



Automatización de Alimentadores en Sectores Urbanos de una Empresa de Distribución de Energía Eléctrica en Ecuador

Automation of Feeders in Urban Sectors of an Electric Power Distribution Company in Ecuador

Leonardo David Quisimalín Villacís | [iD](#) Universidad Técnica de Cotopaxi (Ecuador)
Cristian Laverde Albarracín | [iD](#) Universidad Técnica Estatal de Quevedo (Ecuador)

ARTICLE HISTORY

Received: 30/03/2023
Accepted: 02/05/2023

PALABRAS CLAVE

Automatización, reconectores, reconfiguración, confiabilidad.

KEY WORDS

Automation, reclosers, reconfiguration, reliability.

RESUMEN

El restablecimiento del suministro eléctrico en una red de distribución ha sido un reto para las empresas distribuidoras ya que la identificación y reparación de la incidencia conlleva tiempo y recursos, sin dejar de lado la energía no suministrada, convirtiéndose en una gran pérdida para las empresas. El documento describe el proceso de desarrollo para la automatización de los alimentadores urbanos de la Empresa Eléctrica Riobamba S. A. (EERSA), donde se determina el estado de las variables necesarias para iniciar una opción de transferencia mediante una reconfiguración del sistema de distribución dejando aislada la zona de falla. Además, se propone dos tipos de programación, como es el diagrama de bloques de función y texto estructurado, se analiza el impacto que ocasiona la reconfiguración del sistema sobre la coordinación de protecciones, así como la importancia de las comunicaciones dentro de la funcionalidad del arranque del programa. Finalmente, en base a la puesta en marcha se presentan métricas que permiten validar los resultados esperados dentro de la confiabilidad del sistema por medio de los índices de calidad, su fácil identificación de la zona de falla ha permitido la pronta actuación y toma de decisiones para el mantenimiento correctivo, disminuyendo así los índices de la calidad del servicio técnico, proporcionales a la continuidad con la que se prestará el servicio de energía eléctrica, y que se identifica por la frecuencia (F_{MIK}) y la duración (T_{TIK}) de las interrupciones del suministro pasando de durar horas a segundos solamente, dependiendo de la interrupción o falla, de esta manera las empresas distribuidoras minimizan la energía no suministrada.

ABSTRACT

The restoration of the electricity supply in a distribution network has been a challenge for the distribution companies since the identification and repair of the incident takes time and resources without leaving aside the energy not supplied, becoming a great loss for the companies. The document describes the development process for the automation of the urban feeders of Empresa Eléctrica Riobamba S. A. (EERSA), where the status of the variables necessary to initiate a transfer option is determined through a reconfiguration of the distribution system, leaving the fault zone isolated. In addition, two types of programming are proposed, such as the function block diagram and structured text, the impact caused by the reconfiguration of the system on the coordination of protections is analyzed, as well as the importance of communications within the starting functionality of the system. program. Finally, based on the start-up, metrics are presented that allow validating the expected results within the reliability of the system through quality indices, its easy identification of the failure zone has allowed prompt action and decision making to corrective maintenance, thus reducing the Technical Service Quality indices proportional to the continuity with which the electric power service will be provided, and which is identified by the frequency (F_{MIK}) and duration (T_{TIK}) of supply interruptions going from long hours to seconds only depending on the interruption or failure, in this way the distribution companies minimize the energy not supplied.

I. INTRODUCCIÓN

La expansión, operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos ha permitido el desarrollo de muchas tecnologías, y al considerar este servicio como un eje fundamental para el desarrollo económico, se hace necesario tener un servicio de calidad que sea confiable y continuo.

Con el fin de mejorar la percepción de la satisfacción por el servicio de energía eléctrica por parte del usuario final, y en búsqueda de disminuir los indicadores de baja calidad del servicio técnico relacionado con la continuidad del servicio de energía eléctrica, así como la disminución de la energía no suministrada, los investigadores

han incursionado en el impleo de diferentes aplicaciones para conseguir estos objetivos, siendo principalmente la incorporación de equipos de protección, dispositivos de seccionamiento, reguladores de voltaje y reconfiguración de la red [1].

La reconfiguración de redes de distribución es una de esas aplicaciones que involucra una alta complejidad computacional y requiere una técnica de optimización inteligente para su solución. En el Instituto Nacional de Tecnología Maulana Azad de la India, se desarrolló una aplicación del método de optimización de enjambre de partículas para resolver el problema de reconfiguración de la red en el sistema de distribución (2016) cuyo objetivo es usar el algoritmo de optimización inteligente, optimización de enjambres de partículas (OSP) con diferentes variantes que se desarrollan de acuerdo con la aplicación de destino [1].

La restauración del suministro de energía eléctrica a los clientes afectados puede ser un problema combinatorio a gran escala con los operadores de control, siendo el de mayor impacto el tiempo para encontrar una solución de restauración e implementarla lo antes posible [2]. Al permitir que las fallas sean aisladas y restauradas, también se mejoran los índices de calidad del servicio técnico.

Reconfigurar la red de distribución de energía eléctrica significa alterar la topología de la misma, cambiando el estado de un conjunto de interruptores, reconectores o equipos telecomandados normalmente cerrados (NC) y normalmente abiertos (NA). En IEEE sistema eléctrico de transmisión, se desarrolló un enfoque de optimización de sistemas inmunológicos artificiales para la reconfiguración del sistema de distribución multiobjetivo, cuyo propósito es la utilización del algoritmo multiobjetivo para reducir las pérdidas de energía y mejorar el índice de confiabilidad [2].

En este sentido, una alternativa eficaz para mejorar el suministro eléctrico es la automatización de los sistemas eléctricos y reconfiguración de la red, lo que implica una modificación de la topología al cambiar los estados de un conjunto de equipos de corte y seccionamiento normalmente cerrados y normalmente abiertos. De hecho, la restauración de la red de distribución de energía eléctrica es una actividad de emergencia en el control del sistema. La condición de emergencia se crea cuando falla la función básica de las empresas eléctricas debido a fallas en la red. La restauración del suministro de energía eléctrica a los clientes afectados puede ser un problema combinatorio a gran escala con los operadores de control, siendo el de mayor impacto el tiempo para encontrar una solución de restauración e implementarla lo antes posible [3], [4]. Al permitir que las fallas sean aisladas y restauradas, también se mejoran los índices de confiabilidad del sistema

de distribución de energía eléctrica, así como las diferentes variables, entre estos se tiene: el nivel de voltaje, armónicos, pérdidas de potencia, cargabilidad, entre otros. En muchos casos, reducir las pérdidas de potencia no garantiza una mayor fiabilidad.

A continuación, se presenta la metodología y la programación implementada, que se basa en texto estructurado para mejorar el rendimiento computacional y las reglas de dominancia de la unidad terminal remota, permitiendo así que la aplicación del algoritmo sea viable. La programación implica la detección rápida de la zona en falla por medio de los dispositivos de protección telecomandados. Al confirmarse una falla permanente se aísla rápidamente la zona en falla y se verifica las opciones disponibles para una reconfiguración de la red con el fin de restaurar el suministro a tantas cargas como sea posible, se toma como parte primordial la energización de las zonas no falladas consideradas como críticas (hospitales, clínicas, entes gubernamentales y financieros, entre otros), de igual forma al proceder con una reconfiguración se considera una repartición de la carga a fin de evitar que el alimentador al que se transfiera la zona desenergizada se llegue a sobrecargar.

2. MÉTODO

El método propuesto se centra en una codificación en texto estructurado, basado por niveles de arquitectura, a fin de conseguir una reconfiguración de la red. Para ello es necesario, en primer lugar, realizar mejoras tecnológicas de innovación en las redes de distribución, tales como: inserción de nuevos equipos de protección y seccionamiento, retiro de equipos obsoletos, repotenciación de las redes, construcción de redes, equipos de prueba, etc., con el afán de conseguir diferentes opciones de restablecimiento del servicio de energía eléctrica.

Se consideran cuatro etapas para la puesta en marcha de la automatización de los alimentadores urbanos de la EERSA, que se describen a continuación:

OPTIMIZACIÓN DE LA TOPOLOGÍA

Se enfoca en la reconfiguración de la topología de la red de distribución que permita unir alimentadores de la misma o diferentes subestaciones, incrementar las fuentes de alimentación a cargas especiales (hospitales, clínicas, antenas de comunicaciones, entidades públicas, etc.), en la figura 1 se retira un equipo de corte o seccionamiento innecesario o en desuso [5] (ver Figura 1).

Figura 1.*Optimización de la topología***Figura 2.***Instalación de reconectores*

INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN Y SECCIONAMIENTO

Con la readecuación de la topología de los alimentadores urbanos se deben instalar equipos telecomandados (reconectores) (ver Figura 2), los cuales en conjunto con los relés de cabecera tomarán identificativos de FEEDER (reconector normalmente cerrado [NC] más cercano a la subestación), MIDPOINT (reconectores normalmente cerrados [NC] se ubican en el alimentador entre los equipos FEEDER y MIDPOINT, son abiertos para aislar una sección de falla o deslastrar carga) y TIE (reconector normalmente abierto [NA] donde se encuentran dos alimentadores de igual o diferente subestación, es decir, son responsables por hacer la interconexión entre circuitos. Son cerrados para restablecer secciones sin falla), para que según la zona de ocurrencia de la falla actúen de distintas maneras en base a la opción de reconfiguración que se encuentre disponible. Asimismo, una vez que se tenga una reconfiguración exitosa y esta llegase a sobrecargarse automáticamente se realizará un deslastre de carga, la cual puede ser tomada por otro alimentador, o por el mismo, una vez que no exista sobrecarga.

PRUEBAS DE ACEPTACIÓN DE FÁBRICA (FAT)

Consiste en las pruebas de funcionamiento de la lógica de programación de todos los escenarios de los alimen-

tadores automatizados. Para realizar las pruebas FAT es necesario la readecuación de un minilaboratorio (ver Figura 3) con reconectores, relés, unidad terminal remota (RTU) y una red de datos ethernet para la comunicación, los cuales permitan verificar el funcionamiento de cada uno de los escenarios implementados en cada topología, deslastre de carga, corriente de *pick up*, baja frecuencia, entre otros.

PRUEBAS DE ACEPTACIÓN EN SITIO (SAT)

Consiste en las pruebas de aceptación en el campo. Las mismas que implican probar los escenarios verificados en las pruebas FAT en este caso con todos los equipos FEEDER, MIDPOINT y TIE instalados y comunicados de los alimentadores. Dentro de estas pruebas es necesario contemplar las maniobras de seccionamiento (apertura y cierre) de equipos lo que ocasiona una molestia para los usuarios del sistema eléctrico de distribución, es por ello por lo que las pruebas se deben realizar en horario nocturno/madrugada y con la instalación de *jampers* o *bypass* en equipos normalmente cerrados. De la misma manera, la utilización de la maleta de pruebas (ver Figura 4) para la inyección de corriente de falla y, de ser necesario, realizar pruebas sincronizadas con el SCADA (ver Figura 5).

Figura 3.
Pruebas de aceptación de fábrica



Figura 4.
Pruebas de aceptación en campo

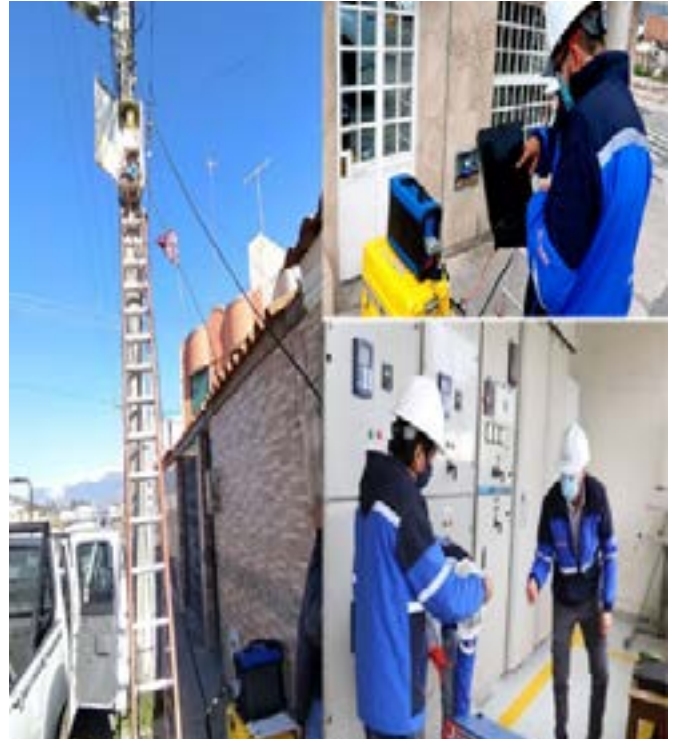


Figura 5.
Validación en SCADA local [6]



IDENTIFICACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL

Se da mediante una combinatoria de N elementos donde sus posiciones están asociadas con un interruptor específico, quedando identificado a cada dispositivo como en (1):

$$X=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (1)$$

Donde x_i , es el estado del interruptor, en el que toma el valor de 0 si el interruptor está abierto, de lo contrario, es 1 [7], [8]. Al partir de esta codificación se crea un conjunto de individuos sobre la viabilidad del sistema.

Para este caso el universo de configuraciones fue igual a 106 que corresponde al número total de reconectadores como protección y transferencia, 20 relés de cabeza, que conducen a identificar los *loops* por alimentador

automatizado con cada uno de sus posibles escenarios. En la figura 6 se identifica el área comprendida de los 20 alimentadores automatizados (ver Figura 6).

CODIFICACIÓN

Para la codificación y niveles de arquitectura para una reconfiguración de la red de distribución ante fallas se presenta en las figuras 7 y 8 el diagrama de flujo para la aplicación con el objetivo de preservar la estructura radial y las consideraciones para que se realice una reconfiguración exitosa, respectivamente (ver Figuras 7 y 8).

La programación de la automatización de los alimentadores se realiza utilizando las herramientas computacionales de la unidad terminal remota (RTU), la que recepta todas y cada una de las señales de los equipos telecomandados [9], [10].

Para la recomposición de la energía eléctrica debido a una falla se maneja de acuerdo con:

- Camino listo
- Alimentadores que no se encuentren sobrecargados
- Equipos listos
- Transferencias listas
- Opciones listas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 9 se muestra el tiempo estimado por acción realizada analizando la disminución de tiempos con relación a una red sin automatización, con una red automatizada (ver Figura 9).

Para identificar el procedimiento de una transferencia exitosa se consideran los resultados del alimentador (ver Figura 10) denominado La Georgina (A0302), describiendo su comportamiento a continuación:

DETECCIÓN INMEDIATA DE LA ZONA EN FALLA

Ante la ocurrencia de una falla (ver Figura 11) en cualquiera de las secciones del alimentador, inmediatamente el equipo de protección la detecta, identificando el origen de la falla, esta la discrimina entre temporal o permanente.

De ser una falla temporal, la reconexión automática, la cual se encuentra configurada, despejará inmediatamente la falla, en el caso de ser una falla permanente (ver Figura 12) el equipo se bloqueará.

SECCIÓN EN FALLA AISLADA Y RESTABLECIMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ZONAS AFECTADAS

Al identificarse como una falla permanente el arranque de automatismo procede a aislar la sección en falla, y empieza a verificar la sobrecarga en los alimentadores don-

de se transferirá la carga afectada, así como las condiciones para la habilitación de automatismo en cada equipo. En la figura 13 se presenta una transferencia exitosa de las zonas afectadas por una falla cerca de la cabecera del alimentador (ver Figura 13).

A fin de evaluar el desempeño de la automatización de los alimentadores urbanos de la EERSA, desde su puesta en marcha, se realiza una comparativa de los índices de calidad disponibles para valorar la calidad del servicio de distribución que están determinados de acuerdo a la Regulación N.º ARCERNNR –002/20 denominada «Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica» sustitutiva de la Regulación N.º ARCONEL –005/18, que tiene que ver con calidad del servicio técnico relacionado con la continuidad con la que se prestará el servicio de energía eléctrica, y que se identifica por la frecuencia (FMIK) y la duración (TTIK) de las interrupciones del suministro [11]-[18].

En las figuras 14, 15 y 16 se muestra el impacto de la automatización en el indicador de calidad de servicio TTIK, en 3 alimentadores (ver Figuras 14, 15 y 16).

En la figura 17 se muestra el impacto de la automatización en el indicador FMIK del alimentador La Georgina (ver Figura 17).

Figura 6.
Alimentadores de la zona urbana automatizada

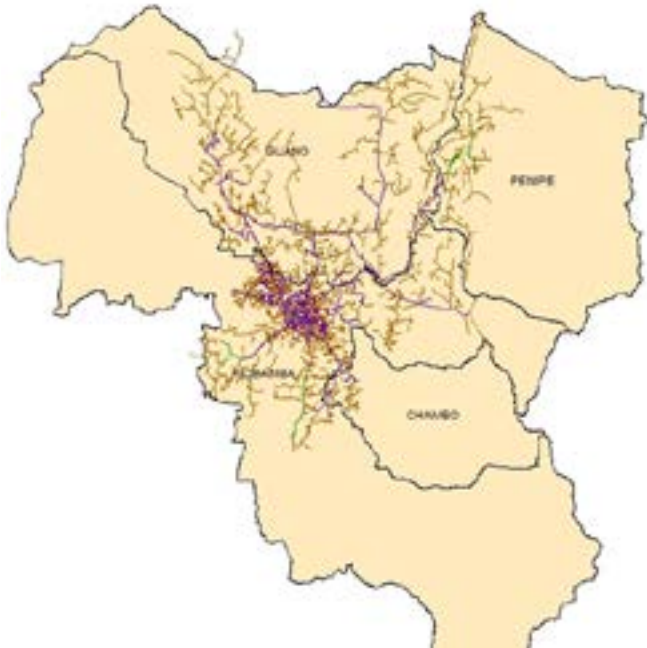


Figura 7.
Arquitectura - niveles



Figura 8.
Arquitectura del programa (lazo externo-reconfiguraciones)

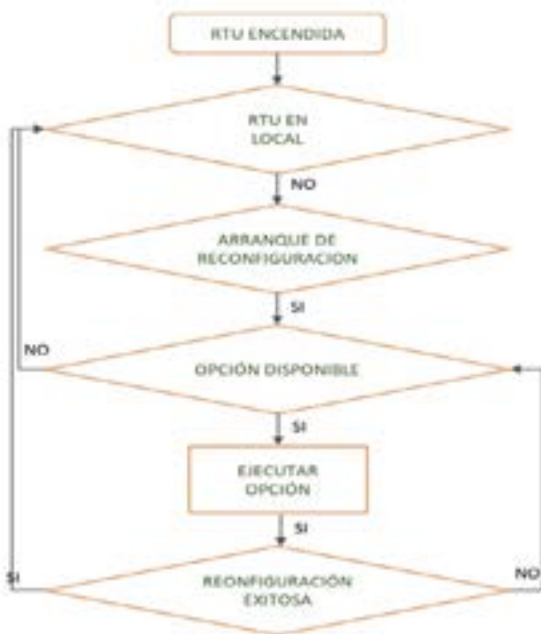


Figura 9.
Resumen esquema de automatización



Figura 10.
Topología alimentador La Georgina (A0302)



Figura 11.
Ocurrencia de falla cerca de la cabecera del alimentador

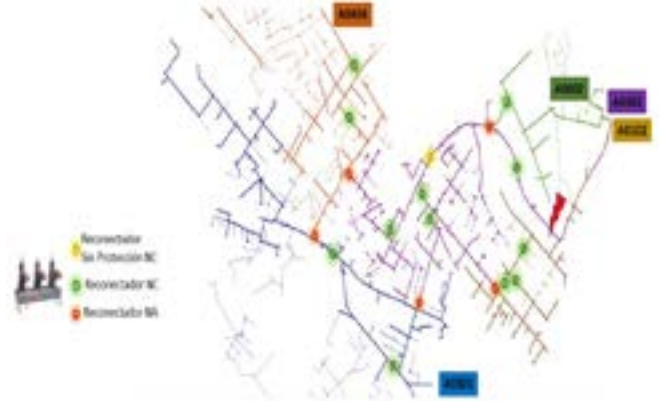


Figura 12.
Apertura del relé de cabecera del alimentador en falla



Figura 13.
Ocurrencia de falla cerca de la cabecera del alimentador



Figura 14.
Indicador TTIK alimentador La Georgina

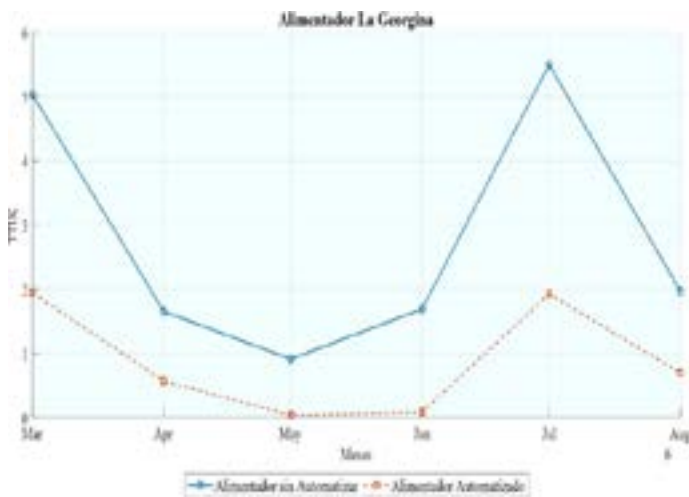


Figura 15.
Indicador TTIK alimentador Multiplaza

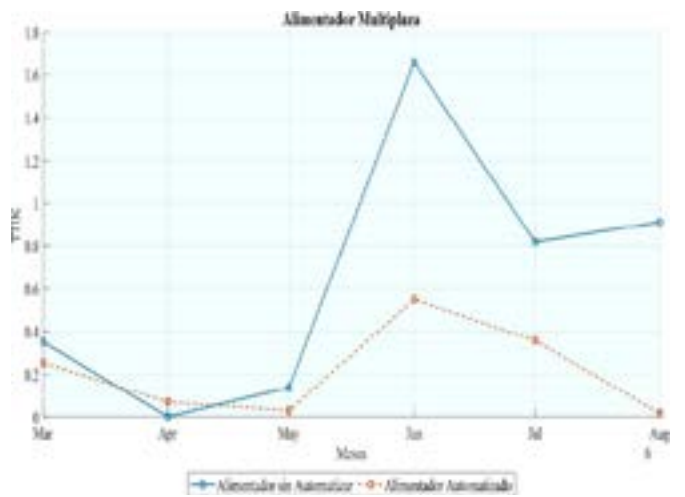
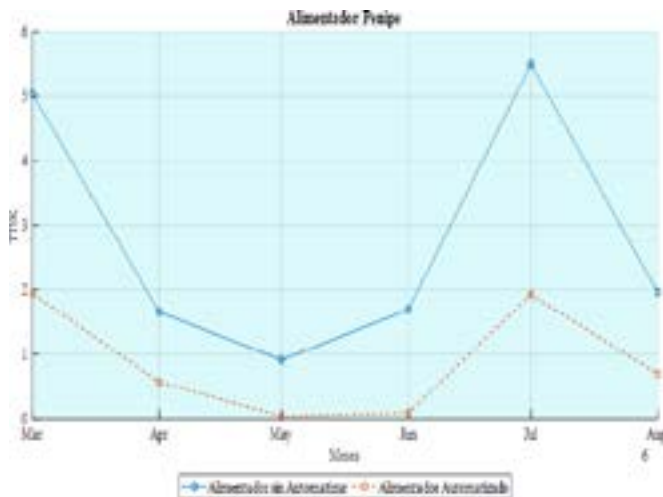
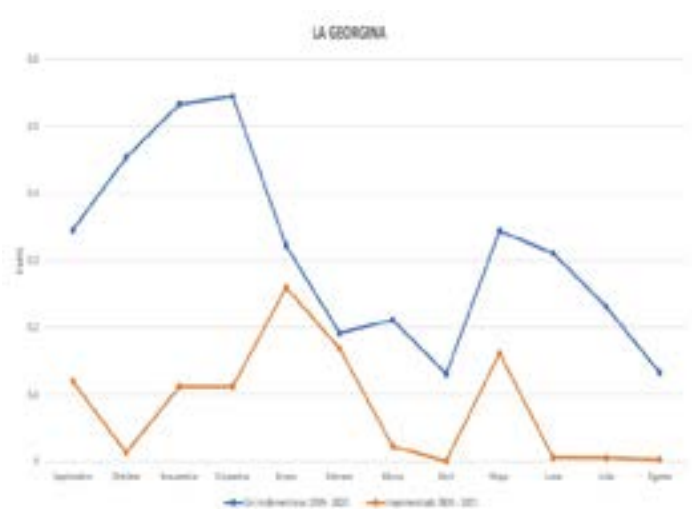


Figura 16.

Indicador TTIK alimentador Penipe

**Figura 17.**

Indicador FMIK alimentador La Georgina



4. CONCLUSIONES

- El impacto de la reconfiguración de una red de distribución de energía eléctrica de empresas distribuidoras para los diferentes eventos de fallas es considerable, dado que su solución genera un mayor gasto en recursos, donde los grupos de trabajo realizaban inspecciones visuales a fin de poder localizar la causa de la falla para un posterior restablecimiento, hacerlo de forma automática mejora la percepción de la satisfacción por el servicio de energía eléctrica por parte del usuario final, la calidad del servicio técnico y la disminución de la energía no suministrada.
- La metodología para el restablecimiento de la red de distribución se basa en identificar la falla, aislar la zona de falla y restablecer el servicio de energía eléctrica en zonas no afectadas a los diferentes alimentadores de una misma u otra subestación de manera automática, reconfigurando la topología de la red con equipos FEEDER, MIDPOINT y TIE telecomandados e instalados a la largo de la red, tomando como parte primordial la energización de las zonas no falladas consideradas como críticas (hospitales, clínicas, entes gubernamentales y financieros, entre otros), de igual forma al proceder con una reconfiguración se considera una repartición de la carga a fin de evitar que el alimentador al que se transfiera la zona desenergizada se llegue a sobrecargar. La programación es escalable, además que puede incluir muchas otras funciones objetivas, como balanceo de carga, costos de conmutación y duración promedio de interrupción del sistema. Estas funciones objetivas podrían incluirse en un estudio futuro. Se debe considerar todas las restricciones requeridas para las condiciones iniciales de la programación, a fin de

evitar afectaciones en la operación luego de su puesta en marcha.

- Con este desarrollo se ha conseguido disminuir los recursos de las empresas distribuidoras en lo que se refiere a personal, material y transporte, así mismo los tiempos de restablecimiento del servicio de energía eléctrica que son proporcionales a la calidad de servicio técnico relacionado con la continuidad con la que se prestará el servicio de energía eléctrica, y que se identifica por la frecuencia (FMIK) y la duración (TTIK) de las interrupciones del suministro ha pasado de durar horas a segundos solamente, dependiendo de la interrupción o falla, finalmente, con este desarrollo se disminuirá la energía no suministrada a causa de fallas de diferente índole dentro de la red de distribución. Puede ser aplicado en los sistemas de distribución dependiendo de la política de operación de la empresa eléctrica distribuidora, esta puede priorizar la reducción de pérdidas o la mejora en el indicador de continuidad del servicio que tiene que ver con el tiempo y la frecuencia de interrupción. Su fácil identificación de la zona de falla ha permitido la pronta actuación y toma de decisiones para el mantenimiento correctivo, disminuyendo así los índices de la calidad del servicio técnico y, en general, de la calidad del servicio.

REFERENCIAS

- [1] A. A. Ishan Srivastava, «An application of particle swarm optimization method for solving network reconfiguration problem in distribution system», *Int. J. Swarm Intelligence*, vol. 2, n.º 2/3/4, 2016, India, 2016.

- [2] A. Zambroni de Souza and D. Oliveira, «Artificial immune systems optimization approach for multiobjective distribution system reconfiguration», *Power Systems. IEEE Transactions*, 0885-8950, 2014.
- [3] Y. Liu, J. Li and L. Wu «Coordinated optimal network reconfiguration and voltage regulator/DER control for unbalanced distribution systems», 1949-3053 IEEE, 2018.
- [4] R. Greer et al., *Distribution automation systems with advanced features*, IEEE Rural Electric Power Conference, Chattanooga, Tennessee, 2011.
- [5] A. Tyagi, A. Verma and P. R. Bijwe, *Reconfiguration of balanced and unbalanced distribution systems for cost minimization*, Proc. of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Malaysia, November 5-8, 2017, India, 2017.
- [6] S. Electric, «Schneider Electric», 11 2020. [En línea]. Available: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=U-Series+Manual+%28N00-809-03%29.pdf&p_Doc_Ref=N00-809-03. [Último acceso: 10 10 2020].
- [7] V. J. Shetty and S.G. Ankaliki, «Electrical distribution system power loss reduction and voltage profile enhancement by network reconfiguration using PSO», 978-1-5386-9249-3\$31.00©2019 IEEE, Dharwad, Karnataka, 2019.
- [8] L. M. Ortiz, *Gateway para la integración de RTU con protocolos propietarios, a una red de adquisición de datos sobre iFix*, tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2003.
- [9] P. R. Sánchez, *Automatización del sistema de la red de distribución primaria de la ciudad de Cienfuegos*, Universidad Central «Marta Abreu» De las Villas, Cuba, 2015.
- [10] M. A. Toscano Palacios, *Automatización de una subestación eléctrica utilizando el protocolo IEC 61850 y el IEC para el envío de datos*, tesis de ingeniería, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, 2010.
- [11] A. Renovables, «Regulación N.º ARCERNR --002/20 Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica», Quito, 2020.
- [12] F. Ding, «Hierarchical decentralized network reconfiguration for smart distribution systems-part II: applications to test systems», *IEEE Transactions on Power Systems*, 0885-8950 © 2014 IEEE, 2014.
- [13] A. K. Ferdavani, *A review on reconfiguration of radial electrical distribution network through heuristic methods*, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru 81310 Johor, Malaysia, 2011.
- [14] S. Nikita S. Galat, *Distribution system feeder reconfiguration by robust optimization method, objectives and solution methods*, International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, 978-1-5386-2745-7/17/\$31.00 ©2017 IEEE, Nashik, 2017.
- [15] M. Kabirifar, *Distribution system reconfiguration using heuristic method and enhanced genetic algorithm with fuzzy sets objectives*, Isfahan University of Technology, Isfahan, 2015.
- [16] Y. Wang, «On the radiality constraints for distribution system restoration and reconfiguration problems», *IEEE Power Engineering Letters*, vol. XX, N.º X, XXX, 2020.
- [17] Y. He, *Studies on technical proposal and management model based on automatization system in rural district*, School of Business Administration in North China Electric Power University, Baoding 011003, China, 2008.
- [18] W. Zheng, «An adaptive distributionally robust model for three-phase distribution network reconfiguration», IEEE, 2020.