

REVISIÓN DE ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LA CANTIDAD DE  
INTERRUPCIONES DE SERVICIO EN SDL UTILIZANDO SECCIONADORES DE  
REPETICIÓN O TRES ETAPAS EN PUNTOS ESTRATÉGICOS

Jonathan Joel Velazco Agudelo

Darcy Maryoly Garcés Ojeda

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Sistemas de Distribución de  
Energía Eléctrica

Director

Gerardo Latorre Bayona

Doctor en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Bucaramanga

2025

## **Dedicatoria**

Dedicamos esta monografía con amor y gratitud a nuestros padres, pilares fundamentales de nuestras vidas. A ellos, que, con esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional, nos enseñaron el valor del conocimiento, la perseverancia y el trabajo honesto. Gracias por ser nuestro ejemplo y fortaleza en cada camino profesional.

## **Agradecimientos**

Extendemos un sincero y profundo agradecimiento a la planta docente de la Universidad Industrial de Santander, quienes con dedicación, compromiso y conocimiento nos inculcaron las bases fundamentales de la ingeniería eléctrica. Gracias por enseñarnos no solo contenidos técnicos, sino también valores que marcarán nuestro desempeño en el campo laboral.

A todos los que hicieron parte de este proceso, gracias por inspirarnos y acompañarnos en nuestro camino como ingenieros electricistas.

## Resumen

**Título:** REVISIÓN DE ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LA CANTIDAD DE INTERRUPCIONES DE SERVICIO EN SDL UTILIZANDO SECCIONADORES DE REPETICIÓN O TRES ETAPAS EN PUNTOS ESTRATÉGICOS

**Autor:** Jonathan Joel Velazco Agudelo, Darcy Maryoly Garcés Ojeda

**Palabras Clave:** Confiabilidad eléctrica, SDL, seccionadores, optimización, NSGA-II, Markov, SAIDI, SAIFI.

**Descripción:** La confiabilidad del servicio eléctrico en sistemas de distribución es un factor clave para garantizar la continuidad y calidad del suministro. Este estudio plantea la implementación de seccionadores de repetición o de tres etapas como estrategia principal para reducir interrupciones en la red, fundamentándose en la aplicación de herramientas avanzadas de análisis y optimización.

Se evaluaron cuatro estrategias: 1) el Algoritmo Evolutivo (AE), que genera soluciones a través de procesos de selección y recombinación; 2) el Algoritmo Genético de Ordenación No Dominante II (NSGA-II), orientado a la optimización multiobjetivo mediante ordenación elitista; 3) el Modelo de Cadenas de Markov, que modela probabilísticamente la transición entre estados de operación y falla, y 4) la Optimización Multicriterio, que combina criterios técnicos y operativos para la selección estratégica de puntos de instalación.

Tras un análisis de viabilidad técnica, económica y operativa, se seleccionó el Modelo de Optimización Multicriterio como la estrategia más adecuada para la implementación práctica. A esta metodología se le aplicó un análisis DOFA, identificando sus fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas, con el objetivo de mostrar sus beneficios y mitigar riesgos. Los resultados demuestran que la metodología seleccionada puede ser aplicada por los OR, ayudando a que el efecto negativo de las fallas transitorias sea mínimo. Esto teniendo en cuenta que los seccionadores de repetición pueden reaccionar ante ellas, reduciendo significativamente la duración de interrupciones, mejorando la confiabilidad del servicio (índices SAIDI y SAIFI) y promoviendo la evolución hacia redes de distribución más resilientes, inteligentes y sostenibles.

## Abstract

**Title:** REVIEW OF STRATEGIES TO REDUCE THE NUMBER OF SERVICE INTERRUPTIONS IN SDL USING REPEATER DISCONNECTORS OR THREE STAGES AT STRATEGIC POINTS

**Author:** Jonathan Joel Velazco Agudelo, Darcy Maryoly Garcés Ojeda

**Key Words:** Electrical reliability, SDL, disconnectors, optimization, NSGA-II, Markov, SAIDI, SAIFI.

**Description:** The reliability of electrical service in distribution systems is a key factor in ensuring continuity and quality of supply. This study proposes the implementation of repeaters or three-stage disconnectors as the main strategy for reducing network interruptions, based on the application of advanced analysis and optimization tools.

Four strategies were evaluated: 1) the Evolutionary Algorithm (EA), which generates solutions through selection and recombination processes; 2) the Non-Dominant Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), aimed at multi-objective optimization through elitist sorting; 3) the Markov Chain Model, which probabilistically models the transition between operating and failure states, and 4) Multi-Criteria Optimization, which combines technical and operational criteria for the strategic selection of installation points.

Following a technical, economic, and operational feasibility analysis, the Multi-Criteria Optimization Model was selected as the most appropriate strategy for practical implementation. A SWOT analysis was applied to this methodology, identifying its strengths, opportunities, weaknesses, and threats, with the aim of demonstrating its benefits and mitigating risks. The results demonstrate that the selected methodology can be applied by ROs, helping to minimize the negative effect of transient faults. This takes into account that reclosing switches can react to them, significantly reducing the duration of interruptions, improving service reliability (SAIDI and SAIFI indices), and promoting the evolution towards more resilient, intelligent, and sustainable distribution networks.

## Tabla de Contenidos

Capítulo 1 Introducción e información general .....	8
Planteamiento del problema.....	8
Objetivos .....	9
Objetivo 1.....	9
Objetivo 2.....	9
Objetivo 3.....	9
Capítulo 2 Antecedentes y marco conceptual.....	10
Antecedentes .....	10
Marco normativo.....	12
Marco conceptual.....	13
Capítulo 4 Estrategias para reducir la cantidad de interrupciones del SDL .....	16
Algoritmo Evolutivo (AE).....	16
Algoritmo genético de ordenación no dominante II (NSGAI).....	17
Cadena de Markov .....	20
Optimización multicriterio.....	21
Capítulo 5 Análisis DOFA de la Estrategia de Optimización Multicriterio .....	23
Fortalezas .....	23
Oportunidades .....	24
Debilidades .....	24
Amenazas.....	25
Capítulo 6 Puntos óptimos para la instalación de seccionadores de 3 etapas.....	26
Metodología de Recolección y Análisis de Información para el Pronóstico de Fallas. 26	
Recolección de Datos.....	26
Procesamiento y Organización de Datos .....	26
Determinación de Causas Raíz .....	30
Ubicación óptima de los seccionadores de repetición .....	30
Capítulo 7 Análisis económico - seccionador de repetición de 3 etapas (15 kV).....	33
Capítulo 8 Resultados .....	35
Capítulo 9 Conclusiones .....	39
Lista de referencias .....	40

### **Lista de tablas**

Tabla 1 Saifi de alimentadores - [Horas]. .....	27
Tabla 2 Saifi de alimentadores - [Interrupciones].....	28
Tabla 3 Probabilidad de ocurrencia en fallas en el alimentador 27. ....	29
Tabla 4 Datos eléctricos de los puntos seleccionados. ....	35
Tabla 5 Indicadores de calidad de los puntos seleccionados. ....	36

## **Lista de ilustraciones**

Ilustración 1. Indicadores de Calidad durante el año 2024.....	29
Ilustración 2. Diagrama de Red del alimentador 27. ....	31
Ilustración 3. Tensiones en P.U. ....	31
Ilustración 4. Esquema de análisis de ubicación para seccionadores. ....	32
Ilustración 5.Ubicaciones de los puntos eléctricos bajo análisis. ....	35
Ilustración 6.Ubicaciones óptimas. ....	37
Ilustración 7.Ubicación seleccionada.....	38

## **Capítulo 1**

### **Introducción e información general**

La revisión de estrategias para reducir las interrupciones del servicio de energía en los sistemas de distribución de energía SDL es fundamental para mejorar la continuidad y confiabilidad del suministro eléctrico. En este contexto, a continuación, se expone la problemática y los objetivos de este estudio

#### **Planteamiento del problema**

En los sistemas de distribución de energía eléctrica en Colombia se ha identificado una alta frecuencia de fallas en las líneas de media tensión, lo que impacta directamente la continuidad y calidad del servicio. Estas fallas, en su mayoría, se deben a causas no identificadas, seguidas por fallas ocasionadas por maniobras, luego por pases abiertos y otras causas adicionales.(Dr. Juan Antonio Maruri Jiménez, 2015)

Un factor adicional que agrava esta problemática es el acceso a las zonas donde se presentan las fallas. En reiteradas ocasiones, el personal técnico encargado de la reparación se enfrenta a dificultades para acceder a áreas rurales o de difícil acceso. Esto hace que el tiempo de respuesta sea considerablemente mayor, lo que prolonga la duración de las interrupciones del servicio.

Además, las condiciones adversas, como caminos en mal estado o zonas alejadas sin infraestructura vial adecuada, generan retrasos significativos en la llegada de las cuadrillas de mantenimiento al lugar de la falla. Esto no solo afecta la eficiencia en la solución de los problemas, sino que también aumenta el descontento de los usuarios y las

pérdidas económicas tanto para la empresa como para los sectores productivos que dependen del servicio eléctrico.

A pesar de los esfuerzos por mejorar los tiempos de respuesta mediante mantenimiento correctivo y preventivo, la combinación de fallas recurrentes por obsolescencia de los equipos y las dificultades de acceso ha convertido la situación en un problema crítico que requiere una intervención técnica urgente.

### **Objetivos**

Revisar estrategias para reducir la cantidad de interrupciones de servicio en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (SDL) mediante la implementación de seccionadores de repetición o tres etapas en puntos estratégicos.

#### **Objetivo 1.**

Identificar estrategias para reducir la cantidad de interrupciones de servicio en una zona del Sistema de Distribución de Energía Eléctrica (SDL).

#### **Objetivo 2.**

Realizar un análisis DOFA de acuerdo con el alcance de la implementación de seccionadores de repetición para una zona del Sistema de Distribución de Energía Eléctrica (SDL).

#### **Objetivo 3.**

Determinar puntos estratégicos para instalar seccionadores de repetición, con el objetivo de reducir la cantidad de interrupciones de servicio en un circuito seleccionado dentro de la zona objeto de estudio.

## **Capítulo 2**

### **Antecedentes y marco conceptual**

A continuación, se muestra antecedentes que permiten analizar el desarrollo de los seccionadores de repetición, identificando su impacto en los sistemas de distribución local. Por su parte, el marco conceptual define los principios de funcionamiento de estos dispositivos y finalmente el marco normativo establece las regulaciones y estándares técnicos.

#### **Antecedentes**

En los últimos años, la calidad del servicio en redes de distribución eléctrica ha cobrado una relevancia creciente debido a la necesidad de garantizar un suministro continuo y confiable de energía. En Ecuador, empresas distribuidoras como la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL-EP) han enfrentado dificultades para mantener altos estándares de calidad, especialmente en áreas urbanas con redes complejas y dinámicas. Este escenario ha impulsado la implementación de nuevas tecnologías y la adopción de sistemas de protección avanzados, como los reconectores y seccionadores, que permiten una mejor gestión de las fallas en la red y una optimización en los tiempos de restablecimiento del servicio. (Regalado Cajamarca, 2021)

Diversos estudios han demostrado que la ubicación estratégica de estos dispositivos en los alimentadores de media tensión puede reducir significativamente la frecuencia de interrupciones (medida a través del índice FMIK) y los tiempos de reposición (índice TTIK), lo que impacta positivamente en los indicadores globales de calidad del servicio técnico. La revisión de técnicas y algoritmos de optimización, como los algoritmos

evolutivos multiobjetivo, ha permitido desarrollar metodologías más eficientes para determinar la ubicación óptima de estos equipos, mejorando tanto la confiabilidad de la red como los costos asociados. (Regalado Cajamarca, 2021)

En el departamento de Santander, las estaciones base de la red celular dependen de sistemas de protección en sus redes eléctricas para garantizar la continuidad del servicio y la calidad de la señal. Actualmente, estas estaciones utilizan seccionadores de baja tensión, los cuales son dispositivos mecánicos que permiten desconectar parte de la red eléctrica en caso de una falla, facilitando así las labores de mantenimiento y asegurando la seguridad del sistema.(Martinez De La Hoz & Romero Bermudez, 2015)

Sin embargo, el sistema de seccionadores de baja tensión ha mostrado varias deficiencias operativas. En promedio, cada torre presenta alrededor de 34 fallas por año, lo que genera frecuentes interrupciones en el servicio de telecomunicaciones. Cada vez que ocurre una falla, el seccionador actual actúa para desconectar solo la parte afectada, activando automáticamente generadores de respaldo que funcionan con combustible, mientras se realizan las reparaciones. Este proceso implica altos costos para la empresa debido a la movilización del personal de mantenimiento, el suministro de combustible, la reposición de los seccionadores dañados y la mano de obra necesaria para la reconexión.(Martinez De La Hoz & Romero Bermudez, 2015)

Además de los costos asociados, la calidad del servicio a los usuarios se ve comprometida, ya que las interrupciones prolongadas en el suministro eléctrico en las estaciones base afectan la disponibilidad de la red celular. Frente a esta problemática, surge la necesidad de buscar una solución más eficiente para mejorar tanto la confiabilidad como

la rentabilidad del sistema de protección de la red eléctrica. Una posible alternativa es el reemplazo de los seccionadores de baja tensión actuales por seccionadores de repetición de tres etapas. Estos dispositivos permiten recierres automáticos secuenciales en caso de fallas temporales, lo que podría reducir significativamente los costos operativos y el número de interrupciones de servicio. (Martinez De La Hoz & Romero Bermudez, 2015)

### **Marco normativo**

Resoluciones de la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas):

- Resolución CREG 015 de 2018: Regula la calidad del servicio en los Sistemas de Distribución Local (SDL) en Colombia. Incluye indicadores clave como SAIDI y SAIFI, que son esenciales para medir la duración y frecuencia de interrupciones, afectadas por la implementación de seccionadores automáticos.
- Resolución CREG 036 de 2019: Establece metas anuales de calidad del sistema para cada Operador de Red (OR), con incentivos asociados a los indicadores de duración y frecuencia de interrupciones.
- Código de Redes (Resolución CREG 025 de 1995): Define las condiciones técnicas y de calidad para la operación de los SDL, incluyendo la instalación y operación de dispositivos de protección y maniobra, como los seccionadores automáticos.
- RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas): Establece las condiciones mínimas de seguridad en instalaciones eléctricas en Colombia. Aunque no aborda específicamente los seccionadores automáticos, su cumplimiento es esencial en cualquier intervención técnica.

### Normas Internacionales:

- IEEE Std 1366-2012: Proporciona guías para medir la confiabilidad del sistema de distribución, destacando el impacto de los seccionadores automáticos en los índices SAIDI y SAIFI.
- IEEE Std C37.04, C37.06, C37.09: Estándares para interruptores y seccionadores de alta tensión, con especificaciones para su operación y mantenimiento.
- IEC 62271: Especifica los requisitos para los seccionadores de alta tensión, asegurando su confiabilidad y operación segura.
- IEC 60364: Normativa para instalaciones de baja tensión, aplicable a sistemas de distribución que involucren este tipo de tensión.
- NERC PRC-005: Establece los requisitos de mantenimiento de equipos de protección, como seccionadores automáticos, para garantizar la confiabilidad del sistema y minimizar interrupciones.

### Marco conceptual

**Sistema de distribución:** Un sistema de distribución es el conjunto de infraestructuras eléctricas encargadas de llevar la energía desde las redes de transmisión hasta los usuarios finales. Se compone de subestaciones, líneas de media y baja tensión, transformadores y dispositivos de protección. Su diseño busca garantizar un suministro confiable, eficiente y seguro, minimizando las pérdidas eléctricas y asegurando la continuidad del servicio. (Das, 2017)

**Contingencia:** En el contexto eléctrico, una contingencia se refiere a un evento inesperado que afecta la operación normal del sistema, como la falla de un generador, una

línea de transmisión o un transformador. Los sistemas eléctricos se diseñan con redundancias para minimizar el impacto de estas eventualidades y mantener la confiabilidad y seguridad del suministro (Prabha Kundur, 1994).

**Cortocircuito:** Un cortocircuito ocurre cuando dos conductores con diferente potencial eléctrico entran en contacto directo, generando una corriente excesiva que puede dañar equipos y comprometer la seguridad del sistema. Para mitigar sus efectos, se emplean dispositivos de protección como fusibles y disyuntores que interrumpen el flujo de corriente de manera rápida y segura. (IEEE Std 242-2001, 2001)

**Pérdidas eléctricas:** Las pérdidas eléctricas representan la energía disipada durante el transporte de la electricidad a través de las redes de distribución y transmisión. Se dividen en pérdidas técnicas, debidas a la resistencia de los conductores y transformadores, y pérdidas no técnicas, relacionadas con fraudes o errores de medición. Reducir estas pérdidas es fundamental para mejorar la eficiencia energética del sistema. (Turan Gonen, 2014)

**Red Radial:** Una red radial es una configuración de distribución en la que los alimentadores parten de una subestación y abastecen a los usuarios en una sola dirección, sin interconexiones entre líneas. Su principal ventaja es la simplicidad y bajo costo, pero su desventaja es la vulnerabilidad ante fallas, ya que una interrupción en un punto puede dejar sin servicio a todos los consumidores aguas abajo. (Richard E. Brown, 2008)

**Red Esquema Anillo:** Este tipo de red conecta los diferentes puntos de suministro en forma de circuito cerrado, permitiendo que la energía fluya por múltiples rutas. Su principal beneficio es la mayor confiabilidad, ya que, en caso de una falla, el suministro

puede ser restablecido por otro camino. Sin embargo, su implementación es más costosa debido a la necesidad de mayor infraestructura.(Thomas Allen Short, 2014)

**Seccionadores:** Los seccionadores son dispositivos mecánicos diseñados para abrir o cerrar circuitos eléctricos en condiciones sin carga o con baja corriente. Su función principal es aislar secciones de la red para mantenimiento o maniobras operativas, evitando riesgos para el personal y garantizando la seguridad del sistema.(IEC 62271-102:2018, 2018)

**Reconectador:** El objetivo principal del reconectador es determinar si las interrupciones en el sistema de distribución son de carácter temporal o permanente. Cuando se presenta una falla temporal, el reconectador actúa de forma adecuada durante sus ciclos de recierre, con el fin de mantener la interrupción como transitoria y evitar que se transforme en una falla permanente debido a la actuación innecesaria de otros dispositivos de protección.(IEC 62271-102:2018, 2018)

Los reconectadores dependerán de los valores técnicos de operación, los cuales son:

- Tensión de operación máxima y mínima.
- Corriente de operación normal.
- Corriente de interrupción máxima.
- Aislante interior, aceite o gas SF6.
- Nivel de aislamiento básico. (IEC 62271-102:2018, 2018)

## Capítulo 4

### Estrategias para reducir la cantidad de interrupciones del SDL

#### Algoritmo Evolutivo (AE)

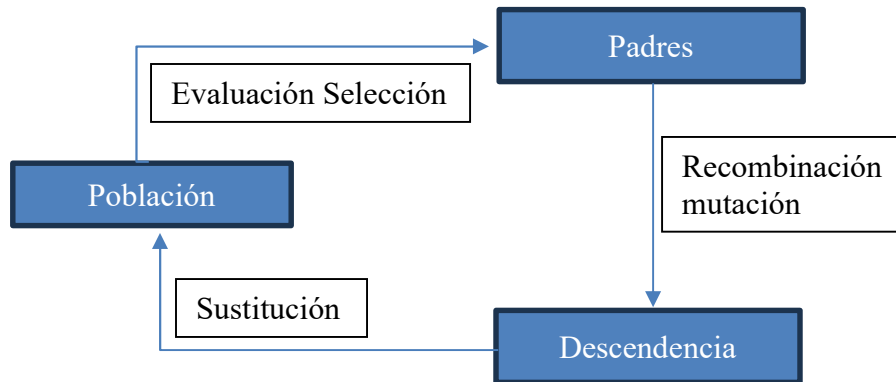
El algoritmo evolutivo consiste en tomar variantes que sean posibles soluciones al problema, agruparlas en un conjunto denominado variantes padres, después valorar una recombinación (Mezcla) entre las variantes de posible solución, generado una nueva generación de variantes de posible solución, y entre ellas se realiza un filtro para determinar cuál es la variante de posible solución más adecuada para resolver el problema.(Regalado Cajamarca, 2021). En el algoritmo evolutivo se tiene la siguiente estructura:

Algoritmo Pseudo Código general de un algoritmo evolutivo

- 1: Comenzar;
  2. Inicializar: la población con soluciones candidatas aleatorias;
  3. Evaluar cada candidato;
  - 4.Repetir hasta que (se cumpla la condición de determinación) Do Seleccionar padres;
  5. Recombinar el par de padres;
  6. Mutar la descendencia resultante;
  7. Evaluar los nuevos candidatos;
  8. Formar nueva población para la siguiente generación;
- Fin

El código presentado fue extraído de (Regalado, 2021).

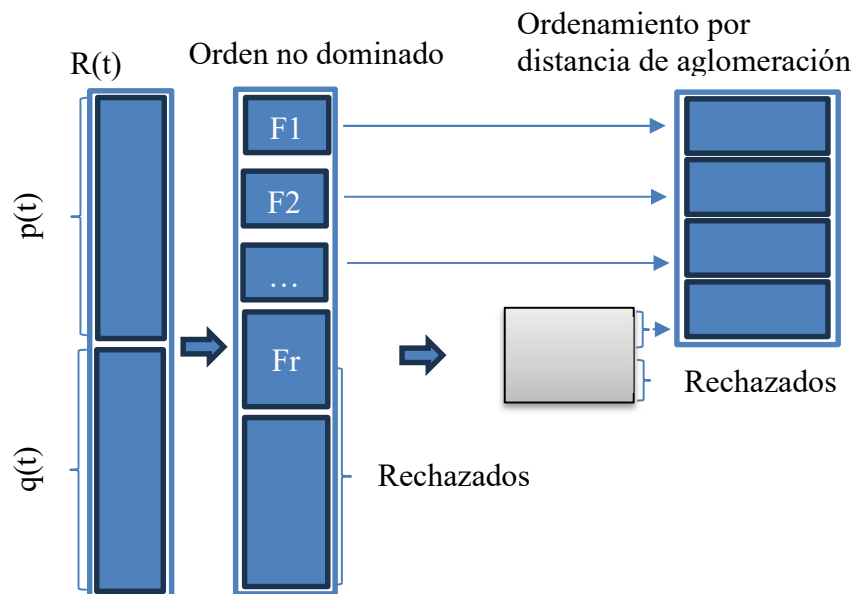
A continuación, se muestra el ciclo de proceso:



El esquema presentado es adaptado de (Regalado, 2021).

### Algoritmo genético de ordenación no dominante II (NSGAI)

El NSGA-II es un algoritmo evolutivo orientado a la optimización multiobjetivo que se basa en la clasificación por dominancia no estricta. Este método emplea un enfoque elitista y un mecanismo de comparación basado en la densidad de soluciones, lo que le permite identificar diversas alternativas viables para un mismo problema. (Regalado Cajamarca, 2021), ver el siguiente esquema, el cual fue adaptado de (Regalado, 2021).



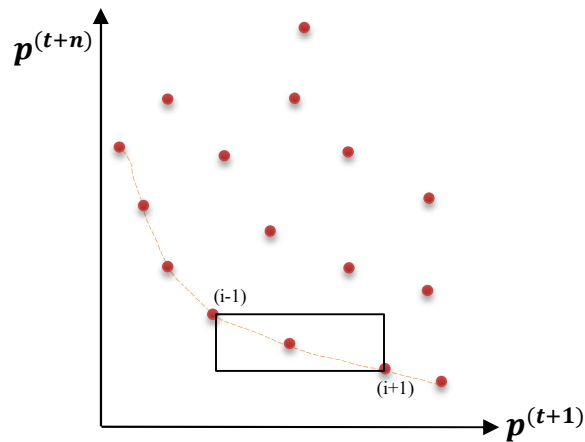
Este algoritmo trabaja con una población que clasifica en diferentes frentes según el criterio de no dominancia. El primer frente (F1) agrupa a los individuos que no son dominados por otro, el segundo frente (F2) incluye a aquellos dominados únicamente por los del primer frente, y así sucesivamente. A cada individuo se le asigna un rango correspondiente al frente en el que se encuentra; por ejemplo, los del primer frente reciben el rango 1, los del segundo rango 2, y así consecutivamente. Además, se calcula una medida denominada distancia de aglomeración para cada individuo, la cual indica qué tan cerca está de otros individuos dentro del mismo frente. Un valor alto de esta distancia sugiere que hay menos soluciones cercanas, lo que contribuye a preservar la diversidad en el conjunto de soluciones generadas.

A partir de la población ordenada  $R(t)$ , se construye la nueva población  $P(t+1)$  incorporando individuos de los frentes en orden sucesivo. Si no es posible incluir un frente completo debido al límite de tamaño, se seleccionan los individuos del último frente considerado ( $F(r)$ ) con base en su distancia de aglomeración, priorizando aquellos con mayor valor. Luego, a partir de  $P(t+1)$ , se eligen algunos individuos como padres utilizando un torneo, en el cual la selección se basa en el rango y la distancia de aglomeración. Si las soluciones tienen rangos distintos, se escoge la de menor rango; en caso de pertenecer al mismo frente, se prefiere la que tenga mayor distancia de aglomeración.

Luego de esto, con la población seleccionada se genera una nueva descendencia  $Q(t+1)$  utilizando operadores convencionales de cruce y mutación.(Regalado Cajamarca, 2021).

Finalmente, la población actual  $P(t+1)$  se combina con la descendencia  $Q(t+1)$  para conformar un nuevo conjunto  $R(t)$  de tamaño  $2N$ , con el cual se reinicia el proceso iterativo hasta alcanzar un conjunto de soluciones óptimas. Con el fin de visualizar la distribución y densidad de estas soluciones en el conjunto óptimo.

Se examina con mayor precisión la frontera de Pareto, representada por la línea roja punteada, la cual muestra los óptimos locales que ofrecen los mejores resultados en términos de las funciones multiobjetivo. Así, cuando dos individuos pertenecen al mismo frente, la selección se realiza considerando su distancia de aglomeración, la cual está ilustrada mediante el cuboide delineado en azul. (Regalado Cajamarca, 2021). Se presenta a continuación una representación gráfica. (Regalado Cajamarca, 2021):



El esquema presentado es adaptado de (Regalado, 2021)

## Cadena de Markov

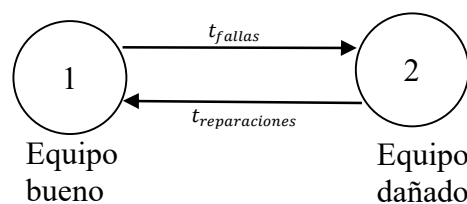
El modelo de la cadena de markov permite realizar un análisis del sistema a través de una serie de estados. Esto permite modelar procesos estocásticos de manera eficiente y se basa en un diagrama de transición de estados, en el que cada estado refleja una condición del sistema (bueno o falla) y estos cambios dependen de la probabilidad de ocurrencia.

En redes de media tensión se identifican dos estados:

- Estado seguro: Cuando la línea opera dentro de las condiciones normales de operación.
- Estado de falla: Cuando la línea excede su capacidad o sufre algún daño.

La transición o cambios de estados dependen de:

- Tasa de fallas  $\lambda$ : Probabilidad de que una línea pase de un estado seguro a uno de falla.
- Tasa de reposición  $\mu$ : Probabilidad de que una línea en falla sea restaurada a un estado seguro.



El esquema presentado fue adaptado de (Regalado, 2021).

- Optimización del mantenimiento: Identifica líneas con mayor riesgo de falla para planificar acciones preventivas.

- Reducción de fallos y costos: Minimiza interrupciones en la red mediante un análisis probabilístico eficiente.
- Mayor seguridad operativa: Ayuda a evitar apagones en cascada al anticipar puntos vulnerables en la red.

### **Optimización multicriterio**

La metodología de optimización propuesta se basa en la aplicación de cuatro criterios fundamentales. Los cuales se integran entre sí para conformar un conjunto de intersección que permite identificar las ubicaciones más factibles para la instalación de seccionadores de repetición en la red de distribución. Esta estrategia no solo considera parámetros eléctricos cuantificables, como el flujo de potencia y el nivel de cortocircuito, sino también criterios profesionales relacionados con el conocimiento operativo de la red, incluyendo experiencia del personal y antecedentes de fallas en áreas específicas.(Richard E. Brown, 2008)

Este enfoque multicriterio resulta especialmente útil en redes donde los operadores ya poseen un conocimiento detallado de su comportamiento y puntos críticos, permitiendo identificar zonas con potencial para la mejora del servicio. Si bien puede conocerse de antemano el área general que requiere intervención, la metodología permite definir con precisión el nodo óptimo para la instalación del seccionador, maximizando así su efectividad. En redes poco conocidas o con escasa información operativa, su aplicación puede ser limitada. Sin embargo, en sistemas bien caracterizados, ofrece una herramienta poderosa para la toma de decisiones estratégicas en la mejora de la continuidad del servicio.(Richard E. Brown, 2008)

## **Selección del área de estudio**

Se define como área de influencia un circuito de distribución con características particulares:

- Red radial alimentada por un único alimentador eléctrico.
- Representación gráfica modelada en DIGSILENT.
- Tensiones representadas en valores por unidad (p.u.), codificadas por colores.

Se excluye la cabecera del circuito del análisis debido a su protección existente contra interrupciones intempestivas.(Antonio GómezExpósito, Antonio J. Conejo, 2009)

## **Criterios Técnicos de Análisis**

Para seleccionar los puntos óptimos de instalación de seccionadores de repetición se consideran los siguientes criterios:

- **Flujo de Potencia:** Identificación de líneas con mayor carga.
- **Nivel de Cortocircuito:** Evaluación de nodos con mayor contribución de cortocircuito.
- **Ubicación Estratégica:** Puntos clave según la topología de la red.
- **Calidad del Servicio:** Áreas con desempeño deficiente según indicadores de continuidad.(Antonio GómezExpósito, Antonio J. Conejo, 2009)

## **Integración de Criterios**

Se construyen conjuntos de posibles ubicaciones a partir de cada criterio anterior. Luego se realiza una **intersección entre los conjuntos**, identificando las ubicaciones que aparecen en todos ellos como las más adecuadas.(Antonio GómezExpósito, Antonio J. Conejo, 2009).

## Capítulo 5

### Análisis DOFA de la Estrategia de Optimización Multicriterio

La estrategia seleccionada para la reducción de interrupciones en sistemas de distribución local (SDL), basada en Optimización Multicriterio, se fundamenta en la integración de variables técnicas y operativas para mejorar la confiabilidad del servicio eléctrico. Esta metodología permite una evaluación sistémica, precisa y adaptable, considerando tanto parámetros eléctricos como el conocimiento operativo del sistema.

Con el fin de identificar sus principales ventajas competitivas, limitaciones internas y factores externos que puedan influir en su implementación, a continuación, se presenta un Análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) detallado:

#### **Fortalezas**

**Enfoque integral de análisis:** Combina múltiples criterios técnicos (flujo de potencia, cortocircuitos, calidad del servicio) y operativos (experiencia de personal, histórico de fallas) para una decisión más robusta.

**Precisión en la ubicación de dispositivos:** Identifica nodos específicos de mayor impacto dentro de la red, optimizando la inversión y la eficiencia del sistema.

**Mejora comprobada en indicadores de calidad:** Contribuye a la reducción de los índices SAIDI y SAIFI, lo que se traduce en una mayor continuidad del servicio.

**Cumplimiento normativo:** Alineación con las regulaciones nacionales (CREG, RETIE) e internacionales (IEEE, IEC), lo cual favorece su aceptación técnica y legal.

## **Oportunidades**

**Fortalecimiento del concepto de redes inteligentes:** Su aplicación favorece la evolución hacia redes más resilientes, digitalizadas y automatizadas.

**Acceso a nuevas tecnologías y software especializado:** La integración con plataformas como DIgSILENT y herramientas de análisis predictivo aumenta la eficiencia del modelo.

**Potencial de replicabilidad:** Puede ser implementada en otras zonas del país con condiciones similares, facilitando su escalamiento.

**Disponibilidad de incentivos regulatorios:** Las metas de mejora establecidas por la CREG abren la posibilidad de obtener beneficios económicos si se mejora la calidad del servicio.

## **Debilidades**

**Dependencia de datos de alta calidad:** La efectividad del modelo se ve comprometida si no se dispone de información confiable y actualizada.

**Complejidad técnica de implementación:** Requiere conocimientos avanzados en análisis multicriterio, modelado de redes y uso de software técnico.

**Aplicabilidad limitada en zonas con baja caracterización operativa:** En sectores sin datos históricos ni monitoreo continuo, la metodología pierde precisión.

**Altos costos iniciales:** La adquisición de seccionadores inteligentes, sistemas de comunicación y software especializado puede representar una barrera económica.

## **Amenazas**

**Condiciones adversas del entorno:** Terrenos de difícil acceso, mal clima o infraestructura deficiente pueden dificultar la instalación y mantenimiento de los equipos.

**Resistencia al cambio organizacional:** La preferencia por métodos tradicionales de ubicación o mantenimiento puede limitar la adopción de esta metodología.

**Cambios en el entorno regulatorio:** Variaciones en los lineamientos técnicos o en los incentivos podrían afectar la viabilidad del proyecto.

**Problemas de interoperabilidad:** Riesgos asociados a la integración de nuevos dispositivos en redes existentes sin la debida compatibilidad o pruebas de validación.

## **Capítulo 6**

### **Puntos óptimos para la instalación de seccionadores de 3 etapas**

#### **Metodología de Recolección y Análisis de Información para el Pronóstico de Fallas**

##### **Recolección de Datos**

La recolección de información se realizó a través de un software especializado utilizado por la unidad operativa, garantizando un proceso estructurado y confiable. Se consideraron los siguientes criterios para la recopilación de datos:

Parámetros técnicos:

- Nivel de tensión (MT).
- Fallas registradas bajo cualquier tipología diferente a trabajos programados o en tensión.
- Eventos ocurridos en los circuitos pertenecientes a la zona de estudio.

Filtrado de datos:

- Se excluyeron eventos relacionados con mantenimiento preventivo.
- No se consideraron incidentes sin afectación al servicio.
- Se descartaron eventos transitorios de menos de 3 minutos, conforme a las regulaciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para empresas distribuidoras.

##### **Procesamiento y Organización de Datos**

Los datos extraídos del software se almacenaron en un archivo estructurado y fueron procesados mediante Microsoft Excel y herramientas de análisis de datos, permitiendo:

- Clasificación de fallas por año y tipología.
- Organización cronológica para identificar patrones de fallas.
- Eliminación de inconsistencias en los registros de fallas.
- Normalización de datos para su integración en modelos predictivos.

## SAIDI

CIRCUITO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
ALIMENTADOR 1	0,97	0,03	0,35	0,23	0,13	0,12	0,08	0,05	0,42	1,09	0,25	0,05	3,75
ALIMENTADOR 2	0,22	0,18	0,17	0,28	0,45	0,41	0,33	0,21	0,36	0,28	0,12	0,11	3,12
ALIMENTADOR 3	0,49	0,41	0,34	0,57	0,67	1,04	0,70	0,27	0,38	0,26	0,19	0,20	5,52
ALIMENTADOR 4	0,36	0,28	0,15	0,31	1,07	0,49	0,57	2,63	2,85	0,64	0,82	0,26	10,43
ALIMENTADOR 5	0,62	0,15	0,32	0,14	0,46	0,32	0,44	0,27	0,44	0,85	0,14	0,07	4,23
ALIMENTADOR 6	0,33	0,18	0,17	0,11	0,12	0,21	0,28	0,22	0,14	0,22	0,14	0,11	2,25
ALIMENTADOR 7	0,04	0,05	0,07	0,08	0,03	0,04	0,04	0,24	0,31	0,09	0,06	0,04	1,10
ALIMENTADOR 8	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,14	0,11	0,06	0,04	0,02	0,56
ALIMENTADOR 9	0,03	0,03	0,07	0,02	0,07	0,06	0,04	0,27	0,11	0,04	0,02	0,08	0,84
ALIMENTADOR 10	0,16	0,10	0,08	0,22	0,09	0,06	0,16	0,55	0,24	0,10	0,14	0,02	1,91
ALIMENTADOR 11	0,02	0,04	0,03	0,05	0,14	0,00	0,04	0,17	0,14	0,18	0,01	0,01	0,83
ALIMENTADOR 12	0,11	0,09	0,06	0,11	0,70	0,31	0,22	0,28	0,65	0,33	0,12	0,30	3,29
ALIMENTADOR 13	0,22	0,09	0,09	0,07	0,05	0,19	0,12	0,19	0,24	0,16	0,16	0,11	1,69
ALIMENTADOR 14	0,19	0,14	0,12	0,12	0,11	0,08	0,07	0,15	0,18	0,06	0,03	0,04	1,31
ALIMENTADOR 15	0,15	0,14	0,07	0,16	0,05	0,02	0,07	0,06	0,13	0,09	0,06	0,04	1,05
ALIMENTADOR 16	0,01	0,01	0,03	0,07	0,02	0,03	0,05	0,13	0,02	0,00	0,03	0,01	0,40
ALIMENTADOR 17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ALIMENTADOR 18	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,05	0,03	0,16
ALIMENTADOR 19	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,10
ALIMENTADOR 20	0,09	0,09	0,06	0,07	0,07	0,05	0,06	0,09	0,09	0,05	0,11	0,02	0,85
ALIMENTADOR 21	0,13	0,09	0,09	0,17	0,16	0,23	0,11	0,54	0,23	0,13	0,28	0,17	2,32
ALIMENTADOR 22	0,27	0,13	0,07	0,14	0,15	0,14	0,25	0,08	0,27	0,09	0,10	0,11	1,80
ALIMENTADOR 23	0,01	0,02	0,02	0,06	0,11	0,02	0,12	0,10	0,13	0,19	0,24	0,05	1,08
ALIMENTADOR 24	0,65	0,48	0,50	0,23	0,38	0,38	0,39	0,87	0,63	1,00	0,53	0,10	6,15
ALIMENTADOR 25	0,17	0,25	0,09	0,12	0,33	0,19	0,14	0,14	0,43	0,39	0,42	0,11	2,77
ALIMENTADOR 26	0,12	0,02	0,12	0,13	0,14	0,19	0,16	0,23	0,28	0,34	0,42	0,14	2,28
ALIMENTADOR 27	0,52	0,15	0,28	0,41	0,86	0,45	0,64	0,42	0,95	0,69	0,40	0,09	5,85
ALIMENTADOR 28	0,04	0,05	0,10	0,05	0,10	0,07	0,11	0,14	0,04	0,08	0,09	0,03	0,91
ALIMENTADOR 29	0,06	0,24	0,06	0,31	0,08	0,12	0,08	0,13	0,41	0,40	0,29	0,15	2,32
ALIMENTADOR 30	0,13	0,19	0,09	0,43	0,28	0,20	0,39	0,27	0,40	0,41	0,19	0,06	3,04
ALIMENTADOR 31	0,27	0,22	0,71	0,39	0,96	0,74	0,46	0,31	1,43	1,39	0,29	0,07	7,23
ALIMENTADOR 32	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03
ALIMENTADOR 33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

*Tabla 1 Saidi de alimentadores - [Horas].*

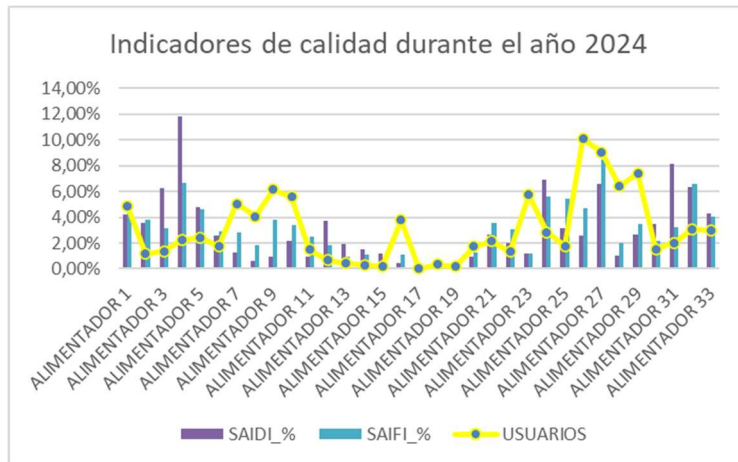
*Fuente: Elaboración propia.*

## SAIFI

CIRCUITO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
ALIMENTADOR 1	0,06	0,08	0,15	0,08	0,07	0,11	0,07	0,03	0,19	0,33	0,10	0,03	1,32
ALIMENTADOR 2	0,04	0,05	0,06	0,13	0,12	0,08	0,13	0,09	0,15	0,15	0,07	0,08	1,15
ALIMENTADOR 3	0,08	0,05	0,06	0,08	0,11	0,15	0,05	0,07	0,08	0,07	0,08	0,08	0,96
ALIMENTADOR 4	0,06	0,10	0,05	0,21	0,26	0,15	0,21	0,23	0,21	0,21	0,18	0,15	2,01
ALIMENTADOR 5	0,06	0,08	0,14	0,09	0,14	0,10	0,12	0,09	0,20	0,16	0,12	0,09	1,39
ALIMENTADOR 6	0,08	0,09	0,05	0,07	0,08	0,09	0,09	0,08	0,06	0,08	0,05	0,06	0,88
ALIMENTADOR 7	0,06	0,01	0,13	0,04	0,07	0,01	0,08	0,07	0,27	0,02	0,02	0,06	0,84
ALIMENTADOR 8	0,07	0,06	0,05	0,02	0,02	0,01	0,02	0,06	0,11	0,05	0,02	0,07	0,57
ALIMENTADOR 9	0,10	0,07	0,20	0,02	0,07	0,08	0,04	0,14	0,25	0,03	0,01	0,13	1,14
ALIMENTADOR 10	0,11	0,06	0,17	0,13	0,04	0,03	0,04	0,17	0,09	0,06	0,14	0,01	1,04
ALIMENTADOR 11	0,03	0,02	0,16	0,07	0,14	0,05	0,04	0,10	0,05	0,07	0,00	0,03	0,75
ALIMENTADOR 12	0,02	0,02	0,02	0,03	0,10	0,08	0,05	0,08	0,04	0,05	0,03	0,04	0,55
ALIMENTADOR 13	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,29
ALIMENTADOR 14	0,03	0,02	0,04	0,04	0,03	0,01	0,02	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,33
ALIMENTADOR 15	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,10
ALIMENTADOR 16	0,04	0,01	0,07	0,05	0,02	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,04	0,01	0,33
ALIMENTADOR 17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ALIMENTADOR 18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03
ALIMENTADOR 19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03
ALIMENTADOR 20	0,02	0,01	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03	0,08	0,02	0,39
ALIMENTADOR 21	0,08	0,04	0,04	0,09	0,08	0,07	0,05	0,17	0,08	0,07	0,16	0,12	1,07
ALIMENTADOR 22	0,09	0,13	0,07	0,12	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,05	0,03	0,03	0,93
ALIMENTADOR 23	0,00	0,04	0,01	0,01	0,05	0,01	0,05	0,02	0,02	0,03	0,07	0,05	0,35
ALIMENTADOR 24	0,24	0,14	0,12	0,09	0,18	0,08	0,11	0,14	0,23	0,18	0,11	0,04	1,69
ALIMENTADOR 25	0,13	0,20	0,14	0,13	0,12	0,17	0,07	0,06	0,16	0,19	0,17	0,11	1,65
ALIMENTADOR 26	0,05	0,02	0,22	0,05	0,07	0,06	0,05	0,17	0,08	0,22	0,18	0,25	1,41
ALIMENTADOR 27	0,17	0,08	0,29	0,18	0,39	0,19	0,20	0,24	0,29	0,34	0,13	0,06	2,57
ALIMENTADOR 28	0,08	0,08	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,07	0,02	0,16	0,04	0,02	0,60
ALIMENTADOR 29	0,09	0,13	0,03	0,19	0,03	0,02	0,03	0,02	0,05	0,23	0,09	0,14	1,05
ALIMENTADOR 30	0,08	0,08	0,04	0,07	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08	0,07	0,02	0,65
ALIMENTADOR 31	0,11	0,07	0,13	0,07	0,13	0,11	0,06	0,05	0,06	0,13	0,03	0,03	0,98
ALIMENTADOR 32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
ALIMENTADOR 33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

*Tabla 2 Saifi de alimentadores - [Interrupciones].*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 1. Indicadores de Calidad durante el año 2024.*

*Fuente: Elaboración propia.*

La probabilidad de ocurrencia de cada una de las fallas del alimentador 27

CAUSA	FRECUENCIA	PROBABILIDAD
Aislador dañado	2	0,17%
Animal sobre la línea	35	2,89%
Apertura generada por la utilización de un equipo o material con defecto de fabricación en cualquier elemento del SDL	5	0,41%
Bajante suelto o quemado en BT o MT	7	0,58%
Consignación de emergencia de ENELAR ESP	60	4,95%
Cortacircuito dañado	10	0,83%
Corto en red de BT	53	4,38%
Corto en red de MT	8	0,66%
Daños en el Transformador	1	0,08%
Descarga atmosférica	46	3,80%
Desconexión para cerrar seccionador	3	0,25%
DESCONOCIDA	588	48,55%
Falla ocasionada por terceros	1	0,08%
Línea en BT reventada	34	2,81%
Línea en MT reventada	9	0,74%
Línea sobre la cruceta en BT o MT	4	0,33%
Mal tiempo en la zona	228	18,83%
Nido sobre la línea	4	0,33%
Pararrayo dañado	9	0,74%
Poste partido en BT	3	0,25%
Poste partido en MT	2	0,17%
Transformador quemado	8	0,66%
Vegetación sobre la línea	91	7,51%
<b>Total general</b>	<b>1211</b>	<b>100%</b>

*Tabla 3 Probabilidad de ocurrencia en fallas en el alimentador 27.*

*Fuente: Elaboración propia.*

## **Determinación de Causas Raíz**

El análisis de datos permite establecer las principales causas de fallas en el Alimentador 27, facilitando la toma de decisiones estratégicas para la optimización del mantenimiento correctivo y preventivo, así como para la ubicación óptima de los seccionadores de repetición en la red de distribución.

## **Ubicación óptima de los seccionadores de repetición**

Determinar puntos estratégicos para instalar seccionadores de repetición, con el objetivo de reducir la cantidad de interrupciones de servicio en un circuito seleccionado dentro de la zona objeto de estudio.

Selección del método y área de influencia para la ubicación de seccionadores de repetición: Con el objetivo de reducir la cantidad de interrupciones en el sistema, se ha seleccionado un método para determinar la ubicación estratégica de los seccionadores de repetición. Para este estudio, se definió un área de influencia correspondiente al alimentador 27:

Este circuito corresponde a una red radial alimentada por un único alimentador eléctrico 27, concentrado en la sección representada en color verde. Las tensiones de las distintas unidades se expresan en valores por unidad (p.u.) y están identificadas por colores, según la escala de referencia que se muestra en la siguiente tabla:



identificar las zonas del circuito donde se presentan los mayores flujos de potencia. Cabe aclarar que este análisis excluye la cabecera del circuito, ya que dicha sección cuenta con las protecciones adecuadas para evitar salidas intempestivas fuera del circuito principal.

Se realiza un análisis considerando distintos criterios técnicos para identificar los puntos más adecuados para la instalación de seccionadores de repetición. En este proceso, se construyen varios conjuntos de posibles soluciones: líneas con mayor flujo de potencia, nodos con mayor nivel de cortocircuito, líneas estratégicamente ubicadas según la topología de la red y puntos con inferior desempeño en términos de índice de calidad del servicio. Finalmente, las ubicaciones que se repiten en todos estos conjuntos son consideradas como las más idóneas para la instalación de los seccionadores de repetición. Esta metodología asegura una recopilación de información precisa y estructurada, permitiendo una gestión proactiva del sistema eléctrico y la reducción de interrupciones en el servicio.



*Ilustración 4. Esquema de análisis de ubicación para seccionadores.*

*Fuente: Elaboración propia.*

## Capítulo 7

### Análisis económico - seccionador de repetición de 3 etapas (15 kV)

A continuación, se presenta un análisis económico detallado para la adquisición e instalación de un (1) seccionador de repetición de tres etapas, con especificación de 15 kV - 100 A - 2 kA. La estimación considera tanto el valor del equipo como los costos asociados a instalación, pruebas, transporte y costos indirectos, acorde a precios promedio del mercado colombiano en 2025.

Según cotización Inter Eléctricas, el valor por unidad es: Valor unitario con IVA:

**\$2.284.800**

Adicionalmente, hay costos de instalación en los cuales se asumieron costos promedios

<b>Concepto</b>	<b>Valor Unitario</b>
Mano de obra técnica	\$600.000
Transporte del equipo y personal	\$300.000
Herramientas	\$200.000
Materiales eléctricos menores	\$200.000
Pruebas, certificación y RETIE	\$250.000
<b>Subtotal instalación</b>	<b>\$1.550.000</b>

Para cubrir aspectos como supervisión, imprevistos, logística y gestión documental:

10% sobre (\$2.284.800 + \$1.550.000) = **\$383.480**

### **Resumen final del proyecto**

Concepto	Valor
Equipo (1 seccionador)	\$2.284.800
Instalación completa	\$1.550.000
Costos indirectos (10%)	\$383.480
<b>TOTAL, ESTIMADO</b>	<b>\$4.218.280</b>

El costo total estimado para la adquisición e instalación completa de un seccionador de repetición de tres etapas es de aproximadamente **\$4.218.280 COP**. Esta cifra refleja una inversión razonable y alineada con los estándares de proyectos en redes de distribución de media tensión en Colombia, cumpliendo con las exigencias normativas y técnicas del RETIE.

## Capítulo 8

### Resultados

A partir de los distintos análisis de la red presentados, se muestra a continuación una tabla con los resultados obtenidos:

Ubicación	Potencia Activa (kW)	Corriente Trifásica (I" A)	Potencia Trifásica (S" ) (VA)	Corriente Trifásica (I" A) (A)	Potencia Trifásica (S" A) (VA)
Ubicación 1	1234,62	2512,306	57439034,224	2903,991	66394156,810
Ubicación 2	590,89	1202,38	27490201,42	1389,84	31776104,32
Ubicación 3	1794,76	3652,12	83498714,88	4221,51	96516712,79
Ubicación 4	1240,22	3056,89	69889832,43	3446,19	78790534,84
Ubicación 5	1291,07	3550,13	81166801,14	4086,14	93421786,50

*Tabla 4 Datos eléctricos de los puntos seleccionados.*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 5. Ubicaciones de los puntos eléctricos bajo análisis.*

*Fuente: Elaboración propia.*

A continuación, se muestran los resultados de calidad del análisis de la red del alimentador 27:

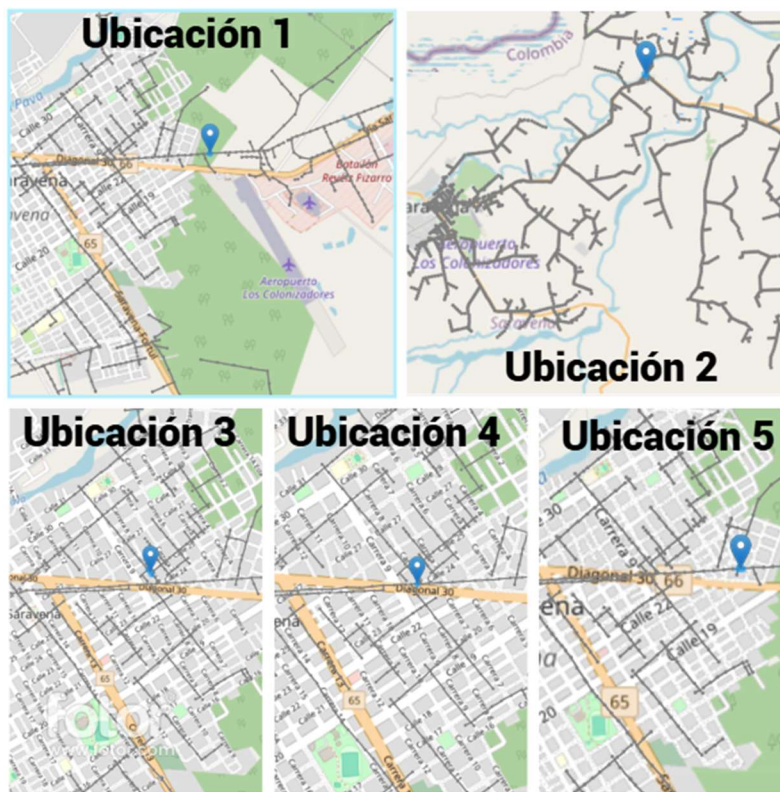
ELEMENTO	DURACION AFECTACION MINUTOS	DURACION AFECTACION HORA	FRECUENCIA AFECTACION	CLIENTES AFECTADOS	SAIDI	SAIFI
Ubicación 1	5667,75	0,65	23	89	0,013	0,02
Ubicación 2	11336,9	1,29	27	25	0,009	0,007
Ubicación 3	21617,06	2,47	108	2237	5,181	2,356
Ubicación 4	11481,35	1,31	5	35	0,002	0,002
Ubicación 5	14451,32	1,65	28	12	0,035	0,003

*Tabla 5 Indicadores de calidad de los puntos seleccionados.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Se realizó el análisis a un total de 4.468 nodos, los cuales representan posibles ubicaciones para la instalación del seccionador de repetición. Como resultado, se identificaron cinco ubicaciones destacadas, las cuales se presentan en las tablas anteriores. Estas ubicaciones fueron seleccionadas con base en el análisis eléctrico, considerando criterios como la potencia que fluye a través de los nodos, niveles elevados de corriente de cortocircuito y condiciones desfavorables en los indicadores de calidad del servicio.

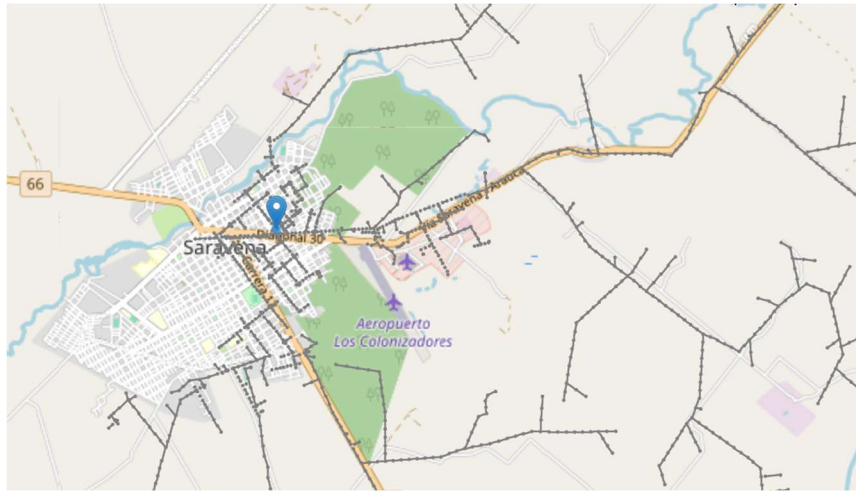
De las cinco ubicaciones evaluadas, se concluyó que todas son técnicamente viables para la instalación del seccionador de repetición. No obstante, se seleccionó la ubicación número 3 como la más adecuada, debido a que presenta los valores más altos de potencia, el mayor nivel de corriente de cortocircuito y los indicadores de calidad más negativos. Por estas razones, se determinó que la ubicación 3 es la opción óptima para la instalación del seccionador.



*Ilustración 6. Ubicaciones óptimas.*

*Fuente: Elaboración propia.*

La Mejor ubicación es la seleccionada 3, pues se encuentre en lugar adecuado para mantenimiento, es de fácil acceso a las cuadrillas y sin repercusiones en causales ambientales y sociales.



*Ilustración 7. Ubicación seleccionada.*  
Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo 9**

### **Conclusiones**

Viabilidad técnica garantizada: El seccionador de repetición de tres etapas ofrece una solución técnicamente viable y confiable para redes de media tensión, especialmente en circuitos radiales. Su capacidad de actuación ante fallas transitorias permite restablecer el servicio sin intervención manual, lo cual es esencial en zonas de difícil acceso o con alta densidad de fallas. La selección de la ubicación identificada en el alimentador 27 demuestra la aplicabilidad de la tecnología.

Rentabilidad y retorno de inversión: Con un costo total estimado de 4.218.280 COP por unidad instalada, representa una inversión razonable frente a las pérdidas económicas derivadas de interrupciones frecuentes. Se prevé una mejora en los indicadores de SAIDI y SAIFI, lo que, a su vez, representa beneficios regulatorios y la posibilidad de obtener compensaciones económicas para el Operador de Red.

Alineación normativa y modernización de redes: La instalación de seccionadores de repetición cumple con los requisitos del RETIE y de normativas internacionales (IEC 62271, IEEE 1366). Además, favorece la evolución hacia redes inteligentes y automatizadas, contribuyendo a una infraestructura eléctrica resiliente, moderna y sostenible.

Beneficios operativos y estratégicos: La implementación reduce significativamente el desplazamiento de cuadrillas, mejora la capacidad de respuesta ante fallas, y optimiza la operación de la red. Al instalarse en puntos estratégicos, identificados mediante análisis multicriterio, se maximiza su impacto positivo, garantizando mejoras sostenibles en la continuidad del servicio y reduciendo el descontento de los usuarios finales.

## Lista de referencias

- Antonio GómezExpósito, Antonio J. Conejo, C. A. C. (2009). *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*.
- Das, J. C. (2017). Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics, Second Edition. En *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics, Second Edition*. <https://doi.org/10.1201/b11021>
- Dr. Juan Antonio Maruri Jiménez. (2015). Caracterización De Fallas Más Recurrentes En Líneas De Media Tensión Utilizando Wavelets. *Ekp*, 13(3), 1576–1580.
- IEC 62271-102:2018. (2018). *High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches*.
- IEEE Std 242-2001. (2001). *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*.
- Martinez De La Hoz, J. A., & Romero Bermudez, F. J. (2015). *Propuesta para el cambio de seccionadores en baja tensión por seccionadores de repetición de tres etapas en los circuitos de media tensión de las estaciones base de la red celular de claro móvil en el departamento de Santander*. Universidad Autonoma de Bucaramanga.
- Prabha Kundur. (1994). *Power System Stability and Control*.
- Regalado Cajamarca, E. V. (2021). *Ubicación óptima de reconectores y seccionalizadores en alimentadores urbanos en redes de distribución eléctrica para mejorar los indicadores de calidad del servicio técnico*.  
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20374>
- Regalado, E. (2021). *Ubicación Óptima De Reconectores Y Seccionalizadores En*

*Alimentadores Urbanos En Redes De Distribución Eléctrica Para Mejorar Los Indicadores De Calidad Del Servicio Técnico.*

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20374/1/UPS-GT003247.pdf>

Richard E. Brown. (2008). *Electric Power Distribution Reliability.*

Thomas Allen Short. (2014). *Electric Power Distribution Handbook.*

Turan Gonen. (2014). *Electric Power Distribution System Engineering.*

Dr. Juan Antonio Maruri Jiménez. (2015). Caracterización De Fallas Más Recurrentes En Líneas De Media Tensión Utilizando Wavelets. *Ekp*, 13(3), 1576–1580.