

Restauración de sistemas eléctricos de distribución usando un algoritmo heurístico constructivo

Electric distribution system restoration using a constructive heuristic algorithm

Rubén Iván Bolaños¹, Ricardo Alberto Hincapié Isaza², Ramón Alfonso Gallego Rendón³
Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
ribolanos@utp.edu.co
ricardohincapie@utp.edu.co
ragr@utp.edu.co

Resumen— En este artículo se presenta una metodología para resolver el problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución de energía eléctrica, el cual es planteado como un modelo de optimización no lineal entero mixto, donde la función objetivo a maximizar es la carga que está por fuera del servicio, sujeto a un conjunto de restricciones técnicas y operativas. El problema es solucionado empleando técnicas heurísticas, a través de indicadores de sensibilidad que guían el proceso de restauración. La metodología es validada en sistemas de distribución, encontrando resultados de buena calidad.

Palabras clave— Optimización, restauración, sistemas de distribución, técnicas heurísticas.

Abstract—This paper presents a methodology to solve the problem of service restoration in electric distribution systems, which is proposed as a model of mixed integer non-linear optimization where the objective function is to maximize the load that is outside of service, subject to a set of technical and operational constraints. The problem is solved using heuristic techniques, through sensitivity indicators that guide the restoration process. The methodology is validated in distribution systems, finding good-quality results.

Key Word — Optimization, restoration, distribution systems, heuristic techniques

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la distribución de la energía eléctrica ha venido siendo regulada con el fin de mejorar los índices de confiabilidad los sistemas en procura de un suministro de energía confiable y de buena calidad para los usuarios. Las empresas distribuidoras de energía eléctrica se han trazado la tarea de buscar estrategias que permitan lograr este propósito, de tal manera que al disminuir el impacto sobre los usuarios y mejorar la continuidad del servicio, se mejoren los índices financieros y al mismo tiempo eviten sanciones por parte de las entidades reguladoras.

Cuando una falla permanente es identificada en el centro de control, se realizan maniobras que permiten regresar el sistema a estado normal de operación. Para esto el operador debe tomar decisiones adecuadas y precisas, por lo que debe contar con herramientas computacionales que guíen el proceso de restablecimiento del servicio de manera eficiente y en tiempo real.

Con el crecimiento y desarrollo de los sistemas de distribución de energía eléctrica, su operación es cada vez más compleja, siendo necesario contar con herramientas computacionales para su análisis, razón por la cual el tema de la restauración del servicio de energía en los sistemas de distribución ha tenido una amplia discusión.

Entre las primeras investigaciones se encuentra la realizada por Morelato y Moticelli en [1], en la cual se propone un marco general que permite diseñar algoritmos para resolver un amplio rango de problemas de restauración del servicio en sistemas de distribución. El problema se resuelve por medio de una búsqueda heurística sobre un árbol de decisión binario, la cual es apoyada con reglas heurísticas obtenidas a partir de los operadores de red, que permiten reducir el espacio de búsqueda. Los autores consideraron un problema híbrido restauración/reconfiguración, en el cual el objetivo es restaurar la carga a los usuarios y al mismo tiempo balancear la carga en los alimentadores.

Hsu *et al* en [2], proponen un plan de restauración en alimentadores de distribución, para las zonas que quedan fuera de servicio después de ocurrida una falla. Desarrollan un algoritmo computacional basado en una búsqueda heurística, el cual ha sido probado en el sistema de distribución de la empresa de energía eléctrica de Taiwán, obteniendo resultados que muestran la eficiencia del plan de restauración propuesto.

¹ Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira

² Docentes del Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira

³ Docentes del Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira

Raidl y Julstrom en [3], solucionan el problema de la restauración mediante la representación de árboles de expansión para el problema de diseño de redes, usando algoritmos evolutivos. Son descriptos los operadores de inicialización, recombinación y mutación, los cuales ofrecen localidad, heredabilidad y eficiencia computacional. La inicialización y recombinación se realizan mediante la implementación de un algoritmo de expansión de árbol aleatorio, el cual se basa en los algoritmos de expansión mínima de Prim y Kruskal, y pasos aleatorios.

Watanabe y Nodu en [4], presentan una metodología para solucionar el problema de la restauración usando un algoritmo genético de dos etapas para minimizar la energía no servida durante el proceso. En la primera etapa el algoritmo crea configuraciones radiales y en la segunda, busca una secuencia óptima de operaciones de conmutación que minimicen la energía no servida para cada configuración. El proceso de recombinación de los algoritmos genéticos se desarrolla mediante una representación de conjunto de aristas y un algoritmo aleatorio de árbol de expansión, denominado *KruskalRST*. El algoritmo propuesto es eficiente para sistemas pequeños de distribución.

Watanabe *et al* en [5], exponen un algoritmo genético híbrido que realiza las mismas tareas mencionadas en [4], con la diferencia de que en este artículo usan tres estrategias de aceleración en la segunda etapa del algoritmo genético, con el fin de mejorar su desarrollo desde el punto de vista del tiempo computacional. Las estrategias de aceleración son: un procedimiento de búsqueda local, un algoritmo goloso y un algoritmo eficiente de flujo máximo. El algoritmo propuesto puede ser aplicado a sistemas de escala real.

Akduman *et al* en [6], proponen un método de solución para el problema de la restauración mediante la formulación de un modelo matemático multi-objetivo con múltiples restricciones, para lo cual los autores utilizan dos funciones objetivo: maximizar el suministro de potencia considerando la importancia de cargas críticas y maximizar la suma de las potencias de las cargas reconectadas (restauradas). La solución del modelo se realiza por medio de la implementación de un algoritmo evolutivo.

Ante condiciones de emergencia, el operador del sistema de distribución debe tomar decisiones de manera adecuada y precisa, para lo cual el operador cuenta con ayuda de software especializado que le permite desarrollar las diferentes tareas que demanda el estado de emergencia. Una de las tareas que se debe realizar tanto en estado normal como en emergencia es la reconfiguración de los alimentadores del sistema de distribución. Desde que se propuso el tema de la reconfiguración por primera vez en la literatura especializada por Merlin y Back en 1975 [7], han propuesto diferentes tipos de funciones objetivo, tales como minimización de pérdidas y balance de cargas en los alimentadores. Pero sin duda alguna la reconfiguración de las redes de distribución es la herramienta principal para dar solución al problema de la

restauración del servicio, debido a que en este problema se realizan transferencias de carga entre los diferentes alimentadores del sistema por medio de dispositivos de apertura y/o cierre.

Baran y Wu en [8] formulan y solucionan los problemas de reducción de pérdidas y balance de carga en los alimentadores. Dos métodos de flujo de carga, con diferente grado de aproximación son desarrollados. Los métodos son computacionalmente atractivos.

Gallego *et al* en [9] plantean un método aproximado de reconfiguración de redes de distribución con el objetivo de reducir las pérdidas del sistema. La metodología es un algoritmo heurístico de optimización de árbol de búsqueda de tipo *branch and bound*, que usa métodos de optimización para tomar decisiones en partes del proceso y así orientar la búsqueda a regiones prometedoras.

Carreño *et al* en [10] proponen una solución al problema de la reconfiguración de redes para la reducción de pérdidas en sistemas de distribución, con una codificación eficiente que permite que el operador de recombinación siempre encuentre topologías de red radial. El algoritmo es probado en un sistema de distribución real, mostrando excelentes resultados y eficiencia computacional.

En este artículo se plantea la restauración del servicio como un problema de optimización sujeto a las restricciones técnicas de operación. La función objetivo del problema consiste en maximizar la carga restaurada que es equivalente a minimizar la energía no servida, teniendo en cuenta límites de capacidad de corriente por las líneas, límites de voltajes nodales y topología radial del sistema. El problema es resuelto mediante el uso de técnicas heurísticas que guían por medio de factores de sensibilidad el proceso de la restauración del servicio. Se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología en un sistema de distribución de dimensiones reales de 153 nodos y 175 tramos de red, obteniendo resultados de buena calidad.

Este artículo está dividido de la siguiente forma: en la sección II se describe el modelo matemático propuesto para describir el problema, en la sección III se presenta la metodología propuesta, en la sección IV se aplica la metodología propuesta y se presentan los resultados obtenidos. Finalmente se ilustran las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El principal objetivo del problema de la restauración del servicio es energizar la mayor cantidad de carga como sea posible, por medio de dispositivos de apertura y/o cierre que permitan transferir las que se encuentran dentro de la zona aislada por el fallo, hacia alimentadores vecinos. Con cada transferencia que se realice se deben revisar las restricciones técnicas y operativas del sistema, como límites de capacidad

de elementos y voltajes nodales del sistema. Adicionalmente debido a que normalmente los sistemas de distribución son operados de forma radial, en los estudios realizados en estos sistemas, este tipo de topología es una exigencia adicional.

En este trabajo se supone que existen dispositivos de apertura o cierre en las líneas del sistema de distribución, así como también puntos de conexión entre los diferentes alimentadores o subestaciones.

El problema de la restauración del servicio se reduce a determinar el estado de los dispositivos de protección presentes en las líneas (abiertas o cerradas), de tal manera que se cumpla con las restricciones técnicas y operativas. Asociadas a cada dispositivo de apertura o cierre en los tramos de red, se tiene una variable binaria, la cual se hace cero si el dispositivo de protección se encuentra abierto y uno si el dispositivo se encuentra cerrado, es decir, que la línea está desenergizada o energizada, respectivamente.

Debido a las diferentes posibilidades que se presentan a la hora de elegir entre cuales dispositivos deben cerrarse o abrirse para obtener una solución óptima, el problema es de tipo combinatorial en el cual pueden ser usadas técnicas exactas o aproximadas como heurísticas constructivas o metaheurísticas.

El problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución puede ser formulado como un modelo de programación no lineal entero mixto, el cual está expresado en (1)-(5).

$$\text{Max } Z = \sum_{K \in R} L_K * Y_K \quad (1)$$

$$\text{s.a. } B(P_i, Q_i, V_i, \theta_i) = 0 \quad (2)$$

$$S_{ij} \leq S_{max} \quad (3)$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (4)$$

$$N_R = N_N - I \quad (5)$$

Donde,

- L_K : carga en el nodo K .
- Y_K : variable binaria de decisión del problema. Vale uno si el proceso de restauración se realiza en el nodo K ; en caso contrario vale cero.
- R : conjunto de cargas desenergizadas.
- P_i : demanda de potencia activa en el nodo i .
- Q_i : demanda de potencia reactiva en el nodo i .
- V_i : magnitud del voltaje en el nodo i .
- θ_i : ángulo del voltaje en el nodo i .
- S_{ij} : corriente entre los nodos i y j .
- S_{max} : corriente máxima que soporta un conductor.

- V_{min} : voltaje nodal mínimo permitido.
- V_{max} : voltaje nodal máximo permitido.
- N_R : número de ramas conectadas del sistema.
- N_N : número total de nodos conectados del sistema.

La función objetivo descrita en la ecuación (1), tiene como finalidad maximizar la carga restaurada, que equivale a minimizar la energía no servida. La ecuación (2) representa las ecuaciones de balance nodal y está dada por las Leyes de Kirchhoff. La desigualdad (3) garantiza que no se sobrepase la capacidad de cada tramo de línea del sistema de distribución. En la restricción (4) se describen los límites en que deben permanecer los voltajes nodales. La ecuación (5) garantiza que la red tenga topología radial.

III. METODOLOGÍA PROPUESTA

Las heurísticas son algoritmos que encuentran soluciones de buena calidad en cortos tiempos de cómputo para problemas combinatoriales complejos. Estos algoritmos son de fácil implementación y encuentran soluciones de buena calidad con esfuerzos computacionales relativamente pequeños. Sin embargo, desde el punto de vista teórico, los algoritmos heurísticos renuncian a encontrar la solución óptima global.

Un algoritmo heurístico es por lo tanto una estrategia de búsqueda que utiliza un conjunto de procedimientos simples, muchas veces basados en el sentido común, el cual encuentra soluciones de buena calidad de manera simple y rápida.

A diferencia de las técnicas metaheurísticas, las técnicas heurísticas pasan a una solución vecina usando índices de sensibilidad. Los algoritmos heurísticos no poseen mecanismos para salir de óptimos locales, ya que su objetivo es incorporar elementos a la solución usando índices de sensibilidad hasta lograr una solución factible que generalmente es una buena solución, más no necesariamente la solución óptima global [11].

A. ENUMERACIÓN Y ORDENAMIENTO

El primer paso en la metodología propuesta, consiste en realizar el ordenamiento de los nodos de forma adecuada con el fin de llevar a cabo el proceso de restauración de una forma lógica y además que implique un menor costo en el tiempo computacional. El ordenamiento debe realizarse para cada alimentador o subestación tanto para la configuración inicial como para cada configuración que resulte después de realizar apertura o cierre de uno o varios dispositivos de protección.

El problema parte de la configuración de un sistema de distribución que se encuentra en estado de operación normal, como el que se muestra en la figura 1.

Al momento de presentarse una falla en alguna zona del sistema, esta debe ser aislada por alguno de los dispositivos normalmente cerrados. Posteriormente se lleva a cabo el proceso de restauración usando dispositivos normalmente abiertos y cerrados.

Considerando como ejemplo una falla permanente en el nodo 3 del sistema de distribución de la figura 1, se observa que el dispositivo que debe conmutar de estado cerrado a abierto es el dispositivo que se encuentra entre los nodos 3 y 13. Una vez aislada la falla, se identifican los nodos que quedan sin suministro de energía (zona aislada). En la figura 2 se observa que son los nodos 13, 14, 15 y 16.

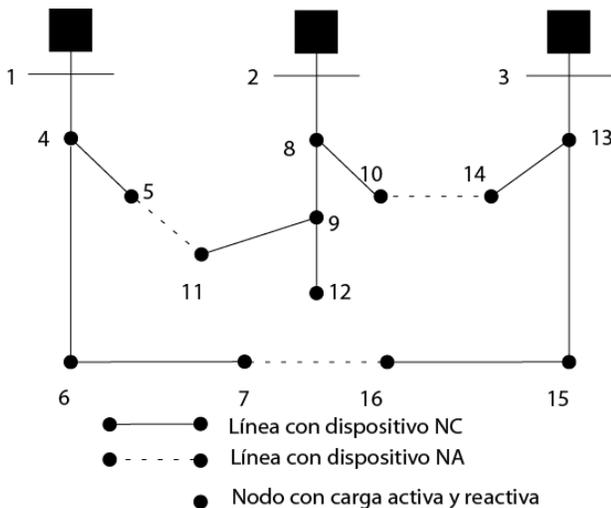


Figura 1. Sistema de distribución [6]

El sistema debe ser reordenado después de haber aislado la falla y con esto facilitar la ejecución del flujo de carga (algoritmo de barrido iterativo) [12]. Los resultados del flujo de carga permiten definir el orden de restauración de las cargas. Para esto se crea una lista con los nodos candidatos a recibir carga. Observando nuevamente la figura 2, los nodos candidatos son: 7 y 10.

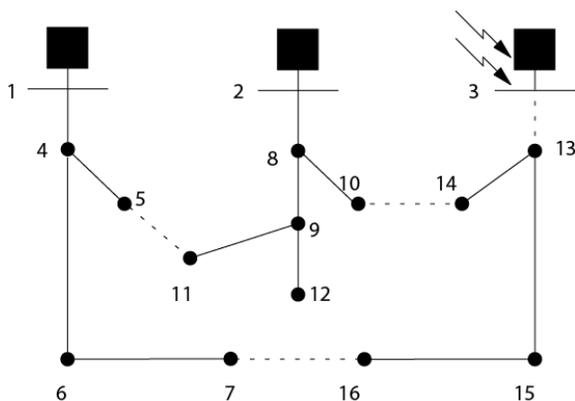


Figura 2. Sistema bajo falla en el nodo 3

B. LISTA DE NODOS CANDIDATOS

Para conformar la lista de los nodos candidatos, se plantean tres alternativas que se describen a continuación. Cabe anotar que cualquiera de las tres formas requiere del barrido y/o ordenamiento realizados en los pasos anteriores.

- Nodo con mayor reserva de voltaje.

Con el flujo de carga ejecutado previamente, se conocen los voltajes en los nodos del sistema, incluidos los nodos candidatos. Con base en estos se calcula la diferencia del voltaje en dicho nodo como la diferencia del voltaje de operación y el mínimo permitido. Por lo tanto:

$$\Delta V_{frontera-i} = V_{Oper_frontera-i} - V_{nom_frontera-i} \quad (5)$$

Donde,

- $\Delta V_{frontera-i}$: reserva de tensión en el nodo candidato i .
- $V_{Oper_frontera-i}$: voltaje del nodo candidato i .
- $V_{nom_frontera-i}$: voltaje nominal del nodo candidato i .

Posteriormente la lista de los nodos con reserva de voltaje se organiza de mayor a menor.

- Menor impedancia de Thévenin (Z_{th}).

De forma general, la impedancia equivalente entre los nodos j y k de una red eléctrica, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$Z_{th, jk} = Z_{jj} + Z_{kk} - 2Z_{jk} \quad (6)$$

Donde los elementos Z_{jj} y Z_{kk} son el j -ésimo y k -ésimo elemento de la diagonal principal de la matriz de impedancias calculada para la red y corresponde a la suma de las impedancias desde el nodo correspondiente hasta el nodo slack o raíz. El elemento Z_{jk} es la suma de las impedancias compartidas por las trayectorias de los nodos j y k hacia el nodo raíz.

Para el caso particular en que se requiere calcular la impedancia equivalente entre un nodo k y el nodo slack, los términos Z_{jj} y Z_{jk} toman el valor de cero debido a que solo existe una trayectoria para el cálculo de dicha impedancia. Por lo tanto:

$$Z_{th} = Z_{kk} = \sum_{i=nodok}^{slack} Z_i \quad (7)$$

Para cada nodo candidato k se calcula el equivalente de Thévenin entre dicho nodo y el nodo slack, tal como se

mencionó anteriormente. La sumatoria de impedancias se realiza con la ayuda del ordenamiento nodal. La lista de los nodos candidatos se organiza de menor a mayor impedancia equivalente.

- Mayor capacidad de corriente.

Para organizar los nodos a partir de la reserva de corriente en un tramo de red dado, se usa el ordenamiento nodal y los resultados del flujo de carga realizados previamente. Se ejecuta un recorrido desde el nodo i hasta el nodo slack y se calcula el delta de corriente para cada tramo de línea del recorrido. El delta de corriente se calcula como la diferencia entre la corriente nominal del tramo de red y la corriente que fluye por dicho tramo obtenida a partir del flujo de carga como se indica en la ecuación (8). Finalmente se le asocia al nodo candidato el delta de corriente mínimo que no viole la restricción por capacidad. Este proceso se repite para todos los nodos candidatos y se organizan con respecto al delta de corriente asociado de forma descendente.

$$\Delta I_{tramo-i} = I_{nom_tramo-i} - I_{oper_tramo-i} \quad (8)$$

$$\Delta I_{frontera-i} = \min(\Delta I_{tramo-i}) \quad \text{con } i = \text{nodo}_{tramo-i}, \dots, \text{nodo}_{slack} \quad (9)$$

Donde,

- $\Delta I_{tramo-i}$: diferencia de corriente en el tramo de red i .
 $I_{nom_tramo-i}$: corriente nominal del tramo de red i .
 $I_{oper_tramo-i}$: corriente que circula por el tramo de red i .
 $\Delta I_{frontera-i}$: diferencia de corriente del tramo de red candidato (frontera) i .

3.3. PROCESO DE RESTAURACIÓN

Después de aislar la zona de fallo e identificar la zona aislada, se procede a restaurar las cargas que se encuentran sin servicio. La restauración de las cargas inicia con el nodo adyacente al nodo en la primera posición de la lista de candidatos. Antes de efectuar la restauración de dicho nodo, se deben verificar los límites de voltaje y capacidad de corriente. Para cada nodo a restaurar se calcula la corriente inyectada en dicho nodo y se verifica que no se viole la capacidad de alguna de las líneas aguas arriba. La corriente inyectada se calcula de la siguiente manera:

$$I_j = \left(\frac{S_j}{V_j} \right)^* \quad (10)$$

Donde I_j corresponde a la corriente inyectada debido a la carga del nodo a restaurar j , S_j es la carga del nodo a restaurar y V_j es el voltaje del nodo candidato, obtenido mediante el flujo de carga realizado después de aislar la zona bajo falla. Después de transferir la carga, la capacidad límite de corriente se verifica de la siguiente forma:

$$\Delta I_{frontera-i} - I_j + 0.2 I_{nom_tramo-i} \geq 0 \quad (11)$$

El límite de voltaje se calcula a partir de la caída de tensión del nodo candidato debido a la inyección de corriente causada por la carga del nodo a restaurar. La caída de tensión se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta V_j = (Z_{kk} + Z_{kj}) * I_j \quad (12)$$

Donde ΔV_j es la caída de tensión debido a la carga del nodo a restaurar, y $(Z_{kk} + Z_{kj})$ es la impedancia de Thévenin vista entre el nodo candidato y el nodo slack. El límite de voltaje se verifica de la siguiente forma:

$$V_j = V_k - \Delta V_j \geq V_{min} \quad (13)$$

Si se cumplen los límites de corriente y voltaje, entonces el nodo es energizado nuevamente e ingresa a una lista de nodos restaurados; el proceso continua de la misma manera con los nodos adyacentes a los nodos restaurados, hasta que todos los nodos hayan sido restaurados o hasta que la lista de nodos candidatos termine.

Durante cada paso del proceso de restauración, se va evaluando la función objetivo planteada en el modelo matemático. La función objetivo inicia con valor cero, indicando que todas las cargas aguas abajo del nodo de falla se encuentran sin suministro de energía eléctrica, pero cada vez que se realice restauración se suma el valor de la carga restaurada. Debido a esto, la función objetivo siempre va mejorando durante el proceso de restauración, lo que indica que en cada paso del algoritmo la alimentación de la carga va aumentando, lo que es equivalente a decir que la energía no servida va disminuyendo. Al final del proceso, el valor de la función objetivo corresponde al valor de potencia restaurada. Sin embargo, este valor puede disminuir ya que es posible que haya que retirar alguno de los nodos restaurados previamente debido a una mala regulación de tensión en los nodos finales, lo cual se analiza mediante un flujo de carga realizado al final del proceso de restauración.

C. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el fin de presentar la aplicación de la metodología propuesta, se emplea un sistema de prueba que contiene 3 alimentadores, 13 nodos y 16 líneas con dispositivos de apertura y cierre [6]. Para implementar la metodología se empleó el lenguaje de programación Fortran 77. El sistema de prueba en su configuración inicial se presenta en la figura 1.

En la tabla 1 se presenta la demanda asociada a cada nodo, en la tabla 2 se muestran los voltajes y ángulos nodales y en la tabla 3 los parámetros de las líneas del sistema.

Nodo	P (MW)	Q (MVAr)	Nodo	P (MW)	Q (MVAr)
------	-----------	-------------	------	-----------	-------------

1	-	-	9	5	1,8
2	-	-	10	1	0,9
3	-	-	11	0,6	-0,5
4	2	1,6	12	4,5	-1,7
5	3	0,4	13	1	0,9
6	2	-0,4	14	1	-1,1
7	1,5	1,2	15	1	0,9
8	4	2,7	16	2,1	-0,8

Tabla 1. Demanda nodal

Nodo	V (pu)	Θ (°)	Nodo	V (pu)	Θ (°)
1	1	0	9	0,971	-1,451
2	1	0	10	0,977	-0,77
3	1	0	11	0,971	-1,525
4	0,991	-0,697	12	0,959	-1,836
5	0,988	-0,544	13	0,994	-0,332
6	0,988	-0,697	14	0,995	-0,459
7	0,985	-0,704	15	0,992	-0,527
8	0,979	-0,763	16	0,991	-0,596

Tabla 2. Voltajes y ángulos nodales

Envío	Recibo	Línea	Y _k	R (pu)	X (pu)	Inom (A)
1	4	1	1	0,075	0,1	800
4	5	2	1	0,08	0,11	800
4	6	3	1	0,09	0,18	800
6	7	4	1	0,04	0,04	800
7	16	15	1	0,12	0,12	800
16	15	13	1	0,04	0,04	800
15	13	12	1	0,08	0,11	800
2	8	5	1	0,11	0,11	1100
8	9	6	1	0,08	0,11	800
8	10	7	1	0,11	0,11	800
9	11	8	1	0,11	0,11	800
9	12	9	1	0,08	0,11	800
10	14	16	1	0,04	0,04	800
3	13	10	0	0,11	0,11	800
13	14	11	0	0,09	0,12	800
5	11	14	0	0,04	0,04	800

Tabla 3. Parámetros de las líneas

Los tres índices de sensibilidad fueron empleados en forma independiente, siendo el de corriente el que proporcionó la mejor respuesta. De acuerdo a esto, a continuación se presentan los resultados de la metodología propuesta al emplear este índice, simulando la falla en el nodo 2 del caso de prueba de la figura 1. Se escoge este nodo debido que al aislar la zona de falla implica la salida de una subestación, por lo cual se considera un caso crítico.

Al ocurrir la falla en el nodo 2 quedan por fuera de servicio los nodos 2, 8, 9, 10, 11 y 12, lo que ocasiona una demanda no servida de 17,0769 MVA, tal como se muestra en la tabla 4.

Nodos	Demanda (MVA)	Nodos	Demanda (MVA)
2	0,0000	10	1,3454

8	4,8260	11	0,7810
9	5,3141	12	4,8104

Tabla 4. Demanda no servida

En la figura 3 se muestra el sistema de prueba bajo falla en el nodo 2. La zona que queda aislada y en la cual se debe llevar a cabo el proceso de restauración, es la que se encuentra encerrada por el círculo.

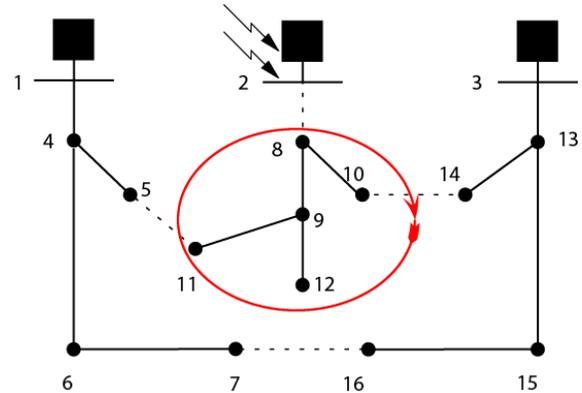


Figura 3. Sistema bajo falla en el nodo 2

Después de ocurrida la falla, se inicia el proceso de restauración. Dicho proceso se lleva a cabo usando los índices de sensibilidad descritos anteriormente. El primer nodo seleccionado con base en el orden dado por los índices de sensibilidad es el nodo 10. El proceso continúa con la restauración del nodo 8 y finaliza con el nodo 11, con lo cual se restauran 6,9524 MVA de la demanda no servida.

Después de llevar a cabo el proceso de restauración los nodos que no pueden ser energizados nuevamente son el 2 (corresponde al nodo donde tuvo lugar la falla) y los nodos 9 y 12, con los cuales se tiene finalmente una demanda no servida de 10,1245 MVA. Los nodos 9 y 12 no son conectados a los otros dos alimentadores debido a que ocasionan sobrecargas en los tramos de red a la salida de las subestaciones.

Se observa que la demanda que deja de ser alimentada al aislar la zona donde ocurre la contingencia corresponde a 17,0769 MVA y después de realizar el proceso de restauración la carga sin servicio corresponde a 10,1245 MVA, lo que indica que el 40,7% de la carga fue restaurada.

En la figura 4 se observa el sistema de distribución después del proceso de restauración. La región encerrada por el círculo corresponde a la zona que queda sin servicio después de haber realizado el proceso de restauración.

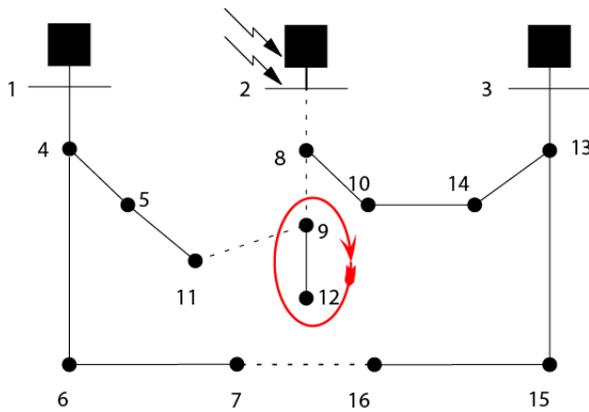


Figura 4. Sistema restaurado

A continuación se muestran los voltajes nodales, con lo cual se verifican que las condiciones operativas del sistema están dentro de los límites permitidos, después de haber aplicado la metodología.

Nodo	V (pu)	Θ (°)	Nodo	V (pu)	Θ (°)
1	1	0	10	0,9723	-0,7512
3	1	0	11	0,9878	-0,6885
4	0,9907	-0,4262	13	0,9845	-0,4214
5	0,9879	-0,6627	14	0,9758	-0,7174
6	0,9860	-0,7536	15	0,9819	-0,6188
7	0,9849	-0,7606	16	0,9814	-0,6878
8	0,9646	-0,8386	---	---	---

Tabla 5. Voltajes nodales

En la figura 5 se muestra el comportamiento de la función objetivo durante el proceso de restauración, en la cual la demanda no servida empieza en 17,0769MVA y con cada iteración de la metodología propuesta, esta va disminuyendo hasta llegar a 10,1245 MVA al final del proceso.

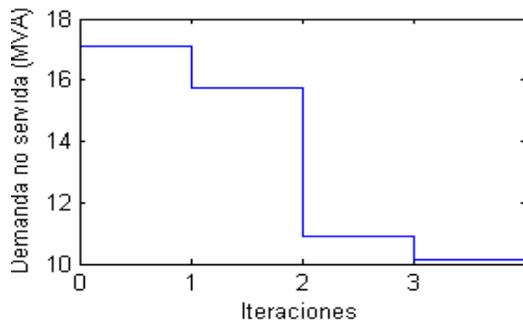


Figura 5. Evolución de la función objetivo

IV. APLICACIÓN Y RESULTADOS

Con el fin de mostrar la validez de la metodología propuesta se realizan pruebas en un sistema de distribución de 153 nodos, 2 subestaciones y 175 tramos de red, en los cuales se supone la existencia de elementos de apertura y cierre. Para realizar las pruebas se eligen los nodos 100 y 146, debido a

que se consideran casos críticos por ser nodos donde están ubicadas las subestaciones. Los datos del sistema se presentan en [13] y las modificaciones realizadas al circuito para implementar la metodología de restauración propuesta se encuentran en [14]. El sistema de prueba se ilustra en la figura 6.

• Caso 1: falla en el nodo 100.

En la aplicación de la metodología se emplearon los tres índices de sensibilidad de forma independiente. En la Tabla 6 se presenta la comparación de los resultados obtenidos.

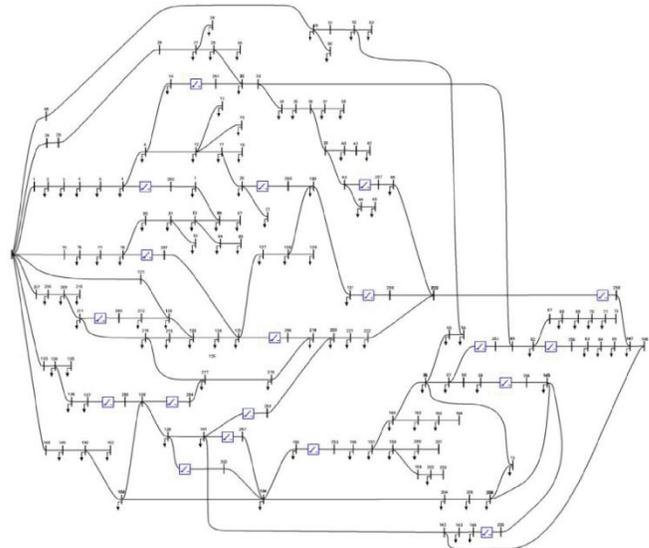


Figura 6. Sistema de prueba [13]

Índice	Número de iteraciones	Tiempo computacional (seg)	Demanda no servida (MVA)
Corriente	33	$26.5 * 10^{-3}$	3.3210
Voltaje	30	$36.3 * 10^{-3}$	3.4305
Impedancia de Thévenin	34	$54.4 * 10^{-3}$	3.3908

Tabla 6. Comparación de los índices de sensibilidad del caso 1

Debido a que el índice que proporcionó mejores respuestas fue el de corriente, solamente se presentan los resultados obtenidos con este indicador.

De acuerdo a las características que presenta este sistema, al presentarse una falla en el nodo 100, la red sufre un gran impacto quedando sin servicio los siguientes nodos: 100, 1, 24, 48, 75, 121, 133, 148, 207, 2, 25, 49, 76, 122, 134, 149, 208, 3, 26, 50, 51, 77, 212, 135, 136, 150, 209, 4, 27, 52, 7, 84, 265, 137, 152, 153, 210, 211, 5, 28, 29, 53, 80, 138, 214, 6, 30, 32, 81, 268, 139, 215, 9, 33, 251, 82, 83, 123, 10, 12, 34, 84, 86, 124, 13, 15, 17, 35, 85, 87, 7, 125, 18, 20, 36, 250, 127, 267, 21, 37, 39, 128, 38, 40, 43, 129, 130, 41, 44, 131,

260, 42 y 45, lo cual da una demanda no servida igual a 3,9608 MVA.

En la figura 7 se presenta el sistema después de aislar la falla en el nodo 100. La zona correspondiente a los nodos aislados es la que se encuentra dentro del recuadro.

Después de aislar la falla se inicia el proceso de restauración del servicio y de esta manera tratar de re-energizar la mayor cantidad de carga en el menor tiempo posible. Los nodos son restaurados de acuerdo al orden obtenido mediante los índices de sensibilidad. El orden en que se restauran los nodos es el siguiente: 153, 150, 138, 149, 152, 268, 139, 148, 52, 51, 53, 49, 48, 50, 214, 211, 215, 209, 123, 208, 210, 124, 207, 125, 127, 267, 33, 32, 34, 29, 251, 43 y 39. En la figura 8 se muestra el sistema después de aplicar la metodología de restauración, donde las zonas de los recuadros corresponden a los nodos que quedan aislados después del proceso de restauración.

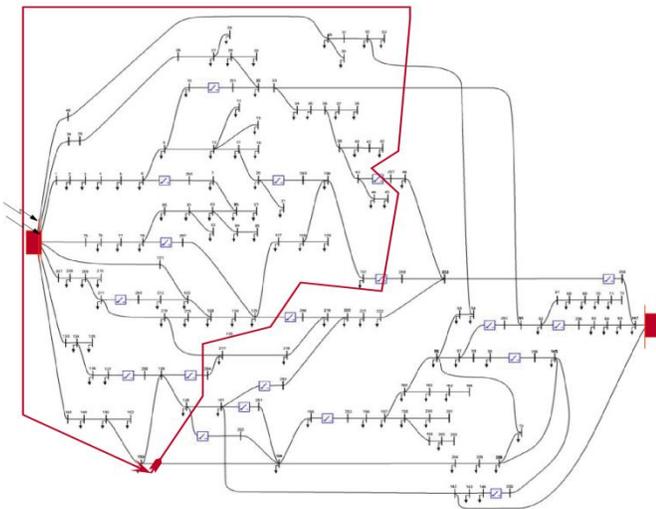


Figura 7. Zona aislada para el caso 1

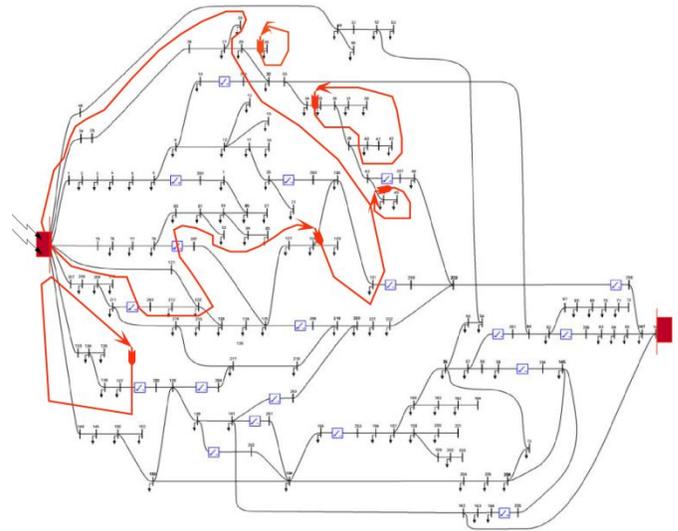


Figura 8. Sistema restaurado para el caso 1

Luego de llevar a cabo la metodología de restauración propuesta, se logran restaurar 0,6390 MVA, lo cual equivale al 16,1331% de la demanda no servida. Los nodos que no pueden ser restaurados son los siguientes: 100, 1, 24, 75, 121, 133, 2, 25, 76, 122, 134, 3, 26, 77, 212, 135, 136, 4, 27, 78, 265, 137, 5, 28, 80, 6, 30, 81, 9, 82, 83, 10, 12, 84, 86, 13, 15, 17, 35, 85, 87, 7, 18, 20, 36, 250, 21, 37, 128, 38, 40, 129, 130, 41, 44, 131, 260, 42 y 45.

En la figura 9 se muestra como la demanda no servida disminuye en cada iteración de la metodología, iniciando en su valor máximo (3,9608 MVA) hasta llegar a 3,3210 MVA al final del proceso de restauración.

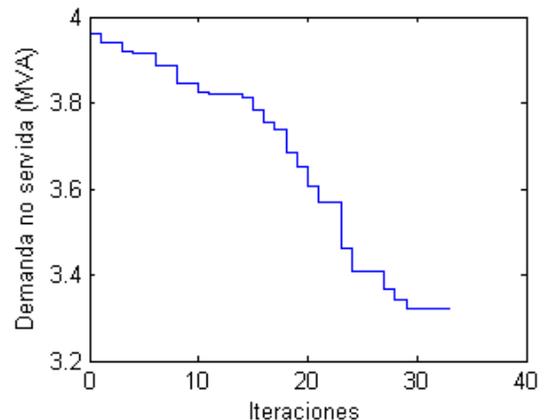


Figura 9. Evolución de la función objetivo del caso 1

- **Caso 2: falla en el nodo 146.**

En la Tabla 7 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con los tres indicadores, donde al igual que en el caso anterior, el índice que proporcionó mejores respuestas fue el de corriente.

Índice	Número de iteraciones	Tiempo computacional (seg)	Demanda no servida (MVA)
Corriente	63	$31.2 * 10^{-3}$	0
Voltaje	51	$46.8 * 10^{-3}$	0.3234
Impedancia de Thévenin	63	$62.5 * 10^{-3}$	0

Tabla 7. Comparación de los índices de sensibilidad del caso 2

En este caso solamente se presentan los resultados obtenidos con el índice de corriente. Nuevamente se toma como caso de prueba una falla en uno de los nodos que involucra la salida de una subestación. Al simular una falla en el nodo 146, se presenta un caso crítico que requiere de un proceso rápido para llevar a cabo la restauración de la mayor cantidad de carga posible. Los nodos que sufren el impacto de la falla quedando fuera de servicio son los siguientes: 146, 142, 147, 141, 143, 65, 258, 261, 263, 144, 64, 223, 154, 255, 63, 222, 46, 259, 155, 204, 262, 145, 256, 221, 257, 254, 206, 62, 220, 205, 73, 61, 67, 219, 252, 68, 218, 266, 57, 69, 217, 56, 58, 70, 264, 55, 160, 59, 71, 54, 157, 162, 72, 156, 158, 163, 253, 159, 200, 164, 202, 201 y 203. Con la salida de los anteriores nodos, la demanda no servida corresponde a 2,6060 MVA.

En la siguiente figura se muestra el circuito bajo falla en el nodo 146, donde la zona aislada se muestra en el recuadro.

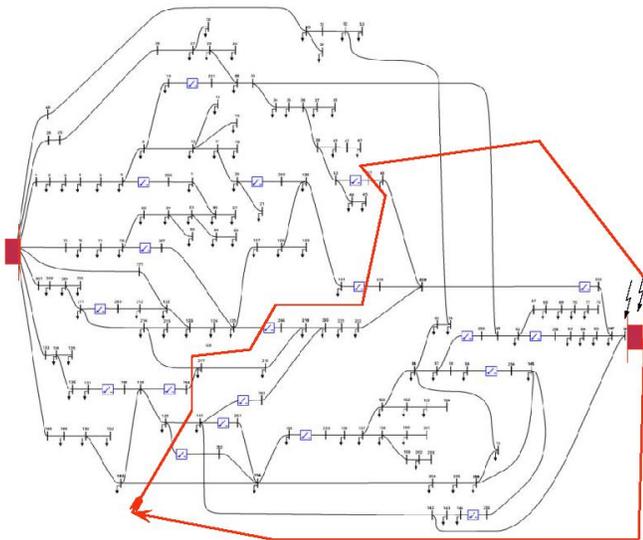


Figura 10. Zona aislada para el caso 2

Con el fin de minimizar los efectos del fallo ocurrido en el nodo 146, se inicia el proceso de restauración de las cargas aisladas según los criterios de sensibilidad. La restauración de los nodos se realiza en el siguiente orden: 54, 55, 56, 57, 160, 58, 252, 157, 162, 59, 61, 156, 158, 163, 62, 253, 159, 200, 164, 67, 256, 202, 201, 68, 63, 203, 69, 64, 70, 65, 71, 147, 72, 258, 223, 222, 46, 259, 221, 257, 220, 219, 218, 266, 217, 264, 141, 142, 261, 263, 143, 154, 144, 155, 204, 262, 255, 145, 254, 206, 205 y 73. Después de realizado el proceso de

restauración, la totalidad de la demanda no servida es restaurada, con lo cual el único nodo que queda aislado es el nodo 146 que corresponde al lugar donde ocurrió la falla.

En la figura 11 se muestra el sistema de distribución restaurado. El único nodo que se encuentra dentro del recuadro es el que corresponde al lugar donde ocurrió la falla.

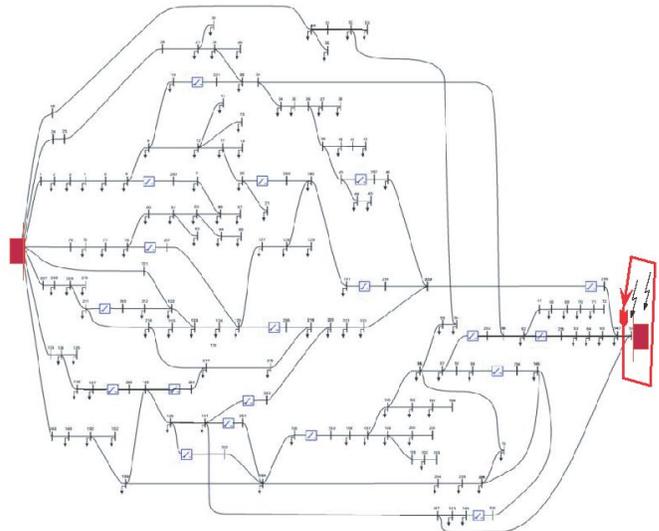


Figura 11. Sistema restaurado para el caso 2

En la figura 12 se muestra la forma como va disminuyendo el valor de la demanda no servida con cada iteración de la metodología propuesta, hasta llegar a cero.

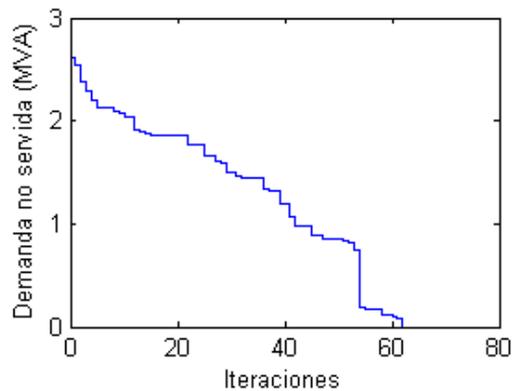


Figura 12. Evolución de la función objetivo del caso 2

V. CONCLUSIONES

Se propuso una metodología para solucionar el problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución, usando un modelo matemático mono-objetivo, en el cual se considera maximizar la carga restaurada teniendo en cuenta restricciones técnicas de operación. El modelo fue solucionado mediante técnicas heurísticas. Los resultados obtenidos al aplicar la metodología a un sistema de

distribución de dimensiones reales de 153 nodos y 175 tramos de red, refleja la capacidad de la metodología y la validez de lo planteado en este trabajo.

La metodología desarrollada es una herramienta válida para minimizar la energía no servida ante estados de emergencia en sistemas de distribución. Debido a la gran cantidad de elementos que lo conforman, se hace necesario contar con este tipo de herramientas computacionales que sean capaces de resolver de manera rápida y eficiente problemas de gran complejidad matemática, como el problema de la restauración del servicio.

Los índices de sensibilidad usados en la metodología permiten obtener posibles puntos de restauración atractivos, de tal manera que la mayor cantidad de carga posible sea restaurada. El uso de uno u otro índice depende de las características y limitaciones físicas que presente la red de distribución.

En trabajos futuros se pueden incluir mejoras en los índices de sensibilidad, así como hacer uso de teoría de grafos para determinar el camino más corto entre un posible punto de reconexión y el nodo slack y de esta manera clasificar el orden que se va a realizar la restauración. También puede ser realizado un trabajo que además de restaurar, pueda determinar cuál debe ser la ubicación óptima de los reconectores normalmente abiertos y cerrados de acuerdo a la capacidad de minimizar la energía no servida y los costos que implique poner dicho elemento en la red.

Finalmente se pueden explorar otras técnicas de solución que permitan resolver el problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución como algoritmos genéticos, búsqueda tabú y simulated annealing, entre otros. Estas técnicas podrían ser mejoradas usando índices de sensibilidad.

REFERENCIAS

- [1] A.L. Morelato, A. Monticelli, “*Heuristic Search to Distribution System Restoration*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.4, October 1989.
- [2] Y.Y. Hsu, H.S. Yu, S.K. Peng, “*Heuristic Search to Distribution System Restoration*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.4, April 1992.
- [3] G.R. Raidl, B.A. Julstrom, “*Edge Sets: An Effective Evolutionary Coding of Spanning Trees*”. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 7, No.3, June 2003.
- [4] I. Watanabe, M. Nodu, “*A Genetic Algorithm for Optimizing Switching Sequence of Service Restoration in Distribution Systems*”. IEEE, Congress on Evolutionary Computation, September 2004.
- [5] I. Watanabe, I. Kurihara, Y. Nakachi, “*A Hybrid Genetic Algorithm for Service Restoration Problems in Power Distribution Systems*”. IEEE, Congress on Evolutionary Computation, September 2006.
- [6] B. Akduman, B. Turkyay, A.S. Uyar, “*Service Restoration in Distribution Systems Using an Evolutionary Algorithm*”. Mediterranean conference and exhibition on distribution and energy conversion. Agianapa, cyprus, paper No. MED 10/177, November 2010.
- [7] A. Merlin, G. Back, “*Search for a Minimum Loss Operational Spanning Tree Configuration for an Urban Power Distribution System*”. Power Systems Conference (PSC), Cambridge, pp. 1-18, 1975.
- [8] M.E. Baran, F.F. Wu, “*Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.2, April 1989.
- [9] R.A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero, “*Um Método Aproximado de Otimização Usado na Reconfiguração de Redes de Distribuição*”. UTP-DSEE-FEE-UNICAMP-DEE-FEIS-UNESP, 1994.
- [10] E.M. Carreño, R. Romero, A.P. Feltrin, “*An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No.4, November 2008.
- [11] R.A. Gallego, A.H. Escobar, E.M. Toro, “*Técnicas metaheurísticas de optimización*”. Segunda Edición. Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [12] C.S. Cheng, D. Shirmohammadi, “*A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks*”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988.
- [13] Universidade Estadual Paulista, Campus de IlhaSolteira, Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica “*sistema de Distribución 153 Nodos*”. Descargado en Octubre de 2012, de: <http://falcao.feis.unesp.br/dee/projetos/lapsee/>.
- [14] R.I. Bolaños, “*Solución al Problema de la Restauración del Servicio en Sistemas de Distribución Usando Técnicas Heurísticas*” Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Enero 2013.