. X. He-yan, «Type Selection Design And Structural Optimization Of 66 Kv Transmission Line Tower,» de *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, IEEE, 2019, pp. 5690-5694.
- [8] C. a. L. C. a. Z. H. a. H. B. Zhang, «A review on the aging performance of direct current cross-linked polyethylene insulation materials,» de *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, IEEE, 2015, pp. 700-703.
- [9] Z. a. M. X. a. X. Z. a. J. H. a. C. J. Liu, «Power tower inspection simultaneous localization and mapping: A monocular semantic positioning approach for uav transmission tower inspection,» *Sensors*, vol. 22, n° 19, p. 7360, 2022.
- [10] X. a. L. Z. a. M. X. a. L. Z. a. W. K. a. X. X. Peng, «UAV power line safety inspection system and key technologies,» *Remote Sens. Inf*, pp. 51-57, 2015.

-
- [11] L. a. L. k. M. a. A. E. a. H. ., J. a. K. M. a. J. A. a. K. A. a. H. T. Matikainen, «Remote sensing methods for power line corridor surveys,» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, vol. 119, pp. 10-31, 2016.
- [12] L. a. G. J. a. B. K. a. B. S. a. M. H. Fahmani, «Modelling of very high voltage transmission lines inspection's quadrotor,» *SN Applied Sciences*, vol. 2, n° 8, p. 1425, 2020.
- [13] R. S. D. O. M. R. M. S. F. G. C. S. D. T. P. C. B. H. R. Gonçalves, «Drone-Robot to Clean Power Line Insulators,» *Sensors*, vol. 23, n° 12, p. 5529, 2023.
- [14] L. F. a. C.-T. B. a. L. A. a. G.-J. L. E. Luque-Vega, «Power line inspection via an unmanned aerial system based on the quadrotor helicopter,» de *MELECON 2014-2014 17th IEEE Mediterranean electrotechnical conference*, IEEE, 2014, pp. 393-397.
- [15] J. a. L. L. a. W. B. a. C. X. a. W. Q. a. Z. T. Zhang, «High speed automatic power line detection and tracking for a UAV-based inspection,» de *2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering*, IEEE, 2012, pp. 266-269.
- [16] A. S. a. H. B. B. S. a. T. H. B. a. M. K. Surya, «Review of Aerial Vehicle Technology for Transmission Line Inspection in Indonesia,» de *2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, IEEE, 2020, pp. 49-54.
- [17] Q. a. W. S. a. L. L. a. L. X. a. L. Z. a. G. W. a. G. X. a. T. Q. a. H. C. Wen, «Technical Requirements for Autonomous Point Cloud Collection and Autonomous Inspection of Unmanned Aerial Vehicle,» de *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, IEEE, 2021, pp. 3421-3424.
- [18] I. S. 2821-2020, IEEE Guide for Unmanned Aerial, IEEE, 2020, pp. 1-49.
- [19] Y. a. R. J. a. W. S. a. C. L. a. H. L. Lu, «Lightweight YOLOx-based transmission line insulators and their defects detection,» de *Fifteenth International Conference on Graphics and Image Processing (ICGIP 2023)*, SPIE, 2024, p. 13089.