

Automatización y Modernización del Mantenimiento de Sistemas Eléctrico: Integración de Drones, GIS y Análisis de Datos para la Gestión de Redes

Alejandro López Aguirre
Subgerencia de distribución
Empresa de Energía del Quindío - EDEQ
Armenia, Colombia
alejandro.a.lopez@edeq.com.co
+57 3116882119

Resumen — Este trabajo presenta una metodología efectiva para mejorar el mantenimiento de activos críticos en sistemas eléctricos de distribución, combinando drones, Sistemas de Información Geográfica (GIS) y automatización. La metodología se enfoca en identificar y segmentar con precisión las cabeceras de circuitos, zonas críticas que, en caso de fallas, pueden causar interrupciones significativas en el servicio. A partir del análisis de conectividad de la red, estas zonas se mapean en un GIS, y un bot automatizado genera órdenes de trabajo basadas en estos datos. El uso de drones permite realizar diagnósticos rápidos y precisos, acelerando la detección de problemas y mejorando las intervenciones preventivas. Los resultados demuestran una mejora en la asignación de recursos y en la eficiencia operativa, lo que confirma que la integración de estas tecnologías puede transformar la gestión del mantenimiento, asegurando la continuidad del servicio eléctrico.

Abstract — This paper presents an effective methodology to enhance the maintenance of critical assets in electrical distribution systems by integrating drones, Geographic Information Systems (GIS), and automation. The methodology focuses on accurately identifying and segmenting circuit headers, critical zones where failures can lead to significant service interruptions. Through network connectivity analysis, these zones are mapped in a GIS, and an automated bot generates work orders based on this data. The use of drones enables quick and precise diagnostics, speeding up problem detection and improving preventive interventions. The results show a significant improvement in resource allocation and operational efficiency, confirming that the integration of these technologies can transform maintenance management, ensuring the continuity of electrical service.

Palabras clave: Optimización de Recursos en Mantenimiento, Sistemas de Información Geográfica (GIS), Drones en Inspección Eléctrica, Automatización de Órdenes de Trabajo.

I. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento eficiente de activos críticos en sistemas eléctricos de distribución es un desafío cada vez más relevante, especialmente en un contexto donde la demanda de continuidad del servicio y la calidad en la entrega de energía son más exigentes que nunca. Las cabeceras de los circuitos, que abarcan los tramos de red entre el interruptor del circuito y los primeros elementos tele gestionados o de transferencia, representan áreas particularmente críticas debido a su vulnerabilidad a fallas que pueden afectar a un gran número de usuarios. En este escenario, los métodos tradicionales de mantenimiento, que dependen en gran medida de inspecciones manuales y procesos reactivos, han demostrado ser insuficientes para gestionar estas zonas de alta criticidad de manera proactiva y eficiente.

Este trabajo se propone como respuesta a la necesidad de optimizar la gestión y el mantenimiento de estas infraestructuras críticas. La metodología desarrollada integra herramientas de automatización, drones y Sistemas de Información Geográfica (GIS) para mejorar significativamente la eficiencia operativa, reducir los tiempos de inactividad, y garantizar la continuidad del servicio. La hipótesis central de este estudio es que la combinación de estas tecnologías permite una identificación precisa de las cabeceras de los circuitos, y al tener correctamente segmentado los circuitos, se pueden hacer intervenciones más rápida y efectiva en las áreas más vulnerables de la red.

El principal aporte de este trabajo reside en la implementación de un bot automatizado que genera órdenes de trabajo basadas en la criticidad de los tramos de la red, identificado mediante

un análisis detallado de la conectividad y el mapeo geoespacial de las cabeceras. Adicionalmente, el uso de drones para el diagnóstico visual de la red ha demostrado ser una estrategia eficaz para acelerar la identificación de problemas potenciales y mejorar la precisión en la planificación de las intervenciones preventivas. Este enfoque no solo optimiza la asignación de recursos, sino que también mejora la coordinación de las actividades de mantenimiento, reduciendo el tiempo de respuesta ante fallas.

La metodología se desarrolló en varias etapas, comenzando con la segmentación de las cabeceras de los circuitos a través de un modelo que extrae información de la conectividad de los elementos. Posteriormente, se utilizó un sistema GIS para mapear estas áreas, lo que permitió una visualización detallada y facilitó la generación automática de órdenes de trabajo mediante el bot. Finalmente, los drones se emplearon para realizar un diagnóstico efectivo de la red, complementado por una revisión manual de las imágenes capturadas para identificar y planificar las intervenciones necesarias.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La modernización y optimización del mantenimiento de activos críticos en sistemas eléctricos de distribución ha sido un área de investigación activa en los últimos años, especialmente en el contexto de la integración de tecnologías emergentes como los drones, el uso de Sistemas de Información Geográfica (GIS) y el análisis de datos. Esta combinación de herramientas ofrece la posibilidad de transformar significativamente los procesos de mantenimiento, haciéndolos más eficientes, precisos y proactivos.

Uno de los estudios clave en este campo es el de Stefan [3], que explora la automatización de operaciones en redes inteligentes mediante sistemas basados en datos espacio temporales. Este trabajo destaca la integración de GIS como una herramienta esencial para optimizar el monitoreo y la gestión de activos en redes de distribución, permitiendo una supervisión más precisa y una respuesta rápida ante posibles fallas.

Otro aporte importante es la revisión realizada por Quamar [4], que examina el uso de drones integrados con GIS. Esta revisión subraya cómo la combinación de estas tecnologías puede facilitar la identificación de áreas problemáticas y mejorar la planificación del mantenimiento en sistemas eléctricos de distribución. El enfoque en la recopilación y análisis de datos en tiempo real es especialmente relevante para asegurar la continuidad operativa y la reducción de tiempos de inactividad.

Davis [5], por su parte, analiza cómo la integración de tecnologías como LiDAR y el aprendizaje automático puede fortalecer la resiliencia de las redes eléctricas y optimizar la recuperación tras eventos climáticos adversos. Aunque su

enfoque principal está en la respuesta a emergencias, las lecciones aprendidas son aplicables a la planificación y ejecución del mantenimiento en sistemas de distribución, donde la preparación y la capacidad de respuesta son críticas.

Igwe [2] estudia la detección de fallas utilizando imágenes de alta resolución y GIS, enfatizando la importancia de una infraestructura robusta para la gestión del mantenimiento en sistemas eléctricos. Aunque el estudio se centra en sistemas de transmisión, los principios subyacentes de integración tecnológica para la identificación precisa de fallas son directamente aplicables a sistemas de distribución.

Finalmente, el trabajo de Snow et al. [1] pone en evidencia la relevancia de utilizar herramientas de análisis de datos y GIS para mapear y gestionar infraestructuras críticas. A pesar de que este estudio incorpora algoritmos avanzados para la identificación automática de activos, subraya la importancia de una gestión integrada que podría ser adaptada a escenarios donde se requiere una intervención humana en la toma de decisiones.

La revisión bibliográfica evidencia un consenso en cuanto a la relevancia de la integración de drones, GIS y sistemas de procesamiento de datos para mejorar el mantenimiento de sistemas eléctricos de distribución. Los estudios revisados demuestran cómo estas tecnologías pueden ser aplicadas para optimizar la gestión de activos, mejorar la eficiencia y reducir los tiempos de inactividad, estableciendo una base sólida para futuros desarrollos en esta área, en donde puede aportar la metodología propuesta en este documento.

III. METODOLOGÍA

El presente estudio propone una metodología integral para modernizar el mantenimiento de redes eléctricas de distribución, combinando herramientas avanzadas de análisis de datos, sistemas de información geográfica (GIS), y tecnología de drones. La metodología se centra en las cabeceras de los circuitos, que contienen activos críticos en la infraestructura eléctrica de un sistema de distribución. Estas cabeceras, que incluyen los tramos de red que se encuentran ubicados desde la cabecera del circuito hasta los primeros reconectores y elementos de transferencia, son esenciales para garantizar la fiabilidad y continuidad del suministro eléctrico.

La metodología se divide en cinco fases principales, cada una de las cuales se implementa mediante el uso de tecnologías específicas para optimizar la gestión de activos críticos en las redes eléctricas.

A. Extracción y Procesamiento de Datos de Conectividad.

En la primera fase, el enfoque se centra en la extracción y análisis de información del Modelo Digital de Energía (MDE), que se trata de una base de datos que contiene detalles sobre la conectividad eléctrica de todos los activos del sistema

de distribución, tales como elementos de corte, transformadores y tramos de red. Esta fase es crucial para identificar la trayectoria eléctrica de cada activo desde su punto de ubicación hasta su punto de alimentación, es decir, el interruptor del circuito.

El proceso comienza con la extracción de datos del MDE mediante un modelo desarrollado en Python que accede a las bases de datos basadas en Oracle, diseñado para acceder y procesar la información. Este modelo analiza la conectividad eléctrica entre los diferentes activos, por lo que se puede trazar de manera precisa la trayectoria eléctrica desde cualquier activo específico hasta el interruptor del circuito.

Una vez construida la conectividad de la red, se lleva a cabo un análisis de datos para identificar los activos que forman parte de la cabecera de cada circuito. Este análisis se realiza en base a un conjunto de reglas definidas que toman en cuenta la ubicación de reconectores y elementos de corte de transferencia, los cuales actúan como puntos de delimitación dentro de la red. Al aplicar estos criterios, se logra segmentar de manera efectiva la red, destacando los tramos que comprenden las cabeceras y separándolos del resto del sistema.

Para una mayor claridad, en la Figura 1 se observa un diagrama unifilar de un circuito de distribución de EDEQ, denominado 303-26, en donde se puede identificar la conectividad eléctrica en el circuito, iniciando por el interruptor de la cabecera resaltado en color rojo, hasta los elementos de corte finales, y conexiones de transferencia con otros circuitos en naranja. A través de la metodología se puede identificar como la cabecera del circuito está compuesta por los elementos que están entre el 303-26, hasta las: R-116, R-054, S-565, S-1475, R-234 y R-083, los cuales se encuentran resaltados en color magenta.

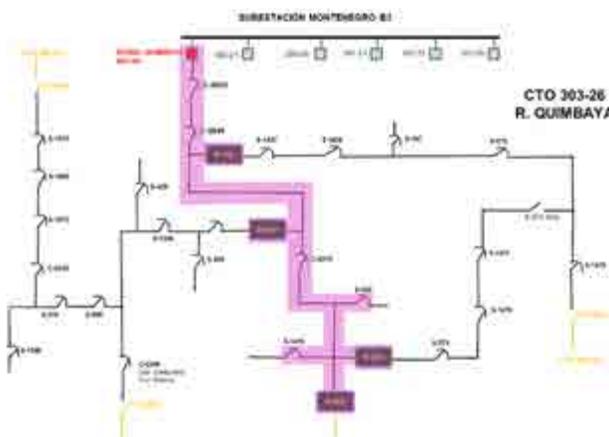


Figura 1: Diagrama unifilar del circuito 303-26 con la marcación de la cabecera.

B. Georreferenciación y Visualización mediante GIS.

Una vez identificados los tramos de red, se utiliza un sistema GIS para mapear las zonas de intervención. Esta fase permite visualizar geográficamente los segmentos de red, facilitando la planificación y gestión de las intervenciones, el aplicativo GIS utilizado para este caso de estudio permite publicar el mapa en una capa web de fácil accesibilidad para el personal, por lo que pueden consultar en cualquier momento el mapa, y además ubicarse espacialmente respecto a la red. Este paso es crucial para priorizar las zonas de intervención y preparar la fase de diagnóstico e intervenciones.

C. Automatización de la Creación de Órdenes de Trabajo.

En la tercera fase, se desarrolla y emplea un bot en Python basado en la librería Selenium para automatizar la generación de órdenes de trabajo (OT) en el aplicativo de gestión de activos empresarial (EAM), el cual mediante un proceso de web scraping permite diligenciarlas de manera masiva las ordenes de trabajo. Para cargar las OT el bot se basa en los datos procesados y georreferenciados, emitiendo ordenes específicas para cada zona identificada. Esta automatización reduce el tiempo necesario para la preparación y organización de las tareas de diagnóstico, asegurando que se aborden de manera oportuna y eficiente. El proceso de integración del bot con el sistema de gestión de activos permite sincronizar las actividades planificadas con las operaciones de diagnóstico en campo.

D. Diagnóstico de Red mediante Drones.

El diagnóstico de las redes eléctricas se lleva a cabo mediante drones equipados con cámaras de alta resolución y de termografía. Los drones sobrevuelan las zonas georreferenciadas, capturando imágenes y datos, que posteriormente son analizados por personal experto para identificar necesidades de intervención eléctrica y forestal. Este enfoque permite una evaluación precisa y exhaustiva de las condiciones de la red, identificando posibles fallas por elementos fatigados o en mal estado, puntos de sobrecalentamiento, vegetación en cercanía o en contacto con la red, y otros riesgos que puedan comprometer la integridad del sistema eléctrico.

E. Generación y Seguimiento de Órdenes de Trabajo para la Intervención

La última fase implica la generación de órdenes de trabajo específicas para abordar las necesidades identificadas durante el diagnóstico. Estas órdenes se clasifican en tres categorías: intervenciones eléctricas, intervenciones forestales, e intervenciones de guadales. La clasificación y seguimiento de las órdenes se realizan mediante un sistema de seguimiento que permite monitorear el progreso de cada tarea, garantizando la ejecución de las ordenes de trabajo. Además, se implementa un sistema de retroalimentación

ORGANIZA:

APOYA:



continúa para ajustar y optimizar las estrategias de mantenimiento basadas en los resultados obtenidos.

IV. RESULTADOS

El desarrollo e implementación del enfoque metodológico basado en la integración de análisis de datos, GIS, y drones para el mantenimiento de activos críticos en sistemas eléctricos de distribución ha permitido establecer un proceso más organizado y eficiente en la gestión de intervenciones. La metodología está siendo actualmente implementada en la Empresa de Energía del Quindío (EDEQ), una empresa de distribución de energía de Colombia, situada en la zona media de Colombia, en una región conocida por su producción cafetera y un creciente ecoturismo. La empresa cuenta con cerca de 5.283km de red, repartidos en 2.730km en nivel de tensión 1, 2.399km en nivel de tensión 2, 137km en nivel de tensión 3, y 17km en nivel de tensión 4, con un total de 221.000 clientes.

Los principales logros de este trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

A. Identificación y Segmentación Eficiente de Activos Críticos.

El modelo desarrollado demostró una alta efectividad en la extracción de información de conectividad y en la segmentación precisa de las cabeceras de los circuitos, lo que permitió identificar con claridad los tramos de red que se sitúan entre los interruptores y los primeros reconectores y elementos de transferencia de cada circuito. Estos tramos son de especial relevancia debido a su alta criticidad, ya que cualquier falla no programada en estas áreas puede generar una interrupción significativa del servicio para todos los usuarios conectados a dichos circuitos.

La metodología fue aplicada en 36 de los 65 circuitos de nivel de tensión 2 operados por EDEQ, cubriendo aproximadamente 2.050 km de red. Tras la segmentación, se determinó que las cabeceras de estos circuitos suman alrededor de 290 km, representando el 14.3% de la longitud total de los circuitos analizados y el 12.3% de la red total de nivel de tensión 2. Esto indica que las cabeceras, a pesar de estar en una porción relativamente pequeña de la red, concentran una importancia estratégica debido a su criticidad.

La relevancia de esta segmentación radica en que cualquier interrupción en las cabeceras puede afectar a todos los usuarios del circuito, impactando directamente en los indicadores de calidad del servicio, como el SAIFI y el SAIDI. La restauración del servicio dependerá de las transferencias que se puedan realizar a través de otros circuitos, un proceso que implica la identificación precisa de la falla, su aislamiento, y la ejecución de maniobras mediante equipos tele controlados o personal en campo.

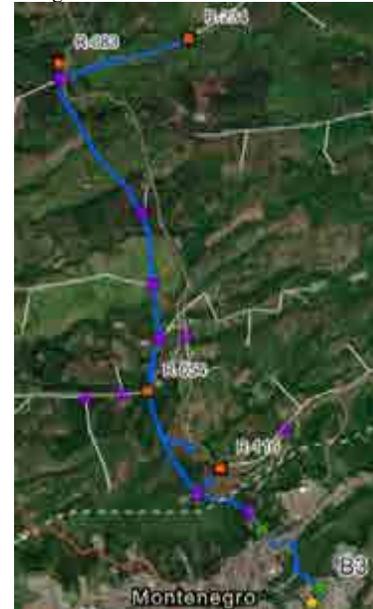
En el caso del sistema EDEQ, los circuitos donde se aplicó esta metodología atienden a cerca de 79.000 usuarios, lo que representa el 34% del total de usuarios del sistema. Identificar y segmentar estas zonas críticas permite enfocar los esfuerzos de mantenimiento y respuesta en áreas clave que, aunque representan solo una pequeña fracción de la red, tienen el potencial de afectar a un gran número de usuarios en caso de fallas.

Es crucial señalar que, si bien los 290 km de cabeceras no concentran el 34% de los usuarios del sistema, cualquier falla en este tramo reducido de la red impactaría el servicio de todo el circuito, y podría afectar significativamente a un gran número de usuarios, dada la criticidad de estos tramos en la estructura del sistema.

B. Mapeo Geoespacial de Áreas de Intervención.

Después del proceso de segmentación e identificación de las zonas correspondientes a las cabeceras de los circuitos, se utilizó un sistema GIS para mapear con éxito las áreas de intervención. Este mapeo proporcionó una visualización clara y detallada de las áreas críticas, permitiendo que todos los involucrados en el proceso validen la información geográfica e identifiquen de manera precisa los segmentos de red que forman parte de las cabeceras.

Figura 2: Cabecera del circuito 303-26



La Figura 2 ilustra un ejemplo del circuito 303-26, donde los tramos de red críticos se resaltan en color azul, mientras que los tramos que no forman parte de la cabecera del circuito se muestran en color blanco, siendo claramente demarcado por los elementos de corte. Y en la Figura 3 se puede ver la totalidad del circuito, en donde se puede ver la proporción de

la cabecera con respecto a la totalidad del circuito. Este enfoque visual facilita la comprensión y validación de las áreas críticas por parte de todo el equipo, tanto en oficina como en campo

Figura 3: Topología completa de circuito 303-26



C. Automatización en la Generación de Órdenes de Trabajo y Diagnóstico de Intervenciones.

La implementación de un bot automatizado para la generación de órdenes de trabajo ha optimizado significativamente el proceso de diagnóstico y planificación de intervenciones en la red eléctrica. El bot, alimentado por los datos de conectividad y segmentación, automatiza la creación de órdenes de trabajo, permitiendo generar órdenes de diagnóstico para cada una de las zonas.

El uso de drones para la inspección de la red ha demostrado ser altamente eficiente, permitiendo un diagnóstico más rápido y preciso en comparación con los métodos tradicionales de recorridos a pie. Los drones han reducido el tiempo necesario para evaluar las condiciones de los activos críticos, mejorando la velocidad y la precisión en la detección de problemas potenciales.

Tras la captura de imágenes por los drones, se realiza una revisión manual de las mismas para identificar las necesidades de intervención. Este proceso permite generar órdenes de trabajo específicas para la ejecución de actividades forestales y eléctricas preventivas, enfocadas en las áreas de mayor riesgo. La combinación de automatización en la planificación y el uso de drones en el diagnóstico ha resultado en una mayor eficiencia operativa, reduciendo el tiempo de respuesta y mejorando la efectividad de las intervenciones preventivas en la red.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo ha demostrado que la integración de un bot automatizado para la generación de órdenes de trabajo, combinado con el uso de drones y un sistema GIS, puede transformar significativamente el proceso de mantenimiento en sistemas eléctricos de distribución. La metodología propuesta permitió una identificación y segmentación precisa de las cabeceras de los circuitos, la cual resultó ser fundamental para enfocar las intervenciones en las áreas de mayor criticidad, mejorando así la eficiencia operativa y la gestión de recursos.

Los resultados obtenidos mostraron que, aunque las cabeceras representan una porción relativamente pequeña de la red, alrededor del 14.3% de la longitud total de los circuitos analizados, su criticidad es elevada, ya que cualquier interrupción en estos tramos afecta a un número considerable de usuarios. Y, el mapeo geoespacial de estas áreas críticas, accesible en tiempo real, ha mejorado la precisión en la asignación de recursos y la coordinación de las actividades de mantenimiento, permitiendo una toma de decisiones más informada y oportuna.

La automatización en la generación de órdenes de trabajo, seguida por el diagnóstico mediante drones, ha aumentado la velocidad y precisión con la que se identifican problemas en la red. Aunque las imágenes capturadas por los drones requieren una revisión manual, este enfoque ha demostrado ser más eficiente que los métodos tradicionales de inspección a pie, lo que se traduce en un tiempo de respuesta reducido y una mejora en la efectividad de las intervenciones preventivas.

Los resultados de este trabajo son aplicables principalmente en la gestión y mantenimiento de redes de distribución eléctrica, donde la identificación precisa de áreas críticas y la automatización en la planificación y ejecución de intervenciones pueden tener un impacto significativo en la continuidad del servicio y la satisfacción del cliente.

VI. TRABAJOS FUTUROS

Para futuras trabajos se recomienda explorar la integración de técnicas de inteligencia artificial para la automatización de la revisión de imágenes capturadas por drones, lo que podría reducir aún más el tiempo y los recursos necesarios para el diagnóstico. Además, sería beneficioso realizar estudios comparativos para cuantificar de manera más precisa los beneficios en términos de ahorro de costos y reducción de tiempos de inactividad, ampliando el análisis a diferentes contextos operativos.

VII. REFERENCIAS

- [1] M. S. Snow, R. Ma, y D. M. Flewelling, "Utility Asset Identification from Drone Imagery Using Faster-RCNN," Redlands University, Redlands, CA, USA, 2021.
- [2] C. F. Igwe, "Automatic Vision Based Fault Detection on Electricity Transmission Components Using Very High-Resolution Imagery and GIS," Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2021.
- [3] M. Stefan, "Automation of Smart Grid Operations Through Spatio-Temporal Data-Driven Systems," Aalborg University, Aalborg, Dinamarca, 2019.
- [4] M. M. Quamar, B. Al-Ramadan, K. Khan, y M. Shafiullah, "Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology—A Review," Remote Sensing, vol. 15, no. 20, p. 5039, 2023.
- [5] M. A. Davis, "Improving Electrical Power Grid Resiliency and Optimizing Post-Storm Recovery Using LiDAR and Machine Learning," University of Texas, Austin, TX, USA, 2020.