



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Optimización de la Reconfiguración de Sistemas de Distribución Mediante Algoritmos Genéticos

Ing. Ricardo Rivas Giménez

Administración Nacional de Electricidad (ANDE)

Paraguay

RESUMEN

Este trabajo estudia el problema de la recomposición de un Sistema Eléctrico de Distribución, con topología radial y esencialmente equilibrado, el cual, luego de un evento que causa la desconexión programada, o no programada, queda con uno o varios trechos de alimentadores sin energía.

La metodología de restablecimiento implementada para la resolución del problema está basada en un algoritmo de reconfiguración automática, que establece un nuevo arreglo de los seccionadores cerrados y abiertos que modifica la topología del sistema, y optimiza simultáneamente la carga a ser restablecida con el mínimo número de maniobras posibles, con un tiempo de resolución mínimo de recomposición. Para ello, se utiliza un método de optimización multi-objetivo, usando el Algoritmo Genético.

Los resultados experimentales obtenidos y presentados, son satisfactorios y permiten su aplicación tanto en ambiente de operación de tiempo real, como de estudios de planificación de operación de corto y medio plazo.

Para validar el método propuesto, fueron considerados tres sistemas de distribución de tres alimentadores cada uno, siendo dos académicos de pequeño porte con 89 nodos cada uno (el primero con 29 y el segundo con 42 transformadores) y otro real de medio porte con 506 nodos (270 transformadores) perteneciente al Sistema Metropolitano de Distribución de la ANDE.

PALABRAS CLAVES

Sistema de distribución radial, recomposición, reconfiguración, optimización multi-objetivo, algoritmo genético.



1. INTRODUCCIÓN

La continuidad en el suministro de energía eléctrica a los centros de consumo (residenciales, comerciales e industriales), en un Sistema Eléctrico de Distribución (SED), en ocasiones puede verse interrumpida por eventos programados (servicios de mantenimiento preventivo) y no programados (contingencias debido a fenómenos climáticos o accidentales) [1]-[2]. La consecuencia de estos eventos, en todos los casos, es la interrupción del suministro en uno, o varios tramos de carga.

Así, una vez identificado el, o los tramos, de carga con suministro interrumpido, los seccionadores del SED, deben mudar sus estados de operación (seccionadores abiertos y cerrados) para obtener una nueva, y óptima, configuración topológica, aislando sólo el, o los tramos, afectados y preservando, en lo posible, la mayor cantidad de carga no afectada [3]. En el presente trabajo, la reconfiguración del SED, consiste en encontrar una nueva configuración, a través del Algoritmo Genético (AG) [4], que es adoptado debido a la comprobada eficacia para la optimización global de funciones matemáticas que representan sistemas dinámicos reales y complejos, como un SED de topología radial.

De esa manera, el AG, adecuado para la reconfiguración del SED, tiene como objetivo principal la optimización simultánea de la carga a ser restablecida con el menor número de maniobras de cierre o apertura de los seccionadores. Por consiguiente, el AG es adaptado para la optimización simultánea de dos objetivos: a) maximización de la carga a ser restablecida, y b) minimización del número de seccionadores a ser maniobradas. Para validar la eficiencia del método de restablecimiento implementado, para obtener un nuevo y óptimo arreglo de seccionadores cerrados y abiertos, fueron considerados tres sistemas eléctricos de distribución, cada uno con tres alimentadores con recursos de acople entre los mismos. Dos de los SED's son de tipo académico y el tercer SED, proviene de datos reales, pertenecientes a la Administración Nacional de Electricidad (ANDE) de Paraguay.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El objetivo principal que persigue la reconfiguración, para el restablecimiento del suministro de energía eléctrica, es la maximización de la carga a ser restablecida y la minimización simultánea del número de maniobras de los seccionadores disponibles (manuales o tele comandados). La reducción del número de maniobras está asociada principalmente con la reducción de los tiempos de recomposición y en segundo plano, con la minimización del número de operación de seccionadores, evitando reducir la expectativa de vida útil de esos elementos de corte [5].

2.1 Recomposición de redes de distribución

En la recomposición se pretende el restablecimiento de la energía eléctrica para la mayor cantidad de consumidores, en el menor tiempo posible, atendiendo todas las restricciones de carga y operación, a través de un método de reconfiguración.

Para el restablecimiento de aquellas áreas, cuyo suministro fue interrumpido, se requiere de una óptima transferencia de alimentación desde regiones que están energizadas, desde uno o más alimentadores, con los que el alimentador con el trecho afectado por el evento comparte seccionadores de acople. Esta transferencia, dada a través de maniobras de cierre de seccionadores de acople (normalmente abiertos), podrá energizar todos, o parte de aquellos trechos de carga cuyo suministro fue interrumpido, considerando las restricciones de operación y de topología [6].

El procedimiento de recomposición, considerado en el presente trabajo, consiste en dos pasos descriptos a continuación [7]:

- Paso 1 – Auto-restablecimiento. La recomposición, o restablecimiento, se realiza dentro del propio alimentador, utilizando sus propios recursos de maniobra;
- Paso 2 – Restablecimiento mediante apoyos. La recomposición ocurre a través de uno o más alimentadores de apoyo, con los que existen seccionadores de acople (recursos).

2.2 Reconfiguración de redes eléctricas

El problema de reconfiguración trata de la modificación de la topología de la red eléctrica, a través de la apertura o cierre de seccionadores disponibles, buscando optimizar la operación final del sistema,

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

satisfaciendo restricciones operativas de calidad, confiabilidad y seguridad. Los SED's, en general, operan con una configuración radial. La ventaja principal de esta topología radica en la facilidad de la coordinación de la protección y a menores corrientes de cortocircuito. Además, los SED's de topología radial, poseen facilidades de maniobras que permiten la transferencia de parte o toda la carga de un alimentador para otro.

2.3 Formulación matemática

La formulación matemática adoptada para representar al problema de reconfiguración, para el restablecimiento óptimo del suministro, se describe a continuación:

$$\text{Max}_{\text{Conf}_i \in C_r} \sum_{i \in B_c} P_i \quad (1), \text{ sujeto a:}$$

$$\left| V_i^{\min} \right| \leq |V_i| \leq \left| V_i^{\max} \right| \quad \forall i \in B_r \quad (2)$$

$$\left| \sum I_i \right| < \left| I_{\max}^{disp} \right| \quad \forall i \in B_r \quad (3)$$

$$x_{jk} \in [0,1] \quad \forall jk \in \lambda i \quad (4)$$

$$P_i = P_{oi} \cdot \left| \bar{V}_i \right|^a \quad (5)$$

$$Q_i = Q_{oi} \cdot \left| \bar{V}_i \right|^b \quad (6)$$

Donde:

P_i : potencia de carga total en el nodo;

B_c : conjunto de nodos de carga;

V_i : vector de tensiones en los nodos;

I_i : vector de inyecciones de corriente en los nodos;

I_{\max}^{disp} : máxima corriente admisible en el alimentador;

Conf_i : configuración radial i de la red luego del evento;

C_r : conjunto de todas las configuraciones radiales luego del evento.

x_{kj} : variable binaria que determina si el circuito entre los nodos j y k está abierto o cerrado;

λi : conjunto de alimentadores

3. ALGORITMO GENÉTICO MULTI-OBJETIVO

3.1 Algoritmo Genéticos

El AG es un modelo computacional inspirado en los principios fundamentales de la evolución de las especies de Darwin y en la Genética [4]; y, se comprobó a través de múltiples aplicaciones, que el AG es capaz de establecer soluciones óptimas globales, no óptimos locales, para problemas complejos de la Ciencia y la Industria. El AG es un método de optimización que trabaja sobre una población de soluciones factibles, aplicando los denominados operadores genéticos para la obtención de nuevas soluciones. Cada solución (vector de variables independientes, denominado individuo), define el valor numérico de una función objetivo (denominado Fitness) que se quiere optimizar. De esta manera, los operadores genéticos se aplican en cada iteración (generación), hasta que se alcance algún criterio de parada (normalmente referido al máximo número de generaciones). Los siguientes operadores fueron aplicados [4]:

- Selección. Escoge las soluciones (individuos) cuyos Fitness sean los probabilísticamente más altos, haciendo analogía con la selección de las especies, de la Teoría de la Evolución. Antes de iniciar el proceso de selección se define la cantidad de población inicial requerida. Este valor fue fijado en 20 ($N = 20$). Luego, fue definido como criterio de parada el máximo número de generaciones (fijado en 50 para el SED real de la ANDE). El tipo de operador de Selección utilizado fue el método de la Ruleta.
- Cruzamiento. Genera pares de individuos nuevos a partir de pares de individuos anteriores (progenitores), que provienen del conjunto de individuos escogidos en el operador de Selección. En el presente trabajo, se utilizó el método de un punto de corte, y la probabilidad de cruzamiento fue de 0,7 ($pc = 0,7$).
- Mutación. Aplica una perturbación en un componente del individuo, representado por una cadena de caracteres binarios, o en varios componentes de varios individuos, de acuerdo con una probabilidad

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

pequeña, cuyo valor varía en función del tamaño de la población inicial, la cantidad de genes a mutar (caracteres binarios del individuo) y la longitud del vector de caracteres que representa al individuo, haciendo analogía con la Naturaleza.

La expresión matemática para el cálculo de la probabilidad de mutación (p_m) es [4]:

$$P_m = \frac{G}{(P_i * L_v)} \quad (7), \text{ donde}$$

p_m : probabilidad de mutación;

G : número o cantidad de genes para mutación;

P_i : población inicial;

L_v : longitud del vector.

- Elitismo. Es utilizado para preservar las mejores soluciones para las próximas generaciones. Con este operador se mantiene la mejor solución encontrada.

El AG es básicamente un método de optimización mono-objetivo, en el cual, se pretende optimizar una única función objetivo (Fitness), y la solución que optimiza dicho objetivo puede tener varias variables de decisión (multimodalidad). Ante la necesidad de optimizar simultáneamente “n” funciones objetivos, el AG debe adecuar su metodología para resolver un problema de optimización multi-objetivo, que matemáticamente se representa de la siguiente manera:

$$\text{Max / Min } f_n(x) \quad (8)$$

Donde $f_n(x)$ es el vector de funciones objetivo (Fitness).

3.2 Adecuación del AG para optimización multi-objetivos

Actualmente, existen múltiples técnicas para adecuar el AG para problemas multi-objetivos [8], [9], [10] y [11]. En el presente trabajo fue implementado el método de suma ponderada de objetivos, el cual consiste en calcular un Fitness basado en la combinación lineal de las funciones matemáticas que representan los objetivos, que se desean optimizar. La expresión matemática del método de suma ponderada, queda resumida en la ecuación (9):

$$F(x) = a_1 \cdot f_1(x) + \dots + a_n \cdot f_n(x) \quad (9)$$

Donde $F(x)$ representa al Fitness que el AG debe optimizar y, a_1, a_2, \dots, a_n , corresponden a los coeficientes de la suma ponderada de las “n” funciones objetivos.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

El método propuesto de reconfiguración para maximizar el restablecimiento de la energía está basado en la adecuación del AG para optimización multi-objetivo, descrito a través de la ecuación (9). Además, fueron desarrollados cinco algoritmos complementarios para el cálculo de las funciones objetivos y para satisfacer la condición de radialidad del SED bajo estudio, y son los siguientes:

- Aislación de fallas;
- Algoritmo genético;
- Radialidad;
- Transferencia de carga;
- Flujo de potencia.

4.1 Aislación de Fallas

Este algoritmo realiza un análisis de la topología del SED, y determina una lista de seccionadores disponibles para ser abiertos, del lado fuente y del lado de la carga, para aislar el tramo afectado por la perturbación. Este procedimiento minimiza el área afectada en función de la disponibilidad y la conveniencia de las maniobras. Además, el referido algoritmo, indica a través de una lista, cuales seccionadores están disponibles para las maniobras de restablecimiento. La lista de seccionadores configura un vector de alternativas de solución. Cada vector solución está conformado por valores binarios 1 y 0, donde el número 1 indica que el seccionador está cerrado y el número 0 asocia un seccionador abierto. Los referidos estados de los interruptores establecen la topología; y, por consiguiente, la configuración de toda la red de

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

distribución. La Fig. 1, muestra un ejemplo de un SED con tres alimentadores, representados cada uno, por su vector solución.

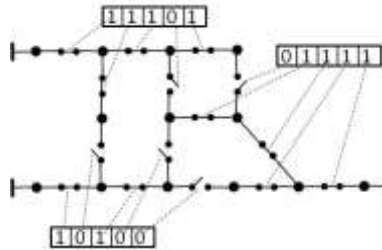


Figura 1: Conformación de Vectores de Solución

4.2 Algoritmo Genético

Este algoritmo recibe el listado de seccionadores, determinado anteriormente en función al evento localizado en un trecho específico, y aplica “Tabla Verdad” que genera una tabla conteniendo todas las posibles combinaciones, de estados de seccionadores y topologías, para el vector solución. A partir de la referida tabla, se genera la población inicial para el AG, logrando una sustancial reducción en el tiempo de búsqueda, de buenas soluciones iniciales. Una vez obtenida la población inicial se sigue el siguiente procedimiento.

- Cada vector solución es verificado, para comprobar si la topología es radial;
- Una vez verificada la radialidad de la topología, se realiza la transferencia de carga permitida para dicha configuración;
- Luego se aplica el algoritmo de Flujo de Potencia, de cuyos resultados se calculan las funciones objetivos y el correspondiente valor numérico del Fitness;
- Finalmente el AG aplica los operadores de evolución (Selección o reproducción), los operadores genéticos (Cruzamiento y Mutación) [4], para la obtención de nuevos individuos y el operador de Elitismo [4] con la finalidad de preservar para las siguientes generaciones el individuo con Fitness más alto.

Este procedimiento, se aplica sobre cada individuo resultante en cada generación hasta que el criterio de parada (máximo número de generaciones) del AG sea satisfecho.

4.3 Radialidad

En este algoritmo se realiza un análisis de la topología del SED, utilizando la Teoría de Grafos [10], [12], y la técnica de ordenamiento de redes descrito en [13]. Solo aquellas topologías confirmadas como radiales continúan el proceso. Si un vector de solución representa una topología no radial, se ejecuta automáticamente un algoritmo de corrección de radialidad que analiza la topología que resulta de aplicar el vector solución y despeja la causa que ocasiona la no radialidad. La corrección de radialidad asegura la capacidad del programa computacional de analizar sistemas eléctricos de gran porte, donde los espacios de búsqueda crecen exponencialmente. Luego de que se asegura que el vector solución es radial, dicho vector es enviado a la función de Transferencia de Carga.

4.4 Transferencia de carga

Con la transferencia de carga se modifica la base de datos en función de las maniobras, de cierre y apertura de los seccionadores, y se reasignan los correspondientes tramos y cargas a los recursos, adoptados en cada vector de solución. El procedimiento de transferencia de carga se realiza solamente sobre aquellos vectores solución que representan topologías radiales; y, se transfieren las cargas al alimentador o los alimentadores, de apoyo, mientras dure el evento programado o no programado que originó la afectación del tramo, y la desconexión de las cargas asociadas. Como resultado de esta transferencia, se reorganiza la base de datos del SED y luego se transfiere a la función de Flujo de Potencia.

4.5 Flujo de potencia

Las redes trifásicas fueron consideradas simétricas y equilibradas, y su resolución se realiza a través del diagrama de secuencia positiva, representación monofásica de la red. Esta alternativa fue considerada porque el desequilibrio de carga entre fases de los alimentadores del SED, de la ANDE (Administración

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Nacional de Electricidad del Paraguay), considerados es menor al 1,5%, y por consiguiente, la representación monofásica es válida. Fue implementado un algoritmo de Flujo de Potencia adecuado para sistemas radiales, adoptando un modelo monofásico de barradura inversa/directa, de sumas de corrientes [14], y utilizando el modelo de línea corta para redes primarias, y empleando la representación de potencia constante para las cargas [13],[16].

4.6 Funciones objetivos

Como el propósito de la reconfiguración, para el restablecimiento, consiste en lograr la máxima transferencia de carga, con el menor número posible de maniobras, el procedimiento para el cálculo de las funciones objetivo es:

- Potencia transferida. A partir de los resultados del flujo de potencia, se sigue el siguiente procedimiento de cálculo:

- 1) Se calcula la potencia demandada por el SED.

$$P_{be} = \sum_{i \in B_T} P_i \quad (10)$$

$$Q_{be} = \sum_{i \in B_T} Q_i \quad (11)$$

Donde:

P_{be} : Potencia activa instalada antes del evento.

Q_{be} : Potencia reactiva instalada antes del evento.

P_i : Potencia activa total en el nodo.

Q_i : Potencia reactiva total en el nodo.

B_T : Conjunto de nodos de carga

- 2) Se calcula la potencia interrumpida en el SED.

$$P_{int} = \sum_{i \in B_T} P_i^f \quad (12)$$

$$Q_{int} = \sum_{i \in B_T} Q_i^f \quad (13)$$

Donde:

P_{int} : Potencia activa total interrumpida.

Q_{int} : Potencia reactiva total interrumpida.

P_i^f : Potencia activa interrumpida en el nodo.

Q_i^f : Potencia reactiva interrumpida en el nodo.

B_T : Conjunto de nodos de carga.

- 3) Se calcula la potencia instalada en el SED, luego de la transferencia de carga.

$$P_{at} = \sum_{i \in B_T} P_i^a \quad (14)$$

$$Q_{at} = \sum_{i \in B_T} Q_i^a \quad (15)$$

Donde:

P_{at} : Potencia activa instalada luego de la transferencia.

Q_{at} : Potencia reactiva instalada luego de la transferencia.

P_i^a : Potencia activa instalada en el nodo luego de la transferencia.

Q_i^a : Potencia reactiva instalada en el nodo luego de la transferencia.

B_T : Conjunto de nodos de carga

- 4) Se calcula la potencia no restablecida en el SED luego del evento.

$$P_{nr} = P_{be} - P_{at} \quad (16)$$

$$Q_{nr} = Q_{be} - Q_{at} \quad (17)$$

Donde:

P_{nr} : Potencia activa no restablecida luego de la transferencia.

Q_{nr} : Potencia reactiva no restablecida luego de la transferencia.

- 5) Se calcula la potencia restablecida en el SED con la transferencia de carga.

$$P_r = P_{int} - P_{nr} \quad (18)$$

$$Q_r = Q_{int} - Q_{nr} \quad (19)$$

$$S_r = \sqrt{(P_r^2 + Q_r^2)} \quad (20)$$

Donde:

S_r : Potencia aparente restablecida con la transferencia.

La función objetivo f_1 es igual a la potencia restablecida S_r .

$$f_1(x) = S_r \quad (21)$$

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

- Numero de Maniobras. Mediante un contador se enumera la cantidad de interruptores cuyos estados mudan (de abierto para cerrado, y viceversa).

$$f_2 = \sum Nop \quad (22)$$

Luego de la obtención de las funciones objetivos, asociado a cada vector solución (topología), se procede al análisis del Fitness, teniendo en cuenta la expresión matemática (9).

$$F(x) = a_1 \cdot F_1(x) + a_2 \cdot F_2(x) \quad (23)$$

La ecuación (23) corresponde a la suma ponderada de las funciones $F_1(x)$ y $F_2(x)$, donde x representa el vector solución, tal como se ilustra en la Fig. 1. Con la finalidad de normalizar el Fitness, se considera que el valor límite para $F_1(x)$ es F_{1max} y el valor límite para $F_2(x)$ es F_{2min} . F_{1max} adopta el valor de 100 que corresponde a la potencia base (MVA) del SED y F_{2min} adopta el valor 1 que es el mínimo número de maniobras esperado. Para balancear los resultados de $F_1(x)$ con los de $F_2(x)$, se aplica el factor F_n . De esta forma los valores límites se relacionan de la siguiente forma.

$$F(x) = a_1 \cdot \frac{F_n \times f_1}{F_{1max}} + a_2 \cdot \frac{F_{2min}}{f_2} \quad (24)$$

Donde:

f_1 : Es el valor total de la potencia restablecida; f_2 : Es la cantidad de maniobras realizadas;

F_{1max} : Es el máximo valor de potencia restablecida, en una iteración (generación);

F_{2min} : Es el mínimo número de maniobras, en una determinada generación;

$F(x)$: Es el Fitness, para cada x , que se optimiza

Considerando el valor mínimo de $f_1(x)=100kVA$ y $F_{1max}=100MVA$, al dividirlos bajo la misma unidad de medida daría:

$$\frac{f_1(x)}{F_{1max}} = \frac{100.000}{100.000.000} [VA] = 0,001 \quad (25)$$

Multiplicando cada expresión por 1.000 para normalizar el numerador con el denominador, en el peor caso (mínimo valor de $f_1(x)$), queda el siguiente valor:

$$10.000 \times \frac{f_1(x)}{F_{1max}} = 10.000 \times \frac{100.000}{100.000.000} [VA] = 1 \quad (26)$$

De esta manera, el máximo valor para el primer sumando es igual a la unidad, y el máximo valor del segundo sumando es también igual a 1; por lo tanto, el máximo valor de la función $F(x)=2$, cuando la función $f_1(x)$ es mínimo. Por otro lado, cuando la función $f_1(x)$ es máximo, es decir asume valores elevados, siendo el máximo valor posible de $f_1(x)=100MVA$, el primer sumando de la función $F(x)$, sería 1000 y el máximo del segundo sumando continuaría siendo 1, por lo tanto, el máximo valor de la función $F(x)=1001$. Esta solución garantiza en todos los casos posibles el escalonamiento adecuado de los valores del fitness.

Los valores numéricos adoptados para los coeficientes de ponderación, a_1 y a_2 , son iguales a 1 para que ambas funciones objetivos $f_1(x)$ y $f_2(x)$ tengan el mismo grado de importancia en la búsqueda de una única solución que satisfaga simultáneamente ambas condiciones.

4.7 Flujograma

En la Fig.2 se presenta el flujograma del algoritmo implementado, resumiendo las partes principales que fueron consideradas para la solución del presente trabajo, y que facilitó la estructuración y la secuencia de cálculos.

El algoritmo de reconfiguración propuesto para el restablecimiento óptimo, con la identificación del trecho afectado, determina el alimentador al cual pertenece, calcula la cantidad de trechos desenergizados, y el total de potencia interrumpida por la falla.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

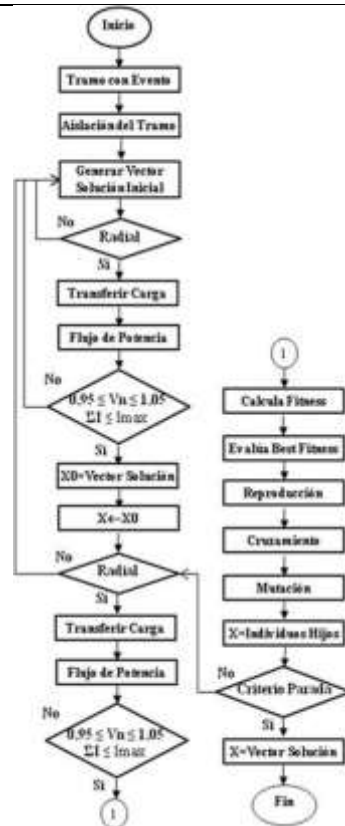


Figura 2: Flujograma del Algoritmo de Reconfiguración

5. SIMULACIONES

5.1 Entorno Computacional

Fue utilizado el lenguaje de programación del MatLab®, para la implementación de todo el algoritmo de reconfiguración, del algoritmo de radialidad, de la función de transferencia de la carga y del flujo de potencia. Para la obtención de los resultados numéricos y de simulación fue empleado un computador personal, con procesador Intel Core i5-3470 CPU de 3.2 GHz de velocidad de procesamiento, y 4 GB de memoria RAM.

5.2 Sistemas de Prueba

Para validar la eficiencia del algoritmo de reconfiguración propuesto, fueron considerados tres sistemas de prueba, dos de pequeño porte y uno de medio porte.

Sistema 1. Es un SED, de pequeño porte, modificado a partir de un esquema unifilar de un alimentador [13] que sirvió de base para validar el algoritmo de flujo de potencia. Se agregó 2 alimentadores adicionales, de similares características, y seccionadores de operación para transferencias de carga, quedando configurado con 23,33MVA de potencia demandada, 29 transformadores de distribución, 89 nodos y 26 seccionadores, 18 de los cuales normalmente cerrados (NC) y 8 normalmente abiertos (NA), según la Fig.3.

Sistema 2. Es un SED de pequeño porte elaborado a partir de un alimentador de la India.

Se agregó 2 alimentadores y seccionadores de operación para transferencias de carga, quedando configurado con 5,26MVA de potencia demandada, 42 transformadores de distribución, 89 nodos y 25 seccionadores (18 NC y 7 NA), conforme se ilustra en la Fig. 4.

Sistema 3. Es un SED de medio porte, perteneciente al sistema eléctrico de distribución del área metropolitana de la ANDE, compuesto por 3 alimentadores de la Estación San Lorenzo (SLO3, SLO5 y SLO12), con 23,63MVA de potencia demandada a través de 270 transformadores de distribución, 506 nodos, 36 seccionadores, (29 NC y 7 NA), según la Fig. 5.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

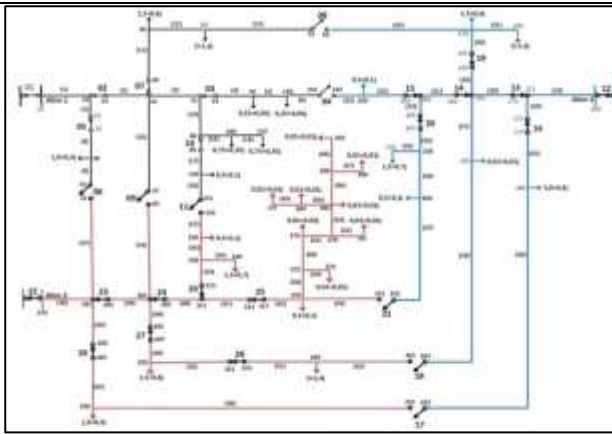


Figura 3: Sistema de Distribución N° 1

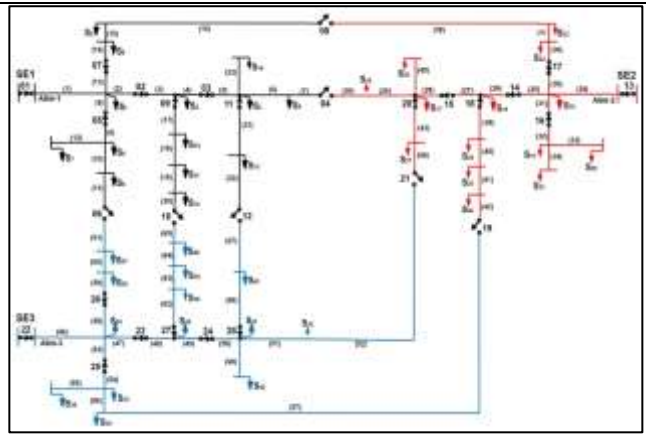


Figura 4: Sistema de Distribución N° 2

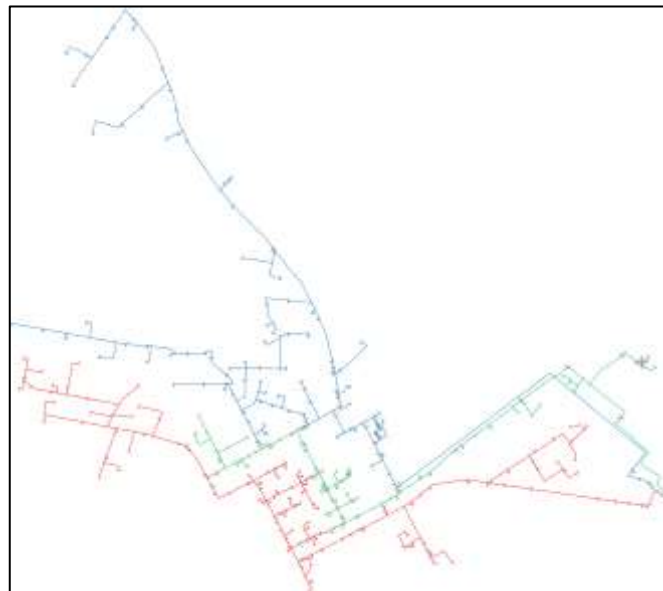


Figura 5: Sistema de Distribución N° 3

5.3 Resultados Obtenidos

Para el **Sistema 1:**

- Condiciones iniciales antes de un evento y simulación de un evento en el tramo 1

Tabla I: Condiciones antes del Evento

	Alimentador		
	1	2	3
Tensión Nominal (kV)	13,8	13,8	13,8
Carga instalada (MVA)	7+j3,3	7,01+j3,31	7,08+j3,38
Potencia entregada (MVA)	7,08+j3,44	7,10+j3,45	7,17+j3,53
Corriente Total (A)	322,98	323,82	0,0783
Factor de Potencia	0,90	0,90	0,90
Pérdidas Totales en la Red (MVA)	0,09+j0,15	0,09+j0,14	0,08+j0,14
Tensión mínima (kV)	13,794	13,794	13,790
Corriente Máxima Admisible (A)	650	650	650

Tabla II: Configuración del AG

Población Inicial	20	Cantidad de Generaciones	30
Probabilidad de Cruzamiento	0,7	Cantidad de Genes	2
Probabilidad de Mutación	0,013		

Tabla III: Condiciones Luego del Evento

	Alimentador		
	1	2	3
Potencia interrumpida (MVA)	7+j3,3		
Aislación			
Lado Fuente: Abrir Seccionador	1		
Lado Carga: Abrir Seccionador	2 - 5		
Seccionadores Operables	7-9-3-10-8-4-11-6		

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Fitness	77,5		
Reconfiguración			
Abrir Seccionador			
Cerrar Seccionador	8 - 6		
Tensión Nominal (kV)	13,8	13,8	13,8
Carga instalada (MVA)	0	13,01+j6,21	8,08+j3,78
Potencia Entregada (MVA)	0	13,33+j6,76	8,18+j3,95
Corriente Total (A)	0	612,81	418,8
Factor de Potencia	-	0,89	0,90
Pérdidas Totales en la Red (MVA)	0	0,32+j0,52	0,10+j0,17
Tensión mínima (kV)	13,8	13,495	13,77
Carga restablecida (MVA)		7+j3,3	
Porcentaje de carga restablecida (%)		100%	
Tiempo Promedio de Resolución (s)		33,55	

El Tiempo Promedio de Resolución se obtiene luego de haber ejecutado 5 veces el programa computacional.

Para el Sistema 2:

- Condiciones iniciales antes de un evento y simulación de un evento en el tramo 24

Tabla IV: Condiciones antes del Evento

	Alimentador		
	1	2	3
Tensión Nominal (kV)	11	11	11
Carga instalada (MVA)	1,23+j1,25	1,23+j1,25	1,23+j1,25
Potencia entregada (MVA)	1,29+j1,31	1,29+j1,31	1,29+j1,31
Corriente Total (A)	96,57	96,57	96,57
Factor de Potencia	0,70	0,70	0,70
Pérdidas Totales en la Red (MVA)	0,06+j0,06	0,06+j0,06	0,06+j0,06
Tensión mínima (kV)	10,390	10,390	10,390
Corriente Máxima Admisible (A)	150	150	150

Tabla V: Configuración del AG

Población Inicial	20	Cantidad de Generaciones	30
Probabilidad de Cruzamiento	0,7	Cantidad de Genes	2
Probabilidad de Mutación	0,014		

Tabla VI: Condiciones Luego del Evento

	Alimentador		
	1	2	3
Potencia interrumpida (MVA)		1,23+j1,25	
Aislación			
Lado Fuente: Abrir Seccionador		13	
Lado Carga: Abrir Seccionador		14 - 17	
Seccionadores Operables	15- 18- 20- 4- 19- 21-8		
Fitness	12,25		
Reconfiguración			
Abrir Seccionador		15	
Cerrar Seccionador		4 - 19 - 8	
Tensión Nominal (kV)	11	11	11
Carga instalada (MVA)	1,73+j1,77	0	1,55+j1,58
Potencia Entregada (MVA)	1,88+j1,90	0	1,66+j1,68
Corriente Total (A)	140,14	0	124,39
Factor de Potencia	0,70	-	0,70
Pérdidas Totales en la Red (MVA)	0,14+j0,13	0	0,11+j0,10
Tensión mínima (kV)	9,92	11	10,02
Carga restablecida (MVA)	0,8323+j0,8491		
Porcentaje de carga restablecida (%)	67,8652		
Tiempo Promedio de Resolución (s)	38,55		

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Para el Sistema 3:

- Condiciones iniciales antes de un evento y simulación de un evento en el tramo 330

Tabla VII: Condiciones antes del Evento

	Alimentador		
	SLO-3	SLO-5	SLO-12
Tensión Nominal (kV)	23	23	23
Carga instalada (MVA)	5,34+j2,26	7,30+j3,09	9,16+j3,79
Potencia entregada (MVA)	5,37+j2,29	7,38+j3,17	9,31+j3,94
Corriente Total (A)	143,58	197,81	248,76
Factor de Potencia	0,92	0,92	0,92
Pérdidas Totales en la Red (MVA)	0,03+j0,03	0,09+j0,08	0,15+j0,15
Tensión mínima (kV)	23,235	23,002	22,867
Corriente Máxima Admisible (A)	360	360	360

Tabla VIII: Configuración del AG

Población Inicial	20	Cantidad de Generaciones	50
Probabilidad de Cruzamiento	0,7	Cantidad de Genes	2
Probabilidad de Mutación	0,013		

- Simulación de un evento en el Tramo 330

Tabla VI: Condiciones Luego del Evento

	Alimentador					
	SLO-3		SLO-5		SLO-12	
Potencia interrumpida (MVA)						9,0694+j3,7501
Aislación						
Lado Fuente: Abrir Seccionador						54074
Lado Carga: Abrir Seccionador						53736
Seccionadores Operables	53737	50593	51112	51111	51110	54053 51627 51793
Fitness						71
Reconfiguración						
Abrir Seccionador						
Cerrar Seccionador						51110
Tensión Nominal (kV)		23		23		23
Carga instalada (MVA)		11,84+j4,93		7,3+j3,09		0,09+j0,04
Potencia Entregada (MVA)		12,06+j5,17		7,38+j3,17		0,09+j0,04
Corriente Total (A)		323,07		197,81		2,51
Factor de Potencia		0,92		-0,92		0,92
Pérdidas Totales en la Red (MVA)		0,23+j0,24		0,09+0,08		0,00+j00
Tensión mínima (kV)		22,738		23,002		23,46
Carga restablecida (MVA)				6,5017+2,6706		
Porcentaje de carga restablecida (%)				71,6192		
Tiempo Promedio de Resolución (s)				194,13		

6. CONCLUSIONES

La reconfiguración propuesta, utilizando el AG, logró demostrar su efectividad en los tres sistemas eléctricos considerados. Las principales ventajas obtenidas son:

- Permite aislar y segmentar el tramo afectado por el evento;
- Permite reconfigurar la red de distribución mediante propuestas óptimas de maniobras de seccionadores, respetando las restricciones de operación;
- Permite maximizar el restablecimiento de potencia interrumpida por el evento;
- Permite minimizar el número de maniobras;
- Resuelve el problema en pocos segundos, siendo apto su utilización para “tiempo real de operación”;
- Recomendable también su utilización para estudios de planificación de la operación del SED.

Por lo tanto, el algoritmo propuesto constituye una herramienta computacional útil para la reconfiguración en tiempo real y para planificación de la expansión de medio plazo, y el restablecimiento del SED, de topología radial, esencialmente equilibrado.



BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Sathish Kumar, T. Jayabarathi, S. Prabhakar Karthikeyan, I. Jacob Raglend, D. P. Kothari, “Power system restoration, reconfiguration and optimization using Field Programmable Gate Array”. Proceedings of the 2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (2011 ICETECT), March 23–24, Nagercoil – India, 2011.
- [2] A. Zidan, M. Khairalla, A. M. Abdrabou, T. Khalifa, K. Shaban, A. Abdrabou, R. E. Shatshat, A. M. Gaouda, “Fault Detection, Isolation, and Service Restoration in Distribution Systems: State-of-the-Art and Future Trends”. IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 8, No. 5, pp. 2170 – 2185, September 2017.
- [3] N. H. Shamsudin, M. S. S. M. Basir, A. R. Abdullah, M. F. Sulaima, E. F. Shair, “Losses Minimization in Network Reconfiguration for Fault Restoration Via a Uniform Crossover of Genetic Algorithm”. Proceedings of the 2015 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET), August 25 – 27, Langkawi, Kedah – Malaysia, 2015.
- [4] David E. Goldberg. “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”. 1st Ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1989.
- [5] J. B. Leite, J. R. Sanches, “Development of a Self-Healing Strategy with Multiagent systems for Distribution Networks”. IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 8, No. 5, pp. 2198 – 2206, September 2017.
- [6] G. Eason, B. Noble, and I.N. Sneddon, “On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions,” Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. A247, pp. 529-551, April 1955. (*references*).
- [7] S-J. Lee, S-I. Lim, B-S Ahn. “Service Restoration of Primary Distribution Systems Base on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria”. IEEE Power Engineer Society Pre-print. PE-701-PWRS – 0, 1997.
- [8] K. Deb. “Multi-objective optimization using evolutionary algorithms”. New York: Wiley, 2001.
- [9] K. Deb; A. Pratap; S. Agarwal; T. Meyarivan. “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: nsga-ii”. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, [S.I.], 2002, v.6, n. 2, p.182-197.
- [10] D. S. Sanches. “Algoritmo evolutivo multi-objetivo para reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica”. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- [11] Danilo Sipoli. “Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivo para Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. EESC/USP. São Carlos, 2013.
- [12] Diogo Rupolo. “Reconfiguración de Redes de Distribución de Energía Eléctrica Através de un Algoritmo de Busca Dispersa”. Tesis de Mestrado. Univesrsidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Campus de Ilhs Solteira, 2013.
- [13] N. Kagan; C. C. B. de Oliveira; E. J. Robba. “Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.
- [14] Diogo Rupolo. “Reconfiguración de Redes de Distribución de Energía Eléctrica Através de un Algoritmo de Busca Dispersa”. Tesis de Mestrado. Univesrsidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Campus de Ilhs Solteira, 2013.
- [15] J. C. Amasifen. “Algoritmo evolutivo dedicado à solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição radiais”. 184f. Disertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.