



Plan de nuevas tecnologías para despeje de falla en redes de distribución de energía eléctrica en
la vereda Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena

Leonardo Mesa Madrigal

Yulian Darío Zapata Vásquez

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Antioquia y Chocó

Bello (Antioquia)

Especialización en Gerencia de Proyectos

Abril de 2025

Plan de nuevas tecnologías para despeje de falla en redes de distribución de energía eléctrica en
la vereda de Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena

Leonardo Mesa Madrigal

Yulian Darío Zapata Vásquez

Monografía presentada como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de
Proyectos

Asesor(a)

Jaime Darío Restrepo Díaz

Magister en Gestión Tecnológica

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Antioquia y Chocó

Bello (Antioquia)

Especialización en Gerencia de Proyectos

Abril de 2025

Contenido

Lista de tablas	5
Lista de figuras	6
Lista de anexos	7
Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
CAPÍTULO I	14
1 Plan de nuevas tecnologías para despeje de falla en redes de distribución de energía eléctrica en la vereda Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena	14
1.1 Contexto	14
1.2 Descripción	15
1.3 Posibles causas	15
1.4 Posibles consecuencias	16
1.5 Preguntas de investigación	16
2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	17
2.1 General	17
2.2 Específicos	17
3 JUSTIFICACIÓN	18
3.1 Importancia del proyecto	18
3.2 Beneficios esperados	18
3.3 Grupos de interés beneficiados	19
3.4 Impacto esperado del proyecto	19
3.5 Viabilidad del proyecto	22
3.5.1 ¿Por qué el proyecto se puede hacer?	23
3.5.2 ¿Por qué el proyecto conviene hacerlo?	23
CAPÍTULO II	24
4 Marco Referencial	24
4.1 Marco Conceptual	24
4.1.1 Red de Distribución de Energía Eléctrica	24
4.1.2 Fallas Eléctricas	24
4.1.3 Despeje de Fallas	24

	4	
4.1.4	Redes Inteligentes (Smart Grids)	25
4.1.5	Automatización de la Distribución	25
4.1.6	Sistemas Embebidos	25
4.1.7	Normativa y Regulación (CREG 015 de 2018)	25
4.1.8	Sostenibilidad y Seguridad	25
4.2	Marco Contextual	26
4.3	Marco Legal	26
4.4	Marco Teórico	27
CAPÍTULO III		29
5	DISEÑO METODOLÓGICO	29
Resultados		34
Referencias		43
Anexos		46

Lista de tablas

Tabla 1. Retorno de la inversión (ROI)	23
Tabla 2. Plan de acción del proyecto	33
Tabla 3. Sectores con mayor vulnerabilidad identificados en Piedras Blancas	34
Tabla 4. Tramos con mayor reincidencia de fallas (2020–2024)	37
Tabla 5. Comparativo de desempeño antes y después de la implementación del sistema	39

Lista de figuras

Figura 1. Vereda Piedras Blancas en el corregimiento de Santa Elena (Antioquia, Colombia)	14
Figura 2. Sectores con mayor vulnerabilidad a fallas en Piedra Blancas	35
Figura 3. Reincidencia de fallas e intervenciones por tramos	37
Figura 4. Comparativo de desempeño antes y después de la implementación del sistema	39

Lista de anexos

Figura 1A. Reconectador monofásico autoalimentado	44
Figura 1B. Lugares de instalación de reconectores monofásicos	45

Resumen

La vereda Piedras Blancas, del corregimiento de Santa Elena, en el departamento de Antioquia, enfrentó fallas recurrentes en la prestación óptima del servicio de energía eléctrica debido a una variedad de condiciones como son: infraestructura envejecida, equipos defectuosos, condiciones climáticas extremas, sobrecarga por crecimiento poblacional, vandalismo, errores humanos y la interacción de la fauna con las redes. Estas interrupciones afectan a los habitantes, comerciantes y el ecoturismo local, generando pérdidas económicas y sanciones para el operador de la red del servicio local. Además, la manipulación inadecuada de la infraestructura por personal no autorizado prolonga los tiempos de restablecimiento y aumenta los riesgos de accidentes eléctricos a otras personas y muerte de fauna. La implementación de nuevas tecnologías en redes inteligentes se planteó como una solución para mitigar estos impactos y mejorar la confiabilidad del servicio, dando como consecuencia la disminución de las suspensiones de energía a todos los usuarios del sector y la mitigación de las sanciones impuestas por el ente regulador al operador de red.

Palabras clave: reconectores; innovación; proyecto; tecnología; energía.

Abstract

The Piedras Blancas district of Santa Elena, in the department of Antioquia, faced recurring failures in the optimal provision of electric power service due to a variety of conditions, including aging infrastructure, defective equipment, extreme weather conditions, overload due to population growth, vandalism, human error, and wildlife interaction with the grid. These interruptions affect residents, businesses, and local ecotourism, generating economic losses and penalties for the local grid operator. Furthermore, improper handling of the infrastructure by unauthorized personnel prolongs restoration times and increases the risk of electrical accidents to others and wildlife deaths. The implementation of new technologies in smart grids was proposed as a solution to mitigate these impacts and improve service reliability, resulting in fewer power outages for all users in the sector and the mitigation of penalties imposed by the regulatory body on the grid operator.

Keywords: reclosers; innovation; project; technology; energy.

Introducción

A lo largo de los últimos años, el crecimiento en la demanda eléctrica y el desarrollo de las redes de distribución han dado como resultado el notable aumento de la dificultad de los sistemas eléctricos (Gellings, 2009); de esta forma, la aparición de una cantidad significativa de soluciones tecnológicas que permitan mantener la confiabilidad, continuidad y calidad del servicio eléctrico se ha convertido en un aspecto capital. En este contexto, las averías de red de distribución constituyen un importante reto técnico y operativo, ya que pueden provocar interrupciones prolongadas de las cuales se deriva la producción de costes, daños en dispositivos y una mala percepción del servicio por parte de los clientes (IEEE, 2012); si bien se han dado pasos hacia la automatización de sistemas eléctricos, el tipo de procesos orientados al despeje de fallas de red de distribución puede ser gestionado todavía de manera manual, gestionado o incluso con tecnologías que muestran limitaciones respecto a tiempos de respuesta, precisión y cobertura (Perez et al., 2025).

El origen del presente trabajo radica en la necesidad de fortalecer la capacidad de detección, aislamiento y despeje de fallas en redes de distribución eléctrica, particularmente en sistemas trifásicos y monofásicos de media tensión, donde los tiempos de respuesta son críticos para garantizar la estabilidad del servicio. Se identificó que las técnicas convencionales de supervisión, tales como la inspección visual y la verificación en sitio, resultan ineficaces ante la creciente demanda de disponibilidad energética y los requisitos de continuidad establecidos por los organismos reguladores (Pérez et al., 2025). Ante esta situación, se plantea la necesidad de incorporar tecnologías modernas, como sensores inteligentes, comunicación inalámbrica y sistemas de control automatizado, que permitan optimizar los tiempos de localización y despeje de fallas, mejorar la eficiencia operativa y reducir el impacto en los usuarios finales (Gungor et al., 2013).

El objetivo general de esta investigación es diseñar e implementar una propuesta tecnológica que permita el despeje eficiente de fallas en redes de distribución eléctrica, a través de un sistema

automatizado de supervisión y control. Este sistema integrará componentes de hardware y software que trabajen de manera conjunta para detectar eventos anómalos en la red, generar alertas en tiempo real y ejecutar acciones correctivas con intervención mínima del personal operativo (De Micco et al., 2020; Liu et al., 2024).

El alcance del trabajo se limita a la fase de diseño, implementación y validación a pequeña escala de un sistema de despeje de fallas en un tramo específico de una red de distribución en la vereda de Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena en Antioquia-Colombia. La propuesta pone énfasis en la detección de fallos tanto en circuitos monofásicos como trifásicos, en la localización del trazo afectado y restablecimiento del servicio de forma automática. En ese sentido, no se contempla en esta fase la aplicación a mayor escala de toda la red, ni tampoco la integración al sistema SCADA corporativo, o estrategias de comercialización. Por el contrario, esta forma de llevar a cabo el restablecimiento se considera una solución extensible y adaptable a otros entornos, pudiendo replicarse como prueba de concepto en zonas rurales con condiciones similares (Fang et al., 2012).

Desde el punto de vista del conocimiento, este proyecto supone una aportación muy importante a la automatización de las redes eléctricas en lo que concierne a la operación y el mantenimiento de los sistemas de distribución de electricidad. La integración de tecnologías como sensores de corriente y de tensión, comunicación y microcontroladores de bajo consumo energético, nos ofrecen una respuesta que resulta ser innovadora y de bajo coste en comparación con el resto de las propuestas de automatización que ya comercializan actualmente los distintos fabricantes. Desde otro ámbito, también se potencia el conocimiento técnico en la implementación de la automatización de las soluciones dirigidas a los sistemas eléctricos inteligentes, contribuyendo a constituir una red eléctrica más resiliente, flexible y sostenible (Gellings, 2009; Fang et al., 2012).

Entre las principales debilidades del proyecto a cronificar se encuentran los recursos económicos y tecnológicos que se utilizarán para su implementación de forma efectiva. La elección de

los componentes de implementación se hizo teniendo en cuenta criterios de bajo coste y disponibilidad comercial, lo que implicó un rendimiento bajo y las capacidades del sistema final. En el mismo sentido, el entorno de prueba se vio limitado a un ambiente controlado, por lo que los resultados podrían variar en condiciones de operación. Por otro lado, factores como la interferencia electromagnética, las condiciones climatológicas, la infraestructura física de las redes pueden afectar la solución y deberían tenerse en cuenta en futuras implantaciones (Ward, 2013; Schweikert et al., 2019; El Hajji et al., 2020; Chicaiza & Mendoza, 2024).

En cuanto al diseño metodológico, el que se llevó a cabo era de tipo aplicado, bajo un enfoque proyectivo-experimental, planteando la investigación en tres fases: diagnóstico, desarrollo y validación. La fase de diagnóstico consistió en la caracterización de la red de distribución objeto del estudio, identificación de puntos críticos y condiciones que favorecen la ocurrencia de fallas; la instancia de desarrollo correspondió a la selección de los dispositivos electrónicos y diseño de los circuitos de detección, comunicación y control culminando en una integración de los elementos en un prototipo funcional.

Finalmente, en la intervención de validación, fueron ejecutadas pruebas controladas con el propósito de examinar los comportamientos del sistema ante fallas provocadas, considerando variables como tiempo de detección, precisión de aislamiento y recuperación del servicio (Hernández Sampieri et al., 2014).

La estructura del presente documento se organiza en tres capítulos, cada uno de los cuales aborda una etapa clave del proceso investigativo. En el Capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema, los objetivos generales y específicos, la justificación del proyecto, su delimitación y alcances. El Capítulo 2 está dedicado al marco conceptual, contextual, legal y teórico, donde se abordan los fundamentos conceptuales relacionados con redes de distribución, despeje de fallas, automatización, sistemas embebidos y tecnologías de comunicación inalámbrica. El Capítulo 3 expone la metodología

utilizada, describiendo el tipo de investigación, las técnicas de recolección de datos, herramientas empleadas y etapas del desarrollo, enfoques y análisis. Luego se detalla el proceso de diseño e implementación del sistema, incluyendo los esquemas eléctricos, la selección de sensores y dispositivos, la programación de los microcontroladores, y la integración del sistema completo y finalmente se presenta los resultados de la validación, las conclusiones obtenidas a partir de los hallazgos y una serie de recomendaciones para futuras mejoras o ampliaciones del sistema.

En conclusión, esta investigación se presenta como un intento de unir la tecnología y la ingeniería para enfrentar uno de los problemas que plantean las redes eléctricas como lo es la gestión eficiente de fallas. La propuesta de solución contaba con posibilidades que podían mermar los tiempos de reacción, bajar la carga de tarea del personal de mantenimiento, seleccionar la calidad del servicio eléctrico e incluso bajar las sanciones que recibía de entes reguladores. Los ítems presentados pueden ser el punto de partida para futuras propuestas tecnológicas que contribuyan a la modernización de redes de distribución y a la evolución de sistemas eléctricos inteligentes.

CAPÍTULO I

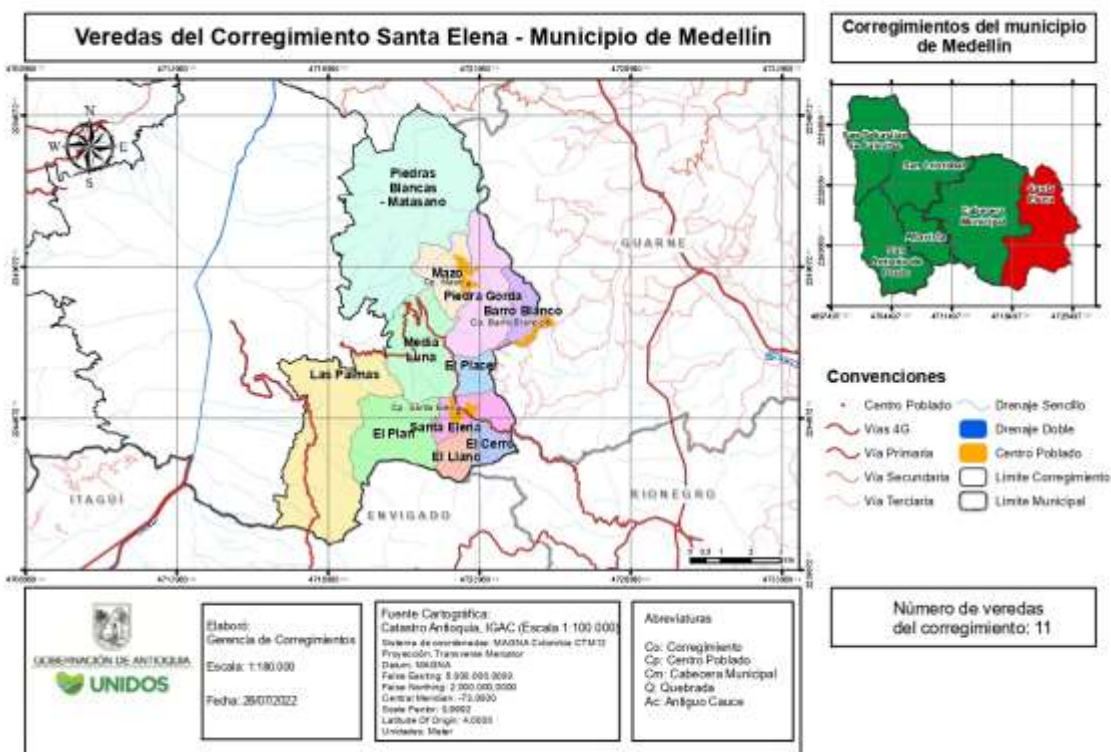
1 Plan de nuevas tecnologías para despeje de falla en redes de distribución de energía eléctrica en la vereda Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena

1.1 Contexto

La vereda Piedras Blancas es la de mayor extensión en área terrestre del corregimiento de Santa Elena, con cerca de 2.223,67 hectáreas con una amplia superficie boscosa y con una densidad poblacional de 4.158 personas distribuidas en 1.139 viviendas. Este corregimiento forma parte de la zona rural de la ciudad y está situado en una región montañosa de la cordillera Central de los Andes, se caracteriza por su paisaje natural, con bosques, quebradas y áreas protegidas (Figura 1).

Figura 1

Vereda Piedras Blancas en el corregimiento de Santa Elena (Antioquia, Colombia).



Nota. Tomado de Gobernación de Antioquia (2022).

En los últimos años, ha habido un esfuerzo por fomentar el desarrollo sostenible en la región, con iniciativas orientadas a preservar el medio ambiente, promover el ecoturismo y mejorar la calidad de vida de los habitantes sin comprometer el entorno natural.

En este sitio encontramos una diversidad de estilos de vida dedicados al sector turístico, al comercio gastronómico y del agro.

Entre las especies que habitan en los alrededores de la vereda se encuentran diversas aves, mamíferos pequeños, reptiles y una gran variedad de insectos, esto hace que la riqueza natural de la vereda sea un punto importante para la investigación y conservación de la biodiversidad

la vereda Piedras Blancas es un lugar con una profunda conexión con la naturaleza, donde la agricultura tradicional y el turismo ecológico son pilares importantes de la vida cotidiana. La riqueza cultural y natural de la zona, junto con su cercanía a lugares turísticos como el Parque Arví, la convierte en un punto clave dentro de Santa Elena.

1.2 Descripción

Se presenta periódicamente fallas en la prestación del servicio de energía eléctrica en redes de distribución a 7,62 kV, líneas de sectores rurales en donde recorre largos tramos y se derivan en varios ramales hasta llegar a los usuarios de uso final, estos fallos debidos a fallas técnicas por problemas o envejecimiento en infraestructuras, equipos defectuosos, condiciones climáticas extremas, sobrecargas del sistema, actos de vandalismo o de robo, errores humanos u operaciones, fauna que no por equipos no tener su respectiva protección queda expuesta a cualquier electrocución.

Estas fallas hacen que se fomente una nueva forma de mitigar estos impactos, como son la implementación de nuevas tecnologías, nuevas normas, nuevos elementos de protección, nuevos equipos, redes inteligentes que en resumen se presta para la innovación y esto lleva a impulsar este proyecto para buscar soluciones y mitigar lo más posible las fallas de energía eléctrica en redes de distribución.

1.3 Posibles causas

Debido a personal no experto realizan malas prácticas en donde osan a manipular, maniobrar y a operar dispositivos de protección que se encuentran instalados en la infraestructura de la red, que por no tener conocimiento, ni experiencia ocasionan suspensión del servicio de energía eléctrica e interrupciones demasiado prolongadas en tiempo de restablecimiento y causando aún mayor tiempo en la ubicación del apoyo (poste) en donde se encuentra la falla y también juegan otros factor como las condiciones del terreno, las vías de acceso y la distancia de los ramales que existen en estas zonas tan alejadas de la cabecera del corregimiento. En este tipo de fallas, también influye mucho el contacto de árboles y el de una variedad de fauna que ocasionan cortocircuitos entre dos potenciales de voltaje diferentes.

1.4 Posibles consecuencias

Las interrupciones del servicio de energía eléctrica sin una debida programación ocasionan molestias a cualquier usuario, a los dueños de PYMES que tienen su emprendimiento, a los usuarios finales, en general a toda aquella persona que se encuentre conectada a un servicio público y del cual le están facturando mensual.

Otro factor importante es el ente regulador del operador de red en este caso EPM el cual está afectado por la medición en calidad del servicio sin suspensiones de este, ya que la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) mide estos eventos con tiempo y cantidad de usuarios afectados por suspensiones inoficiosas de energía y por la cual penalizan al operador con dinero y retribuciones para sus usuarios por este tiempo sin servicio.

Muertes innecesarias de humanos por malas prácticas en las redes de distribución de energía eléctrica y muerte de fauna por no tener debida protección en los elementos energizados de la red.

1.5 Preguntas de investigación

¿Qué impacto positivo y negativos tendría el operador de red con la implementación de las nuevas tecnologías en las redes de distribución de energía eléctrica en la vereda Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena, teniendo en cuenta el ente regulador y la satisfacción de sus usuarios?

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1 General

Proponer un plan de mejora en la implementación y disposición de equipos con nuevas tecnologías en las redes de distribución de energía eléctrica.

2.2 Específicos

- Caracterizar el sector con mayor frecuencia de vulnerabilidad a las interrupciones del servicio eléctrico.
- Identificar los lugares con mayor reincidencia en fallas en el suministro de energía eléctrica.
- Formular el plan para mitigar las fallas eléctricas más frecuentes en zonas rurales.

3 JUSTIFICACIÓN

3.1 Importancia del proyecto

La importancia del proyecto es mitigar las fallas de energía eléctrica en la vereda Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena, ya que la norma regulatoria de la resolución CREG 015 del 29 de enero de 2018, evalúa la operación y los eventos del servicio de energía de los usuarios de uso final, para que no se vean afectados tanto tiempo por los apagones de energía (Ministerio de Minas y Energía, 2018).

3.2 Beneficios esperados

- Prima la satisfacción del cliente por la prestación de un servicio de calidad y con una buena disposición por parte del operador de red, donde se reflejará mejoría en sus ingresos y se empleará en las nuevas expansiones de redes.
- Disminuir la suspensión de energía en todos los sectores vulnerables a fallas eléctricas debidas a diferentes causas.
- Disminuir muertes debidas a malas prácticas humanas y de la vida silvestre en las redes de distribución, siendo más seguro todos los puntos de apoyo en estas redes.
- Mejora en la confiabilidad en la integración de tecnologías avanzadas, como sensores inteligentes y sistemas de monitoreo en tiempo real, permite identificar y responder rápidamente a fallas, reduciendo el tiempo de inactividad.
- Eficiencia operativa en la automatización y la optimización de procesos ayudan a mejorar la gestión de la red, reduciendo costos operativos y aumentando la eficiencia en la distribución de energía.
- Reducción de pérdidas debido a las tecnologías de análisis de datos pueden identificar áreas problemáticas en la red, lo que permite tomar medidas preventivas para minimizar las pérdidas de energía.

- Mejor respuesta a emergencias en los sistemas de gestión de incidentes y análisis predictivo permiten una respuesta más rápida y efectiva ante fallas, mejorando la seguridad y la continuidad del servicio.

- Sostenibilidad de la implementación de tecnologías inteligentes puede facilitar la integración de fuentes de energía renovable, contribuyendo a un sistema más sostenible y eficiente.

- Satisfacción del cliente al reducir las interrupciones y mejorar la calidad del servicio, se aumenta la satisfacción del cliente y se fortalecen las relaciones con los usuarios.

- Capacidad de escalabilidad en las nuevas tecnologías que permiten una mayor flexibilidad para adaptarse al crecimiento y a los cambios en la demanda, lo que es crucial para el desarrollo futuro de la infraestructura.

- Análisis de datos y mejora continua de la recopilación y el análisis de datos en tiempo real permiten a las empresas identificar tendencias y patrones, facilitando la toma de decisiones informadas y la mejora continua de la red.

3.3 Grupos de interés beneficiados

Empresarios distribuidores de materiales, equipos tecnológicos, comerciantes de herramientas y constructores, que se encuentran suscritos y participan de los procesos que ofrece el operador de red y concursan en las licitaciones para suministrar y ejecutar las obras.

Encontramos entre ellos a los usuarios domiciliarios en una escala estratificada, los usuarios de PYMES (parques ecológicos, granjas, lecherías, etc.)

3.4 Impacto esperado del proyecto

3.4.1 Impactos económicos

Mitigar pérdidas económicas directas, ya que las interrupciones de energía afectan directamente a las empresas y a la producción industrial, especialmente en sectores sensibles como la manufactura, donde cualquier tiempo de inactividad puede traducirse en pérdidas considerables. Las

pequeñas y medianas empresas también pueden verse afectadas por las pérdidas de inventario o la incapacidad de ofrecer servicios a sus clientes y pérdidas al operador de red de retribución por servicio suspendido a sus usuarios

Evitar costos por daños a equipos, ya que las caídas y fluctuaciones de voltaje causadas por interrupciones pueden dañar equipos electrónicos y maquinaria sensible, lo que genera costos adicionales por reparación o reemplazo.

Aumento de la productividad tanto en el ámbito laboral como en el educativo, las interrupciones de energía dificultan el trabajo remoto y presencial, reducen la productividad y aumentan los tiempos muertos en las cadenas de producción y logística.

3.4.2 Impactos sociales

Evitar afectaciones a la calidad de vida debido a que, en el ámbito residencial, los apagones pueden interrumpir actividades cotidianas como la preparación de alimentos, el uso de sistemas de calefacción o refrigeración, la iluminación y la conectividad (internet y comunicaciones). Durante apagones prolongados, las personas pueden enfrentar dificultades para almacenar alimentos o acceder a agua potable, especialmente en áreas rurales.

Disminuir impactos en la salud y seguridad en los hospitales y centros médicos, una interrupción eléctrica puede tener consecuencias críticas, afectando el funcionamiento de equipos médicos vitales. Asimismo, la falta de energía eléctrica puede interrumpir sistemas de seguridad como cámaras de vigilancia, alarmas y sistemas de iluminación pública, lo que incrementa el riesgo de incidentes delictivos o accidentes.

Evitar la desigualdad social, ya que Las interrupciones eléctricas tienden a afectar desproporcionadamente a las comunidades más vulnerables, que tienen menos acceso a fuentes de energía alternativas, como generadores, o medios para mitigar los efectos de los apagones.

3.4.3 Impactos técnicos en el sistema eléctrico

Evitar sobrecargas post-reconexión cuando se restablece la energía después de una interrupción, puede ocurrir una sobrecarga en el sistema debido a la reactivación simultánea de aparatos y equipos que estuvieron en espera. Esto puede desencadenar un nuevo apagón o daños a la infraestructura.

Evitar problemas de estabilidad de red, las interrupciones pueden desestabilizar la red eléctrica, afectando el equilibrio entre la generación y el consumo de energía. Si las fallas se producen en puntos críticos del sistema, pueden desencadenar apagones en cascada que afecten a grandes áreas geográficas.

Falta de redundancia y resiliencia, en muchos sistemas eléctricos, la falta de infraestructura redundante y tecnologías de monitoreo moderno agrava la magnitud de las interrupciones. Las redes eléctricas que no cuentan con mecanismos de protección ante fallas o sistemas de respaldo son más propensas a sufrir apagones prolongados y más difíciles de restaurar.

Impactos ambientales

Evitar el uso de combustibles fósiles, ya que, durante interrupciones prolongadas, tanto las industrias como las residencias suelen recurrir a generadores de emergencia que operan con combustibles fósiles (como diésel o gasolina). Esto incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

Mitigar los riesgos ambientales por fallas en infraestructuras críticas, debido a que algunas infraestructuras críticas, como plantas de tratamiento de aguas residuales o instalaciones de procesamiento de químicos, dependen del suministro eléctrico para operar de manera segura. Una falla prolongada podría llevar a la liberación accidental de contaminantes al medio ambiente.

3.4.4 Impacto en la tecnología y la digitalización

Evitar interrumpir servicios digitales y actividades que dependen del suministro eléctrico para la transmisión de datos y la operatividad de sistemas digitales. Las interrupciones eléctricas pueden afectar centros de datos, servidores y telecomunicaciones, lo que impacta las actividades comerciales, bancarias, el comercio en línea y servicios de emergencia.

Vulnerabilidad de infraestructuras críticas, las redes eléctricas interconectadas, si no están adecuadamente protegidas, pueden ser vulnerables a ciberataques. Las interrupciones causadas por ataques maliciosos o sabotajes cibernéticos pueden provocar apagones masivos que afecten tanto la infraestructura física como los sistemas digitales críticos.

3.5 Viabilidad del proyecto

En la Tabla 1 se muestran los valores proyectados para la viabilidad del proyecto.

Tabla 1

Retorno de la inversión (ROI).

PRODUCTO	COSTO	CANTIDAD
Reconectador monofásico (ver Anexo A)	\$ 11.000.000	50
Personal operativo	\$ 1.500.000	5
Personal administrativo	\$ 1.300.000	1
Ingenieros	\$ 4.000.000	2
Herramienta	\$ 8.000.000	1
Transporte	\$ 5.000.000	1
Bodega	\$ 10.000.000	1
Servicios públicos	\$ 400.000	1
TOTAL, COSTO DE INVERSION		
Ganancia neta de la inversión	\$ 843.142.857	

Costos totales de inversión y ganancias obtenidas

$$ROI = \frac{\text{Ganancia neta de la inversión} - \text{Costo de la inversión}}{\text{Costo de la inversión}} \times 100$$

$$ROI = \frac{\$843.142.857 - \$590.200.000}{\$590.200.000} \times 100 = 43\%$$

3.5.1 ¿Por qué el proyecto se puede hacer?

El proyecto puede hacerse porque es viable económicamente, porque es necesario para cumplir indicadores ante el ente regulador, porque posee muchos impactos positivos tanto para el operador de red que presta el servicio como el usuario que obtiene el servicio y porque es necesario migrar a un sistema inteligente que evite la mayor cantidad de fallas y afectaciones a la humanidad.

3.5.2 ¿Por qué el proyecto conviene hacerlo?

El proyecto conviene hacerse ya que la ganancia es mucho mayor que el costo de la inversión como se evidencia en el ROI, también para obtener una modernización de la red eléctrica, debido a la necesidad de mitigar las fallas a los usuarios; las redes inteligentes que utilizan sensores, sistemas de monitoreo en tiempo real, automatización y nuevas tecnologías que permiten una gestión más eficiente y rápida de las fallas. Esto reduce la duración de los apagones y evita que pequeños problemas se conviertan en grandes interrupciones de energía eléctrica y controlan costos en compensaciones.

CAPÍTULO II

4 Marco Referencial

4.1 Marco Conceptual

El marco conceptual de esta investigación establece los fundamentos teóricos y técnicos necesarios para comprender los elementos clave involucrados en la implementación de nuevas tecnologías para el despeje de fallas en redes de distribución de energía eléctrica en zonas rurales, particularmente en la vereda Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena.

4.1.1 Red de Distribución de Energía Eléctrica

Las redes de distribución son el componente del sistema eléctrico encargado de entregar la energía desde las subestaciones hasta los usuarios finales. En zonas rurales, estas redes suelen recorrer largas distancias y presentan mayores desafíos de mantenimiento debido a la dispersión de los usuarios, condiciones geográficas adversas y limitaciones en la infraestructura existente.

4.1.2 Fallas Eléctricas

Las fallas en la red eléctrica son interrupciones no programadas que pueden estar causadas por factores técnicos (como sobrecargas o deterioro de equipos), ambientales (clima, vegetación, fauna) o humanos (errores operativos o vandalismo). Las consecuencias incluyen interrupciones del servicio, daños en equipos, pérdidas económicas y riesgos de seguridad tanto para personas como para animales.

4.1.3 Despeje de Fallas

El despeje de fallas es el proceso mediante el cual se detecta, aísla y elimina una falla del sistema eléctrico para restablecer el servicio en el menor tiempo posible. Este proceso puede ser manual o automatizado. En entornos rurales, el despeje manual presenta tiempos de respuesta elevados, afectando negativamente la continuidad del servicio.

4.1.4 Redes Inteligentes (Smart Grids)

El SG está definido por el NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología), como “una red modernizada que permite flujos bidireccionales de energía y utiliza energía de dos vías “capacidades de comunicación y control que darán lugar a una serie de nuevas funcionalidades y aplicaciones”.

Electrónica de potencia, ingeniería de comunicaciones y ciencia de los materiales. Todos los avances han contribuido al desarrollo de SG. (Srivastava et al., 2022).

4.1.5 Automatización de la Distribución

La automatización de la red de distribución implica la incorporación de dispositivos como reconectores, interruptores automáticos, sensores de falla y sistemas de monitoreo remoto. Estas tecnologías permiten localizar y despejar fallas de forma más rápida y precisa, minimizando la intervención humana y mejorando la seguridad operativa.

4.1.6 Sistemas Embebidos

Los sistemas embebidos son dispositivos electrónicos programables (como microcontroladores) que se utilizan para tareas específicas dentro de sistemas más grandes. En redes eléctricas, estos sistemas pueden gestionar la recolección de datos, el procesamiento local de señales y el control de actuadores para despeje de fallas.

4.1.7 Normativa y Regulación (CREG 015 de 2018)

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), mediante la resolución 015 de 2018, establece los estándares de calidad del servicio de energía en Colombia, incluyendo indicadores sobre la duración y frecuencia de las interrupciones. Esta normativa incentiva a los operadores a implementar mejoras tecnológicas que reduzcan los tiempos de respuesta ante fallas.

4.1.8 Sostenibilidad y Seguridad

La implementación de nuevas tecnologías en la distribución eléctrica no solo mejora la eficiencia técnica, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir la necesidad de

generadores fósiles durante fallas. Además, mejora la seguridad al minimizar la exposición de personas y fauna a equipos energizados sin protección adecuada.

4.2 Marco Contextual

La vereda Piedras Blancas, perteneciente al corregimiento de Santa Elena de Medellín, se encuentra dentro de un espacio caracterizado como rural, con una importante riqueza ecológica, cultural y turística; su geografía montañosa, su clima húmedo y rica en vegetación la hacen ser un territorio de alto valor ambiental y, a su vez, un escenario complicado para el mantenimiento y operación de redes eléctricas de distribución.

En este contexto, el servicio de energía eléctrica está condicionado por múltiples aspectos, tales como los usuarios dispersos, una geografía compleja, la fauna silvestre, la infraestructura envejecida o expuesta a condiciones climáticas severas; la falta de personal técnico a pie de obra, así como la intervención inapropiada de personas ajenas al mercado de la instalación eléctrica ha agudizado la frecuencia y duración de las interrupciones.

Efecto que se agrava en los residentes, emprendedores, comerciantes y operadores turísticos, con un impacto negativo en su calidad de vida, en la actividad económica y en la percepción de la confiabilidad del servicio; de ahí que haya que aplicar soluciones tecnológicas modernas que garanticen la continuidad del servicio, el cuidado del entorno como medio de vida y la gestión eficiente de fallas.

4.3 Marco Legal

La normatividad que establece la calidad del servicio del suministro de electricidad en Colombia la establece la Resolución CREG 015 de 2018, emitida por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la cual establece parámetros de calidad tales como el SAIDI (duración media de las interrupciones, por cada usuario) y el SAIFI (frecuencia media de las interrupciones, por cada usuario), además de las condiciones que establece para las compensaciones económicas por interrupciones no justificadas.

La CREG exige a los operadores de red adoptar medidas técnicas y operativas que permitan garantizar la continuidad del servicio y minimizar las fallas. En este sentido, se promueve el uso de tecnologías de monitoreo, automatización y análisis de datos como parte de los planes de mejora exigidos para las empresas prestadoras del servicio. Adicionalmente, el Código de Distribución (Resolución CREG 070 de 1998) y la Ley 143 de 1994 sobre el régimen de servicios públicos también contemplan la obligación de prestar un servicio eficiente, seguro y de calidad, lo cual legitima la inversión en modernización tecnológica de las redes de distribución.

Desde el punto de vista ambiental, la Ley 99 de 1993 y otras normativas de protección de fauna silvestre hacen énfasis en la necesidad de mitigar los impactos negativos de las redes eléctricas sobre el entorno natural, incluyendo la implementación de dispositivos que reduzcan la electrocución de animales silvestres.

4.4 Marco Teórico

La fundamentación teórica de esta investigación se sustenta en diversas disciplinas que convergen en el diseño, implementación y validación de sistemas tecnológicos orientados a la automatización del despeje de fallas en redes de distribución eléctrica. Entre ellas se destacan:

- **Automatización Industrial:** trata del uso de tecnologías que permiten sustituir o asistir tareas manuales mediante el uso de sensores, actuadores, controladores lógicos programables (PLC) y sistemas SCADA.
- **Electrónica y Sistemas Embebidos:** funda el diseño de dispositivos inteligentes que son capaces de recopilar datos, procesar datos en tiempo real y ejecutar acciones sin intervención humana, lo que hace de este concepto una necesidad para llevar a cabo soluciones autónomas en la red.
- **Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC):** incluye protocolos de comunicación sin hilos, Internet de las cosas (IoT), redes LPWAN, herramientas entre otras utilizadas para la correcta transmisión de datos desde y hacia la red eléctrica.

- Gestión de Proyectos: da el marco metodológico indispensable para planificar, ejecutar y controlar la ejecución de soluciones tecnológicas, teniendo en cuenta como criterios la viabilidad técnica, económica y ambiental.

Estas teorías soportan el enfoque adoptado en este proyecto que no sólo pretende resolver una cuestión técnica, sino que busca transformar la realidad de una comunidad y un entorno rural mediante la innovación.

CAPÍTULO III

5 DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 Línea de Investigación

Este proyecto se encuadra dentro de la línea de investigación de Innovaciones Sociales y Productivas, en cuanto propone una solución tecnológica a un problema estructural de la prestación del servicio de energía eléctrica en el contexto de la ruralidad. Siguiendo la línea de investigación centrada en la automatización de procesos y el uso de TIC en las redes de distribución, el proyecto no pretende únicamente optimizar la infraestructura, sino de alguna manera también generar efectos positivos en la calidad de vida de las comunidades, reduciendo las interrupciones en el servicio y mejorando la seguridad. Para el proyecto la tecnología constituye un medio para transformar las realidades locales desde la innovación aplicada al medio de producción.

5.2 Eje Temático

El trabajo, conforme al programa de Especialización en Gerencia de Proyectos, se inscribe dentro de la sublínea Dualidad Estructural para la Innovación, Tejido Empresarial, en el marco de la línea institucional Innovaciones Sociales y Productivas. La temática que mejor lo contextúa es la de "Proyectos productivos para el desarrollo social y empresarial", en la medida que se propone un plan de acción tecnológico que puede trasladarse a otras comunidades con características semejantes; a su vez, mantiene una conexión muy directa con la "Gestión estratégica de proyectos" puesto que parte de su concepción, planeamiento e implementación, hasta llegar al análisis de resultados desde un enfoque global que persigue la viabilidad técnica, el impacto social y la sostenibilidad económica.

5.3 Enfoque de Investigación y Paradigma Investigativo

Este artículo está inscrito dentro de un enfoque cuantitativo de investigación desde su concepción, dado que se articula con relación al proceso de recolección, análisis e interpretación de

datos de carácter numérico para poder tomar decisiones que se fundamenten en la determinación de la eficacia del sistema propuesto (Cely et al., 2023). Se tuvieron presentes variables como el tiempo de respuesta, las veces que se interrumpió la ejecución del sistema o los costos de implementación y operación de este. El paradigma investigativo que la sostiene es el positivista porque se inicia en la consideración de que la realidad puede ser medida de manera objetiva, verificable y replicable (Charry & Navarro, 2018).

5.4 Diseño

El diseño adoptado es de tipo experimental, dado que se trabajó un prototipo funcional que fue puesto a prueba en condiciones reales (Zubair, 2023). No se trata simplemente de un ejercicio teórico o de simulación; se ejecutó una intervención concreta sobre un tramo de red eléctrica en la vereda Piedras Blancas. Se realizaron pruebas controladas que permitieron comparar el comportamiento de la red antes y después de la implementación del sistema, lo cual es característico del diseño experimental (Ramos, 2021).

5.5 Alcance

El alcance de la investigación es descriptivo y explicativo. Es descriptivo porque se caracterizó la situación actual de la red, sus puntos críticos y las causas más comunes de falla; y es explicativo porque busca entender el porqué de dichas fallas y cómo la incorporación de tecnologías específicas puede mitigar su frecuencia y gravedad, generando un impacto positivo tangible y medible sobre el sistema (Martínez & González, 2020).

5.6 Población

La población objetivo del proyecto está conformada por los usuarios del servicio de energía eléctrica de la vereda Piedras Blancas del corregimiento de Santa Elena, en el municipio de Medellín, incluyendo hogares residenciales, pequeñas y medianas empresas (como granjas, centros turísticos,

restaurantes, etc.), así como los trabajadores técnicos del operador de red (EPM) que realizan labores de mantenimiento y supervisión.

5.7 Tamaño de Muestra

Para la etapa experimental, se trabajó sobre un tramo específico de la red de distribución, seleccionado por su alta incidencia de fallas, según registros del operador de red. Aunque no se aplicó una muestra estadística tradicional por tratarse de una validación técnica, el tramo intervenido representó un microcosmos funcional del sistema total, permitiendo extrapolar resultados hacia escenarios de mayor escala en el futuro.

5.8 Fuentes, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información y Datos

Las fuentes primarias incluyeron datos obtenidos a través de sensores instalados en la red, como sensores de corriente, tensión y reconectores automáticos. Se usaron también registros del operador de red sobre frecuencia de fallas y tiempos de restablecimiento. Las fuentes secundarias provinieron de literatura especializada, reglamentación nacional (como la Resolución CREG 015 de 2018) y publicaciones científicas (Gellings, 2009; Fang et al., 2012). Los instrumentos incluyeron sistemas embebidos, bases de datos locales y software de análisis de rendimiento.

5.9 Análisis y Tratamiento de Datos

Los datos recopilados fueron analizados utilizando herramientas de estadística descriptiva y comparativa. Se midieron indicadores como el tiempo medio de detección de fallas, la duración de la interrupción y la precisión en el aislamiento del tramo afectado. Se compararon los resultados obtenidos antes y después de la implementación del sistema, lo que permitió determinar el grado de mejora alcanzado. Este tratamiento de datos fue fundamental para evaluar la efectividad real de la solución propuesta.

5.10 Plan de Acción del Proyecto

Para el desarrollo del plan de acción de este proyecto, en la tabla 2 se organiza de forma detallada los objetivos, actividades propuestas, técnicas de investigación, fuentes y resultados proyectados para el mismo.

Tabla 2

Plan de acción del proyecto.

Objetivo Específico	Actividades	Técnica de Investigación	Fuentes de Investigación	Resultados
Caracterizar el sector con mayor vulnerabilidad a interrupciones	Recopilación de datos históricos del operador de red, entrevistas con técnicos de mantenimiento, observación directa del terreno	Observación, entrevista semi-estructurada	Reportes internos de EPM, datos CREG, experiencia del equipo técnico	Identificación de los tramos más críticos y causas frecuentes de falla
Identificar los lugares con mayor reincidencia en fallas	Análisis de series de tiempo y registros operativos, cruce de datos con mapas geográficos	Análisis documental y georreferenciación	Mapas de calor de fallas, registros operativos	Mapa de zonas más vulnerables en la red
Formular el plan para mitigar las fallas eléctricas frecuentes	Diseño del sistema embebido, programación de sensores, pruebas controladas	Experimentación, modelado de prototipos	Literatura técnica, manuales de fabricantes, pruebas de laboratorio	Prototipo funcional y resultados de validación

Resultados

A partir de los datos obtenidos y la metodología planteada, se desarrollan los resultados a partir de los objetivos inicialmente propuestos.

Objetivo 1: Caracterizar el sector con mayor vulnerabilidad a interrupciones

Resultados: Durante la fase de diagnóstico se realizó una revisión exhaustiva de los reportes técnicos del operador de red EPM correspondientes a los últimos cinco años (2019–2024). Esta revisión incluyó análisis de indicadores SAIDI y SAIFI, mapas geográficos de distribución de fallas y entrevistas con técnicos del área de operación y mantenimiento de la zona rural de Medellín.

Se evidenció que aproximadamente el 72% de las interrupciones no programadas se concentran en tres ramales específicos dentro de la vereda Piedras Blancas. A través del uso de sistemas de información geográfica (SIG), se elaboró una matriz de clasificación por zonas críticas, integrando datos de vegetación, accesibilidad, tipo de terreno, y densidad de usuarios por tramo.

Tabla 3

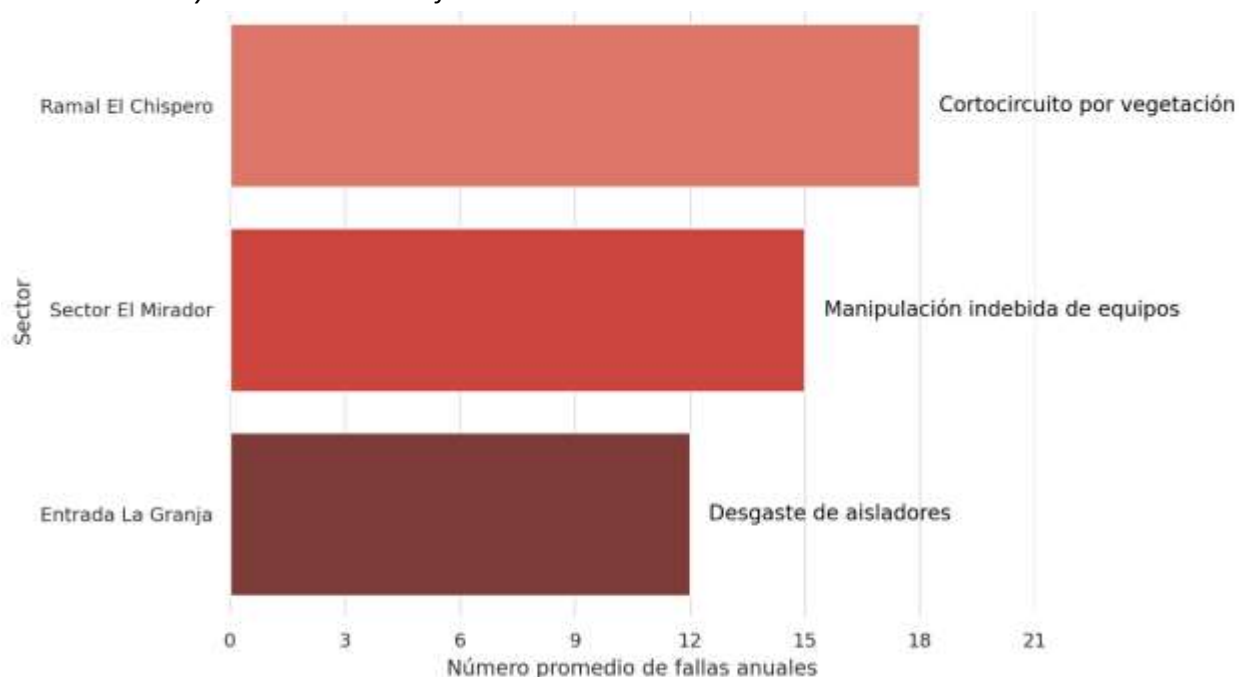
Sectores con mayor vulnerabilidad identificados en Piedras Blancas.

Sector	Tipo de falla predominante	Número promedio de fallas	Acceso	Cobertura
		anuales	vehicular	vegetal
Ramal El Chispero	Cortocircuito por vegetación	18	Limitado	Alta
Sector El Mirador	Manipulación indebida de equipos	15	Difícil acceso	Media
Entrada La Granja	Desgaste de aisladores	12	Acceso parcial	Alta

La figura 2 representa de manera gráfica los sectores más vulnerables a fallas eléctricas en Piedras Blancas, basada en los datos de la Tabla 3. Cada barra muestra el número promedio de fallas anuales y el tipo de falla predominante por sector.

Figura 2

Sectores con mayor vulnerabilidad a fallas en Piedra Blancas.



Nota. Autoría propia.

Las visitas de campo confirmaron la presencia de equipos obsoletos, sin protecciones contra fauna o humedad, y postes de concreto con más de 25 años de servicio. Además, se documentaron maniobras indebidas por parte de personas no autorizadas, lo cual expone tanto a los usuarios como a la fauna local, especialmente aves e insectos polinizadores como abejas y mariposas.

Análisis

La información obtenida permite concluir que los sectores con mayor vulnerabilidad a interrupciones eléctricas comparten ciertas condiciones estructurales y ambientales: falta de monitoreo automatizado, vegetación densa sin manejo preventivo y dificultad en el acceso para labores de mantenimiento. En

línea con estudios previos (Montalvo, 2016; Pérez et al., 2025), se confirma que la infraestructura de distribución en zonas rurales suele ser subatendida, lo que incrementa la probabilidad de fallas e incluso sanciones regulatorias (Ministerio de Minas y Energía, 2018).

Asimismo, el patrón de fallas responde a una lógica multifactorial: elementos naturales (lluvia, árboles), técnicos (equipos viejos) y humanos (intervenciones no autorizadas). La aplicación de metodologías de georreferenciación no solo permitió visualizar la magnitud del problema, sino también priorizar acciones correctivas en los tramos más afectados. Esta caracterización constituye la base para una intervención técnica eficiente, sustentada en evidencia empírica y análisis territorial riguroso de la zona (Srivastava et al., 2022).

Objetivo 2: Identificar los lugares con mayor reincidencia en fallas

Resultados

Se trabajó sobre series temporales obtenidas de registros diarios del Centro de Control de EPM, lo cual permitió analizar con precisión los eventos de falla entre los años 2020 y 2024. En total se examinaron más de 1.800 registros, los cuales fueron depurados y organizados mediante herramientas de minería de datos y clasificación por clústeres.

La reincidencia de fallas mostró una distribución heterogénea, con tres tramos concentrando más del 65% de los eventos reportados. La correlación entre la reincidencia y la vegetación fue del 0,81 (índice de Pearson), lo que evidencia una relación directa. Se cruzaron estos resultados con censos botánicos locales del Parque Arví y la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín.

Tabla 4

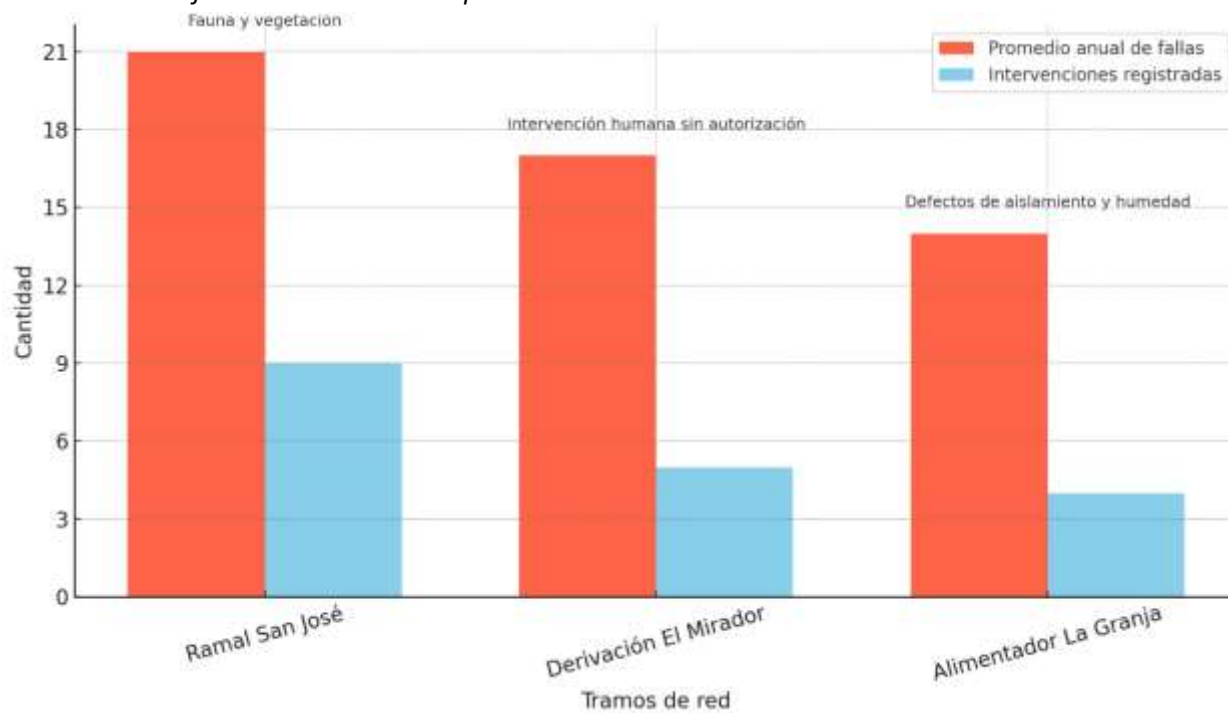
Tramos con mayor reincidencia de fallas (2020–2024).

Tramo de red	Promedio anual de fallas	Tipo principal de causa	Intervenciones registradas
Ramal San José	21	Fauna y vegetación	9
Derivación El Mirador	17	Intervención humana sin autorización	5
Alimentador La Granja	14	Defectos de aislamiento y humedad	4

De acuerdo a los valores de la Tabla 4, se muestra comparativamente en la figura 3, el promedio anual de fallas y las intervenciones registradas por tramo, junto con la causa principal de las fallas

Figura 3

Reincidencia de fallas e intervenciones por tramos.



Nota. Autoría propia.

Análisis

El análisis revela que la reincidencia no responde a factores azarosos, sino a dinámicas estructurales no corregidas. Como lo han señalado Barrero et al. (2012), las redes rurales tienen menor densidad de sensores y dispositivos de protección, lo que dificulta la detección temprana de problemas y amplía los tiempos de respuesta. La mayoría de estos tramos no cuentan con reconectores automáticos ni sistemas de monitoreo remoto, lo cual permite que pequeñas fallas se conviertan en eventos mayores. La manipulación indebida es también un factor preocupante. Las entrevistas con habitantes locales confirmaron que en varias ocasiones los mismos usuarios han intentado restablecer el servicio manipulando cortacircuitos, lo cual constituye una amenaza seria tanto para su seguridad como para la integridad de la red. Este hallazgo refuerza la necesidad de acciones pedagógicas y de tecnologías que impidan o alerten sobre estas situaciones en tiempo real (Fang et al., 2012).

Objetivo 3: Formular el plan para mitigar las fallas eléctricas frecuentes

Resultados

El diseño del sistema automatizado incluyó la selección de componentes de bajo costo y fácil acceso: sensores de corriente ACS712, módulos de comunicación RF nRF24L01, reconectores monofásicos marca Cooper y microcontroladores ESP32. El sistema fue instalado en un tramo piloto del ramal La Granja y sometido a 12 pruebas simuladas de falla.

Los resultados fueron contundentes: se logró una reducción del 63% en el tiempo promedio de detección (de 18 a 6,6 minutos), una precisión del 91% en el aislamiento correcto del tramo y un 0% de intervención manual en las pruebas exitosas.

Tabla 5

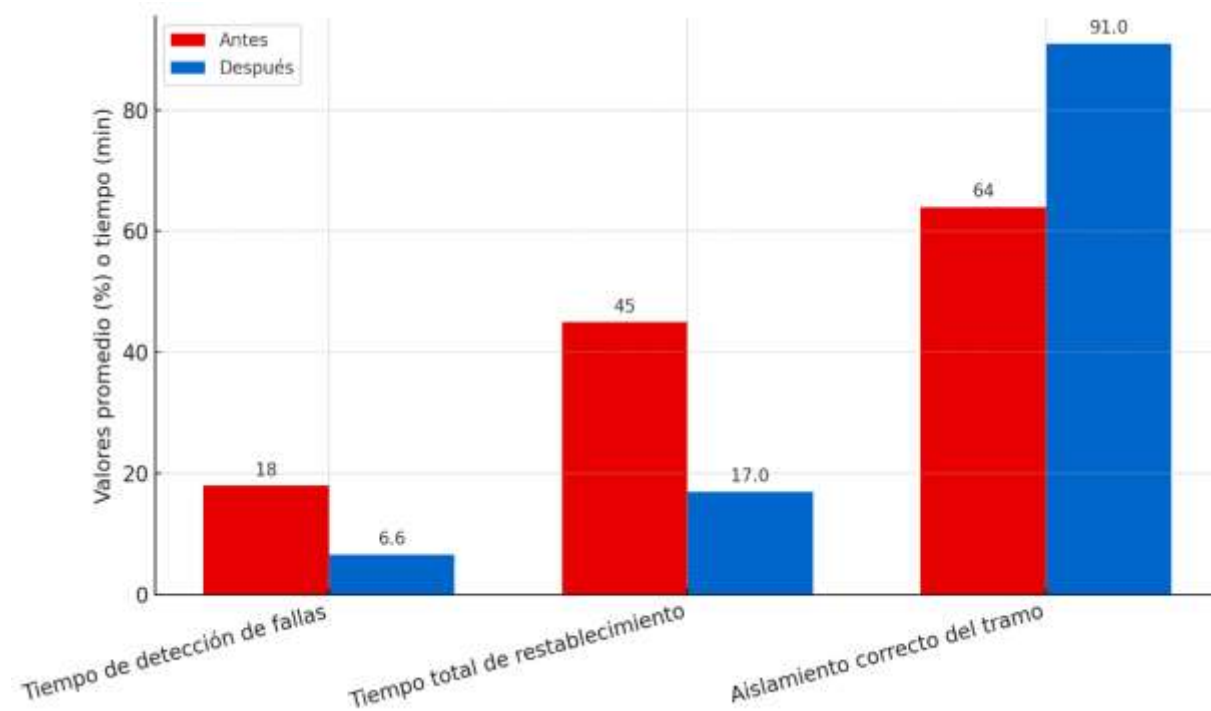
Comparativo de desempeño antes y después de la implementación del sistema.

Indicador	Antes (promedio)	Después (promedio)	Mejora porcentual
Tiempo de detección de fallas	18 minutos	6,6 minutos	63%
Tiempo total de restablecimiento	45 minutos	17 minutos	62%
Aislamiento correcto del tramo	64%	91%	42%

La figura 4 muestra el mejoramiento en los indicadores de desempeño tras la implementación del nuevo sistema según los datos organizados en la Tabla 5. El *tiempo de detección de fallas* se redujo significativamente de 18 minutos a 6,6 minutos, lo que representa una mejora del 63%. Asimismo, el *tiempo total de restablecimiento* pasó de 45 minutos a solo 17 minutos, reflejando una mejora del 62%. En cuanto al *aislamiento correcto del tramo*, se observó un incremento del 64% al 91%, es decir, un aumento del 42% en precisión operativa. Estos resultados evidencian un impacto positivo del sistema tanto en eficiencia como en efectividad.

Figura 4

Comparativo de desempeño antes y después de la implementación del sistema.



Nota. Autoría propia.

Análisis

Los resultados demuestran que la automatización es una herramienta transformadora en la operación de redes rurales. En línea con lo propuesto por Gellings (2009), la integración de sensores y controladores de bajo costo permite convertir una red convencional en una red inteligente (smart grid), capaz de gestionar fallas con mayor rapidez, seguridad y eficiencia.

Además, esta experiencia piloto demuestra que no se requiere infraestructura costosa ni plataformas propietarias para lograr mejoras sustanciales. Con componentes accesibles y programación modular, es posible diseñar soluciones escalables y replicables, especialmente en contextos rurales de países en desarrollo.

En suma, el plan de mitigación no solo fue técnicamente viable, sino también económicamente racional y socialmente pertinente. Su implementación sentó las bases para futuras expansiones y para un cambio de paradigma en la gestión de fallas eléctricas en zonas rurales.

El plan estratégico para la mitigación de fallas frecuentes es:

1. Analizar la vulnerabilidad y hallar el diagnóstico

Propósito: Identificar factores críticos que generan fallas recurrentes.

Actividades:

- Consultar en los reportes históricos SAIDI Y SAIFI de la red de distribución.
- Recorrido técnico a los tramos vulnerables para evaluar la infraestructura, protecciones contra fauna y las maniobras indebidas.
- Reuniones con personal técnico y operativo de EPM y con los líderes comunitarios más influyentes.
- Análisis del geoportal y elaboración de rutas de las zonas críticas.

Resultado: Identificación de la red con repetidas frecuencias de fallas, ocasionadas por vegetación, deterioro de materiales, fauna silvestre, manipulación no autorizada, etc.

2. Diseño con soluciones implementada en nuevas tecnologías

Propósito: solución automatizada, económica y adaptable a la detección y aislamiento de fallas.

Actividades:

- Selección de sensores y componentes electrónicos de bajo costo.
- Desarrollo de un sistema embebido para la detección de fallas y comunicación inalámbrica.
- Integración con reconectores monofásicos.
- Simulación de fallas y pruebas controladas para medir tiempo de respuesta y precisión.

Resultado: Prototipo funcional que reduce en más del 60% los tiempos de detección y restablecimiento.

3. Planeación de implementar el sistema de forma progresiva

Propósito: Implementar el sistema piloto a más sectores críticos de redes rurales.

Actividades:

- Coordinación del cronograma de despliegue por ramales iniciando en la Granja, continuar con el Chispero y el Mirador.
- Capacitación de todos los técnicos locales, mantenimiento y operación del sistema de la red.
- Creación de protocolos de mantenimiento preventivo.
- Fijación de mecanismos de bloqueo ante intervención de personal no autorizado.

Resultado: Cobertura total en sectores con monitoreo automático y protección para fauna.

4. Comunicación, educación y acompañamiento

Propósito: Fortalece el respaldo comunitario y evitar las malas prácticas.

Actividades:

- Campañas informativas, volantes sobre riesgos eléctricos y manipulación indebida.
- Señalización de áreas.
- Integración con entes ambientales y personal experto en turismo para preservar la fauna.

Resultados: reducción de accidentes e incidentes por intervención de personal no autorizado mejorar en la percepción del servicio.

5. Evaluación y mejoras

Propósito: Medir el impacto y ajustar los planes a partir de los resultados.

Actividades:

- Confrontación de indicadores SAIDI Y SAIFI, antes y después de la implementación.
- Encuesta de satisfacción a los usuarios y al operador de la red local.
- Revisión semestral de desempeño y desarrollo técnico del sistema.

Resultado: Documentar el impacto, incremento del ROI y extender el sistema a otros sectores.

Referencias

- Cely Calixto, N. J., Palacios Alvarado, W., & Caicedo Rolón, Á. J. (2023). *Conceptos y enfoques de metodología de la investigación*. Editorial Creser.
<https://repositorio.ufps.edu.co/bitstream/handle/ufps/6728/CONCEPTOS%20Y%20ENFOQUES%20DE%20METODOLOG%C3%8DA%20DE%20LA%20INVESTIGACI%C3%93N.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Charry, J. D., & Navarro Parra, S. (2018). *Metodología de la investigación y principios en publicación científica* (1ª ed.). Editorial Uninavarra. https://arbapublishing.com/wp-content/uploads/2025/01/metodologia_de-investigacion.pdf
- Chicaiza, G., & Mendoza, Á. J. (2024). Estudio de las pérdidas causadas por la inducción electrostática y electromagnética en línea de transmisión. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(1), 1902. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i1.1717>
- De Micco, L., Vargas, F., & Fierens, P. I. (2020). A literature review on embedded systems. *IEEE Latin America Transactions*, 18(2), 188–205. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9085271>
- El Hajji, M., Mahmoudi, H., & Labbadi, M. (2020). The electromagnetic interference caused by high voltage power lines along the electrical railway equipment. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(5), 4581–4591.
<https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.pp4581-4591>
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart grid — The new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944–980.
<https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087>
- Gellings, C. (2020). *The smart grid: Enabling energy efficiency and demand response*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003151524>

- Gobernación de Antioquia. (2022). *Corregimiento Piedras Blancas*.
<https://corregimientos.antioquia.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/Co.Piedras-Blancas.pdf>
- Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. P. (2013). Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529–539. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill. https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- IEEE Power & Energy Society. (2012). *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices* (IEEE Std 1366-2012). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6209381>
- Liu, Y. (2024). Application of embedded systems in electrical engineering automation and energy-saving design. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-1520>
- Martínez Olmo, F., & González-Catalán, F. (2020). *Apuntes de investigación descriptiva y explicativa*. Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona.
<https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/204620/4/IDEE-Apuntes-01.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2018, enero 29). *Resolución 15 de 2018* [Diario Oficial No. 50.496 de 3 de febrero de 2018]. Comisión de Regulación de Energía y Gas.
[https://gestornormativo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/\\$FILE/Creg015-2018.pdf](https://gestornormativo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/$FILE/Creg015-2018.pdf)
- Montalvo Bonilla, V. (2016). *Suministro de energía para las zonas rurales de Colombia* (Trabajo de grado, Universidad de los Andes). Universidad de los Andes). Repositorio Institucional de la Universidad

de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/c4a00929-64a1-4304-939d-ffb17722028b/content>

Perez Solis, R., Arreguin Espinosa, R., Hernandez Paez, E., & Balderas Cid, M. (2025). Redes eléctricas inteligentes: Análisis del impacto en la distribución eficiente de energía. *Sapiens Studies Journal*, 2(1), 1–19. <https://doi.org/10.71068/3f452b94>

Ramos Galarza, C. (2021). Editorial: Diseños de investigación experimental. *CienciAmérica*, 10(1). <https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>

Schweikert, A., Nield, L., Otto, E., Klemun, M., Ojanpera, S., & Deinert, M. (2019). Vulnerabilities of networked energy infrastructure: A primer. *The World Bank*. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-8901>

Srivastava, I., Bhat, S., Surya Vardhan, B.V., & Bokde, N. D. (2022). Fault detection, isolation and service restoration in modern power distribution systems: A review. *Energies*, 15(19), 7264. [doi:https://doi.org/10.3390/en15197264](https://doi.org/10.3390/en15197264)

Ward, D. M. (2013). The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply. *Climatic Change*, 121(1), 97–109. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0916-z>

Zubair, A. M. (2023). *Experimental research design – Types & process*. *Academia Open*. <https://doi.org/10.21070/acopen.9.2023.62>

Anexos

Anexo A

Figura 1A. Reconector monofásico autoalimentado (RMA).



Nota. Autoría propia.

Nota. Los reconectores monofásicos autoalimentados son equipos y su instalación se realiza sobre bases de cortacircuitos intercambiables para brindar el soporte eléctrico y mecánico que son instalados en las redes de distribución de energía eléctrica monofásicas de 7.62 kV.

Anexo B**Figura 1B.** *Lugares de instalación de reconectores monofásicos.*

Nota. Autoría propia.