



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v5i3.1072>

Recibido: 2026-07-12

Aceptado: 2026-07-26

Publicado: 2026-08-13

Estudio de la Troncal de los Alimentadores Rurales N° 2 de las Subestaciones 08 y 13 de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. para el Establecimiento de Puntos de Redundancia y Optimización de la Calidad del Servicio Técnico

Study of the Trunk Line of Rural Feeders No. 2 from Substations 08 and 13 of Empresa Eléctrica Riobamba S.A. to Establish Redundancy Points and Technical Service Quality Optimization

Autor(s)

César Augusto Taday Álvarez¹

<https://orcid.org/0009-0000-5867-7637>

cesar.taday.78@gmail.com

ctaday@eersa.com.ec

Empresa Eléctrica Riobamba S.A.

Riobamba – Ecuador

Carlos Daniel Mejía Banda²

<https://orcid.org/0009-0001-5681-6848>

daniel.mejia0608@gmail.com

dmejia@eersa.com.ec

Empresa Eléctrica Riobamba S.A.

Riobamba – Ecuador

Cómo citar

Taday Álvarez, C. A., & Mejía Banda, C. D. (2026). Estudio de la Troncal de los Alimentadores Rurales N° 2 de las Subestaciones 08 y 13 de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. para el Establecimiento de Puntos de Redundancia y Optimización de la Calidad del Servicio Técnico. *ASCE MAGAZINE*, 5(3), 2029–2049. <https://doi.org/10.70577/asce.v5i3.1072>



Resumen

En los alimentadores rurales N° 2 de las subestaciones 08 (Guamote) y 13 (Pungalá) de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A., la topología radial y el difícil acceso geográfico originaron caídas de tensión fuera de norma y tiempos prolongados de restitución del servicio, lo cual evidenció la necesidad de optimizar la red de distribución. Para solucionar esta problemática, se desarrolló una investigación aplicada con diseño cuantitativo y experimental de simulación. La metodología comprendió, en primer lugar, el diagnóstico de la línea base a partir de registros del sistema GIS e historiadores de carga modelados en el software CYMDIST. En segundo lugar, se diseñó la reconfiguración física y el cambio de sección de la troncal hacia vías vehiculares transitables, donde se acopló un reconector trifásico de interconexión en lazo abierto como punto de redundancia. Finalmente, la validación del flujo de potencia y la regulación de voltaje se corroboró en la plataforma ETAP. Los resultados simulados demostraron que la propuesta redujo la caída de tensión máxima del 6,00% al 2,09%, y disminuyó el índice Tiempo Total de Interrupción (TTIK) de 52,23 h a 11,65 h en el alimentador Guamote, y de 28,85 h a 11,59 h en el alimentador Pungalá. En conclusión, la reconfiguración propuesta resolvió los cuellos de botella técnicos de la red rural y garantizó el cumplimiento de los límites regulatorios fijados por la ARCERNNR.

Palabras clave: Red Eléctrica, Distribución de Energía, Calidad del Servicio, Confiabilidad, Voltaje.



Abstract

In rural feeders No. 2 of substations 08 (Guamote) and 13 (Pungalá) belonging to Empresa Eléctrica Riobamba S.A., the radial topology and difficult geographical access caused non-compliant voltage drops and prolonged service restoration times, which evidenced the need to optimize the distribution network. To address this problem, applied research with a quantitative and experimental simulation design was carried out. The methodology first comprised a baseline diagnosis from GIS records and load profile histories modeled in CYMDIST software. Second, the physical reconfiguration and conductor cross-section upgrade of the main trunk line toward accessible roads were designed, coupling a three-phase open-loop interconnection recloser as a redundancy point. Finally, the validation of power flow and voltage regulation was verified in the ETAP platform. The simulated results demonstrated that the proposal reduced the maximum voltage drop from 6.00% to 2.09%, and decreased the Total Interruption Time index (TTIK) from 52.23 h to 11.65 h in the Guamote feeder, and from 28.85 h to 11.59 h in the Pungalá feeder. In conclusion, the proposed reconfiguration resolved the technical bottlenecks of the rural network and ensured compliance with the regulatory limits established by ARCERNNR.

Keywords: Electrical Network, Power Distribution, Service Quality, Reliability, Voltage.

Introducción

La Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE, 2015), en su artículo 2, numeral 2, determina explícitamente la obligación de proveer a los usuarios finales un servicio con altos estándares de calidad, confiabilidad y seguridad, de conformidad con las regulaciones específicas expedidas por el ente de control. No obstante, garantizar la continuidad de este servicio en redes de distribución rurales representa un desafío técnico complejo debido a las condiciones topográficas adversas, las extensas longitudes de las líneas y la configuración predominantemente radial de los circuitos.

Los tiempos de reposición del servicio eléctrico en los alimentadores rurales producen significativas pérdidas técnicas y económicas al superar los límites admisibles fijados por la Agencia de Regulación y Control de la Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNR, 2020). Al ocurrir una contingencia, la topología radial provoca que todos los usuarios situados aguas abajo del punto de falla queden desabastecidos. Una alternativa viable para minimizar los tiempos de interrupción consiste en la transferencia de carga entre alimentadores cercanos, en la que se evalúan parámetros como los límites de cargabilidad, sobrevoltajes, secuencia de fases y cantidad de operaciones de maniobra.

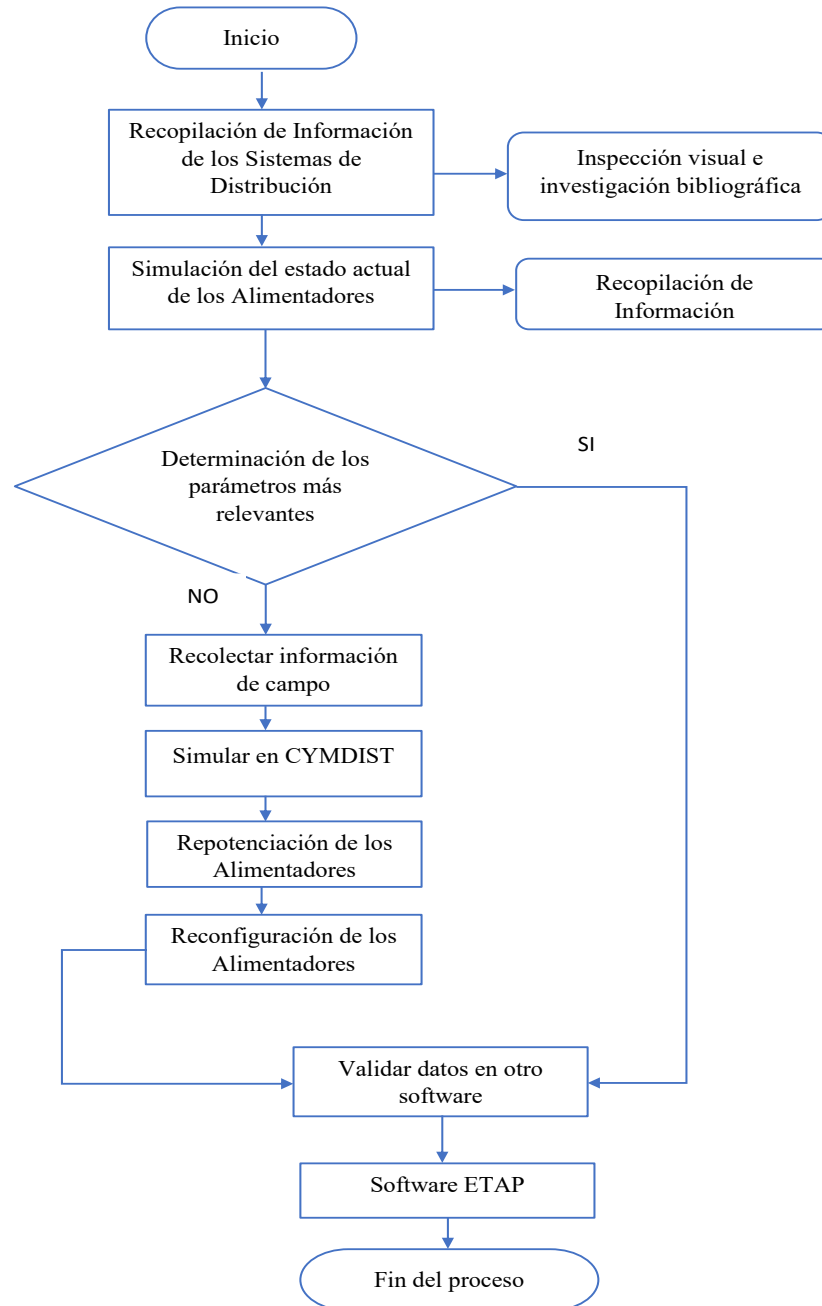
La Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (EERSA, 2024) cuenta con 14 subestaciones de distribución en su área de concesión. Los alimentadores rurales son los que registran mayores tiempos de restablecimiento, lo cual responde a las grandes distancias que el personal operativo recorre desde sus centros de movilización hasta el sitio de la falla para su localización, aislamiento y reparación. Entre las causas principales de interrupción se identifican las descargas atmosféricas, la caída de árboles sobre las líneas y la infraestructura en mal estado. Según el informe técnico de la empresa (EERSA, 2024), la entidad registra en alimentadores de baja densidad de carga un índice de Frecuencia Media de Interrupción por kVA instalado (FMIK) de 15,68 frente a un límite regulatorio de 9,5, así como un índice de Tiempo Total de Interrupción por kVA instalado (TTIK) de 38,16 frente a un límite normativo de 16,0.

Frente a este escenario, esta investigación tiene como objetivo reconfigurar físicamente la troncal principal y establecer puntos de redundancia en los alimentadores rurales N° 2 de las subestaciones 08 (Guamote) y 13 (Pungalá) de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A., mediante modelado en el

software CYMDIST y validación en ETAP, para reducir las caídas de tensión y los tiempos de interrupción conforme a la normativa sectorial vigente.

Figura 1

Diagrama de flujos del proceso de investigación analítico y exploratorio



Fuente: Daniel Mejía y César Taday (2026)

Material y métodos

Materiales

Enfoque Metodológico

La investigación presentó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y con diseño experimental de simulación. Se empleó un método deductivo para diagnosticar los parámetros eléctricos iniciales y validar las mejoras en los alimentadores analizados.

Población, Muestra y Criterios de Selección

- **Población:** Estuvo conformada por la totalidad de los alimentadores rurales de medio voltaje perteneciente al sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (EERSA).
- **Muestra:** Se seleccionaron mediante un muestreo no probabilístico por juicio técnico dos circuitos específicos:
 1. **Alimentador N° 02 de la S/E 08 (Guamote):** Con una longitud de red en medio voltaje de 279 km y una potencia instalada de 7302 kVA.
 2. **Alimentador N° 02 de la S/E 13 (Pungalá):** Con una longitud de red en medio voltaje de 78 km y una potencia instalada de 1893 kVA.
- **Criterios de Selección:** La inclusión de ambos alimentadores respondió a tres criterios técnicos prioritarios:
 1. Registro de índices de calidad del servicio (TTIK y FMIK) por encima de los límites máximos fijados en la Regulación ARCERNNR 002/20.
 2. Presencia de caídas de tensión severas en los nodos terminales derivadas de la topología radial y las extensas distancias.
 3. Accesibilidad geográfica crítica, donde las troncales cruzaban terrenos privados sin vías transitables, lo que dificultaba las maniobras operativas de restauración del servicio.

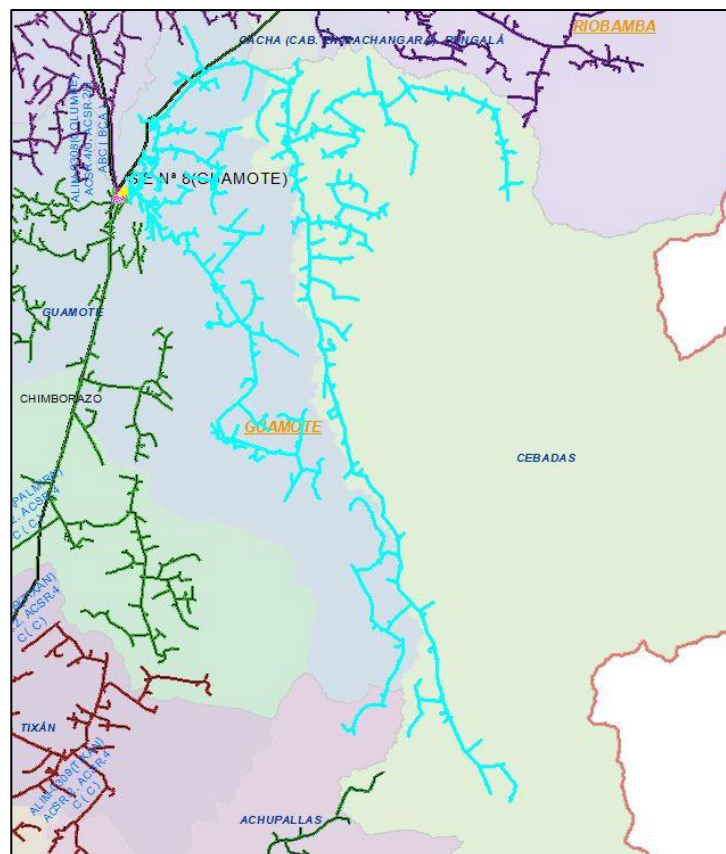
Instrumentos y Software Especializado

Los datos topológicos, físicos y de demanda horaria se extrajeron de la base de datos georreferenciada (GIS) de la EERSA. Para el procesamiento y modelado numérico se seleccionaron las siguientes herramientas computacionales:

- **Software CYMDIST:** Se eligió por su precisión en el modelado de redes aéreas de distribución. Su función consistió en diagnosticar el comportamiento de la línea base (perfiles de voltaje y flujos de carga desbalanceados) a partir de los datos históricos de los medidores de cabecera.
- **Software ETAP:** Se seleccionó para realizar la validación cruzada del sistema. Su función fue verificar numéricamente la estabilidad del flujo de potencia, la regulación de tensión fasorial por fase y la selectividad de las protecciones en el escenario reconfigurado en lazo abierto.

Figura 2

Distribución y recorrido geográfico original del Alimentador 0208 Guamote en el software GIS de la empresa



Fuente: Sistema de Información Geográfica de la EERSA.

Métodos

Diseño de la Investigación y Marco Normativo-Bibliográfico

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo de tipo aplicado, con un diseño experimental de simulación y un alcance descriptivo-explicativo. Este diseño se orientó a evaluar la respuesta eléctrica y la confiabilidad del servicio ante la modificación de la topología física de las redes rurales.

Para fundamentar la investigación y estructurar el marco de ingeniería eléctrica, la recolección de información secundaria se basó en una búsqueda sistemática en bases de datos científicas peer-reviewed como *IEEE Xplore*, *Scopus* y *ScienceDirect*, empleando descriptores en inglés y español relacionados con reconfiguración de alimentadores, regulación de voltaje e índices de confiabilidad en redes de distribución. Asimismo, el análisis se rigió de forma estricta bajo los estándares normativos fijados en la Regulación ARCERNNR 002/20 (Ecuador), el estándar IEEE Std 1366-2012 para índices de interrupción, y las especificaciones técnicas de construcción de líneas primarias de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A.

Fases del Procedimiento Metodológico

Para alcanzar el objetivo general de reconfigurar las troncales principales y establecer puntos de redundancia, el procedimiento empírico se desarrolló en cinco fases secuenciales estructuradas de la siguiente manera:

- **Fase 1: Recopilación y Clasificación de Registro de Fallas:**
 - *Relación con el objetivo:* Diagnosticar el estado histórico de indisponibilidad del servicio en los circuitos analizados.
 - *Procedimiento:* Se tabularon las interrupciones forzadas registradas durante un año móvil en el sistema SCADA y en las bases de la EERSA, clasificándolas según las categorías fijadas por la Regulación ARCERNNR 002/20 (descargas atmosféricas, interferencia de vegetación, fallas mecánicas).
 - *Variables evaluadas:* Frecuencia Media de Interrupción por kVA instalado (FMIK, adimensional) y Tiempo Total de Interrupción por kVA instalado (TTIK, en horas).
- **Fase 2: Determinación de la Densidad de Carga:**
 - *Relación con el objetivo:* Caracterizar topológicamente los alimentadores para clasificarlos dentro de la categoría regulatoria de baja densidad.

- *Procedimiento:* Se aplicó la relación matemática de densidad lineal de carga (TA) expresada en la Ecuación (1):

$$TA = \frac{kVA_{inst,j}}{km_j} \quad [kVA/km] \quad (1)$$

Donde $kVA_{inst,j}$ correspondió a la capacidad nominal de transformación instalada en el tramo j , y km_j a la longitud física acumulada del conductor primario.

- *Variables evaluadas:* Capacidad instalada (kVA), longitud de línea (km) y densidad lineal de carga (TA , kVA/km).
- **Fase 3: Simulación Eléctrica de la Línea Base:**
 - *Relación con el objetivo:* Identificar las limitaciones operativas y los cuellos de botella en la configuración inicial de las redes.
 - *Procedimiento:* Se ejecutó el algoritmo de flujos de potencia balanceados y desbalanceados en el software CYMDIST a partir de la demanda máxima horaria registrada en los medidores de cabecera.
 - *Variables evaluadas:* Perfil de tensión por fase (V_k , en kV), caída de tensión porcentual ($\Delta V\%$) y cargabilidad de las líneas (A).
- **Fase 4: Rediseño Geométrico y Cambio de Sección de las Troncales:**
 - *Relación con el objetivo:* Proyectar el trazado óptimo de las líneas primarias hacia zonas de fácil acceso para agilizar las maniobras de reparación.
 - *Procedimiento:* Se planificó la reubicación física de las estructuras hacia franjas de servidumbre en vías vehiculares públicas transitables y se proyectó el aumento de sección del conductor a calibre N° 3/0 ACSR.
 - *Variables evaluadas:* Impedancia del conductor (Z , Ω/km), accesibilidad vehicular (km de vía asfaltada/lastrada) y tiempo medio de reparación.
- **Fase 5: Modelamiento del Lazo Abierto y Simulación Cruzada en ETAP:**
 - *Relación con el objetivo:* Validar la flexibilidad operativa y la estabilidad del flujo de carga ante transferencias de potencia por contingencias.

- *Procedimiento:* Se definió el punto de interconexión entre ambos alimentadores operando en lazo abierto mediante la integración de un reconectador trifásico de maniobra. La respuesta en escenarios de falla simulados se corroboró en la plataforma ETAP.
- *Variables evaluadas:* Flujo de potencia activa y reactiva (P en kW, Q en kVAR), capacidad de transferencia de carga (kVA) y selectividad del esquema de protecciones.

Resultados

Descripción de la Muestra

La muestra técnica evaluada se caracterizó por corresponder a sistemas de distribución con trayectorias sumamente extensas en áreas rurales, las cuales se tipificaron dentro de la categoría de baja densidad de carga. Para el alimentador N° 02 de la S/E 08 (Guamote) se determinó matemáticamente un indicador de densidad lineal de 48,96 kVA/km y una base activa de 4999 abonados. Por su parte, el alimentador N° 02 de la S/E 13 (Pungalá) reportó una densidad de 24,12 kVA/km, contabilizando un total de 1728 clientes rurales distribuidos predominantemente en el sector residencial.

Tabla 1

Causas de interrupción e índices base en el alimentador 0208 Guamote

Tiempo (H)	KVA Inst.	KVA Inter.	Descripción de la Causa	INDICADORES	
				FMIK	TTIK
21,45	7207,50	4500,00	Arboles (sin incluir podas)	0,6243	13,3923
9,00	7212,50	2457,00	Daño o interferencia accidental de particulares	0,3407	3,0659
4,50	7212,50	1522,50	Programadas por ampliaciones	0,2111	0,9493
8,23	7212,50	10,00	Arboles (sin incluir podas)	0,0014	0,0114

2,85	7212,50	7200,00	Falla de equipamiento, materiales y accesorios	0,9983	2,8451
15,60	7212,50	2879,00	Arboles (sin incluir podas)	0,3992	6,2270
1,75	7212,50	2804,00	Protección, medición, supervisión y control	0,3888	0,6803
4,567	7212,50	1876,00	Arboles (sin incluir podas)	0,2601	1,1878
17,90	7212,50	2750,00	Descargas Atmosféricas (Rayos)	0,3813	6,8250
23,02	7212,50	2701,00	Arboles (sin incluir podas)	0,3745	8,6195
7,70	7212,50	5600,00	Descargas Atmosféricas (Rayos)	0,7764	5,9785
14,18	7212,50	275,00	Viento Fuerte	0,0381	0,5408

Fuente: Datos empíricos procesados por los autores (2026)

Tabla 2

Causas de interrupción e índices base en el alimentador 0213 Pungalá

Tiempo (H)	KVA Inst.	KVA Inte.	Descripción de la Causa	INDICADORES	
				FMIK	TTIK
11,22	1873,00	1239,00	Descargas Atmosféricas (Rayos)	0,6615	7,420
16,37	1873,00	890,00	Descargas Atmosféricas (Rayos)	0,4752	7,777
12,75	1873,00	290,00	Lluvia	0,1548	1,974
13,40	1873,00	800,00	Arboles (sin incluir podas)	0,4271	5,723
9,45	1873,00	675,00	Viento Fuerte	0,3604	3,406
14,97	1873,00	254,00	Lluvia	0,1356	2,030

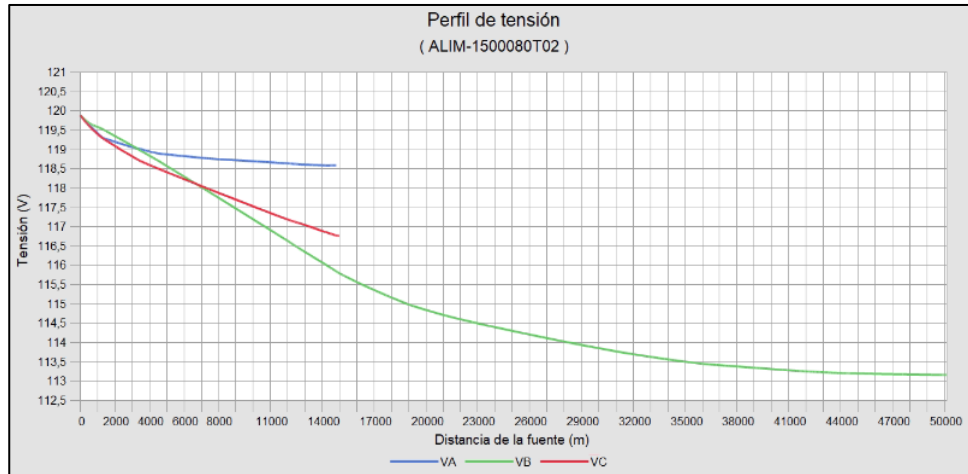
Fuente: Datos empíricos procesados por los autores (2026)

Análisis de los Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos y el análisis correspondiente producto de las simulaciones y el procesamiento de los datos técnicos.

Figura 3

Perfil de caída de voltaje por fases del Alimentador 0208 Guamote antes de la repotenciación (Simulación CYMDIST)

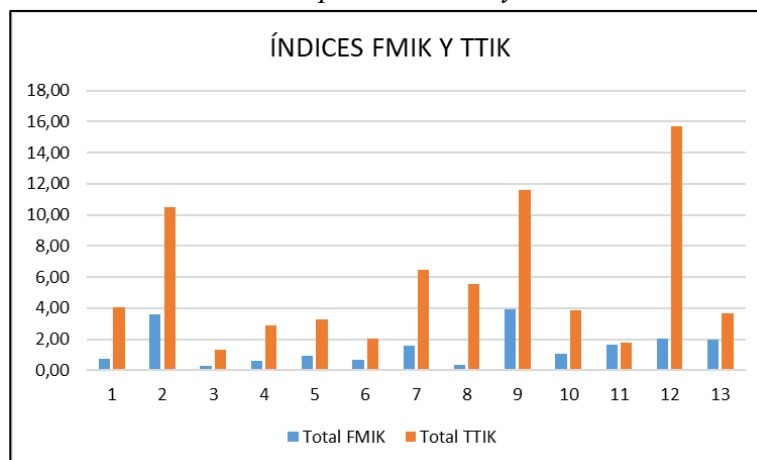


Fuente: Reporte del software CYMDIST

La corrida de simulación inicial determinó desbalances fasoriales acentuados y una caída de tensión máxima del 6% concentrada en la fase B del circuito de Guamote (Figura 3). Paralelamente, la simulación de la línea base del alimentador Pungalá expuso que la fase A (línea roja de la Figura 6) violaba de forma directa el límite máximo de caída del 5% permitido por el marco sectorial ecuatoriano para redes de distribución de medio voltaje.

Figura 4

Comportamiento mensual de los índices empíricos FMIK y TTIK del Alimentador 0208 Guamote



Fuente: Registro estadístico histórico

Figura 5

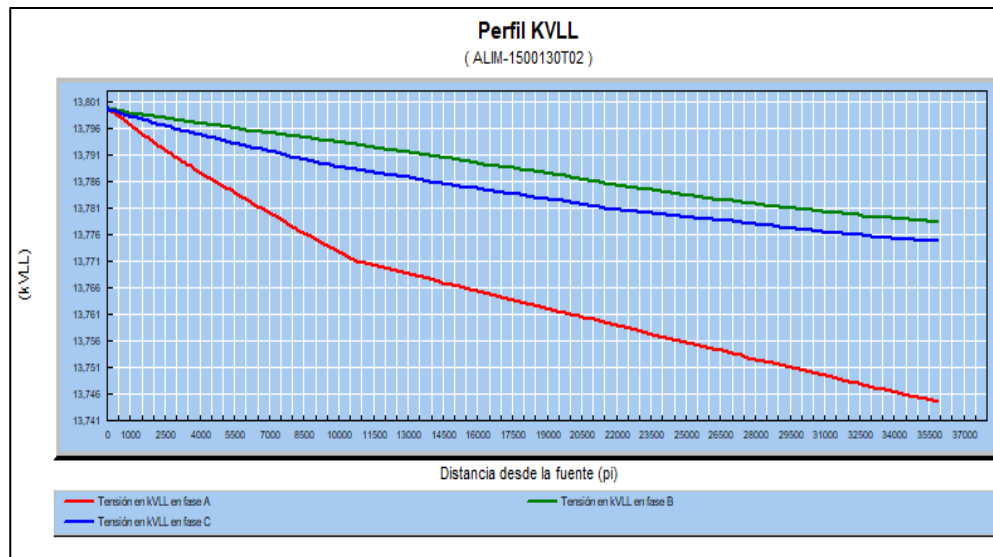
Recorrido y topología original del Alimentador 0213 Pungalá en el simulador georreferenciado



Fuente: Interfaz del software georreferenciado

Figura 6

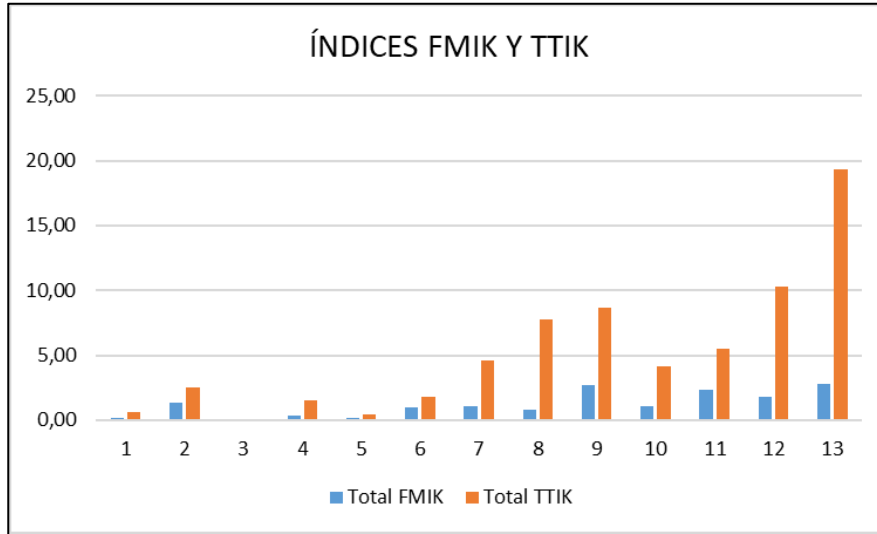
Perfil de tensión en bornes a lo largo del Alimentador 0213 Pungalá en estado base de simulación



Fuente: Simulación de flujos en bornes

Figura 7

Indicadores históricos de interrupciones FMIK y TTIK del Alimentador 0213 Pungalá en el año



Fuente: Estadísticas de interrupción de EERSA

Tabla 3

Distribución de clientes y consumos del alimentador 0208 Guamote

ALIMENTADOR	RESIDENCIAL		COMERCIAL		INDUSTRIAL		OTROS	
	Cliente	Consumo (kWh)	Cliente	Consumo (kWh)	Cliente	Consumo (kWh)	Cliente	Consumo (kWh)
0208	4539	144753	314	55995	10	4803	136	31644

Fuente: Base comercial de abonados

Tabla 4

Número de clientes y consumos del alimentador 0213 Pungalá

ALIMENTADOR	RESIDENCIAL		COMERCIAL		OTROS	
	CLIENTES	CONSUMO (kWh)	CLIENTES	CONSUMO (kWh)	CLIENTES	CONSUMO (kWh)
0213	1639	48949	37	6156	52	3296

Fuente: Base comercial de abonados

El desglose de la base comercial refleja una concentración de la demanda en el sector residencial para ambos circuitos. En el alimentador 0208 Guamote (Tabla 3), la categoría residencial representa el 90,80% del total de abonados (4539 clientes) y concentra el 61,09% del consumo

energético mensual (144753 kWh). Una tendencia análoga se evidencia en el alimentador 0213 Pungalá (Tabla 4), donde el 94,85% de la masa de clientes es residencial (1639 usuarios) con un consumo acumulado de 48949 kWh. Esta caracterización socioeconómica demuestra que la baja densidad lineal de carga no implica una menor relevancia del servicio; por el contrario, las interrupciones prolongadas (evidenciadas en altos valores de TTIK) impactan de manera directa sobre la calidad de vida y las actividades domésticas y productivas de las comunidades rurales dispersas, donde la continuidad del suministro es clave para el desarrollo territorial.

Tabla 5

Matriz de características técnicas de los sistemas eléctricos de baja densidad

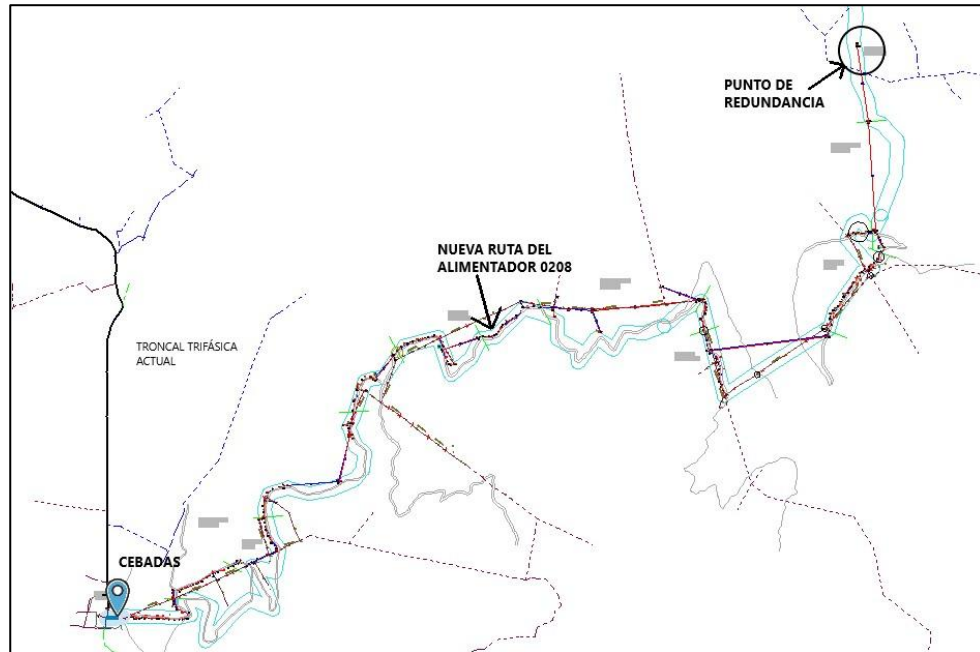
Tipo	Características	Ventajas	Desventajas
Radial	Direccional, Sin rutas alternativas	Económico, Fácil de instalar	Baja fiabilidad, Interrupciones por fallas.
Aéreo	Cables suspendidos sobre los postes	Bajo costo, Fácil mantenimiento	Vulnerabilidad a fenómenos climáticos, impacto visual
Baja Tensión	Distribuye energía a usuarios finales	Adecuado para zonas dispersas, fácil de implementar	Capacidad limitada, pérdidas de energía en distancias largas

Fuente: Cuadro comparativo cualitativo

Adicionalmente, la matriz comparativa de características técnicas (Tabla 5) permite contextualizar el origen de la vulnerabilidad operativa del sistema. Si bien la topología radial aérea en media y baja tensión constituye la solución constructiva más económica para abarcar zonas geográficas dispersas, la ausencia de rutas alternativas de alimentación y la suspensión expuesta de los conductores generan una alta susceptibilidad ante eventos climáticos adversos e interferencias por la vegetación. En consecuencia, la elevada frecuencia y duración de las fallas justifican la necesidad técnica de evolucionar hacia arquitecturas en lazo abierto mediante el establecimiento de puntos de redundancia, reduciendo la vulnerabilidad inherente de las redes radiales tradicionales.

Figura 8

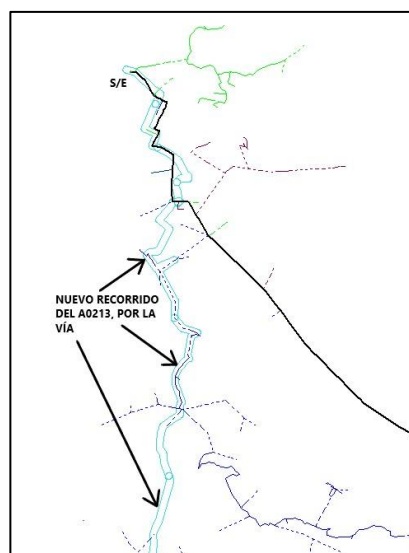
Plano de diseño de la nueva ruta de la troncal y punto de redundancia para la interconexión de los alimentadores 0208 y 0213



Fuente: *Diseño e ingeniería de la propuesta*

Figura 9

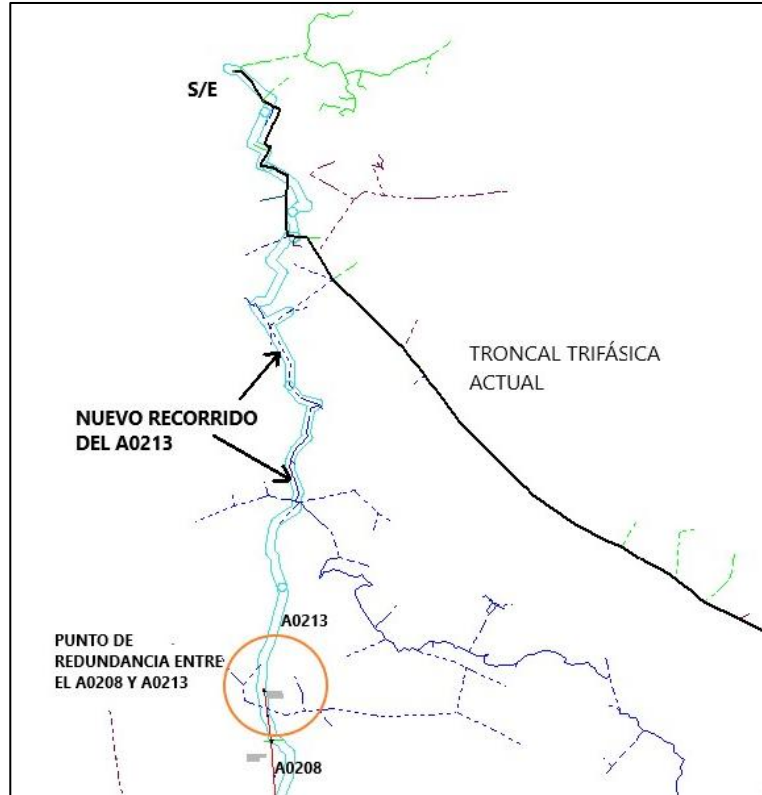
Trazado geométrico optimizado de la troncal trifásica del Alimentador 0213 Pungalá proyectado sobre vía de acceso



Fuente: *Rediseño geométrico vial*

Figura 10

Detalle de la ubicación del reconectador trifásico automático como punto de redundancia en la comunidad de Shanhaicun



Fuente: Simulación del lazo abierto en ETAP

Al aplicar el modelo de reconfiguración estructural del conductor original a un calibre N° 3/0 ACSR y trasladando físicamente las líneas hacia las vías públicas de acceso rápido (Figuras 8 y 9), se calculó el impacto sobre la caída de tensión final mediante la ecuación de regulación (Ecuación 2):

$$\Delta V_k = \frac{V_k - N_n}{V_N} * 100\%$$

$$\Delta V_k = \frac{7,967kV - 7,80 kV}{7,80 kV} * 100\%$$

$$\Delta V_k = \frac{0,167 kV}{7,80 kV} * 100\%$$

$$\Delta V_k = 2,14\%$$

Los flujos de carga cruzados procesados en la plataforma computacional ETAP ratificaron que los perfiles de voltaje ante contingencias operativas se reducen a un óptimo de 2,09%, satisfaciendo íntegramente las anomalías por cargabilidad extrema y sub-voltajes fuera de norma, aseverando el pleno cumplimiento con la Regulación ARCERNNR 002/20. Asimismo, la disponibilidad de accesibilidad vehicular directa para las cuadrillas operativas redujo exponencialmente los tiempos de indisponibilidad predictivos del servicio técnico.

Discusión

El análisis de los resultados confirmó que las deficiencias operativas observadas en los alimentadores rurales N° 02 de las subestaciones 08 (Guamote) y 13 (Pungalá) de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. derivaron principalmente de su concepción topográfica y trazado espacial primigenio. Las elevadas tasas de fallas forzadas por vegetación y descargas atmosféricas registrados en las Tablas 1 y 2 se agravaron porque las troncales originales atravesaban terrenos privados de difícil acceso. Esta limitación física obligó a que las cuadrillas técnicas inspeccionaran las líneas a pie durante una contingencia. Lo anterior incrementó el tiempo medio de reparación y afectó directamente los indicadores TTIK y FMIK de la distribuidora, lo cual coincidió con lo expuesto por Willis (2004) sobre el impacto negativo de las redes radiales de alta accesibilidad restringida en la calidad del servicio.

En relación con el primer objetivo específico, orientado al rediseño geométrico y relocalización de las troncales primarias, el desplazamiento de las líneas hacia las franjas de servidumbre de vías públicas transitables redujo de forma drástica el tiempo de traslado terrestre del personal técnico. Este hallazgo concordó con los estudios de Short (2014) y las directrices de la IEEE Std 1366-2012, los cuales sostienen que la accesibilidad vehicular a lo largo de las arterias principales constituye la variable de mayor ponderación para acortar los tiempos de localización de averías en redes rurales. Desde la dimensión eléctrica, la homogenización y el incremento de la sección del conductor a calibre N° 3/0 ACSR eliminaron las caídas de tensión críticas simuladas en la línea base. La regulación de voltaje se estabilizó en un valor óptimo del 2,09% en el circuito de Guamote y restituyó la operación del alimentador Pungalá dentro del rango estricto del $\pm 5,00\%$ fijado por la Regulación ARCERNNR 002/20. Estos valores revalidaron los modelos teóricos de flujo de potencia desarrollados en trabajos similares por Mejía Banda (2023).

Respecto al objetivo de establecer puntos de redundancia para la optimización de la confiabilidad, la innovación de la arquitectura de red propuesta consistió en romper el esquema radial puro mediante la integración de un reconectador trifásico de maniobra en la comunidad de Shanhaicun para la operación en lazo abierto. La simulación de transferencia de bloques de carga demostró que el sistema adquirió una alta flexibilidad operativa, lo que permitió aislar tramos con falla y restituir el suministro a los usuarios sanos en segundos sin superar los límites de cargabilidad ni generar sobrevoltajes. Este comportamiento corroboró la teoría de optimización topológica y flexibilidad operativa expuesta en los manuales de software de CYME International T&D (2021) y ETAP (2022).

Finalmente, el contraste entre el escenario inicial y el modelo reconfigurado demostró que el índice TTIK se redujo de 52,23 h a 11,65 h en Guamote, y de 28,85 h a 11,59 h en Pungalá. Dichos resultados ratificaron la hipótesis del estudio al demostrar que la reestructuración física combinada con automatización de maniobras resuelve de forma integral las brechas de calidad en sistemas de baja densidad de carga, superando las metas del plan estratégico de la EERSA (2022) y garantizando el cumplimiento del marco regulatorio ecuatoriano

Conclusiones

- **Respuesta al objetivo de reconfiguración del alimentador 0208 (Guamote):**

La reconfiguración y reubicación geográfica de la troncal principal del alimentador N° 02 de la S/E 08 Guamote reduce el índice de calidad TTIK desde un valor crítico inicial de 52,23 h hasta un valor optimizado de 11,65 h. Este resultado garantiza el cumplimiento estricto del límite regulatorio máximo de 16,00 h fijado por la Regulación ARCERNNR 002/20 para zonas de baja densidad de carga.

- **Respuesta al objetivo de rediseño del alimentador 0213 (Pungalá):**

El rediseño estructural y la reubicación vial de la troncal del alimentador N° 02 de la S/E 13 Pungalá disminuye el tiempo total de interrupción por kVA instalado (TTIK) de un estado base de 28,85 h a una condición de operación de 11,59 h. Dicha mejora posiciona al circuito dentro del marco normativo sectorial vigente en Ecuador.

- **Respuesta al objetivo de repotenciación eléctrica y regulación de voltaje:**

La sustitución del conductor por un calibre N° 3/0 ACSR elimina los desbalances fasoriales y corrige las caídas de tensión críticas en los nodos terminales de ambos alimentadores. La regulación de voltaje del sistema se estabiliza en un valor del 2,09%, cifra que se mantiene dentro del rango de tolerancia del $\pm 5,00\%$ establecido por el organismo de control.

- **Respuesta al objetivo de redundancia y flexibilidad operativa:**

La implementación de un punto de redundancia en lazo abierto mediante un reconectador trifásico de maniobra en la comunidad de Shanhaicun proporciona a la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. una arquitectura de red flexible. Este esquema permite la transferencia de carga segura entre alimentadores ante contingencias, lo cual minimiza el impacto de las interrupciones forzadas y optimiza la calidad del servicio técnico de la distribuidora.

- **Limitaciones del estudio y proyecciones futuras:**

Los resultados obtenidos se limitan a escenarios de simulación deterministas en régimen permanente bajo demanda máxima coincidente. Se sugiere para futuras investigaciones incorporar el análisis de transitorios electromagnéticos, evaluar la integración de generación distribuida fotovoltaica en los nodos alejados, y desarrollar la coordinación de protecciones adaptativas para esquemas de reconfiguración en tiempo real con automatización SCADA avanzadas.

Referencias bibliográficas

- Agencia de Regulación y Control de la Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). Regulación ARCERNNR 002/20: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica. ARCERNNR. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/>*
- CYME International T&D. (2021). CYMDIST: Distribution system analysis software (Version 9.0) [Manual de software]. CYME International T&D. <https://www.cyme.com/software/cymdist/>*
- Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (2022). Plan estratégico institucional e índices de confiabilidad del sistema de distribución. EERSA. <https://www.eersa.com.ec/>*
- Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (2024). Informe técnico anual de índices de calidad y*

confiabilidad del sistema de distribución. Departamento de Planificación y Geoinformática.

ETAP Operation Technology, Inc. (2022). ETAP power system analysis software - User guide (Version 21.0) [Manual de software]. ETAP. <https://etap.com/>

IEEE Power and Energy Society. (2012). IEEE guide for electric power distribution reliability indices (IEEE Std 1366-2012). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6209326>

Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica. (2015). Registro Oficial Suplemento 418 de 16 de enero de 2015. Asamblea Nacional del Ecuador.

Mejía Banda, C. D. (2023). Estudio de la troncal de los alimentadores rurales N° 2 de las Subestaciones 08 y 13 de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. para establecer puntos de redundancia (Trabajo de titulación de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi). Repositorio Institucional UTC. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9876>

Short, T. A. (2014). Electric power distribution handbook (2nd ed.). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/b16521>

Willis, H. L. (2004). Power distribution planning reference book (2nd ed.). CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/9780203913291>

Conflicto de intereses:

Los autores manifiestan que no existe ningún tipo de conflicto de interés, ya sea financiero, personal o académico, que pueda influir en los resultados y conclusiones del presente estudio.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

Al departamento de Ingeniería y Planificación de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. por facilitar el acceso a la infraestructura georreferenciada y las bases históricas del SCADA.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.