

MANEJO TOPOLÓGICO DE LA RED DE MEDIA TENSIÓN EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

Rodrigo Alexis Rodríguez Jaramillo
Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión
Universidad Tecnológica de Panamá
Apartado 6-2894, El Dorado
Panamá, República de Panamá
e-mail: rrodriguez@vipe.utp.ac.pa

RESUMEN

En los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica cuando ocurren fallas en la red de media tensión, la prioridad en la operación del sistema, debe estar dirigida a restaurar la carga de forma tal que se minimicen las penalizaciones por energía no suministrada. Para llegar a establecer la configuración de restauración a implementar, es necesario contar con una metodología que permita manejar la topología de la red en forma apropiada y dé las posibles configuraciones radiales a ser evaluadas, considerando que la solución de restauración debe ser alcanzada en tiempo real, es decir, dada la complejidad de la red media tensión se necesitan proveer las alternativas de restauración más apropiadas para ser evaluadas.

Palabras claves: Búsqueda local, heurística, Expansión restauración de carga.

ABSTRACT

In Distribution Power Systems when faults happen in medium voltage network, the priority in system operation, it should be directed to restore the load in a way that the penalty costs by non-supplied energy are minimized. In order to reach the restoration configuration to be implemented, it is necessary to have a methodology that allows managing the network's topology in appropriate way and gives the possible radial configurations to be evaluated. This methodology should consider that the restoration solution should be reached in real time, it means, that the complexity of medium voltage network makes necessary to provide the most appropriate restoration alternatives to be evaluated. The methodology was tested in a real network of 290 nodes, with results that have proven the advantages of the proposed tool.

Keywords: Heuristic, load restoration, local search.

1. Introducción

La reconfiguración de la red de media tensión (MT) es un aspecto importante en la operación de los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE). La reconfiguración de la red de MT puede ser realizada con los siguientes objetivos: restauración de carga ante fallas en el sistema, configuración de mínimas pérdidas, balance de carga entre alimentadores y mantenimiento programado.

En situaciones de emergencia del sistema, tales como aquellos provocados por fallas en la red de MT, la principal tarea de los operadores de los centros de control en ese momento, es la relacionada con la restauración de carga. En las nuevas estructuras de mercados eléctricos desregulados, esta tarea de restauración se puede realizar considerando el costo de la energía no suministrada como criterio de decisión [1]. Es decir, la configuración de restauración, la cual involucra la apertura o cierre de

los aparatos de maniobra (fusibles, seccionadores, interruptores de circuito, reconectores, etc.) de la red, debe considerar la minimización de la penalización por energía no suministrada. No obstante, uno de las principales dificultades es que el problema de restauración es de tipo combinatorial, en donde el número de alternativas está dado por 2^n , donde "n" es la cantidad de aparatos de maniobra. En los SDEE "n" es muy grande debido a la enorme cantidad de aparatos de maniobra existentes, lo que hace que exista una gran cantidad de posibles configuraciones de restauración. Inclusive considerando que la red de MT es operada radialmente, la cantidad de configuraciones radiales que cumplen con esta restricción puede ser mucha. Por lo tanto es importante contar con una metodología que permita manejar la topología de la red en forma apropiada y rápida.

En este artículo se propone una metodología para establecer las configuraciones a evaluar como alternativa de restauración, basada en un análisis heurístico para disminuir el espacio de búsqueda y en una herramienta que permite encontrar las configuraciones de restauración de manera fácil y rápida considerando la restricción de radialidad de la red.

2. Heurística para Disminuir el Espacio de Búsqueda

En situaciones de emergencia el problema combinatorial de los sistemas de distribución se torna mucho más crítico, debido a que puede existir una gran cantidad de alternativas posibles de reconfiguración y la alternativa de solución debe ser encontrada en muy corto tiempo. Esta cantidad se ve enormemente reducida si se considera que sólo se aceptan configuraciones radiales, ya que las redes de MT son generalmente operadas en forma radial. Según [2] la cantidad máxima de configuraciones radiales está dado por:

$$\text{Cantidad máxima de configuraciones radiales} = \sum_{i=1}^{n_t} \binom{n_t}{i} \binom{n_s}{i-1} \quad (1)$$

donde,

n_t Cantidad total de aparatos de maniobra de lazo.

n_s Cantidad total de aparatos de maniobra de seccionalización.

Por ejemplo, para una red que tenga 20 aparatos de maniobra, donde 4 son de lazo (normalmente abierto) y 16 son de seccionalización (normalmente cerrados) se tiene:

$$\text{Cantidad total de configuraciones} = 2^{20} = 1048576$$

$$\text{Cantidad máxima de configuraciones radiales} = \sum_{i=1}^4 \binom{4}{i} \binom{16}{i-1} = 1140$$

Si bien la cantidad máxima de configuraciones se reduce drásticamente por la condición de radialidad, este número aún puede llegar a ser alto, ya que las redes de distribución tienen una cantidad muy superior de aparatos de maniobra que el considerado

en el ejemplo. Por lo que se debe establecer un método, que permita obtener la solución de restauración en tiempos aceptables desde el punto de vista de la operación. Se consideran tiempos aceptables para encontrar la alternativa de restauración aquellos que no superan el minuto [3].

A. Definiciones.

- Operación de maniobra (op-man): una operación de maniobra corresponde al cambio de estado de dos aparatos de maniobra de *cerrado - abierto* a *abierto - cerrado*, es decir, la apertura de un aparato de maniobra de seccionalización y el cierre de un aparato de maniobra de lazo. La operación de maniobra para que sea válida, debe garantizar la radialidad del sistema y el suministro de energía a las cargas.
- Alivio de carga: es la transferencia de carga entre alimentadores no fallados.
- Corte de carga: cargas sin restaurar de las zonas ubicadas aguas abajo de la zona fallada. Es la condición menos deseada en la restauración y ocurre cuando no es posible restaurar el total de las cargas por violaciones de restricciones.
- Conjunto de configuraciones: agrupamiento de las configuraciones de restauración basado en la cantidad de op-man, alivio de carga o corte de carga.
- Búsqueda local: búsqueda de las alternativas de configuración en la vecindad del alimentador fallado.
- Nivel de solución: es la jerarquización de los conjuntos de configuraciones de acuerdo a la cantidad de op-man, alivio de carga y corte de carga.
- Nivel de adyacencia: corresponde a la relación que existe entre el alimentador fallado y los alimentadores no fallados. El nivel de adyacencia se entiende mejor mediante el diagrama de la figura 1 [4].

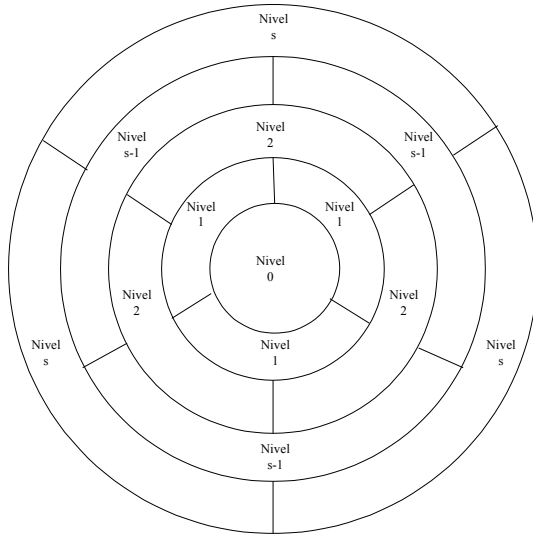


Figura 1. Nivel de Adyacencia

Nivel 0: alimentador fallado.

Nivel 1: alimentadores con conexión directa al alimentador fallado.

Nivel 2: alimentadores sin conexión directa con el fallado pero conectados directamente con alimentadores de nivel 1.

·
·
·

Nivel s: alimentadores sin conexión directa con el fallado pero conectados directamente con alimentadores de nivel s-1.

Las zonas fuera de servicio sólo pueden ser transferidas en forma directa a los alimentadores de nivel 1. Pero los alimentadores de nivel 1 pueden transferir carga a los alimentadores de nivel 2 y así sucesivamente hasta los alimentadores de nivel s. Los puntos de conexión entre los alimentadores son los aparatos de maniobra de lazo.

En tal sentido la “búsqueda local” se realiza para las alternativas de configuración en los niveles de adyacencia más próximos al nivel 0.

B. Determinación de los conjuntos de configuraciones a evaluar.

La búsqueda de la configuración de restauración a implementar sin acotar el espacio de búsqueda, conduce a elevados tiempos de cálculo. Esto se debe a que el problema de restauración como ya se dijo,

es un problema combinatorial, y puede alcanzar una cantidad muy elevada de posibles configuraciones de restauración. Para solucionar este problema, se han aplicado entre otros métodos el uso de reglas heurísticas que limitan el espacio de búsqueda. También es posible establecer una estrategia de búsqueda de las configuraciones a evaluar que considere la cantidad de aparatos de maniobra a operar, y con esto acelerar la búsqueda de la solución de restauración.

C. Reglas heurísticas para reducir el espacio de búsqueda.

Las principales reglas heurísticas utilizadas en la metodología propuesta para la acotación del espacio de búsqueda son:

- Búsqueda local de la solución: esta es la principal regla utilizada para disminuir el espacio de búsqueda y ha sido empleada entre otros autores por [4, 5, 6, 7, 8, 9], su uso se fundamenta en lo siguiente:
 - La búsqueda local disminuye significativamente la cantidad de configuraciones a considerar.
 - Cambios en la topología en cualquier parte de la red pueden llevar a un mayor tiempo de restauración, debido a posibles mayores distancias entre los aparatos de maniobra a operar.
 - El retorno a la configuración inicial (estado normal de operación) después de pasada la emergencia es más fácil.
- Descartar los aparatos de maniobra que por razones operativas no puedan ser operados.
- Descartar los aparatos de maniobra de seccionalización que aguas abajo de la falla no tengan aparatos de maniobra de lazo y/o dejen alguna zona aislada.
- Considerar sólo los aparatos de maniobra de lazo de los alimentadores adyacentes con mayor capacidad para recibir carga.
- Definir una cantidad máxima de op-man “k”. Esta cantidad máxima de op-man, está referida a los cambios de estado de los

aparatos de maniobra para la transferencia de carga entre el alimentador fallado y los alimentadores de nivel 1, y no considera los cambios de estado de los aparatos de maniobra para realizar alivio de carga o corte de carga.

D. Estrategia de evaluación de los conjuntos de configuraciones

Para la estrategia de búsqueda de los conjuntos de configuraciones a evaluar, se establecen $k+2$ niveles de solución que son:

- Nivel de solución 1: el conjunto de configuraciones a evaluar esta formado por aquellas configuraciones que consten de una op-man y transfieran toda la carga en forma radial. Sólo intervienen los aparatos de maniobra de seccionalización del alimentador fallado y los aparatos de maniobra de lazo que vinculan a los alimentadores de nivel 1 con el alimentador fallado.
- Nivel de solución 2: igual al nivel de solución 1, sólo que la cantidad de op-man permitidas es 2.
- Nivel de solución 3: igual al nivel de solución 1 y 2, pero aquí la cantidad de op-man permitidas es 3.
- Nivel de solución k : igual a los anteriores, la cantidad de op-man permitidas es k .
- Nivel de solución $k+1$: este nivel de solución involucra transferir carga de alimentadores de nivel 1 a alimentadores de nivel 2 para establecer un alivio de carga. Los aparatos de maniobra a operar son aparatos de maniobra de seccionalización del alimentador fallado y del alimentador de nivel 1 (sólo el que se requiera para transferir carga), aparatos de maniobra de lazo relacionados entre el alimentador fallado y los alimentadores de nivel 1 y el aparato de maniobra de lazo que transfiere carga del alimentador de nivel 1 al alimentador de nivel 2. Este conjunto de configuraciones, se forma adicionando los aparatos de maniobra que se abran o se cierren para efectos de la transferencia

de carga a las alternativas de los conjuntos de los niveles de solución 1, 2, ..., k .

- Nivel de solución $k+2$: este nivel de solución involucra el corte de carga. Sólo participan aparatos de maniobra de los alimentadores de nivel 1 y el alimentador fallado. Este conjunto de configuraciones, se forma adicionando los aparatos de maniobra que se abran para efectos del corte de carga, a las alternativas de los conjuntos de los niveles de solución 1, 2, ..., k .

En la estrategia establecida, la solución de restauración es buscada jerárquicamente primero en el nivel de solución 1, si no se encuentra se pasa al nivel de solución 2, y así sucesivamente hasta el nivel de solución $k+2$. Esto se representa en la figura 2.

Considerar los niveles de solución basados en la cantidad de op-man, permite tomar en cuenta objetivos importantes formulados en el planteo general del problema de restauración como son:

- Minimizar el tiempo de restauración: el algoritmo busca evaluar primero las configuraciones con la menor cantidad de op-man. Con esto se buscan las alternativas de configuración con menores tiempos de restauración asociados, para disminuir los costos de personal y medios durante la emergencia, y restaurar la carga en un menor tiempo.
- Minimizar el riesgo de falla consecuencia de la transferencia de carga: mientras menor sea el número de transferencias de carga, existe un menor riesgo de falla. Esto se debe, a que las operaciones de transferencia de carga entre alimentadores normalmente se realizan mallando la red y luego radializando para evitar las interrupciones a los clientes. La operación de mallado puede llevar a situaciones de riesgo de falla como consecuencia del estado eléctrico de los puntos de la red a mallar. También, con una menor cantidad de op-man la vida útil de los aparatos de maniobra aumenta y sus costos de operación y mantenimiento disminuyen, además de disminuir la probabilidad de falla en los aparatos de maniobra.

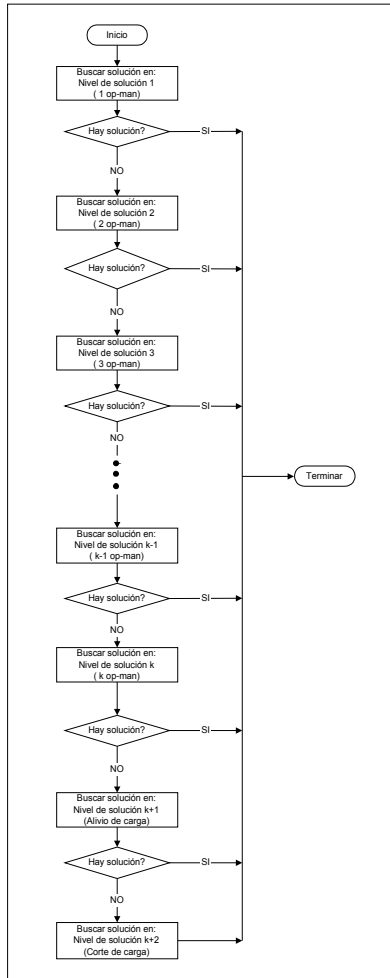


Figura 2. Algoritmo para la estrategia de evaluación de los conjuntos de configuraciones.

3. Matriz de Relación de Lazos

Dentro del total de configuraciones posibles existen alternativas que restauran toda la carga pero mullan la red, y otras que son radiales pero no restauran toda la carga. Si se realiza una búsqueda exhaustiva local para determinar el total de las posibles configuraciones y de ellas elegir sólo aquellas que restauran toda la carga en forma radial, el tiempo de computación aumenta, aspecto que no es recomendable debido a que este algoritmo debe ser aplicado en tiempo real. Para evitar esto se introduce el concepto de matriz de relación de lazos, lo cual facilita el manejo topológico necesario para determinar las configuraciones que restauran toda la carga en forma radial.

Matriz de relación de lazos (MRL): es una matriz de unos y ceros, que se construye considerando la relación que existe entre cada lazo que se pueda

formar entre los aparatos de maniobra de lazo aguas abajo de la zona fallada, y los aparatos de maniobra de seccionalización que los pueden abrir.

Los unos y ceros están dados por la siguiente condición:

- 1 → El aparato de maniobra de seccionalización abre el lazo.
- 0 → El aparato de maniobra de seccionalización no abre el lazo.

La cantidad de filas (N) de la MRL, corresponde a la cantidad total de lazos que se pueden formar con los aparatos de maniobra de lazo aguas abajo de la zona fallada, y está dada por el total de combinaciones tomadas de a dos de los aparatos de maniobra de lazo.

$$N = C_2^{LT} \quad (2)$$

Donde:

N Cantidad de filas de la matriz de relación de lazos.

LT Cantidad total de aparatos de maniobra de lazo.

C_2^{LT} Cantidad de combinaciones de LT tomadas de dos.

La cantidad de columnas (M) de la MRL, corresponde a la cantidad total de aparatos de maniobra de seccionalización del alimentador fallado aguas abajo de la zona fallada que están siendo considerados.

En la figura 3 se presenta un sistema de tres alimentadores que es utilizado para explicar la formación de la MRL.

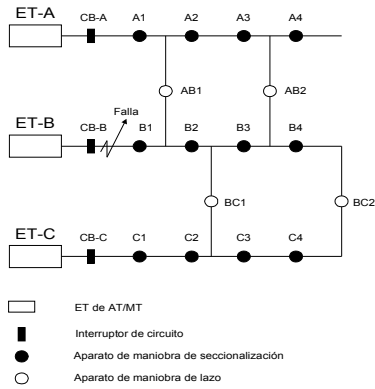


Figura 3. Sistema de distribución de tres alimentadores.

Para una falla en el alimentador B de la figura 3 entre el interruptor de circuito CB-B y el aparato de maniobra de seccionalización B1, se pueden formar seis lazos entre los aparatos de maniobra de lazo aguas abajo de la zona fallada. Estos lazos se pueden observar en la figura 4.

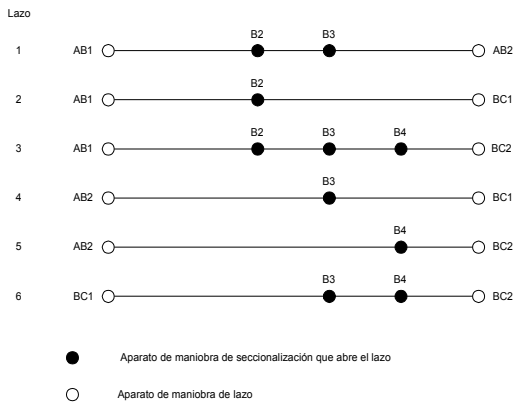


Figura 4. Lazos que se pueden formar para una falla en el alimentador B de la figura 3.

Se puede ver por ejemplo, que el lazo formado entre los aparatos de maniobra de lazo AB1 y AB2 puede

ser abierto sólo por los aparatos de maniobra de seccionalización B2 y B3, el lazo entre AB1 y BC1 se abre sólo con el aparato de maniobra de seccionalización B2, y así con el resto de los lazos formados. También se aprecia que el aparato de maniobra de seccionalización B1 no abre ningún lazo, pero en todas las alternativas de todos los niveles de solución, este aparato de maniobra de seccionalización debe ser abierto, pues es el que aísla la zona fallada de las zonas no falladas aguas abajo.

Estos lazos formados pueden ser representados a su vez mediante la MRL, la cual queda de la siguiente forma:

$$\text{MRL} = \begin{matrix} & \begin{matrix} B1 & B2 & B3 & B4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} AB1 \\ AB1 \\ AB1 \\ AB2 \\ AB2 \\ BC1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} AB2 \\ BC1 \\ BC2 \\ BC1 \\ BC2 \\ BC2 \end{matrix} \end{matrix}$$

En este caso la cantidad de filas de la MRL es 6, la cual corresponde a la cantidad de lazos que se forman. La cantidad de columnas es 4, que corresponde con la cantidad de aparatos de maniobra de seccionalización del alimentador fallado aguas abajo de la zona fallada.

Esta matriz permite disminuir el tiempo de búsqueda de las configuraciones. Esto se logra sobre la base del conocimiento de los lazos que se pueden formar y del conocimiento de cómo abrir cada lazo.

Esto lleva, a que la búsqueda de las configuraciones radiales que restauran toda la carga se limite a verificar que los lazos que se formen sean abiertos por los aparatos de maniobra de seccionalización.

4. Resultados

Para observar el desempeño de la metodología propuesta se realizó la simulación de fallas en alimentadores de la red de 290 nodos presentada en la figura 5, la cual es una porción de la red de MT de la ciudad de Mendoza, Argentina. Se calcularon los

tiempos de ejecución en los procesos principales del algoritmo de restauración desarrollado, y que utiliza para el manejo topológico de la red la metodología propuesta. Esto se presenta en la tabla 1.

Caso 1: falla en el alimentador 0408. En este caso, se observa en la tabla 1 que el tiempo total de ejecución del algoritmo fue de 8.141 segundos, mientras que el tiempo de construcción de la MRL y de determinación de las configuraciones es de 3.109 y 0.000 segundos respectivamente.

Caso 2: falla en el alimentador 0407. En este caso, se observa en la tabla 1 que el tiempo total de ejecución del algoritmo fue de 3.594 segundos, mientras que el tiempo de construcción de la MRL y de determinación de las configuraciones es de 0.547 y 0.000 segundos respectivamente.

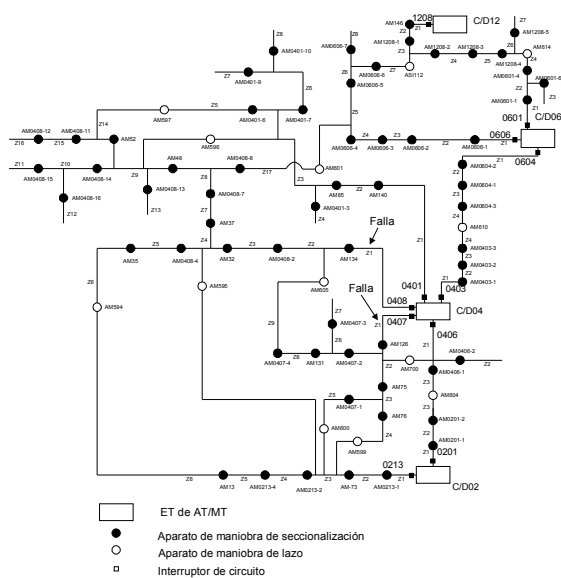


Figura 5. Red Real

Es importante destacar que en ambos casos el tiempo para determinar las configuraciones fue de 0.00 segundos, lo que indica que el tiempo de ejecución de este proceso estuvo por debajo de un milésimo de segundo. También se observa que el tiempo de construcción de la MRL es muy dependiente del alimentador fallado, y esto es comprensible ya que esta matriz depende de la cantidad de aparatos de maniobra que tenga el alimentador, y en este caso el alimentador 0408 es el que tiene mayor cantidad de aparatos de maniobra en la red presentada en la figura 5.

También se puede destacar, que la heurística implementada para disminuir el espacio de búsqueda facilitó el manejo topológico de la red al tenerse que ejecutar en ambos casos, sólo 14 flujos hasta alcanzar la solución, recordando que cada flujo se corresponde con una alternativa de configuración de restauración, la cual es obtenida mediante el cambio de estado de los aparatos de maniobra.

Otro aspecto a considerar de estos resultados, es que el tiempo de construcción de la matriz MRL puede tornarse importante, pero esto puede ser solucionado mejorando la eficiencia en la codificación del algoritmo y/o con máquinas de mayor velocidad de procesamiento. Otra alternativa, es determinar la MRL en un proceso off-line (fuera de línea), lo cual permitiría tener cargada la misma para su uso en situaciones de emergencia, esto puede contribuir a reducir sensiblemente el tiempo total de ejecución del algoritmo de restauración.

5. Conclusiones

La metodología presentada facilita sensiblemente el manejo topológico de la red de MT en situaciones de emergencia, ya que establece en forma rápida las configuraciones de restauración a ser evaluadas. Esto es importante, porque la automatización de las tareas en los centros de control de los SDEE, requiere del desarrollo de herramientas que presenten un adecuado perfil. En este caso, contar con una herramienta que permita determinar en forma rápida las configuraciones a ser evaluadas para determinar la configuración de restauración, es determinante, porque le da mayor viabilidad al algoritmo de restauración que se implemente. Esto es así, debido a que los operadores en situación de emergencia requieren de algoritmos robustos, precisos y sobre todo rápidos, ya que las soluciones tienen que ser alcanzadas en tiempo real o tiempo real extendido.

Finalmente, se puede decir que la metodología presentada es de fácil codificación e implementación, lo que la hace apropiada para distintas aplicaciones, no sólo en la operación del sistema, sino también en la etapa de planificación.

6. Trabajo Futuro

Tabla 1. Tiempos de ejecución por proceso y totales

Alimentador fallado	Tiempos parciales de cálculo en los procesos más importantes (segundos)			Tiempo total acumulado de cálculo (segundos)	
0408	Construcción de MRL	3.109		8.141	
	Determinación de las configuraciones	0.000			
	Calculo de FP	Cantidad de flujos	14		
		Cambiar topología	1.609		
		Calcular flujo	0.016		
	Evaluación de restricciones y penalización	1.625			
Actualización de la topología de la red	1.719				
0407	Construcción de MRL	0.547		3.594	
	Determinación de las configuraciones	0.000			
	Calculo de FP	Cantidad de flujos	14		
		Cambiar topología	1.453		
		Calcular flujo	0.016		
	Evaluación de restricciones y penalización	1.266			
Actualización de la topología de la red	0.266				

Debe considerarse en un futuro como ya se mencionó en el apartado de resultados, la conveniencia de calcular la Matriz de Relación de Lazos en un proceso fuera de línea, para esto se debe desarrollar una metodología que permita calcular una MRL genérica para cada SDEE, y que desde la cual se pueda inferir una MRL particular para las distintas ubicaciones de falla dentro de la red. El objetivo de esto sería el disminuir el tiempo que toma la construcción de la MRL dentro del proceso de determinación de las configuraciones de restauración.

7. Referencias Bibliográficas

- [1] Rodríguez, R. A., Vargas, A.: "Multi-criteria Decision Considering Penalty Costs for Load Restoration in MV Networks", in Proc. 2001 IEEE Porto PowerTech.
- [2] Nan Miu, K., Chiang, H., Yua, B., Darling, G.: "Fast Service Restoration For Large-Scale Distribution Systems With Priority Customers And Constraints", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 789-795, August 1998
- [3] Ćurčić, S., Özveren, C. S., Crowe, L., Lo, P. K. L.: "Electric Power Distribution Network

Restoration: A Survey Of Papers And Review Of The Restoration Problem", Electric Power System Research 35, pp. 73-86, 1995

- [4] Aoki, K., Satoh, E., Itoh, M., Kuwabara, H., Kanezachi, M.: "Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 3, No. 3, July 1988
- [5] Lee, S., Lim, S., Ahn, B.: "Service Restoration Of Primary Distribution Systems Based On Fuzzy Evaluation Of Multi-Criteria", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 1156-1163, August 1998
- [6] Popović, D. S., Ćirić, R. M.: "A Multi-Objective Algorithm for Distribution Networks Restoration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
- [7] Zhou, Q., Shirmohammadi, D., Edwin Liu, W. H.: "Distribution Feeder Reconfiguration For Service Restoration And Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, May 1997
- [8] Wu, J.S., Lee, T. E., Tzeng, Y. M., Chen, C. S.: "Enhancement Of An Object-Oriented Expert System For Contingency Load Transfer Of Distribution System", Electric Power Systems Research 42, 1997
- [9] Lin, W., Chin, H.: "Preventive And Corrective Switching For Feeder Contingencies In Distribution Systems With Fuzzy Set Algorithm", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997