

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.

Ricardo Francisco Alonso Cardozo ^[1]

ricardo_alonso@ande.gov.py

Guillermo Pedro Alonso Cardozo ^[1]

Guillermo_alonso@ande.gov.py

Nilda Isabel Jara León ^[1]

nilda_jara@ande.gov.py

Vidal Antonio Fretes Martínez ^[1]

vidal_fretes@ande.gov.py

^[1] **Administración Nacional de Electricidad ANDE**
Avenida España casi Padre Cardozo. Asunción– Paraguay.

Paraguay

RESUMEN

Las empresas concesionarias de Distribución de Energía Eléctrica, se encuentran en la búsqueda constante de la reducción de los índices de interrupción de energía eléctrica, con el objeto de mejorar los indicadores de continuidad del servicio, redundando estas acciones en una mayor satisfacción del consumidor. No obstante las interrupciones son inevitables ya sean por trabajos de mantenimiento de la red o por fallas propias del sistema.

Este trabajo consiste en la aplicación de una herramienta computacional, para la recomposición de una red afectada por una falla dada, a fin de que esta recomposición logre que el menor número de tramos (o carga) posibles queden afectados, sin comprometer las condiciones del servicio a otros tramos desde el punto de vista de los niveles de tensión, teniendo en cuenta además que las pérdidas se encuentren dentro de los rangos aceptables. Es importante señalar, a efectos de los índices de desempeño del sistema, que esta reposición se realice en el menor tiempo posible.

Para ello, una metodología basada en Sistemas Inmunológicos Artificiales (SIA – Principio de Selección Clonal) y una herramienta para determinación de la afinidad relacionada a problemas de decisión con múltiples objetivos, incertidumbres y restricciones será utilizada. Siendo el problema multiobjetivo (y subjetivo) se adapta a la aplicación de la lógica difusa, para ello se recurren a las variables lingüísticas, que es una herramienta poderosa para procesar un lenguaje difuso.

ABSTRACT

Concessionary companies for electrical power distribution are constantly in the search of the reduction in the rate of power interruption so that they can improve the service continuity indicator, leading this action to a higher customer satisfaction. Nevertheless, interruptions are unavoidable, either due to maintenance works in the electric net or because of the system's own failure.

The aim of this work is to apply a computing tool for the rehabilitation of the affected electrical grid by a determined failure, so that this rehabilitation can assure that the smallest number of sections (or electric charge) be affected, without compromising the service conditions to other sections with respect to the voltage levels, considering besides, that the losses are in the acceptable ranges. It is important to highlight,

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

for the purpose of the rate of the system maintenance, that the above mentioned rehabilitation should be performed as soon as possible.

Therefore, this work will follow a methodology based on Artificial Immune Systems (AIS – Principle of Clonal Selection) and a tool to determine the affinity to decision making problems with multiple objectives, uncertainty and constraints. Being the problem multi-objective (and subjective) it is adjusted to the application of fuzzy logic. Consequently, linguistic variables will be used as they are a powerful tool to process fuzzy language.

PALABRAS CLAVES

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

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución están previstos de redes radiales o débilmente malladas. Por lo general, consisten en un conjunto de alimentadores con los recursos, es decir, un alimentador se puede dividir en secciones con conectividad a otras secciones, lo que permite la interoperabilidad en casos de contingencias.[1]

Todo Sistema de Distribución de Energía Eléctrica se encuentra expuesto a fallas, que obliga a la realización de reconfiguraciones para reponer el servicio. Esto implica un análisis multi-objetivo, problema combinatorio y complejo, con muchas incertidumbres, lo que hace que los métodos clásicos sean difíciles de aplicar [1,2]. No se puede resolver de forma óptima sin 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 en tiempo y forma, los cálculos de flujo de carga, la composición de la función objetivo, sus limitaciones y las técnicas de toma de decisiones utilizadas para definir la configuración eléctrica ideal [1;3].

Se diseñó en este trabajo una herramienta computacional tal que dada una falla, optimice la reposición de la mayor cantidad de cargas posibles, teniendo en cuenta que tanto los niveles de tensión como las pérdidas se encuentren dentro de un rango establecido, y que el tiempo de maniobras sea justificada. Para ello se utiliza los sistemas inmunológicos artificiales (AIS) y la lógica difusa, también se aplica la teoría de grafos, en particular el algoritmo de Prim.

Se analizó primeramente el sistema Teste de 14 barras propuesto en [4]. El cual posee 14 barras de carga y 16 llaves, y posteriormente con estos resultados se aplicó a un sistema de mayor porte como el que alimenta al microcentro de la Ciudad de Encarnación compuesto de 3 alimentadores de 23kV provenientes de la Sub Estación Encarnación. En total este sistema cuenta con: 206 barras de carga y 91 llaves.

2 SISTEMA INMUNOLOGICO ARTIFICIAL

Varias técnicas de computación evolutiva se han empleado para resolver problemas de optimización. Estas técnicas imitan los sistemas o procesos biológicos, tales como el sistema nervioso, la meiosis y el sistema inmunológico, de una manera computacional. [5].

El sistema inmunológico es un complejo de células, moléculas y órganos que representan un mecanismo de identificación capaz de percibir y combatir la disfunción de la propia célula y la acción de los microorganismos infecciosos exógenos. Reconoce una variedad casi ilimitada de células y sustancias extrañas infecciosas, distinguiéndolos de esas células no infecciosas nativas [1;3].

Sistemas Inmunes Artificiales (SIA) poseen muchas características interesantes para resolver problemas de optimización, ya ha sido aplicado a la robótica, el control adaptativo, optimización, sistemas multi-agente y los enfoques de redes neuronales, sistemas basados en el gradiente, la minería de datos, clasificación de imágenes y despacho óptimo [5].

El SIA se utiliza en este trabajo porque presentan las siguientes características: carácter único; reconocimiento de los cuerpos extraños; detección de anomalías; detección imperfecta (tolerancia de ruido); aprendizaje por refuerzo, la memoria; y reconocimiento de patrones [5].

3 RECOMPOSICIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

La recomposición del sistema de distribución requiere el desarrollo y la aplicación de algunas herramientas y metodologías, que se presentarán en las próximas secciones.

3.1 *Flujo de Carga en Sistemas de Distribución*

Flujo de carga es un paso básico en los estudios de sistemas de energía eléctrica. Newton-Raphson y sus métodos desacoplados son ampliamente utilizados para resolver el problema de flujo de carga. Pero, no es adecuada su aplicación para los sistemas de distribución debido a sus características de alta tasa X/R , cargas trifásicas desequilibradas y topología radial, características que ocasionan que la matriz Jacobiana se vuelva impropia provocando la no convergencia del método. En este trabajo, se aplica el método de barradura directa/inversa [6] 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.[1]

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 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]

3.2 *Algoritmo de Prim.*

Es un algoritmo basado en la teoría de grafos, que busca un árbol de expansión mínima de grafo ponderado y conectado. Esto significa que este algoritmo encuentra un subconjunto de aristas que forman un árbol y que incluye todos los nodos, en los que se minimice el peso total de este árbol. Se utiliza en este trabajo para construir un conjunto viable de alimentadores, que sea acíclico (sin anillos).

Es posible crear, a través del algoritmo de Prim, una red de distribución radial aleatoria representada por un gráfico sin bucles o áreas de formación de islas, si se conoce el peso de los nodos. Dado que el algoritmo de Prim garantiza 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]

3.3 *Lógica Difusa.*

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 IA que le permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y verdadero.[8]

En este trabajo se presenta un algoritmo para la reconfiguración de red basado en un enfoque multi-objetivo difuso. Estos objetivos se modelan con conjuntos difusos para evaluar su imprecisión y se puede proporcionar el valor esperado de cada objetivo. Estos objetivos son fuzificados y posteriormente se forma una función objetivo difusa la cual se maximiza para cada operación. Reglas heurísticas también se incorporan en el algoritmo para minimizar el número de operaciones.[8]

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.
2. Minimización de la desviación de la tensión de nodos.
3. Minimización de la sobrecarga de los tramos.
4. Minimización de la pérdida de potencia del sistema.
5. Minimización del tiempo de operación.

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

4 SIMULACIONES

En esta sección se presentan la metodología desarrollada y los Resultados Obtenidos.

4.1 Metodología

4.1.1 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.

4.1.2 Creación de la Población Inicial y Codificación.

Se identifican cuáles son las llaves maniobrables que corresponden a todas las llaves del alimentador en la cual se encuentra la falla. 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 1.

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

$$\bar{x} = [x_1, x_2, x_3 \dots \dots \dots x_n]^T \quad (1)$$

Donde x_i son variables binarias.

4.1.3 Determinación de la Población Viable

Se corrige en esta etapa la radialidad, utilizando el algoritmo de Prim, posteriormente se eliminan los anticuerpos repetidos.

4.1.4 Cálculo de los Valores de las Funciones

Con cada anticuerpo viable, se realiza el cálculo de las funciones objetivos correspondientes a:

- Carga Transferida (S)
- Tensión Mínima (V_{\min})
- Sobrecarga de los tramos (S_c)
- Pérdidas por efecto Joule (L)

- Tiempo de operación(T)

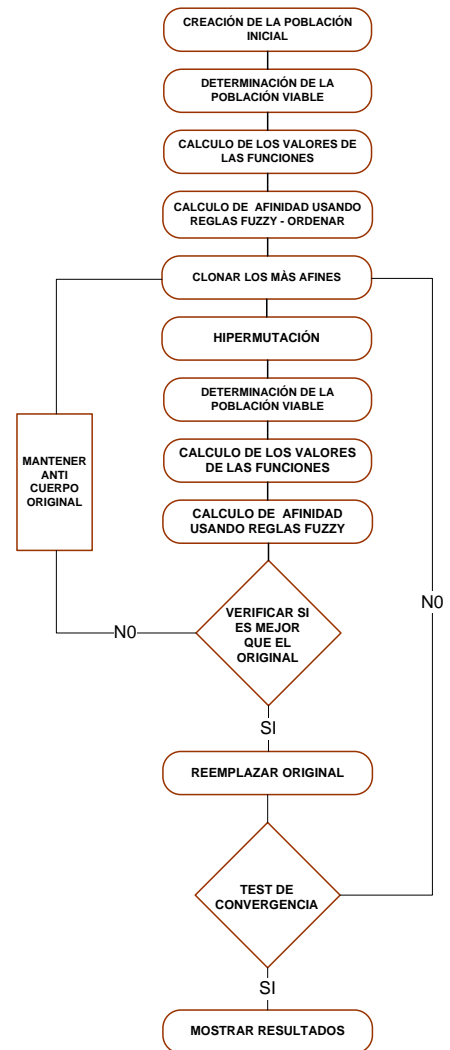


Figura 1 - Metodología. Diagrama de Bloque

Las cuatro primeras funciones se calculan mediante un programa de flujo de carga, basado en el método de barradura directa/inversa. El tiempo de operación se calcula, comparando el anticuerpo con la condición prefalla, asociando el cambio de posición de cada tipo de llave a un tiempo de maniobra asignado. El problema multiobjetivo a considerar es la dada por la Ecuación 2.

$$\min \left\{ \begin{array}{l} L(\bar{x}) \\ 1 \\ \frac{1}{S(\bar{x})} \\ T(\bar{x}) \\ S_c(\bar{x}) \\ |V(\bar{x}) - V_{nom}| \end{array} \right\} \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\begin{array}{l} V_{min} < V < V_{max} \\ t_0 < t_{max} \\ S_{ci}(\bar{x}) \leq S_{cimax}(\bar{x}) \end{array}$$

4.1.5 Cálculo de Afinidad Utilizando Reglas Fuzzy y Ordenar.

Cuando hay varios objetivos a satisfacer al mismo tiempo, el compromiso es conseguir la mejor solución. Estos objetivos descriptos anteriormente que tienen diferentes dimensiones son primeramente fusificados, y posteriormente tratados mediante su integración en la función objetivo a través de factores de ponderación, pero se presenta una necesidad del uso de un marco en el que se puedan comparar más fácilmente. La función de membrecía indica el grado de pertenencia de los miembros de cada variable. Estos pueden tener un valor de pertenencia entre cero y uno en el dominio difuso, y el valor de pertenencia de cada elemento puede ser diferente.[8]

Mediante el uso de la teoría de conjuntos difusos, la pertenencia de la función (μ) se asigna para cada variable, ya que el número de grados de pertenencia de las variables tienen valores entre cero y uno, estos índices pueden ser comparados en este ámbito.[8]

El valor de pertenencia más alto implica una mayor satisfacción con la solución. La función de pertenencia consiste en un valor límite inferior y superior, junto con una función estrictamente monótona creciente o decreciente y continua para diferentes objetivos y se describen a continuación los utilizados en este trabajo.[8]

4.1.5.1 Función de pertenencia para la carga transferida (μS).

El gráfico y sus ecuaciones se muestran en la Figura 2. Donde ($\mu \tilde{S}$) indica que si \tilde{S} es alta, la carga transferida es alta y si \tilde{S} es baja, la carga transferida es baja, para esta función de pertenencia se considera que la mínima carga que se puede transferir es de 50% de la potencia total.

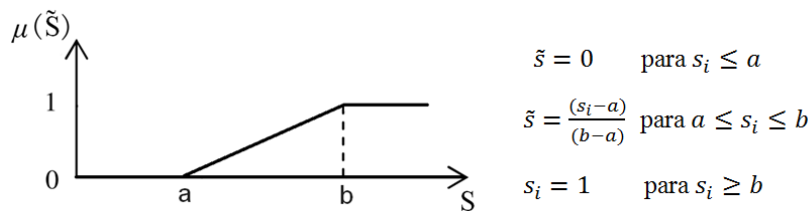


Figura 2 - Carga Transferida. Función de Pertenencia

4.1.5.2 Función de pertenencia para la tensión mínima (μV_{min}).

El gráfico y sus ecuaciones se muestran en la Figura 3. Donde ($\mu \tilde{V}_{min}$) indica como varía el valor de la tensión por encima o por debajo del valor nominal, siendo considerado una desviación de $\pm 10\%$ de la nominal.

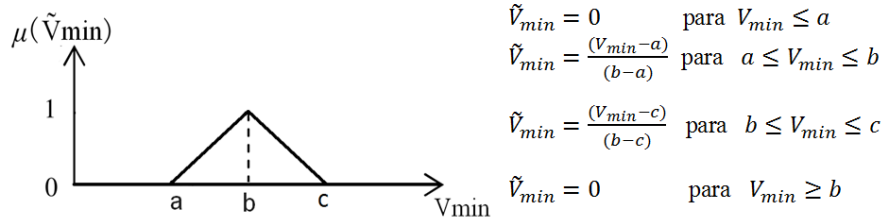


Figura 3 - Tensión Mínima. Función de Pertinencia

4.1.5.3 *Función de pertenencia de sobrecarga ($\mu_{Sc}S_c$).*

El gráfico y sus ecuaciones se muestran en la Figura 4. En esta función de pertenencia se realiza las siguientes consideraciones:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_c &= 0 \text{ para } s_c = 1 \\ \tilde{s}_c &= 1 \text{ para } s_c = 0 \end{aligned}$$

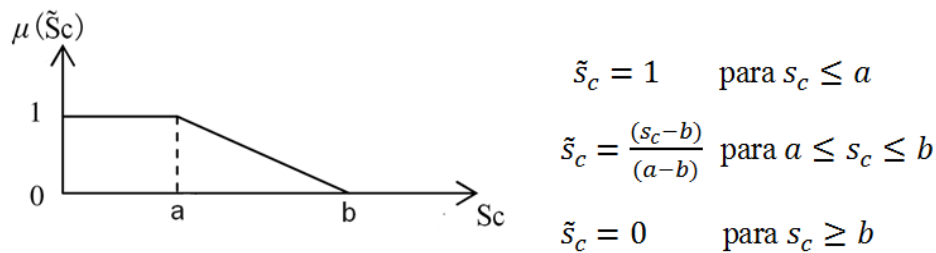


Figura 4. - Sobrecarga. Función de Pertinencia

4.1.5.4 *Función de pertenencia de pérdidas por efecto Joule (μ_L).*

El gráfico y sus ecuaciones se muestran en la Figura 5. Donde podemos deducir que cuanto mayor es la pérdida por efecto joule, menor es su contribución a la función objetivo.

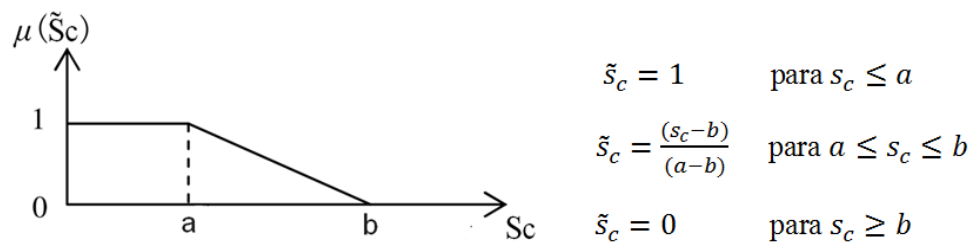


Figura 5 - Pérdidas por Efecto Joule. Función de Pertinencia

4.1.5.5 *Función de pertenencia del tiempo de transferencia (T).*

El gráfico y sus ecuaciones se muestran en la Figura 6. Donde se observa que el grado de pertenencia es pertenencia total en valores pequeños de tiempo de transferencia y decae conforme el tiempo de transferencia aumenta. El tiempo de transferencia está directamente relacionado a la cantidad de maniobras. En este estudio, se considera que el menor número de maniobras posibles para despejar una falla es 2 (dos).

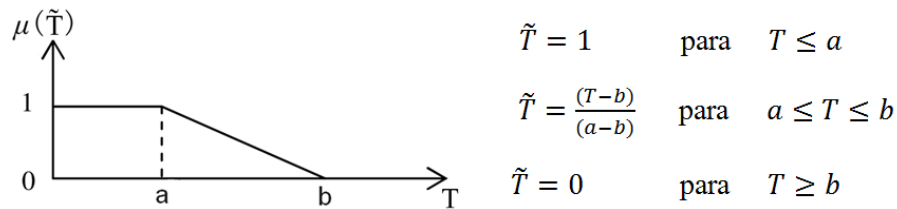


Figura 6. Tiempo de Transferencia. Función de Transferencia.

Dado que el problema de optimización incluye a los cinco objetivos descriptos, la función objetivo se calcula según la ecuación 3.

$$Z = w_1 \hat{S} + w_2 \hat{V}_{min} + w_3 \hat{S}_c + w_4 \hat{L} + w_5 \hat{T} \quad Z = w_1 \hat{S} + w_2 \hat{V}_{min} + w_3 \hat{S}_c + w_4 \hat{L} + w_5 \hat{T} \quad (3)$$

$w_1; w_2; w_3; w_4; w_5$ $W_1; W_2; W_3; W_4; W_5$ Son los pesos de cada función objetivo, que determinan la prioridad atribuida a las mismas y permite la comparación de variables que no son de la misma gama y dimensión.

4.1.6 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.

4.1.7 Hipermutación

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.

4.2 Resultados

La herramienta ha sido validada analizando primeramente el sistema Teste que posee 14 barras de carga y 16 llaves, cuyo diagrama se observa en la Figura 7.

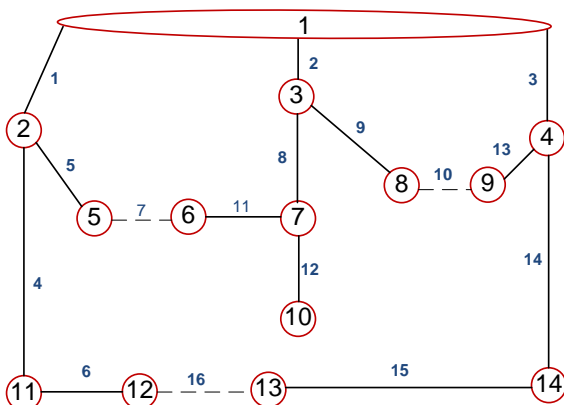


Figura 7 – Sist. Teste de 14 barras Config. Inicial.

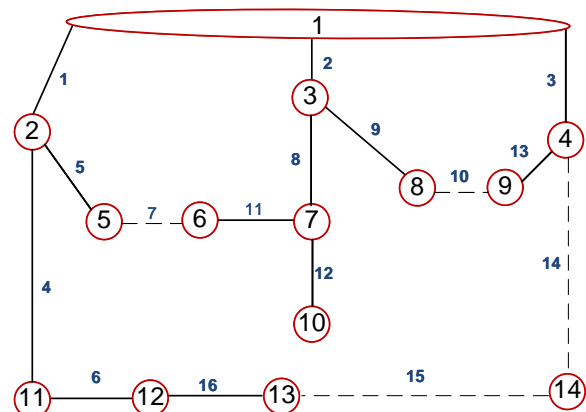


Figura 8 – Sist. Teste de 14 barras. Config. Solución

XI SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay
24, 25 y 26 de Setiembre de 2014

Simulando una falla entre las llaves 14 y 15 la solución obtenida utilizando la herramienta diseñada es la indicada en la Figura 8. Comparando las configuraciones de las Figuras 7 y 8, se puede observar que cambiaron de estado las llaves 14, 15 y 16. Los valores obtenidos de las funciones objetivos que fueron analizadas son los siguientes:

- Corrientes iniciales: 219,94 A
381,203 A
116,440 A
- Carga Transferida: 96,7 % (solo la carga del tramo de avería queda fuera)
- Tensión: 22,43 kV
- Pérdidas 14,7 kW
- Sobrecarga: no se registra
- Tiempo de operación: 3 operaciones, 45 minutos
- Corrientes finales: 264,652 A
382,191 A
44,642 A

Para demostrar la aplicabilidad de la metodología para circuitos de mayor porte se analiza el sistema que alimenta al microcentro de la Ciudad de Encarnación, que consiste en tres alimentadores que poseen un total de 206 barras de carga y 91 llaves, según se observa en la Figura 9.

Simulando una falla entre las llaves 66 y 67 la solución obtenida utilizando la herramienta diseñada es la indicada en la Figura 10. Los valores obtenidos de las funciones objetivos que fueron analizadas son los siguientes:

- Corrientes iniciales: 84,086 A
138,074 A
135,021 A
- Carga Transferida: 100 % (el tramo de avería no tiene carga)
- Tensión: 23,16 kV
- Pérdidas 15,52 kW
- Sobrecarga: no se registra
- Tiempo de operación: 3 operaciones, 45 minutos
- Corrientes finales: 213,171 A
138,074 A
7,355 A

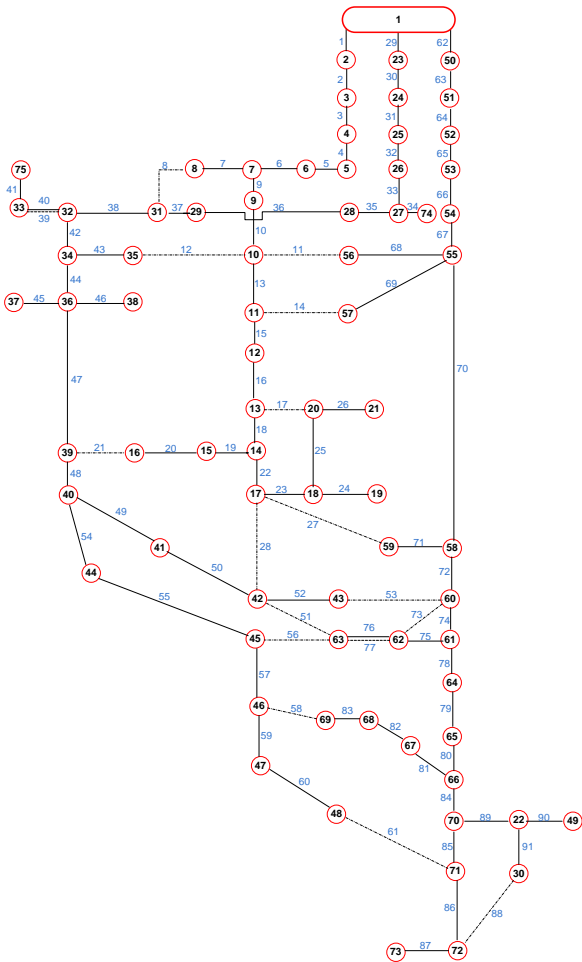


Figura 9. - Sist. Microcentro ENC. Config. Inicial

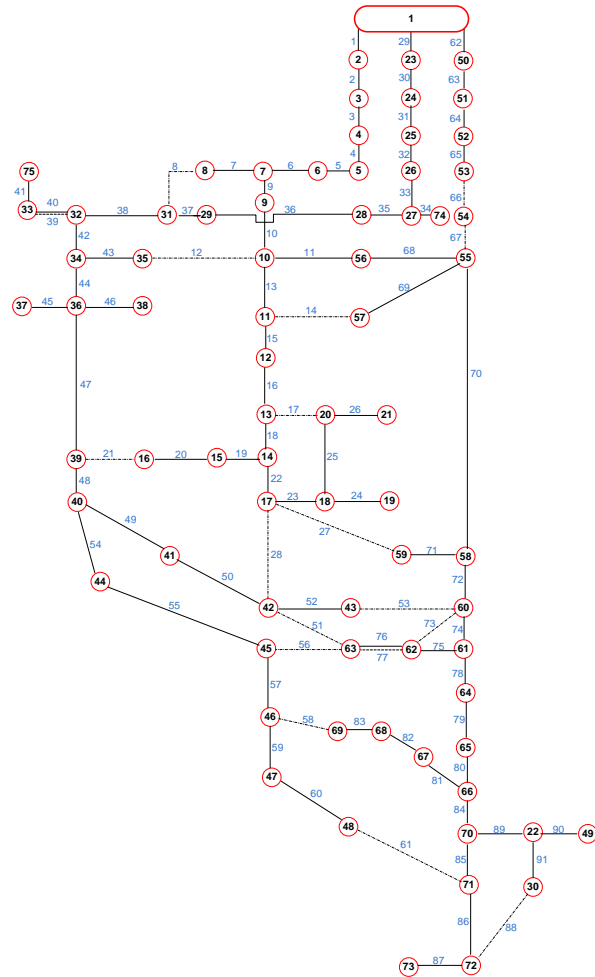


Figura 10. - Sist. Microcentro ENC. Config. Solución

5 CONCLUSIONES

La metodología planteada en este trabajo, para la recomposición de servicios tras una interrupción ofrece buenos resultados tal como se pudo demostrar para ambos sistemas para los cuales ha sido validada. La misma otorga la configuración ideal que optimice simultáneamente todas las funciones objetivos, es decir aquella que permita que dentro de las restricciones impuestas otorgue el mejor resultado para todas las variables consideradas. Puede ser aplicada a cualquier sistema real que reúna características similares al caso analizado.

La creación de un conjunto viable de anticuerpos a través de la metodología basada en el algoritmo de Prim, mejora el rendimiento de la heurística eliminando ya los anticuerpos no viables tales como los que generan redes anilladas. Así mismo los Sistemas Inmunológicos Artificiales en un entorno multi-objetivo resultaron interesantes. Varias pruebas se realizaron variando el punto de partida y la heurística converge a los mismos resultados. Esto demuestra la robustez de la metodología. Muchas otras funciones objetivo pueden ser incluidos.

La introducción de la lógica difusa permite el análisis incluyendo valores no precisos de las funciones objetivos, es decir permitir un cierto rango de valores guiados por las funciones de pertenencia asignados a cada variable en función a su naturaleza. Así mismo el grado de importancia o prioridad establecida a cada función es realizada teniendo en cuenta las recomendaciones de los expertos.

El tiempo de convergencia puede ser mejorada en trabajos posteriores incluyendo lenguajes de programación más avanzados.

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.