

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

Alejandro López Aguirre

Email: alejandro.a.lopez@edeq.com.co

Armenia, Quindío – Colombia

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.

I. Introducción

La gestión de activos críticos en sistemas eléctricos de distribución es esencial para garantizar la sostenibilidad, resiliencia y calidad del servicio eléctrico. En un contexto donde los usuarios exigen mayor continuidad y confiabilidad, las cabeceras de circuitos, que comprenden los tramos entre el interruptor del circuito y los primeros elementos tele gestionados, emergen como activos estratégicos debido a su alta criticidad. Una falla en estas zonas puede comprometer la operación de todo un circuito, afectando potencialmente a miles de usuarios y deteriorando los indicadores de calidad del servicio.

Los enfoques tradicionales de mantenimiento, basados en inspecciones manuales y respuestas reactivas, han demostrado ser insuficientes para gestionar estos activos. Ante este desafío, el presente trabajo propone una metodología que combina automatización, drones y Sistemas de Información Geográfica (GIS) para optimizar la planeación y programación del mantenimiento, permitiendo una segmentación y priorización precisa de activos críticos. Esta aproximación mejora la resiliencia del sistema, maximiza la eficiencia operativa y asegura la continuidad del servicio. Como prueba de su validez, este trabajo fue galardonado con el Premio AMBAR 2024 en la categoría de Innovación y Desarrollo, lo que valida su enfoque innovador y su impacto potencial en la industria.

La metodología propuesta se desarrolló en varias etapas. Inicialmente, se realizó la segmentación de las cabeceras mediante un modelo que analiza la conectividad de los activos. Posteriormente, estas áreas se mapean en un sistema GIS, lo que permitió la automatización en la generación de órdenes de trabajo mediante el bot. Después, los drones se emplearon como herramienta clave para inspecciones visuales, complementadas con revisiones manuales para asegurar la precisión en el diagnóstico. Y, finalmente, una etapa de seguimiento a la ejecución de las actividades programadas. Este enfoque integral establece un nuevo estándar en la gestión de activos eléctricos, alineándose con los retos actuales de la planeación y programación del mantenimiento.

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 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 orientada a modernizar la gestión y el mantenimiento de activos críticos en redes eléctricas de distribución, aprovechando herramientas 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 de alta criticidad para la infraestructura eléctrica. Estas cabeceras incluyen los tramos de red ubicados entre el interruptor del circuito y los primeros reconectores o elementos de transferencia, desempeñando un rol crucial en la fiabilidad y continuidad del suministro eléctrico.

La metodología se estructura en cinco fases principales, diseñadas para optimizar la gestión de estos activos críticos mediante la aplicación de tecnologías específicas, en la Figura 1 se puede ver de manera gráfica el procedimiento.

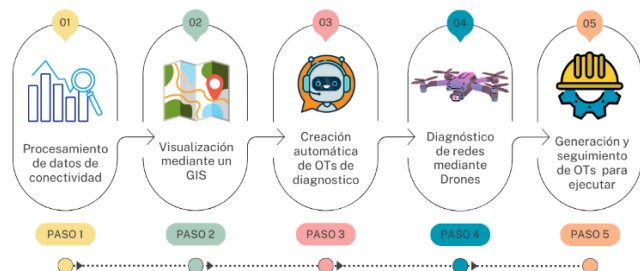


Figura 1: Metodología de 5 fases.

A. Extracción y procesamiento de datos de conectividad.

La primera fase aborda la identificación de los activos críticos a través de un análisis detallado del Modelo Digital de Energía (MDE). Este modelo proporciona datos sobre la conectividad eléctrica de los activos del sistema de distribución, como elementos de corte, transformadores y tramos de red, permitiendo trazar la trayectoria eléctrica desde cada activo hasta el interruptor del circuito.

El proceso comienza con la extracción de datos del MDE mediante un modelo desarrollado en Python que accede a base de dato. Este modelo analiza la

conectividad eléctrica de los activos, estableciendo una representación precisa de la red. Posteriormente, se aplican reglas definidas para segmentar la red, identificando los tramos que constituyen las cabeceras de los circuitos. Estas reglas consideran la ubicación de reconectores y elementos de corte de transferencia como puntos clave de delimitación.

Para una mayor claridad, en la Figura 2 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.

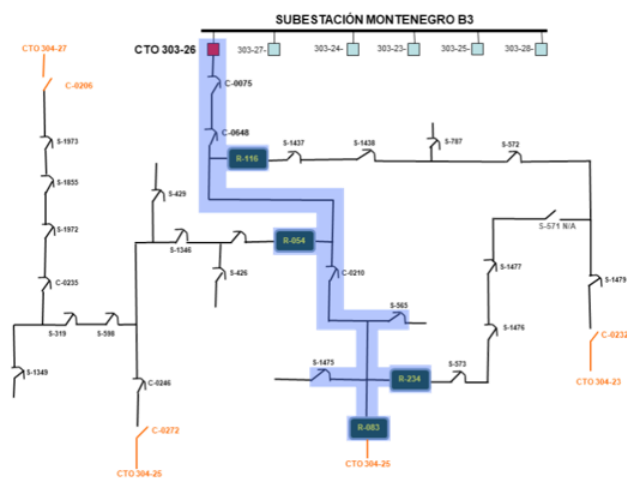


Figura 2: Diagrama unifilar del circuito 303-26 con la marcación de la cabecera.

Este diagrama muestra el interruptor de la cabecera resaltado en color rojo, así como los elementos de corte finales y las conexiones de transferencia con otros circuitos en naranja. A través de la metodología, se identifica cómo la cabecera del circuito está compuesta por los elementos que están entre el 303-26 y los elementos: R-116, R-054, S-565, S-1475, R-234 y R-083, los cuales se encuentran sombreados en color azul.

B. Georreferenciación y visualización mediante GIS.

Una vez identificados los tramos de las cabeceras, se georreferencian utilizando un sistema GIS. Este paso permite mapear las zonas críticas y facilita su visualización en capas digitales accesibles al

personal operativo. La publicación de estas capas en plataformas web asegura que las zonas de intervención sean fácilmente consultadas, mejorando la planificación y gestión de las actividades. La capacidad de ubicarse espacialmente respecto a los activos críticos optimiza la toma de decisiones en campo.

C. Automatización de la creación de órdenes de trabajo.

La tercera fase se centra en la automatización de las órdenes de trabajo mediante un bot desarrollado en Python. Este bot interactúa con el sistema de gestión de activos empresarial (EAM) para generar de manera masiva órdenes de trabajo basadas en los datos procesados y georreferenciados. La automatización reduce el tiempo necesario para organizar y asignar las tareas, sincronizando las actividades planificadas con las operaciones de campo.

D. Diagnóstico de red mediante drones.

El diagnóstico de los activos críticos se realiza mediante drones equipados con cámaras de alta resolución y termografía. Estos dispositivos sobrevuelan las zonas georreferenciadas, capturando imágenes y datos que son analizados por expertos. Este enfoque permite identificar fallas potenciales, como elementos en mal estado, puntos de sobrecalentamiento, y vegetación que compromete la integridad de la red. La información obtenida se utiliza para priorizar intervenciones, garantizando un mantenimiento preventivo más eficiente.

E. Generación, seguimiento y evaluación de las órdenes de trabajo para la intervención.

La fase final de la metodología se centra en la planificación, ejecución y evaluación de las intervenciones mediante órdenes de trabajo clasificadas en tres categorías principales: eléctricas, forestales y de guadales. Estas órdenes, derivadas del diagnóstico inicial, son gestionadas a través de un sistema integral de seguimiento que permite monitorear el avance de las tareas y

garantizar su correcta ejecución. Además, se implementa un mecanismo de retroalimentación continua, que facilita el ajuste y la mejora de las estrategias de mantenimiento en función de los resultados obtenidos, optimizando así la gestión de los activos críticos.

Para evaluar la efectividad de las intervenciones y validar el impacto de la metodología, se realiza un análisis comparativo basado en indicadores de calidad del servicio, específicamente el SAIDI (System Average Interruption Duration Index). Este análisis se lleva a cabo utilizando datos provenientes del sistema SCADA de EDEQ y emplea una ventana móvil de 6 meses: se comparan los datos de calidad del servicio registrados antes y después de la ejecución de las actividades programadas.

En el caso aplicado a EDEQ, el análisis se enfocó exclusivamente en las aperturas generadas por la interacción de la vegetación con la red, dado que el seguimiento de las órdenes de trabajo se restringió a intervenciones de tipo forestal (Arboles y guadales). Para ello, se evaluaron dos escenarios clave:

- Impacto en la cabecera del circuito: Se analiza el comportamiento del SAIDI asociado exclusivamente a la cabecera del circuito, es decir, al interruptor ubicado en la subestación. La comparación se realiza en dos periodos: los seis meses previos y los seis meses posteriores a la intervención, con el objetivo de determinar cambios en el desempeño de este activo crítico.
- Impacto en el circuito completo: Este escenario amplía el análisis al comportamiento del SAIDI en todo el circuito, considerando todos los elementos de corte, independientemente de si fueron intervenidos o no durante la implementación de la metodología.

Estos análisis permiten cuantificar el efecto de las intervenciones y validar la hipótesis de que las cabeceras de los circuitos tienen un impacto significativo en los indicadores de calidad del servicio.

IV. Resultados

El desarrollo e implementación del enfoque metodológico basado en la integración de análisis de datos, GIS y drones ha permitido establecer un proceso más estructurado y eficiente para la gestión de intervenciones en activos críticos del sistema eléctrico. 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 del país, en una región conocida por su producción cafetera y un creciente ecoturismo. La empresa opera un sistema de distribución con cerca de 5.300 km de red y más de 220.000 clientes, distribuidos en cuatro niveles de tensión.

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. 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 impactará 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.

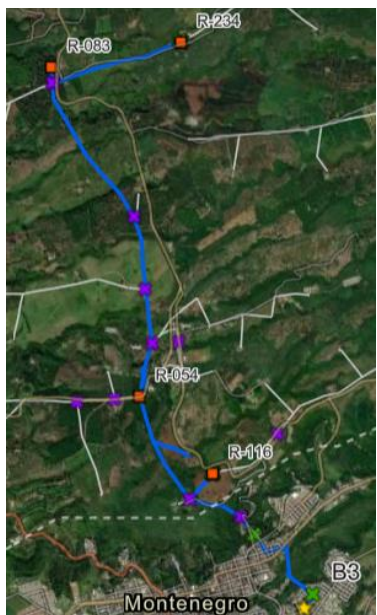


Figura 3: Cabecera del circuito 303-26

La Figura 3 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 4 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.

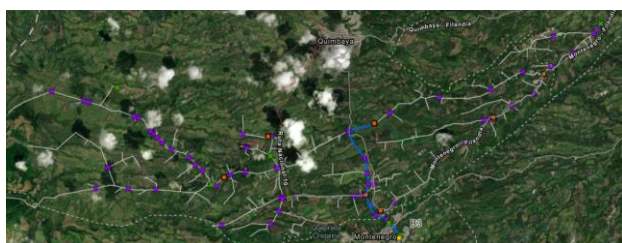


Figura 4: Topología completa de circuito 303-26

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.

D. Evaluación de las ordenes de trabajo.

La evaluación de las intervenciones realizadas se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta en la sección III.E, analizando los circuitos intervenidos durante el primer semestre de 2024. Para garantizar una comparación precisa, se empleó una ventana móvil de 6 meses que abarcó los datos de calidad del servicio (SAIDI) registrados en el sistema SCADA entre julio de 2023 y diciembre de 2024, evaluando así el impacto antes y después de la implementación de la metodología.

Los resultados se dividieron en dos niveles de análisis, los cuales se muestran en la Figura 5. El análisis para cada uno de los escenarios es el siguiente:

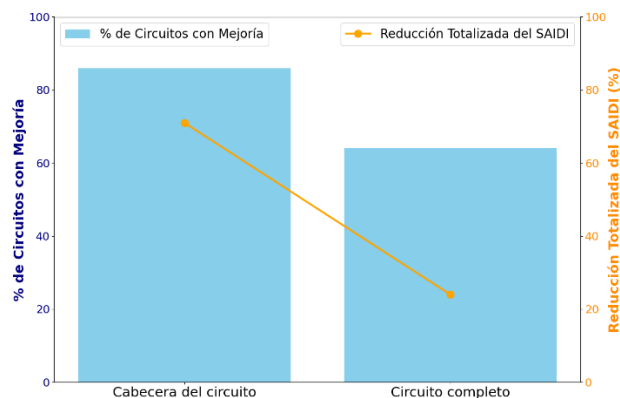


Figura 5: Relación entre Mejoría de Circuitos y Reducción del SAIDI

1. Impacto en la cabecera del circuito

- Porcentaje de circuitos con mejoría: 86%
- Reducción totalizada del SAIDI: 71%

En este análisis, se evaluó exclusivamente el desempeño del interruptor ubicado en la subestación de cada circuito intervenido. Del total de circuitos intervenidos entre enero y junio de 2024, el 86% mostró una mejoría en el SAIDI asociado a este activo crítico. Esta mejora se tradujo en una disminución del 71% en el SAIDI registrado en las cabeceras entre los periodos de evaluación de 6 meses antes y después de la intervención.

2. Impacto en el circuito completo

- Porcentaje de circuitos con mejoría: 64%
- Reducción totalizada del SAIDI: 24%

En este escenario, se consideró el comportamiento del SAIDI a nivel global del circuito, incluyendo todos los elementos de corte, intervenidos o no. Del total de circuitos analizados en el mismo periodo, el 64% presentó una mejoría en este indicador, con una reducción totalizada del 24% en el SAIDI registrado en todo el circuito entre las ventanas de evaluación de 6 meses.

V. Conclusiones

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 permitió identificar y segmentar con precisión las cabeceras de los circuitos, lo que resultó clave para enfocar las intervenciones en activos críticos, optimizando la eficiencia operativa y la asignación de recursos.

Uno de los aspectos más destacados es la capacidad de priorizar las intervenciones en las áreas de mayor criticidad, optimizando así los recursos asignados y maximizando el impacto de las acciones preventivas. Aunque las cabeceras representan solo el 14.3% de la longitud total de los circuitos, su importancia estratégica es inmensa, ya que cualquier falla en estos tramos afecta directamente la continuidad del servicio para todos los usuarios conectados. Este enfoque basado en la gestión de activos críticos ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la confiabilidad y calidad del servicio eléctrico, maximizando el impacto de las intervenciones preventivas.

El mapeo geoespacial desarrollado con herramientas GIS, y el uso de drones para inspección y diagnóstico en campo ha mejorado la precisión en la visualización y comprensión de las áreas críticas. La capacidad de acceder en tiempo real a representaciones claras y detalladas de las cabeceras no solo facilita la planificación operativa, sino que también habilita una coordinación más efectiva entre los equipos de oficina y campo. Por otra parte, aunque las imágenes capturadas por los drones requieren revisión manual, esta metodología supera los métodos tradicionales, marcando un avance hacia un mantenimiento más proactivo y eficiente.

En términos de resultados, la evaluación del impacto en los indicadores de calidad como el SAIDI valida la efectividad de la metodología. En las cabeceras, el 86% de los circuitos presentó una

mejora significativa, con una reducción del 71% en el SAIDI al comparar las ventanas de tiempo, lo que resalta la criticidad de estos activos. Para el circuito completo, el 64% de los circuitos mostró mejoras, con una disminución del 24% en el indicador. Si bien esta reducción es menos marcada, debe considerarse que se está evaluando la totalidad del circuito, incluyendo áreas que no fueron intervenidas. Además, las cabeceras, que representan solo el 14.3% de la longitud de los circuitos, concentran una importancia elevada debido a su impacto en la continuidad del servicio. A pesar de intervenir una porción pequeña de los circuitos, se logró una disminución significativa en el SAIDI, validando la hipótesis de la metodología y confirmando que las cabeceras, aunque contenidas en una fracción limitada de la red, son activos críticos que deben ser gestionados con prioridad.

Finalmente, este trabajo establece una base sólida para la modernización de la gestión de activos críticos en redes de distribución eléctrica, representando un avance hacia la transformación digital, la sostenibilidad y la resiliencia operativa. Su enfoque integrado y replicable puede ser aplicado en otros contextos, alineándose con las tendencias globales en el sector eléctrico.

VI. Trabajos futuros

Para futuros 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 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.

Alejandro López Aguirre - Ingeniero Electricista y Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Cuenta con experiencia en análisis de datos y sistemas de información geográfica, liderando proyectos enfocados en la optimización del mantenimiento de redes eléctricas y la mejora en la gestión operativa.

Se especializa en el desarrollo de herramientas tecnológicas para automatizar procesos y apoyar la toma de decisiones estratégicas, contribuyendo a mejorar la eficiencia y calidad del servicio eléctrico.

Armenia, Quindío – Colombia
alejandro.a.lopez@edeq.com.co
(+57) 3116882119

LinkedIn: www.linkedin.com/in/alejandro-lopez-aguirre-421b7b1b1