



Reubicación Óptima de Llaves Telecomandadas en Redes Eléctricas de Distribución Basadas en Análisis de Confiabilidad Utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivos.

< Ing. Jorge Gamarra[†], Ing. Ricardo Alonso[†], Dr. Ing. Enrique Chaparro[‡] >
<[†]Sub Gerencia de Distribución – Gerencia Técnica, [‡]Departamento de Operación>
<[†]ANDE, [‡]Itaipu Binacional>
< [†]Avda. España y Padre Cardozo, [‡]Central Hidroeléctrica – Hernandarias >
<[†]jorge_gamarra@ande.gov.py, [†]ricardo_alonso@ande.gov.py, [‡]cver@itaipu.gov.py>

RESUMEN:

En el presente trabajo se propone un método automático para la reubicación óptima de *Llaves Telecomandadas* en las redes eléctricas de distribución de configuración radial, considerando una determinada topología compuesta por recursos. En el procedimiento de reubicación óptima propuesta se utilizan *Índices de Confiabilidad* y *Costos Operacionales*. El Índice de Confiabilidad considerado, corresponde a la *Duración Equivalente de interrupción por Potencia instalada (DEP)*; y los *Costos Operacionales (Costo_{total})* se refieren al *Costo de la Energía No Suministrada (CENS)* más el costo del traslado, retiro e instalación de las llaves telecomandadas, denominado también costo de reubicación (*Costo_{Reubicación}*), en algún otro punto diferente a su posición original.

Entonces, para la localización óptima de las referidas llaves fue utilizado el *Algoritmo Genético (AG)* de comprobada eficacia en la resolución de problemas tecnológicos complejos y de gran porte.

El *AG* es un algoritmo meta-heurístico que imita computacionalmente el proceso evolutivo de las especies y la genética, aplicado para la optimización global de funciones matemáticas que representan sistemas físicos complejos. Dicho algoritmo de optimización trabaja con una población de posibles soluciones, las cuales van siendo modificadas iterativamente por operadores probabilísticos de transición en dirección a la solución óptima global. La dirección de búsqueda es guiada por la función matemática asociada a cada solución de la población. La referida función matemática se conoce también como la *función de evaluación* global ó *Fitness*. Por esa razón, el problema de reubicación óptima de *Llaves Telecomandadas* fue puesto como un problema de optimización que deberá minimizar simultáneamente el *DEP* y el *Costo_{total}*. Para ello, el *AG* tradicional fue adaptado para optimización multi-objetivo, obteniendo un *AG Multi-Objetivo (AGMO)*, a través de dos técnicas de adaptación: a) basada en la suma ponderada de las funciones objetivos para la obtención del *Fitness*; y b) a través de las *Reglas de Dominancia de Pareto* aplicadas sobre la población de soluciones que el *AG* manipula. La principal diferencia del *AGMO* basado en las *Reglas de Dominancia de Pareto*, con respecto al de la suma ponderada de objetivos, es la obtención de una familia de soluciones óptimas en una única ejecución del algoritmo. Como validación de la metodología propuesta, el procedimiento de reubicación óptima de llaves será aplicado sobre un sistema de distribución compuesto por alimentadores de tres estaciones (Puerto Botánico, Luque y San Lorenzo).

PALABRAS CLAVES

Centro de Distribución, Red eléctrica de Distribución, Confiabilidad, Llaves Telecomandadas, Matriz Lógico Estructural, Algoritmos Genéticos Multiobjetivos, Duración Equivalente de Interrupción por Potencia Instalada, ANDE.



1. INTRODUCCIÓN:

Un Sistema de Distribución de Energía Eléctrica está formado básicamente por la subestación de distribución, en donde se reducen los niveles de tensión de la energía eléctrica proveniente de los Centros de Generación, y las líneas de distribución que conectan las referidas subestaciones con los centros de consumo. Con una organizada, y bien estructurada red eléctrica de distribución, se busca suministrar energía eléctrica a los centros de consumo con alta calidad, confiabilidad y al mínimo costo posible.

Existen diferentes configuraciones para una determinada red eléctrica de distribución, basadas en los requerimientos de eficiencia y confiabilidad para el suministro de energía eléctrica. Sin embargo, el presente estudio estará enfocado en los sistemas de configuración radial. Esta configuración es la utilizada en la ANDE (Administración Nacional De Electricidad del sistema eléctrico paraguayo) en su red de distribución, por la facilidad en la coordinación y la secuencia de actuación de los dispositivos de protección; y además, cuando ocurren fallas en tramos de la red de distribución, los referidos circuitos pueden ser modificados fácilmente a través de la abertura y cierre de componentes de maniobra, de tal forma que ningún punto de consumo quede sin abastecimiento de energía eléctrica.

Cuando un determinado tramo está en falla, los interruptores correspondientes actúan para aislar dicho tramo. Entonces, todos los tramos adyacentes, en adelante, quedan también sin energía. Para evitar que ocurra falta de energía en aquellos tramos adyacentes, que alimentan centros de consumo, es necesario el cierre de los interruptores normalmente abiertos, asociados a los *recursos*, con los cuales se realiza la transferencia de potencia eléctrica desde otros alimentadores, e inclusive desde otras subestaciones. Siguiendo un programa de aberturas y cierre de interruptores, se cuida que la topología resultante también sea radial con la finalidad de mantener coherentes, y coordinados, los ajustes de los diferentes dispositivos de protección ya existentes en el sistema.

Cuanto menor sea el intervalo de tiempo en la interrupción del suministro de energía eléctrica, mayor será la confiabilidad del sistema. Uno de los índices considerados en este trabajo, que mide la confiabilidad de un sistema de distribución radial, está dado por la *Duración Equivalente de interrupción por Potencia instalada (DEP)*, medida normalmente en horas/año [1]. Por lo tanto, cuanto menor sea el *DEP* menor es la interrupción anual de energía y la confiabilidad del sistema es mayor. Además, cuanto mayor sea el tiempo de interrupción mayor será el *Costo financiero por Energía No Suministrada (CENS)*, o facturada, medida normalmente en US\$/kWh.

Normalmente las llaves (interruptores) utilizadas en las redes de distribución son de operación manual [2], debido a su bajo costo, y cuya principal desventaja radica en que deben ser accionadas *in situ*. Por esa razón, para realizar la transferencia de potencia, a través de los *recursos*, y alimentar nuevamente todos los tramos afectados, adyacentes al tramo en falta, primeramente éste debe ser localizado, y luego conectar el *recurso* más próximo con el cierre de su interruptor correspondiente. De esa manera, una vez corregida la falla el *recurso* es abierto y el interruptor del tramo que estuvo con falla es nuevamente cerrado volviendo la red a la operación y configuración normal. Todo este proceso lleva un considerable tiempo cuando la llave es de operación manual, aumentando el tiempo de interrupción, disminuyendo así la confiabilidad.

En cambio, cuando la llave correspondiente es *telecomandada* desde el Centro de Control de Distribución, los referidos tiempos de interrupción se reducen considerablemente, disminuyendo el *DEP* y el *CENS* aumentando así la confiabilidad del sistema. Sin embargo, se requiere de mayores recursos financieros en la adquisición de cada *Llave telecomandada* en comparación con las llaves de operación manual. Por esa razón, la localización óptima de aquellas llaves, para mejorar la confiabilidad total de un determinado sistema de distribución radial, constituye un problema que va adquiriendo un interés cada vez más creciente; lo que motivó el desarrollo de un algoritmo de localización óptima de llaves cuyo procedimiento está basado en índices de confiabilidad y técnicas meta-heurísticas de optimización global.

En ese contexto, el problema de *Reubicación Óptima de Llaves Telecomandadas* fue puesto como un problema de optimización multi-objetivo, en el que se pretende minimizar el *DEP* y el *Costo_total*. Así, el algoritmo para la *Reubicación Automática y Óptima de las Llaves Telecomandadas* está basado en el *Algoritmo Genético (AG)*. El *AG*, es un algoritmo meta-heurístico de optimización utilizado ampliamente en problemas tecnológicos de gran porte debido a su comprobada eficacia en la optimización global [3]. Sin embargo, para optimizar simultáneamente ambos objetivos, el *AG* descrito en [3], fue adaptado para resolver problemas de optimización multi-criterio obteniendo un *AG Multi-Objetivo (AGMO)* [4].

Para validación, el procedimiento de localización óptima propuesto fue aplicado sobre una red de distribución de prueba, formada por tres estaciones con un único alimentador cada una. Los datos y características de cada estación y alimentador correspondiente proviene del sistema de distribución real de la ANDE. También, el desempeño de ambos *AGMO* implementados será evaluado.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA.

En esta sección serán definidas las funciones matemáticas que presentan al *DEP* y al *Costo_total*, los cuales son utilizados en el procedimiento propuesto para *Reubicación Óptima de Llaves Telecomandadas*. Las expresiones matemáticas obtenidas para el *DEP* y el *Costo_total* provienen de las referencias [5].

2.1. Matriz Lógico Estructural de Tiempos

El procedimiento para definir los tiempos de interrupción en el suministro de energía eléctrica de cada tramo en un determinado alimentador, asociado a una subestación específica de la red eléctrica de distribución en estudio, comienza con la implementación de la *Matriz Lógico Estructural (MLE)* de tiempos [5].

2.1.1. Representación Topológica de la Red Eléctrica de Distribución

La red eléctrica de distribución está asociada, en el presente estudio, a un diagrama unifilar; la cual, a su vez, se representa mediante *grafos* donde los nodos corresponden a los centros de consumo y los *lazos*, que unen los nodos, representan los equipos de maniobra, los cuales pueden ser de operación automática (interruptor), manual (seccionador a cuchilla), o *telecomandada*. En la Fig. 1 se describe a una red eléctrica de distribución representada a través de *grafos*.

2.1.2. Matriz de Adyacencia y Matriz de Alcance

El montaje del *grafo* que representa la topología radial de la red de distribución parte de la Tabla 1 que indica las conexiones entre las subestaciones y los centros de consumo (nodos). En la referida tabla, la columna “DE” indica el nodo inicial y la columna “PARA” el nodo extremo formando de esta manera el lazo “DE – PARA” de la red de distribución, de topología radial, en estudio.

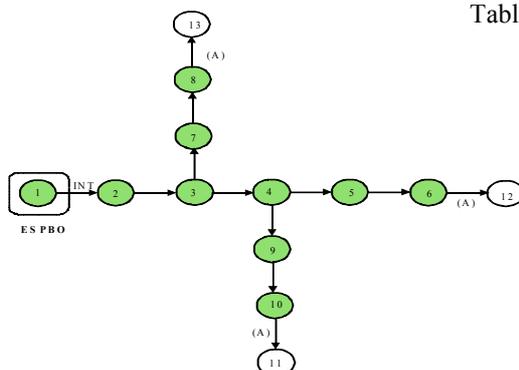


Tabla 1 – Tramos de la red de la Fig. 1.

DE	PARA
1	2
2	3
3	4
4	5
5	6
3	7
7	8
4	9
9	10

Fig. 1 – Grafo que representa la red de distribución.

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

En la Fig. 1, los nodos 11, 12 y 13 constituyen los nodos de enlace con otros alimentadores, o subestaciones. El referido enlace es denominado *recurso*. Los *recursos* poseen interruptores normalmente abiertos, y son cerrados únicamente en casos de transferencia de potencia desde otros alimentadores, o subestaciones, en situaciones de fallas de los tramos del alimentador correspondiente.

A partir de la Tabla 1 es posible el montaje de una *matriz de adyacencia*, A , de tamaño $n \times n$, siendo n el numero de nodos del *grafo*, equivalente al número de centros de consumo en la red de distribución en estudio. La matriz A se construye de la siguiente manera: las filas corresponden al nodo inicial, “DE” en la Tabla 1, y las columnas corresponden al nodo final, “PARA” en la Tabla 1. Si existe conexión entre el nodo “DE” y el nodo “PARA” se coloca en la columna “PARA”, en la fila “DE”, el número 1, conforme se indica en la ecuación (2.1):

$$\begin{matrix}
 \text{PARA} \rightarrow & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\
 \text{DE} \rightarrow & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} \\
 A = & \begin{bmatrix}
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}
 \quad (2.1)
 \end{matrix}$$

$$R = I + \sum_{i=2}^n A^{i-1} \Rightarrow R = \begin{bmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \quad (2.2)$$

La expresión matemática (2.1) describe la matriz A correspondiente al *grafo* de la Fig.1. A partir de la matriz A puede ser montada una matriz denominada *Matriz de Alcance*, R , cuya construcción se obtiene de la ecuación (2.2), en donde I corresponde a la matriz identidad, A es la matriz de adyacencia obtenida en la expresión (2.1), y n es el número de nodos del *grafo* orientado.

2.1.3. Cálculo del MLE

Para el cálculo del *DEP* y del *Costo_total* se determina la matriz *MLE*, en la cual son considerados el tiempo promedio de restablecimiento, o de reparo (TR), y la potencia instalada en el referido centro de consumo. En la referida matriz, cada columna corresponde a los nodos con falla; y, en la fila se encuentran los nodos afectados a partir del nodo con falla. Por lo tanto, la matriz *MLE* deriva de la matriz R , y de tal forma, que sus componentes corresponden a TS , TT o TR estando cada uno de dichos tiempos en función al nodo fallado en el caso de que los nodos restantes estén aguas arriba o aguas abajo, los cuales son descriptos a seguir:

Tiempo de Seccionamiento (TS): tiempo relacionado con la localización y aislación del nodo con falla.

Tiempo de Transferencia (TT): tiempo relacionado con la energización de los demás nodos que se encuentran adelante del nodo con falla, a través del cierre de un *recurso* cercano. El *recurso* es seleccionado de acuerdo a su capacidad de transferencia.

Tiempo de Reparación (TR): corresponde a un promedio de tiempos de reparación establecido en base a datos estadísticos de mantenimiento; es decir, es el tiempo promedio que irremediamente queda indisponible el tramo con falta. También los tramos cuya transferencia es inviable quedan fuera de servicio durante dicho intervalo de tiempo. Comparativamente: $TR > TT > TS$.

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

2.1.4. Cálculo del DEP

Es la duración de la interrupción en el suministro de la potencia eléctrica de consumo, en media tensión, en un periodo de tiempo considerado. El cálculo del DEP se describe en la siguiente ecuación:

$$DEP = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{tramos}}} (c_i \cdot P_i) \times t_i}{P_{\text{total}}} \quad (2.3)$$

Donde:

P_i = suma de la potencia, en kVA , de los transformadores de distribución afectados por la interrupción i de duración t_i ;

P_t = potencia total instalada de los transformadores, en kVA , considerando todo el sistema;

c_i = existencia de carga en el tramo i | n_{tramos} , indica el número total de tramos en un determinado alimentador;

t_i = tiempo total de reparo en el tramo i . Aquí se consideran los siguientes tiempos: TR , TT y TS ;

2.1.5. Cálculo de los Costos Operacionales ($Costo_{\text{total}}$)

El $Costo_{\text{total}}$ está dado por la siguiente expresión:

$$Costo_{\text{total}}(\mathbf{x}) = CENS(\mathbf{x}) + Costo_{\text{Reubicacion}}(\mathbf{x}) \quad (2.4)$$

s.a.

$$N^{\circ} \text{llaves} \leq N^{\circ} \text{max llaves telecomandadas}$$

Dónde:

\mathbf{x} : es un vector binario $[0,1]$ de dimensión $[N \times 1]$ donde N es la cantidad de llaves manuales y telecomandadas, tal que 1 indica que el elemento correspondiente es una llave telecomandada, y 0 indica que es manual. El $Costo_{\text{Reubicacion}}$ corresponde a un costo operacional fijo conocido.

El $CENS$ es calculado de la siguiente manera

$$CENS = \left(\sum_{j=1}^{n_{\text{tramos}}} (P_j \times t_j) \times FP_j \times FU_j \right) \times C_e \times (1 - PT) \quad (2.5)$$

Donde:

FP_j = Factor de Potencia de alimentador primario j afectador por la interrupción i ;

FU_j = Factor de Utilización de alimentador primario j afectador por la interrupción i ;

$C_e = 360$, costo de la energía por cada kWh, en G\$/kWh;

$(1 - PT)$ = constante de pérdidas técnicas en transformadores de distribución instalados.

2.1.6. Formulación de la Reubicación Óptima de Llaves Telecomandadas

En el presente trabajo la reubicación óptima de llaves telecomandadas fue puesta como un problema de optimización multi-objetivo. Los objetivos que deberán ser minimizados simultáneamente son: el *DEP*, considerando todos los alimentadores del sistema de distribución bajo estudio, y el *Costo_total*. Las variables de decisión consideradas durante el proceso de búsqueda de la solución óptima, corresponderá al vector de llaves telecomandadas localizadas en ciertos tramos de un conjunto de alimentadores del sistema de distribución considerado, conforme se indica en la siguiente ecuación:

$$\mathbf{x} = \left[x_1^{a1} \quad \dots \quad x_{na1}^{a1} \quad | \quad \dots \quad | \quad x_1^{ap} \quad \dots \quad x_{ncp}^{ap} \right] \quad (2.6)$$

Donde:

\mathbf{x} = vector de Llaves Telecomandadas, teniendo en cuenta todos los tramos del conjunto de p alimentadores considerados;

x_i^{a1} = componente del vector \mathbf{x} , y se refiere a la i -ésima Llave Telecomandada asociada al alimentador $a1$;

3. AGMO PARA REUBICACIÓN ÓPTIMA DE LLAVES TELECOMANDADAS.

El algoritmo de optimización utilizado para el procedimiento de localización corresponde al *AG* debido a su comprobada eficacia en la optimización global de funciones matemáticas complejas que representan sistemas dinámicos de gran porte [3]. El *AG* imita computacionalmente el proceso evolutivo de las especies y la genética, el cual es adaptado para la optimización de funciones matemáticas que representan sistemas físicos complejos. El *AG* trabaja con una población de posibles soluciones, los cuales van siendo modificados por operadores probabilísticos de transición en dirección a la solución óptima global. La dirección de búsqueda es guiada por una función matemática que representa a una solución específica de aquella población, denominada también *función de evaluación global* ó *Fitness*.

Considerando el problema de Reubicación Óptima de Llaves Telecomandadas, el *AG* descrito en [3], fue adaptado para resolver problemas de optimización multi-criterio obteniendo un *AGMO*. Fueron desarrollados dos mecanismos de adaptación del *AG* [4]: a) obtención del *Fitness* a través de la suma ponderada de las funciones objetivo consideradas para la localización de las llaves; y, b) obtención del *Fitness* a través de la aplicación de las *Reglas de Dominancia de Pareto* sobre el conjunto de soluciones obtenidas [6]. Este último *AGMO* difiere del primero en la generación de una familia de soluciones óptimas, y no una única solución, al final del proceso de optimización.

3.1. AGMO basado en la Suma Ponderada de Objetivos

En el *AGMO* basado en la Suma Ponderada de objetivos (*AGSP*), el *Fitness* de cada solución es evaluado a través de la siguiente expresión matemática:

$$Fitness_i(\mathbf{x}_i) = \frac{a_1}{DEP_i(\mathbf{x}_i)} + \frac{a_2}{CENS_i(\mathbf{x}_i)} \quad (3.1)$$

Los coeficientes a_1 y a_2 , en la ecuación (3.1), corresponden a factores de normalización, tal que $a_1 = DEP_{min}$ y $a_2 = Costo_total_{min}$, se refieren al mínimo valor del *DEP* y del *Costo_total* del conjunto de soluciones de la población. Los factores de normalización tienen como finalidad evitar que determinados objetivos dominen sobre otros llevando al *AGMO* para una convergencia prematura en un óptimo local [3]. De esta forma, el valor máximo del *Fitness* de la ecuación (3.1), es igual a 2.0.

3.2. AGMO basado en las reglas de Dominancia de Pareto

Considerando el problema de reubicación óptima de llaves telecomandadas, el AGMO basado en las reglas de *Dominancia de Pareto* (AGDP) se describe a través de las siguientes reglas [4-6]:

- i) $F_k(\mathbf{x}_i) \leq F_k(\mathbf{x}_j) \mid i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$, donde $i \neq j$ y N corresponde al tamaño de la población de soluciones que el AG estará manipulando, y $k \in \{1, 2, \dots, nf\}$ siendo nf , la dimensión del vector de funciones objetivo;
- ii) $\exists k \mid F_k(\mathbf{x}_i) < F_k(\mathbf{x}_j)$.

En el presente trabajo, $nf = 2$. Las Reglas de *Dominancia de Pareto* se aplican sobre cada solución de la población; tal que, cada solución es comparada con el resto de la población, para determinar el número de soluciones que son mejores que aquella siendo analizada. El número de soluciones que son mejores que una determinada solución establece su *Índice de Dominancia* (ID). Entonces, el ID de una solución define si ella es óptima o no. Así, soluciones cuyo ID es igual a cero son considerados soluciones óptimas [4-6]. En la Fig. 2 se describe el pseudocódigo del AGDP.

```

1.  $t \leftarrow 0$ ;
2. Generar Población Inicial:  $P(t)$ ;
3. Evaluar cada solución de  $P(t)$ ;
4. MIENTRAS  $t < t_{max}$ 
    4.1. Aplica Reglas de Dominancia de Pareto.
        i)  $F_k(\mathbf{x}_i) \leq F_k(\mathbf{x}_j) \mid i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$  y  $k \in \{1, 2, 3\}$ ;
        ii)  $\exists k \mid F_k(\mathbf{x}_i) < F_k(\mathbf{x}_j)$ .
        Estas reglas se aplican sobre cada solución comparándola con el
        resto de la población, con la finalidad de determinar cuantas
        soluciones son mejores que la correspondiente, determinando así su
        índice de dominancia.
    4.2. Actualizar las soluciones en  $FP(t)$ 
    4.3. Calcular el Fitness de cada solución
        clasificada;
    4.4. Aplica operadores probabilísticos del AG:
        Selección, Cruzamiento y Mutación [7], obteniendo nueva población
         $P(t+1)$ ;
    4.5. Evaluar cada nueva solución de  $P(t+1)$ ;
    4.6. hacer  $P(t) \leftarrow P(t+1)$ ;
    4.7.  $t = t + 1$ ;
    FIN MIENTRAS
5. RETORNA  $FP(t)$  // imprime familia de soluciones óptimas
    
```

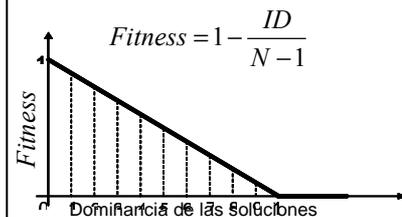


Fig. 2. Pseudocódigo del AGDP

En la Fig. 2, también se muestra como se calcula el *Fitness* de cada solución, el cual está relacionado directamente con el ID; y, todas aquellas soluciones óptimas, definidas a través de las reglas de dominancia de Pareto, son reproducidas, en cada iteración del AGDP, en un grupo denominado *Frente de Pareto*, $FP(t) \mid t$, es un contador de iteraciones. El *Frente de Pareto* es actualizado en cada iteración usando las mismas reglas de dominancia.

3.3. Población Inicial y Operadores Probabilísticas

En el presente trabajo, las N soluciones factibles son generadas de forma aleatoria, siendo el tamaño de la población igual a 70 soluciones ($N = 70$) con 40 generaciones (criterio de parada). En ambos AGMO implementados, fue utilizado el método de la *Ruleta* como operador de Selección, el cual es convenientemente detallado en la referencia [3]. Fue utilizado un operador de Cruzamiento de 2 puntos de corte; y, La probabilidad de cruzamiento fue de $p_c = 0,9$ El operador de Mutación modifica una componente del vector de parámetros binarios por su valor opuesto. La probabilidad de Mutación es igual a $p_m = 0,05$.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

El procedimiento propuesto para la localización óptima de llaves Telecomandadas será aplicado sobre un sistema de distribución utilizado para prueba. Sin embargo, la topología de dicha red eléctrica de distribución provendrán de datos reales del sistema ANDE.

4.1. Descripción del Sistema de Distribución Ejemplo

En esta subsección será descrita la red eléctrica de distribución, de topología radial, utilizada como prueba en el presente trabajo. Está formada por tres subestaciones, conteniendo cada una un único alimentador. Cada alimentador contiene datos reales de los alimentadores correspondientes al sistema ANDE. Dichas subestaciones son: 1) Estación San Lorenzo, alimentador 12 (SLO12), 2) Estación Puerto Botánico, alimentador 3 (PBO3), y 3) Estación Luque, alimentador 6 (LUQ6). En la Fig. 3 se describe gráficamente a la red eléctrica de distribución utilizada como ejemplo:

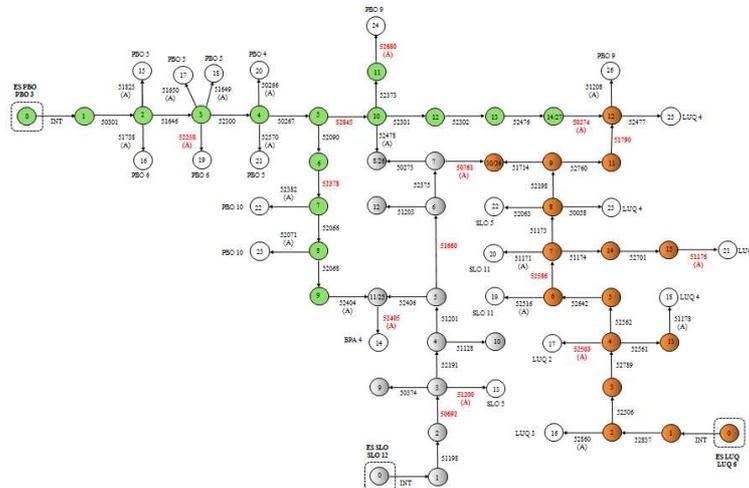


Fig. 3. Sistema de Distribución utilizada como ejemplo

El sistema posee 64 llaves de los cuales 14 son telecomandadas. Entonces, el procedimiento de reubicación óptima de llaves estará restringido a localizar solamente 14 llaves Telecomandadas con las cuales obtener el mínimo *DEP* y *Costo_total* correspondientes.

4.2. Ambiente Computacional

El procedimiento propuesto para localización óptima de llaves telecomandadas fue desarrollado utilizando la plataforma de análisis *MatLab*[®] 7.0. Para la ejecución del referido procedimiento se utilizó un computador personal con procesador *Intel CoreDuo* 1.83GHz, memoria *RAM* de 3GB.

4.3. Análisis de los Resultados Numéricos

Los resultados numéricos obtenidos por el *AGSP* se presentan en la Tabla 2. En cambio, en la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos por el *AGDP*.

Tabla 2. Resultados numéricos para el *AGSP*.

DepMin	Cost_totalMin	iter	MaxFitness	MinFitness	MedFitness	DesvST	DepCalc	Costo_totalCalc
10	4000	34	1,38488	1,19141	1,22806	0,0329255	9,28824	12976,5
12	5000	23	1,68678	1,37859	1,42032	0,0460087	10,325	9532,02
13	6000	31	1,85515	1,63412	1,68164	0,0425847	9,95174	10932
9	3000	24	1,20785	0,992121	1,02995	0,0394984	9,8828	10095

IX SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

Tabla 3. Resultados numéricos para el *AGDP*.

RESULTADOS DEL FRENTE DE PARETO								
	1	2	3	4	5	6	7	8
DEP	14,74	13,49	10,73	10,83	10,00	9,51	10,14	10,04
Costo_Total	7895	11227	10152	9001	11356	11495	10234	10978

En la Tabla 2, la columna correspondiente al símbolo DepCalc corresponde al mínimo *DEP* calculado, y la columna de Costo_totalCalc se refiere al valor mínimo del Costo_total en cada una de las 4 ejecuciones del algoritmo *AGSP*. Sin embargo, en la Tabla 3, se observa que para una única ejecución del algoritmo *AGDP* se obtuvieron 8 soluciones óptimas, y se muestra para cada solución el valor obtenido del *DEP* y el *Costo_total* incluido el *CENS*.

Para la configuración inicial se obtuvo los siguientes valores:

DEP=14.73 *Costo_total*=7895 US\$ *CENS*=7895 US\$

Para el mejor de los resultados usando *AGSP*:

DEP=9.88 *Costo_total*=10095 US\$ *CENS*=5290 US\$

Para el mejor de los resultados usando *AGDP*:

DEP=9.51 *Costo_total*=11495 US\$ *CENS*=5545 US\$

La comparación anterior, entre la configuración inicial y los procedimientos propuestos, e implementados, para la óptima reubicación de llaves telecomandadas, se realiza considerando el valor medido para el *DEP* y el valor calculado únicamente para el *CENS*; pues, en la topología inicial las llaves telecomandadas aún no fueron reubicadas. De esa manera, las soluciones obtenidas con los algoritmos propuestos mejoran substancialmente la confiabilidad y el costo operacional de la red de distribución considerada.

Luego, comparando los resultados obtenidos entre sí, por el *AGSP* y por el *AGDP*, se observa que la mejor solución del *AGDP* resulta comparativamente más adecuada respecto a la solución del *AGSP*., con el cual se demuestra que el *AGDP* tiene mayor capacidad de búsqueda que el *AGSP*. El vector solución obtenida por cada algoritmo se muestra en la Fig. 4.

CONFIGURACIÓN INICIAL Y DE LA SOLUCIÓN		PBO 3																										
Alimentador		51823	51738	51650	51649	52258	50266	52570	52382	52071	52404	52478	52680	50274	50301	51646	52300	50267	52090	52378	52066	52068	52845	52373	52301	52302	52476	
Inicial		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
Solución AGSP		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
Solución AGDP		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0

CONFIGURACIÓN INICIAL Y DE LA SOLUCIÓN		SLO 12														
Alimentador		51198	50692	52191	51201	51660	52375	50273	50374	51128	52406	51203	51200	52405	50761	
Inicial		0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Solución AGSP		0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
Solución AGDP		0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1

CONFIGURACIÓN INICIAL Y DE LA SOLUCIÓN		LUQ 6																								
Alimentador		52837	52506	52789	52562	52642	52586	51173	52198	51714	52760	51790	52561	51174	52701	52860	52503	51178	52516	51171	51176	52063	50058	52477	51208	
Inicial		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Solución AGSP		0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solución AGDP		0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Fig. 4. Solución óptima asociada a la localización óptima de llaves Telecomandadas

5. CONCLUSIONES

Comparativamente los resultados de ambos métodos son semejantes, pero *AGDP* es más interesante del punto de vistas que se tienen un conjunto de soluciones óptimas lo que permite analizar cuál de ellas es la más adecuada. La solución adoptada es aquella cuyo valor *DEP* (principalmente) sea menor, y así también un valor adecuadamente menor del *Costo_Total*, observando también el *CENS*.



IX SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
13, 14 y 15 de Octubre de 2010

Estas soluciones o familia de soluciones dan resultados en cualquiera de los casos menores respecto al *CENS* relacionados a la configuración inicial. Por tanto este método resulta adecuado para el análisis en cuestión pues brinda una posibilidad cierta para la toma de decisión para mejorar la performance de la red de distribución.

REFERENCIAS

- [1] R. Billington, M. S. Grover, “Qualitative evaluation of Permanent Outages in Distribution Systems”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, N° 3, pp. 733 – 741, May/June 1975.
- [2] M. Bernal y C. Enriquez, “Ubicación Óptima de Llaves Telecomandadas del SCADA en un Sistema Eléctrico de Distribución”, VII Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo, Paraguay, 2006.
- [3] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison – Wesley, MA, 1989.
- [4] C. A. C. Coello, G. B. Lamont, D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2nd Edition, Springer Science + Bussines Media, LLC, NY, USA, 2007.
- [5] D. P. Bernardon, M. Sperandio, V. J. García, A. S. Q. Ferreira, L. N. Canha, A. R. Abaide, G. Cardozo Jr., E. F. B. Daza, L. Comassetto, “Ubicación Óptima de Llaves Telecomandadas en las Redes de Distribución para Aumento de la Confiabilidad de los Sistemas”, UNIPAMPA-UFSM-AES SUL.
- [6] Van Veldhuizen, D. y Lamont, “Evolutionary Computation and Convergence to a Pareto Front”. *Genetic Programming Conference*, Stanford University, California – Estados Unidos, 1998.
- [7] A. M. Leite da Silva, J. Endrenyi, L. Wang, “Integrated Treatment of Adequacy and Security in Bulk Power System Reliability Evaluations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 1318 – 1326, August 1994.
- [8] J. Tanomaru, “Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos”. *II Congresso Brasileiro de Redes Neurais, III Escola de Redes Neurais*. Curitiba – Brasil, 1995.
- [9] J. C. Scaramutti, “Aplicación de Algoritmos Genéticos en el Restablecimiento de Energía en Sistemas de Distribución”, Florianópolis-Brasil, 1999.
- [10] V. A. Popov, A. R. Abaide, L. N. Canha, D. P. Bernardon, “Algorithm of Reliability Optimization for Operational Planning of Distribution Systems”, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America*, 2004.
- [11] R. Billington and R. Allan; “Reliability evaluation of power systems”, Perseus Publ., New York, 1997.