

Restablecimiento del Sistema de Distribución utilizando Sistemas Inmunológicos Artificiales y Lógica Difusa, en Redes con Interruptores Telecomandados

Guillermo Pedro Alonso Cardozo ^{a,b}

guillermo_alonso@ande.gov.py

Ricardo Francisco Alonso Cardozo ^{a,b}

ricardo_alonso@ande.gov.py

Vidal Antonio Fretes Martínez ^a

vidal_fretes@ande.gov.py

^aAdministración Nacional de Electricidad ANDE

Avenida España casi Padre Cardozo. Asunción– Paraguay.

^b Universidad Nacional de Itapúa

Abg. Lorenzo Zacarías N° 255 c/ Ruta N° 1 Km 2.5. Encarnación– Paraguay.

Paraguay

RESUMEN

Este artículo propone una metodología para el restablecimiento de una red de distribución de Media Tensión afectada por una falla en un punto determinado, abordando la recomposición como un problema multiobjetivo, procurando transferir la mayor cantidad de cargas afectadas, minimizando la sobrecarga de los tramos, el tiempo de operación, la variación de tensión en relación a la tensión nominal, las pérdidas eléctricas, y la diferencia de cargas de los alimentadores.

La metodología de restablecimiento del servicio de energía eléctrica en sistemas de distribución es realizada considerando interruptores telecomandados y llaves operables de forma local, se propone la operación de la reposición del servicio en 3 etapas considerando las operaciones de forma remota y de forma local para establecer la reconfiguración óptima del sistema utilizando la herramienta de Inteligencia Artificial (Sistemas Inmunológicos Artificiales y Lógica Difusa), teniendo en cuenta todos los seccionadores de operación local y remota de la red. La propuesta se simula en el sistema de distribución de la ciudad de Encarnación-Paraguay, utilizando datos reales de la red.

PALABRAS CLAVES

Restablecimiento de Redes de Distribución, Principio de Selección Clonal, Lógica Difusa, Interruptores Telecomandados.

1 INTRODUCCIÓN

La operación en sistemas de distribución se realiza mediante equipos de apertura y cierre instalados en la red, que pueden ser interruptores telecomandados con mando remoto o seccionadores cuchilla

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

operados de forma local. Las operaciones de apertura o cierre son decididas desde un Centro de Control de Operaciones ya sea de forma remota, mediante el mando a los interruptores telecomandados, o de forma local en coordinación con las unidades móviles de maniobra. La disposición de la red de distribución de Media Tensión normalmente es de forma radial con recurso o débilmente mallada con recurso, que permite una elevada cantidad de configuraciones posibles.

La cantidad de interruptores telecomandados generalmente es limitada debido a la elevada inversión requerida en la instalación de estos equipos, siendo mucho mayor la cantidad total de seccionadores operados de forma local.

El Sistema de Distribución de Energía Eléctrica se encuentra expuesto a fallas, que obliga a la realización de operaciones para aislar la falla y restablecer el servicio. El problema de restablecimiento del servicio se debe realizar en base a un enfoque multiobjetivo, que implica un problema combinatorio y complejo con incertidumbres, lo que hace inaplicable los métodos clásicos [1,2].

En [3] se resuelve el problema de restablecimiento del servicio, utilizando la heurística de sistemas inmunológicos artificiales (AIS) y la lógica difusa, también se aplica la teoría de grafos, en particular el algoritmo de Prim, en dicho trabajo se procura una solución al problema multi-objetivo, optimizando la carga a reponer, el tiempo de reposición, las pérdidas eléctricas, los niveles de tensión y los niveles de sobrecarga de los circuitos. Para resolver este tipo de problemas se debe tener en cuenta aspectos importantes como el modelado adecuado de las redes de distribución, los algoritmos para manejar los cambios de configuración de la topología de la red, los cálculos de flujo de carga, la composición de la función o funciones objetivo, y las técnicas de toma de decisiones que definen la configuración ideal [1;5].

En este trabajo se utilizará una metodología conforme al problema resuelto en [3] basado en Sistemas Inmunológicos artificiales (SIA – Principio de Selección Clonal) y lógica difusa en el análisis objetivo, introduciendo modificaciones de manera que la recomposición del sistema sea resuelto en 3 fases considerando la incorporación de interruptores telecomandados y agregando una función objetivo de balance de carga de los alimentadores.

La metodología propuesta se simula en el sistema de distribución correspondiente a 4 alimentadores de la Subestación Encarnación, utilizando datos reales de la red, el sistema está compuesto por 113 llaves y 97 nodos en representación de teoría de grafos y 798 barras para el flujo de carga.

2 HERRAMIENTAS A UTILIZAR

2.1 Sistema Inmunológico Artificial

El sistema inmunológico artificial (SIA) es una técnica de computación evolutiva que se ha empleado para resolver problemas de optimización, basado en el sistema inmunológico de los vertebrados [6].

Los Sistemas Inmunes Artificiales (SIA) poseen muchas características interesantes para resolver problemas de optimización, ya han sido aplicados en la solución de problemas de robótica, control adaptativo, optimización sistemas multi-agente con enfoque de redes neuronales, sistemas basados en el gradiente, la minería de datos, clasificación de imágenes y despacho óptimo [6]. Los SIA's presentan características ideales para la aplicación en problemas combinatoriales que implican: carácter único; reconocimiento de los cuerpos extraños; detección de anomalías; detección imperfecta (tolerancia de ruido); aprendizaje por refuerzo, la memoria; y reconocimiento de patrones [6].

El algoritmo de esta heurística está representado en la figura 1.

2.2 Lógica Difusa.

La lógica binaria utilizada en las computadoras manejan datos precisos que se reducen a cadenas de unos (1) y ceros (0) y proposiciones que son ciertas y falsas. El cerebro humano puede razonar con información que involucra incertidumbre, además, las personas tienen un sentido común que les permite razonar en un mundo donde las cosas son parcialmente ciertas. La lógica difusa es una rama de la Inteligencia Artificial que le permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y verdadero [9], valores continuos comprendidos entre 0 y 1.

En [10] es utilizada la lógica difusa para la elaboración de un algoritmo para el restablecimiento en sistemas de distribución.

En este trabajo se utiliza la lógica difusa como soporte para transformar el problema multi-objetivo a uno con un solo objetivo difuso de forma análoga a la solución propuesta en [3], y en [9].

En el dominio difuso, cada objetivo se asocia con una función de pertenencia. La función de pertenencia indica el grado de satisfacción del objetivo. La formulación del problema propuesto considera los siguientes objetivos:

1. Maximización de la carga transferida ($S(\bar{x})$).
2. Minimización de la desviación de la tensión de nodos ($dV(\bar{x})$).
3. Minimización de la sobrecarga de los tramos ($Sc(\bar{x})$).
4. Minimización de la pérdida de potencia del sistema ($L(\bar{x})$).
5. Minimización del tiempo de operación ($T(\bar{x})$).
6. Minimización de diferencia de carga entre alimentadores ($\beta_{bal}(\bar{x})$).

Estos 6 objetivos son modelados con conjuntos difusos para ser evaluados.

2.3 Flujo de Carga en Sistemas de Distribución

Debido a las características de los sistemas de distribución que son la alta tasa X/R, cargas trifásicas desequilibradas y topología radial, que ocasionan que la matriz Jacobiana se vuelva impropia provocando la no convergencia del método de Newton-Raphson. En este trabajo, al igual que en [3] se aplica el método de barradura directa/inversa [7] debido a sus mejores características de convergencia. Consiste en un enfoque de cálculo por fases considerando las impedancias mutuas entre ellas.

La topología de red está representada por una matriz de incidencia. En la primera etapa, el algoritmo evalúa la corriente en todas las ramas, desde los nodos de abajo hacia arriba, mediante el uso de la matriz de la carga y la incidencia nodal. En el paso siguiente, las tensiones nodales se actualizan de acuerdo con la caída de tensión de ramas, desde la parte superior de nodo a los inferiores. El proceso converge cuando todas las tensiones nodales están dentro de una tolerancia dada. [1].

2.4 Teoría de Grafos

Es utilizada la representación de la red en forma de grafos al igual que en [3], se recurre al algoritmo de Prim para la creación de la población inicial garantizando la construcción de árbol conectado en un grafo con los pesos en las aristas. Un proceso que asigna pesos a las aristas, se puede utilizar para obtener un conjunto viable de redes [1]. La red es representada por un conjunto

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

de arboles que forman una floresta, de manera que se mantenga la radialidad del sistema y todos los nodos (cargas) sean conectados.

La mutación de los anticuerpos es realizada cambiando el estado de algunas aristas (llaves) manteniendo radial la red, de forma que el grafo constituido sea equivalente a una floresta.

3 METODOLOGIA

El problema consiste en encontrar la secuencia de operaciones que optimice las funciones objetivo consideradas, para una determinada falla en el sistema de distribución. Considerando que el sistema cuenta con interruptores telecomandados y llaves de operación manual, la solución propuesta es realizada en 3 fases: a) Operación Remota, b) Aislación de la Falla de forma Local y Operaciones Remotas y c) Reconfiguración con SIA y Lógica Difusa. La metodología es realizada de forma análoga a [3] con algunas modificaciones.

3.1 Planteamiento Matemático

El problema se plantea como una optimización multi-objetivo de acuerdo a la ecuación (1).

$$\min \begin{cases} L(\bar{x}) \\ 1 \\ \frac{1}{S(\bar{x})} \\ T(\bar{x}) \\ Sc(\bar{x}) \\ dV(\bar{x}) \\ \beta_{bal}(\bar{x}) \end{cases} \quad (1)$$

S.A

$$I_{nap} \leq I_{\max- nap} \quad (\text{corriente de alimentadores})$$
$$t_0 < t_{\max} \quad (\text{tiempo de Operación})$$
$$Sc_i(\bar{x}) \leq Sc_{\max_i}$$
$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$
$$F(\bar{x}) \text{ ser una floresta}$$

Se considera la identificación de la falla como un dato de partida o condición inicial del problema.

A continuación se describen cada una de las fases.

3.2 Fase 1 - Operación Remota

Se identifica el punto de falla del sistema de distribución, se aísla la zona de falla y se realiza la reposición parcial del sistema mediante la operación de interruptores telecomandados e interruptor de cabecera. Se establece un diagrama de grafos conformado con aristas que representan a los interruptores telecomandados e interruptores de cabecera, de forma que la aislación de la falla y la reposición parcial es realizada con la operación de estos equipos de forma remota, son consideradas en el algoritmo de reposición todas las opciones posibles de transferencia con los acoples correspondientes (fuerza bruta) de forma que se seleccione aquella operación que tenga mejor resultado en la función objetivo global, detallada en la sección 3.4.5.

3.3 Fase 2 - Aislación de la Falla de forma Local y Operaciones Remotas

Se realiza la apertura de los seccionadores de operación manual que limitan la zona de falla, y posteriormente son evaluadas las opciones de operaciones remotas de forma a reponer la mayor cantidad de zonas afectadas. Si están son factibles se realizan las operaciones remotas

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

correspondientes. La evaluación de estas operaciones es realizada de la misma manera que la fase anterior.

3.4 Fase 3 - Reconfiguración con SIA y Lógica Difusa.

Las operaciones detalladas en las fases anteriores son realizadas con rapidez pero sin considerar una optimización plena de las configuraciones posibles, más bien están determinadas por las restricciones impuestas en el sistema de distribución, y por la limitada cantidad de llaves operables de forma remota. En esta etapa también se puede establecer las demandas considerando una previsión en el lapso de tiempo que se requiera para la reparación de la falla.

En esta fase se realiza la reconfiguración óptima del sistema considerando las funciones objetivos detalladas en la sección 3.1., siguiendo el algoritmo de la figura 1, detallado a continuación.

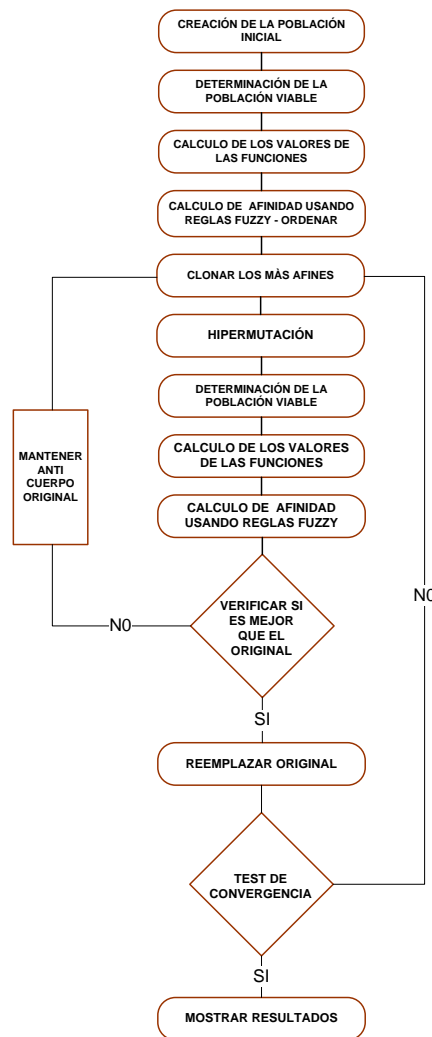


Figura 1: SIA. Diagrama de Bloques

3.4.1 Identificar y Aislar el Punto de Falla. El primer paso consiste en identificar el punto de falla, y aislar indicando cuáles son las llaves que deben permanecer abiertas. Posteriormente se continúa la metodología según lo indicado en el diagrama de bloques de la Figura 1.

3.4.2 Creación de la Población Inicial y Codificación. Se identifican cuáles son las llaves maniobrables que corresponden a todas las llaves del circuito de la subestación, menos las llaves

que deben permanecer abiertas. La variable es un vector (anticuerpo) cuya dimensión es la cantidad de llaves maniobrables y cuyos componentes son ceros (posición abierta) y unos (posición cerrado) hallados aleatoriamente. El anticuerpo se representa por la ecuación 2.

$$\bar{x} = [x_1, x_2, x_3 \dots \dots \dots x_n]^T \tag{2}$$

Donde, x_i son variables binarias.

En esta etapa se incluyen dentro de la población al azar aquellas correspondientes a maniobras de transferencia directa realizadas con una sola operación de forma a facilitar las soluciones posibles.

3.4.3 Determinación de la Población Viable. Se corrige en esta etapa la radialidad (en caso de que los anticuerpos obtenidos al azar no cumplan con dicha condición), utilizando el algoritmo de Prim, posteriormente se eliminan los anticuerpos repetidos.

3.4.4 Cálculo de los Valores de las Funciones. Los valores de las funciones: Carga Transferida (S), Desvío de Tensión (dV), Sobrecarga de los tramos (Sc), Pérdidas por efecto Joule (L) y Tiempo de operación (T) son calculados de acuerdo a la metodología de [3] mediante el flujo de carga, el manejo de la teoría de grafos en las diferentes configuraciones. La función Balance de carga de alimentadores (β) es calculada mediante la herramienta de flujo de carga y es fuzzificada de acuerdo a la figura (2) y la ecuación (3).

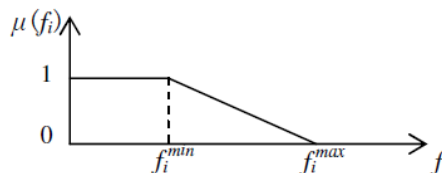


Figura 2: Fuzzificación de la función Balance de Carga de Alimentadores

$$\tilde{\beta}_i = \mu(\beta_i) = \begin{cases} 1, & \beta_i < \beta^{min} \\ \frac{\beta^{max} - \beta_i}{\beta^{max} - \beta^{min}}, & \beta^{min} \leq \beta_i \leq \beta^{max} \\ 0, & \beta_i > \beta^{max} \end{cases} \tag{3}$$

3.4.5 Cálculo de Afinidad Utilizando Reglas Fuzzy y Ordenar. A partir de las funciones objetivo independientes fuzzificadas es calculada una función objetivo global, que es igual a la suma ponderada de estas funciones, de acuerdo a la ecuación (4).

$$Z = w_1 \tilde{S} + w_2 \tilde{dV} + w_3 \tilde{S}_c + w_4 \tilde{L} + w_5 \tilde{T} + w_6 \tilde{\beta} \tag{4}$$

3.4.6 Clonar los más afines. Se crea un conjunto de M anticuerpos de afinidad superior; cuyos resultados han sido más satisfactorios. Cada anticuerpo seleccionado se clona en proporción a su afinidad, formando una nueva población.

3.4.7 Hipermutación. Al igual que en [3], la población de clones se somete a un régimen de hipermutación, se evalúan para cada clon el flujo de carga y el cálculo de las pérdidas; estos resultados son ordenados (por afinidad). Si el clon mutado no es mejor que el anticuerpo original, se mantiene el anticuerpo y se somete de nuevo al proceso de clonación según se ve en el diagrama de la Figura 1, de lo contrario sustituye al original. Este proceso se realiza de forma iterativa y la convergencia es determinada por el número de iteraciones que constituye el criterio de parada.

4. SIMULACIONES

Para demostrar la aplicabilidad de la metodología se analiza el sistema que abastece a parte de la Ciudad de Encarnación, que consiste en 4 alimentadores que poseen un total de 798 barras de carga y 113 llaves representado en diagrama de grafos con 96 nodos y 113 aristas, entre las 113 llaves, 20 son interruptores telecomandados (en azul) según se observa en la Figura 3, estos interruptores telecomandados son similares al representado en la figura 5.

Son planteados dos escenarios con fallas en los nodos 9 y 39 respectivamente.

La configuración inicial está indicada en la figura 3 y 4 con las llaves (aristas) abiertas en líneas punteadas.

En ambas simulaciones se obtuvo un tiempo computacional en la fase 3 de 9 minutos aproximadamente, que hace factible la aplicación de esta metodología en operación, donde se precisa de rapidez en el análisis y respuesta. En las fases 1 y 2 el algoritmo converge en menos de 1 minuto.

4.1 Resultados para Falla en el Nodo 9

La secuencia de operaciones se representa en la Tabla 1. Los resultados de las corrientes obtenidas se representan en la tabla 2 y las configuraciones obtenidas se pueden visualizar en la figura 3.

	Secuencia	Abrir	Cerrar
1ra Fase: Operación Remota	1	10	
	2		14
2da Fase: Aislación de la Falla de forma Local y Operaciones Remotas.	3	9	
	4		1
3ra Fase: Reconfiguración con SIA y Lógica Difusa.	5		21
	6	18	

Tabla 1: Resultado de Operaciones para la Falla en el Nodo 9.

Alimentador	Corriente Inicial pre-falla	Corriente final pos-falla Falla en el Nodo 9	Corriente final pos-falla Falla en el Nodo 39
ENC21	202,36 A	15,61 A	202,36 A
ENC3	192,59 A	284,76 A	128,19 A
ENC20	192,86 A	288,46 A	255,60 A

Tabla 2: Corrientes Pre y Pos-Falla de los alimentadores para falla en el Nodo 9 y Nodo 39.

4.2 Resultados para Falla en el Nodo 39

La secuencia de operaciones se representa en la tabla 3. Los resultados de las corrientes obtenidas se representan en la tabla 2 y las configuraciones obtenidas se puede visualizar en la figura 4.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

	Secuencia	Abrir	Cerrar
1ra Fase: Operación Remota	1	47	
	2	49	
	3	55	
	4		1
	5		53
	6		61
2da Fase: Aislación de la Falla de forma Local y Operaciones Remotas.	7	48	
	8		49
3ra Fase: Reconfiguración con SIA y Lógica Difusa.	9	61	

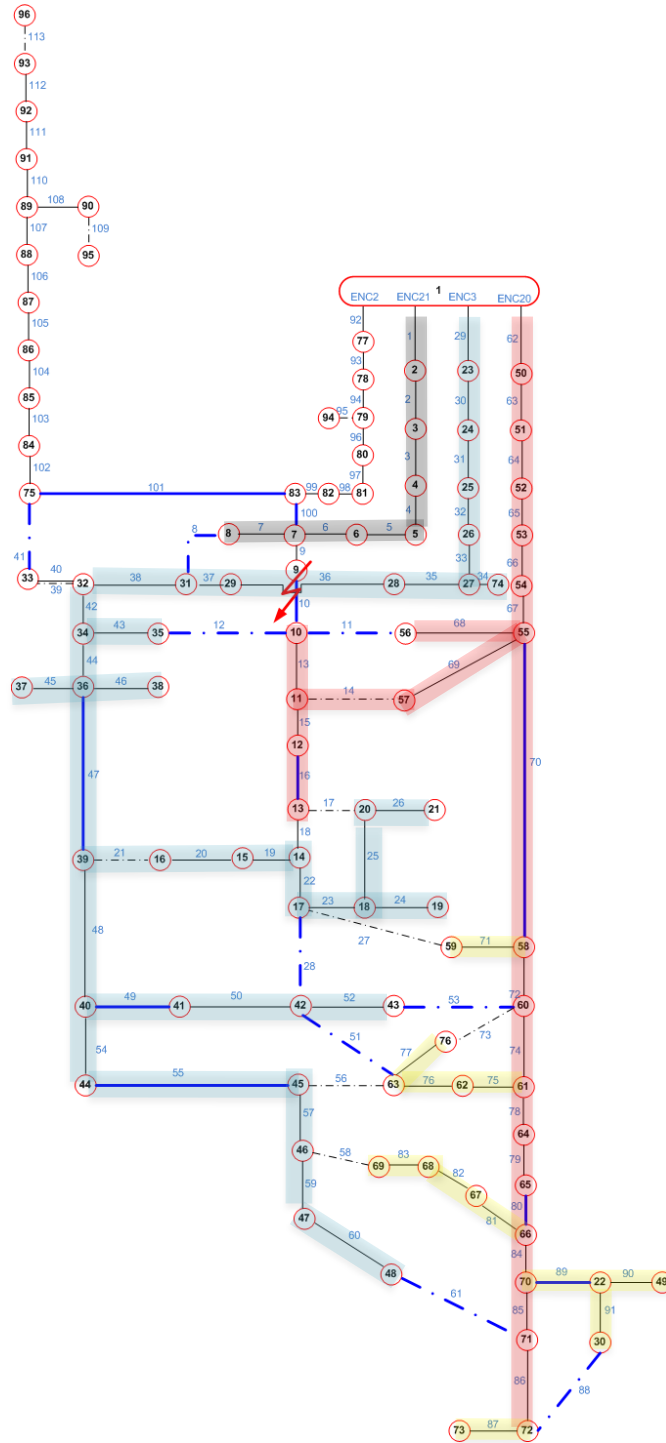
Tabla 3: Resultado de Operaciones para la Falla en el Nodo 39.

CONCLUSIONES

La metodología planteada en este trabajo para la recomposición del servicio tras una interrupción, ofrece buenos resultados, se optimiza simultáneamente todas las funciones objetivos propuestas. La implementación de la reposición del servicio en 3 fases es aplicable para sistemas que poseen llaves operables de forma local e interruptores telecomandados.

La heurística utilizada, basada en SIA y lógica difusa, y el manejo de las configuraciones con teoría de grafos es ideal para el abordaje de este tipo de problemas. El tiempo computacional de convergencia resulta satisfactorio para este tipo de aplicaciones en la que se requiere una respuesta rápida para la toma de decisiones.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

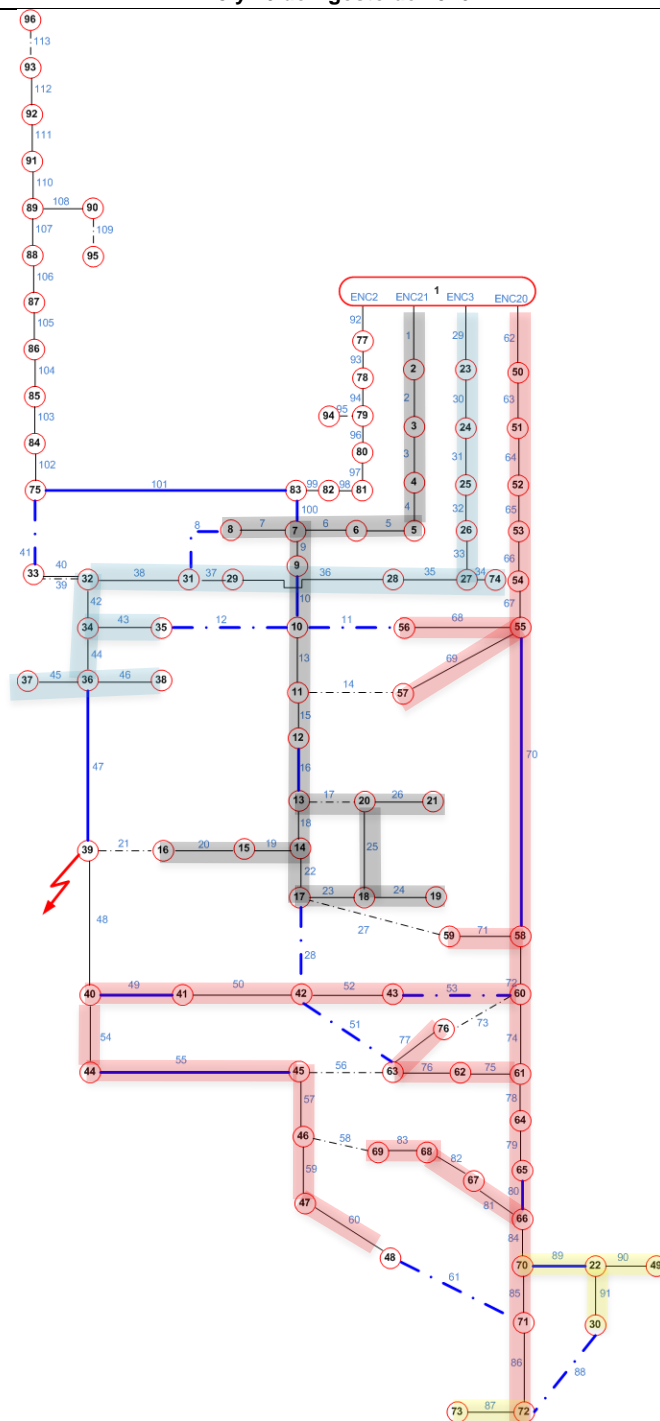


Figura 3: Configuración para falla en el nodo 9. **Figura 4:** Configuración para falla en el nodo 39.



Figura 5: Interruptor Telecomandado

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alonso, R.F.; Oliveira, D.Q.; Zambroni de Souza, A.C. "Artificial Immune Systems Optimization Approach for Multiobjective Distribution System Reconfiguration". Power Systems, IEEE Transactions on Volume:PP Issue:99
- [2] E. M. Carreno, R. Romero, A. Padilha-Feltrin, "An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 4, pp. 1542-1551, 2008.
- [3] R.F. Alonso Cardozo, G.P. Alonso Cardozo, V.A. Fretes Martínez, N.I. Jara León "Restablecimiento del Servicio de Distribución de Energía Eléctrica a través del principio de selección clonal y herramientas para solución de problemas de decisión con múltiples objetivos e incertidumbres", XVI ERIAC, 2.014.
- [4] D. P. Bernadon, V. J. Garcia, A. S. Q. Ferreira, L. N. Cunha, "Multi-criteria Distribution Network Reconfiguration Considering Sub transmission Analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2684-2691, 2010.
- [5] J. Mendonza, R. López, D. Morales, E. López, P. Dessante, R. Moraga, "Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms with Restricted Population and Addressed Operators: Real Application," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 948-954, 2006.
- [6] L. N. de Castro, F. J. Von Zuben, "Learning and optimization using the clonal selection principle," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 3, no. pp. 239-251, 2002.
- [7] H. E. Farag, E. F. El-Saadany, R. El Shatshat, A. Zidan, "A generalized power flow analysis for distribution system with high penetration of distributed generation," Electric Power Systems Research, vol. 81, no. pp. 1499-1506, 2011.
- [8] Pedro Ponce Cruz, "Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería" Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México ISBN: 978-607-7854-83-8.
- [9] A. Saffar, R. Hooshmand, A. Khodabakhshian "A new fuzzy optimal reconfiguration of distribution systems for loss reduction and load balancing using ant colony search-based algorithm" Elsevier B.V. 2011.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

- [10] A. C. B. Delbem, N. G. Bretas¹, A. de Carvalho, “Algoritmo de busca com Heurísticas Fuzzy para Restabelecimento de energia em sistemas radiais de distribuição”, SBA Controle & Automação Vol. 11 no. 01 / Jan., Fev., Mar, Abril de 2000.