

MEJORAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE RECONFIGURACIÓN DE ALIMENTADORES PRIMARIOS

Reliability improvement on distributions power systems by means of primary feeder reconfiguration

RESUMEN

La reconfiguración de alimentadores primarios es una herramienta utilizada en el planeamiento y la operación de los sistemas de distribución enfocado principalmente a la reducción de pérdidas técnicas. En este artículo, se muestra la relación entre la topología del sistema y su confiabilidad por lo que se plantea un nuevo modelo de optimización para la minimización de que busca minimizar los índices de confiabilidad. El modelo propuesto considera la confiabilidad y las restricciones técnicas tales como la cargabilidad de las líneas y la regulación de tensión caso para el cual se obtienen buenos resultados mediante la aplicación de un algoritmo evolutivo.

PALABRAS CLAVES: Reconfiguración, sistema de distribución, confiabilidad, algoritmos evolutivos.

ABSTRACT

Distribution feeder reconfiguration is an efficient tool used on planning and operation of electrical distribution systems for reducing technical losses. This article shows the relationship between system configuration and reliability; consequently it is presented a new optimization model which minimizes reliability indices. This model takes of account reliability but also technical restrictions such as maximum load flow and voltage regulation, the model shows good results using an evolutionary algorithms.

KEYWORDS: *Distribution feeder reconfiguration, reliability, evolutionary algorithms.*

1. NOMENCLATURA

i	Punto de carga i .
t	Tiempo en horas de la interrupción i -ésima.
λ_i	Tasa de falla del elemento i .
r_i	Tiempo de reparación del elemento i .
N_i	Número de usuarios del punto de carga i .
U_i	Tiempo de interrupción anual del punto de carga i .
NR	Número de nodos que no cumplen con la regulación de tensión.
β_i	Número de rutas desde el nodo i al nodo slack.
W	Factores de peso de la función objetivo.
n	Cantidad de puntos de carga.
V_i	Voltaje en el nodo i .
V_{slack}	voltaje en el nodo slack.
S_{ij}	Flujo de potencia entre el nodo i y el nodo j .
S_{ijmax}	Máximo flujo de potencia entre el nodo i y el nodo j .
I_{ij}	Flujo de corriente entre el nodo i y el nodo j .
D_i	Demanda de potencia activa y reactiva en el nodo i .

2. INTRODUCCIÓN

La confiabilidad de los sistemas de distribución se relaciona con la habilidad que tiene este para proveer un adecuado suministro de energía eléctrica, por esta razón es considerada una propiedad cualitativa más que cuantitativa. Para cuantificar la confiabilidad del sistema de distribución se puede recurrir a los índices de confiabilidad, los cuales brindan suficiente información acerca del servicio suministrado, permiten modelar y comprender el desempeño de la red eléctrica, evaluar sus componentes y servir de base para decisiones de inversión y automatización [1].

La reconfiguración de alimentadores primarios es una herramienta altamente utilizada en el planeamiento y la operación de los sistemas de distribución. Aunque convencionalmente, su uso se ha limitado a la minimización de pérdidas técnicas [2], el cambio de topología de la red de distribución afecta significativamente la confiabilidad del mismo como se demostrará en este artículo; este aspecto es especialmente importante bajo los nuevos esquemas regulatorios en donde tanto la calidad como la confiabilidad deben ser analizadas.

ALEJANDRO GARCÉS

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Profesor Auxiliar.
Programa de Ingeniería Eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira.
alejandrog@ohm.utp.edu.co

OSCAR GÓMEZ CARMONA

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Profesor Auxiliar.
Programa de Tecnología Eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
jr@ohm.utp.edu.co

ALFONSO GONZÁLEZ ARIAS

Estudiante Programa de Ingeniería Eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
alfonso@utp.edu.co

En este trabajo se propone realizar un algoritmo evolutivo de optimización (algoritmo genético) que mejore la confiabilidad del sistema de distribución mediante la reconfiguración de alimentadores primarios, es decir, encontrar la topología más conveniente para el sistema desde el punto de vista de la confiabilidad sin violar los límites operativos del sistema. Para esto, se planteará un modelo matemático de optimización que incorpore en la función objetivo la confiabilidad del sistema y en las restricciones la operación del mismo dentro de sus límites operativos. La solución se buscará mediante un proceso de descomposición que incorpora la generación de la configuración, la evaluación de confiabilidad y la evaluación de la operación del sistema mediante un flujo de carga radial.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución, se ha recurrido a diferentes métodos, entre los que se destacan [3]:

- A. La reducción de la tasa de fallos.
- B. La reducción del tiempo de afectación.
- C. La reducción de número de clientes afectados.

A. Reducción de la tasa de fallos:

La reducción de la frecuencia de las interrupciones se puede conseguir a través del mejoramiento del sistema y sus componentes. Las medidas a tomar pueden ser las siguientes:

- Mantenimiento preventivo y monitorización.
- Reposición preventiva de componentes que han alcanzado su vida útil.
- Cables aislados o semiaislados en líneas aéreas.
- Recorte de la vegetación cerca y debajo de las líneas aéreas.
- Protecciones contra la invasión de animales en instalaciones.

B. Reducción del tiempo de afectación:

El tiempo de afectación representa principalmente el tiempo necesario para restablecer el suministro en la zona afectada por la interrupción. Debido a la configuración de la red, la zona afectada por la falla se puede aislar del resto de la red, desconectando la sección que englobe esta zona. Esta medida no reduce el tiempo de afectación de la sección afectada, pero introduce una mejora substancial en tiempo para las partes de la red no afectadas directamente por la falla, sobre todo, si la operación de la reconfiguración de la red está automatizada. Además, si la reconfiguración se produce en un tiempo menor de tres minutos, la interrupción experimentada por el cliente no se considera una interrupción de larga duración. Dicha reducción se puede conseguir actuando sobre las siguientes medidas:

- Automatización de las redes.
- Reconfiguración del sistema tras el fallo.
- Sistema de localización de fallos.
- Reducción del tiempo de respuesta.

C. Reducción de número de clientes afectados:

Con la reducción de número de clientes o potencia interrumpida por cada falla se puede conseguir la disminución de todo tipo de índices. Esta reducción se puede lograr a través de las siguientes medidas:

- Reconfiguración permanente de la red.
- Incremento de los elementos de protección.
- Régimen de puesta a tierra del neutro resonante.

Como se observa en los puntos planteados anteriormente, la reconfiguración es una alternativa para mejorar la confiabilidad de un sistema, y es necesario, por lo tanto, estudiar métodos que permitan seleccionar la mejor configuración de un sistema de distribución desde el punto de vista de la confiabilidad.

3.1 Índices de confiabilidad.

Los índices de confiabilidad pretenden cuantificar la calidad del servicio en los puntos de consumo y mediante estos, valorar la confiabilidad global del sistema.

A nivel de los puntos de carga se distinguen tres índices básicos: tasa de falla (λ), número de veces que se interrumpe el servicio; tasa de reparación (r), tiempo promedio que dura cada falla e indisponibilidad anual (U).

A partir de los anteriores índices, se calculan los índices del sistema. En el orden internacional, se reconocen algunos índices de confiabilidad presentados en la IEEE, entre los más representativos y utilizados se encuentran [4]:

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index): índice de frecuencia de interrupción media del sistema, se define como la relación entre el número de interrupciones a los usuarios sobre el número total de usuarios atendidos.

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (1)$$

SAIDI (System Average Interruption Duration Index), índice de duración de interrupción media del sistema, se define como la suma de las duraciones de las interrupciones sobre el número total de usuarios atendidos.

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (2)$$

Dos técnicas de análisis se aplican con preferencia para calcular los índices de confiabilidad en los sistemas de distribución: La técnica de bloques de frecuencia y duración [5], [6] y la simulación de Montecarlo [7], [8], [9] siendo la primera la más difundida dada su facilidad de solución y su semejanza con el análisis de circuitos eléctricos.

Sin embargo, la técnica de simulación de Montecarlo es mucho más eficiente, ya que permite incorporar diferentes modelos probabilísticos de los componentes y la demanda, además posibilita la aplicación conjunta de diferentes técnicas de optimización.

3.2 Reconfiguración de alimentadores primarios

Los sistemas de distribución cuentan con interruptores y suplencias a lo largo de los alimentadores primarios, los cuales permiten modificar la topología del sistema para lograr un mejor punto de operación de acuerdo a un criterio seleccionado (pérdidas, precios de la energía, etc), considerando variables tales como:

- Niveles de tensión adecuados.
- Pérdidas mínimas.
- Capacidad de líneas y subestaciones.
- Radialidad del sistema.
- Abastecimiento de la demanda.
- Confiabilidad del suministro.

Estos cambios pueden ser realizados en tiempo real o bajo un horizonte de planeamiento de acuerdo al grado de sistematización.

Las variables o restricciones consideradas hacen que el problema de la reconfiguración sea especialmente complejo por cuanto es necesario recurrir a técnicas heurísticas y metaheurísticas para su solución.

3.3 Efecto de la reconfiguración en la confiabilidad del sistema de distribución.

Considérese el sistema mostrado en la Fig. 1 cuyos elementos (líneas de distribución) se encuentran modelados mediante tasas de fallas y reparación constantes. Se mostrará, como un cambio en la topología de la red, afecta la confiabilidad del sistema.

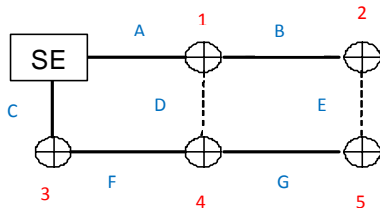


Figura 1. Caso de prueba – Topología 1

La figura anterior representa una red con una subestación (SE) que opera en forma radial, con líneas A, B, C, D, E, F, G y puntos de carga 1, 2, 3, 4 y 5. La topología inicial se representa por líneas continuas. Las tasas de fallas y los tiempos de reparación asumidos en cada una de las líneas se muestran en la tabla 1.

Línea	λ (fallas/año)	r (horas)
A	0.15	5.0
B	0.20	6.0
C	0.10	7.0
D	0.30	4.0
E	0.15	6.0
F	0.25	5.0
G	0.20	8.0

Tabla 1. Tasa de fallas y reparación.

Aplicando la técnica de bloques de frecuencia y duración, la tasa de falla promedio, el tiempo promedio de reparación y los tiempos de indisponibilidad anual en cada punto de carga son:

Punto de carga	λ (fallas/año)	r (horas)	U (horas/año)
1	0.15	5.00	0.75
2	0.35	5.57	1.95
3	0.10	7.00	0.70
4	0.35	5.57	1.95
5	0.55	6.45	3.55

Tabla 2. Índices de confiabilidad en los puntos de carga.

Si la red mostrada en la Fig. 1 cambia su topología como se muestra en la fig. 2, los resultados obtenidos son los siguientes:

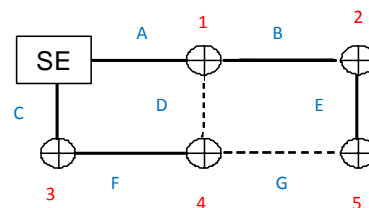


Figura 2. Caso de prueba – Topología 2

Punto de carga	λ (fallas/año)	r (horas)	U (horas/año)
1	0.15	5.00	0.75
2	0.35	5.57	1.95
3	0.10	7.00	0.70
4	0.35	5.57	1.95
5	0.50	5.70	2.85

Tabla 3. Índices de confiabilidad en los puntos de carga.

En este caso los índices de confiabilidad que cambian son los correspondientes al punto de carga 5, presentando una disminución que muestra un efecto positivo de la reconfiguración. Esta configuración fue apropiada para

disminuir los índices de confiabilidad, pero también es posible encontrar redes que tengan un efecto contrario como en el siguiente caso:

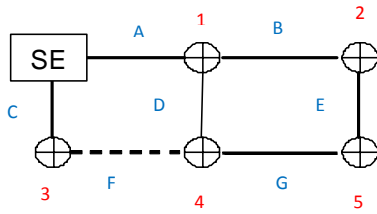


Figura 3. Caso de prueba – Topología 3

Punto de carga	λ (fallas/año)	r (horas)	U (horas/año)
1	0.15	5.00	0.75
2	0.35	5.57	1.95
3	0.10	7.00	0.70
4	0.35	5.57	1.95
5	0.65	5.46	3.55

Tabla 4. Índices de confiabilidad en los puntos de carga.

Al comparar el sistema de la Fig. 3 con el sistema de la Fig. 2, en el punto de carga 5, se observa que tanto la tasa de fallas como la indisponibilidad anual aumentaron, mientras que la tasa de reparación disminuyó, lo que permite demostrar que en un sistema se pueden encontrar topologías que pueden ser óptimas para algunos índices de confiabilidad mientras que para otros puede ser deficiente.

De lo anterior se puede concluir que de acuerdo a la configuración que presenta una red sus índices de confiabilidad pueden aumentar o disminuir.

4. MODELO MATEMÁTICO

Con el fin de mejorar la confiabilidad del sistema de distribución, a partir de la reconfiguración de sus alimentadores primarios, se propone el siguiente modelo matemático:

$$\begin{aligned}
 \min f &= W_1 \cdot SAIFI + W_2 \cdot SAIDI + W_3 \cdot NR \\
 \text{s.a.} \\
 \prod \beta_i &= 1 \\
 \sum_{j \in \sigma} S_{ij} &= D_i \\
 S_{ij} &= V_i \cdot I_{ij}^* \\
 S_{ij} &\leq S_{ij \max} \\
 V_{slack} &= 1 \text{ p.u.}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Desde el punto de vista operativo, los sistemas de distribución conservan una topología radial lo cual matemáticamente corresponde a un árbol [10], como se

representa en la restricción 1. Las restricciones 2 a 5, corresponden a las ecuaciones de flujo de carga y cargabilidad de las líneas (condiciones operativas). Los límites de tensión aunque pueden constituir un conjunto de restricciones adicionales son llevados a la función objetivo por medio del parámetro NR .

Los valores de W pueden variar para dar más o menos peso a cada uno de los objetivos, por ejemplo, si se desea minimizar exclusivamente el $SAIFI$ solo basta con definir $W_2 = 0$. Adicionalmente, estos valores permiten ajustar dimensionalmente los tres objetivos.

5. ALGORITMO DE SOLUCIÓN

En [11] se demuestra que el problema de la reconfiguración presenta explosión combinatorial lo cual lo convierte en un problema que debe ser abordado mediante técnicas de optimización combinatoriales. Adicionalmente, el cálculo de la confiabilidad y restricciones operativas dificultan el uso de técnicas exactas para su solución.

Dadas las características del problema, este es resuelto a través de tres herramientas matemáticas que se coordinan para operar como se muestra en la Fig. 4.

A. Algoritmos genéticos

Herramienta utilizada para realizar el proceso de optimización a través de sus operadores básicos:

- Generación de la población inicial
- Selección
- Cruzamiento
- Mutación

B. Flujo de carga de barrido iterativo

Herramienta utilizada para verificar las restricciones operativas. Este método facilita la ejecución del flujo de carga ya que aprovecha la radialidad del sistema y aplicando la primera y segunda ley de Kirchhoff encuentra el punto de operación. Este método se realiza en dos etapas consecutivas. En la primera etapa (barrido de corrientes) se aplica la primera ley de Kirchhoff a todos los nodos, empezando por los terminales hasta llegar a la subestación, en la segunda etapa (barrido de voltajes) se aplica la segunda ley de Kirchhoff para obtener las caídas de tensión en la red, comenzando desde la subestación hasta los nodos terminales y utilizando los datos encontrados en la primera etapa.

C. Análisis de confiabilidad

Con el fin de valorar la confiabilidad de las configuraciones propuestas por el algoritmo genético, se utilizará la metodología de frecuencia y duración. Esta metodología, ya que considera tasas de fallas y reparación constantes en los elementos, facilita el proceso de optimización y brinda

eficiencia computacional. Además en la práctica es común encontrar el modelo de los elementos mediante tasas de eventos constante, resultado de promedios aritméticos de los eventos que ocurren en el sistema, aunque un análisis más riguroso de los datos podría mostrar modelos más apropiados.

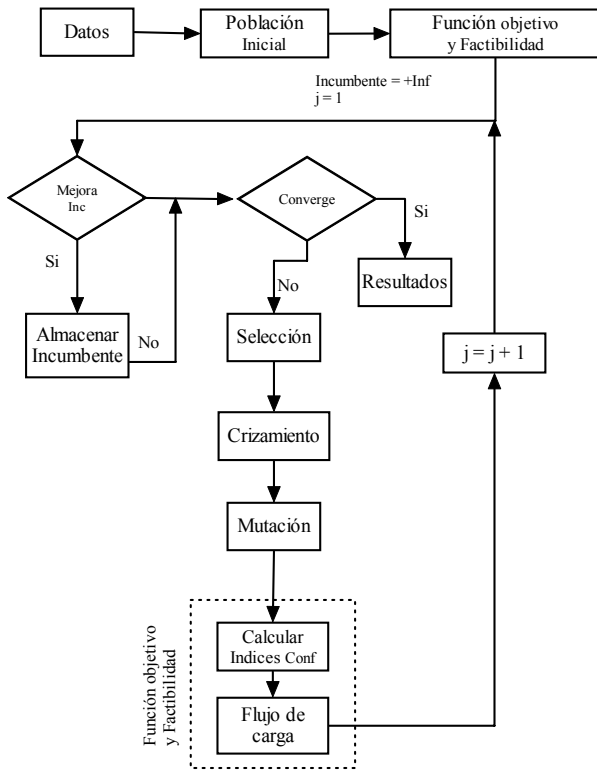


Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

6. CASOS DE PRUEBA Y RESULTADOS OBTENIDOS

Para comprobar el desempeño del método propuesto se utilizaron dos sistemas de prueba: el sistema IEEE de 33 nodos, 37 líneas y una única subestación y un sistema de 29 nodos, 45 líneas y 3 subestaciones propuesto en este trabajo.

Los datos correspondientes a la tasa de fallas (λ), el tiempo medio de reparación (r) y la indisponibilidad (U) son ficticios debido a la falta de esta información en la literatura especializada pero útiles para comprobar la efectividad del algoritmo de solución. Estos datos se encuentran disponibles en [12].

5.1 Sistema IEEE de 33 nodos

Este sistema fue presentado inicialmente en [13] para el aumento de cargabilidad y la reducción de pérdidas técnicas. Respecto al objetivo propuesto, los resultados se presentan en la tabla I.

Función Objetivo	Tiempo [s]	Iter.	SAIFI	SAIDI	NR
SAIDI	489,19	201	45,45	134,92	15
SAIFI	492,23	201	46,45	134,92	12
SAIFI+SAIDI	495,32	201	46,45	134,92	15

Tabla 5. Resultados obtenidos para el sistema IEEE de 33 nodos

Al presentar una única subestación y circuitos primarios relativamente extensos, el sistema no puede cumplir totalmente con la regulación de tensión (NR), esto puede ser solucionado mediante la ubicación de condensadores o reguladores de tensión sin afectar los resultados obtenidos en cuanto a confiabilidad.

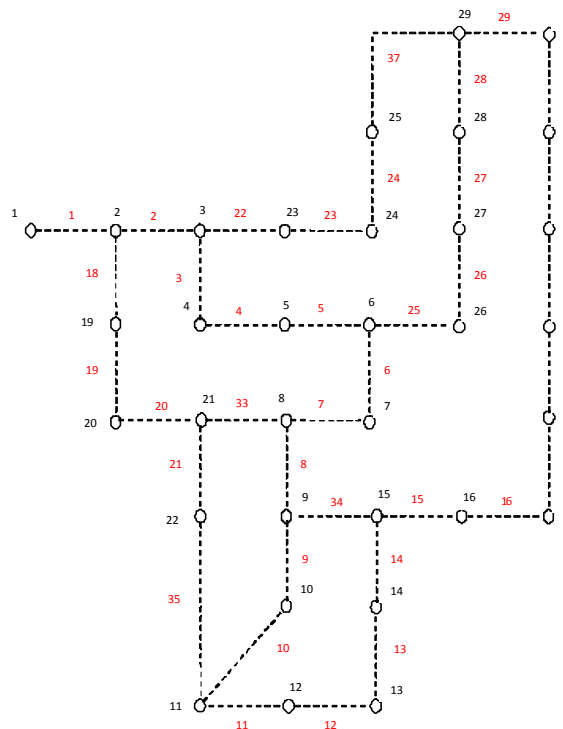


Figura 5. Caso de prueba – Sistema IEEE 33 nodos

5.2 Sistema propuesto de 29 nodos, 45 líneas y 3 subestaciones.

Los resultados obtenidos en este sistema se muestran en la tabla 6.

Función Objetivo	Tiempo [s]	Iter.	SAIFI	SAIDI	NR
SAIDI	79,75	75	11,00	31,975	0
SAIFI	173,62	164	10,55	33,30	0
SAIFI+SAIDI	64,61	59	10,7	32,15	0

Tabla 6. Resultados obtenidos para el sistema de 29 nodos

La topología encontrada garantiza la independencia de cada subestación lo cual muestra la robustez de la herramienta para enfrentarse a sistemas de distribución complejos.

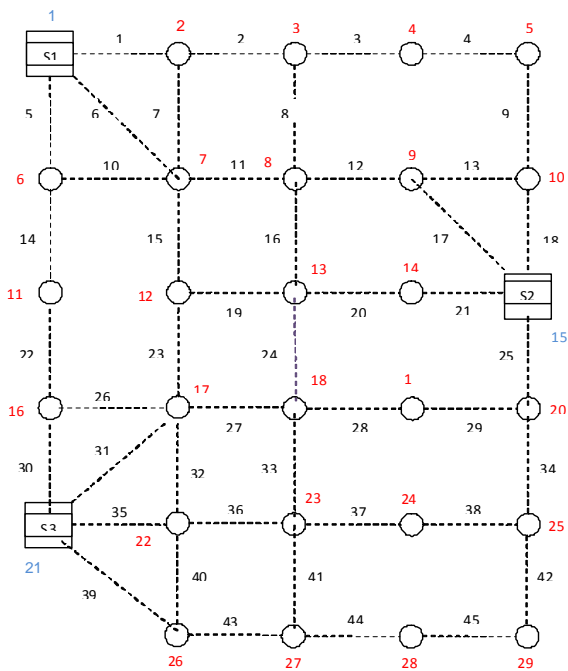


Figura 6. Caso de prueba – Sistema 29 nodos 3 subestaciones.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un algoritmo para la minimización de los índices de confiabilidad en el sistema de distribución, utilizando reconfiguración de circuitos primarios, planteando una función objetivo dirigida solamente a mejorar la confiabilidad del sistema.

La topología del sistema afecta significativamente la confiabilidad de los puntos de carga y por lo tanto del sistema, siendo posible reconfigurar para mejorar la confiabilidad global del sistema o de puntos específicos de carga.

La reconfiguración de alimentadores primarios se muestra como una herramienta eficiente y económica (operativamente) para mejorar la confiabilidad del sistema de distribución.

La confiabilidad del sistema y las restricciones técnicas operativas, deben ser un objetivo conjunto de tal manera que una mejora en el primero no afecte de forma negativa el segundo.

La metodología de solución, debe considerar herramientas para la valoración operativa del sistema (flujo de carga radial), valoración de confiabilidad (frecuencia y duración) y optimización (algoritmo genético). Esto hace que no sea posible recurrir a técnicas de optimización exactas.

La minimización conjunta de los índices SAIFI+SAIDI muestra un resultado que tiene en cuenta ambos índices

de forma global por lo que puede ser una alternativa más útil frente a la minimización independiente de cada índice.

Se propone como futuros trabajos, implementar la metodología propuesta en un modelo trifásico que represente adecuadamente el sistema de distribución, implementar otras técnicas de optimización como simulated annealing o búsqueda tabú y finalmente usar otras técnicas para la valoración de la confiabilidad.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Baeza, R.; Hernández, J. y Rodríguez, J. "Evaluación de confiabilidad de sistemas de distribución eléctrica en desregulación". Revista facultad de ingeniería, U.T.A (Chile), Vol. 11, número 1, pp. 33 – 39.
- [2] H. Yin S. Civalar, J.J Grainger and S.S H. Lee. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction". IEEE Trans. Power Delivery 3(3): 1217-1223. Jul 1988.
- [3] Sumper, A., Sudriá, A., Ramírez, R., Villafáfila, R., Chindris Mircea. "Índices de continuidad en redes y su mejora". En: congreso Hispano Luso. (9a: Chile).
- [4] IEEE Power engineering society. "IEEE Guide for power distribution reliability indices". IEEE Standard 1366. 2003.
- [5] Billinton R, Allan R. "Reliability evaluation of engineering systems", Plenum Publishing, 1983.
- [6] IEEE, standard 493, "Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Systems, IEEE, 1990.
- [7] Billinton R, Allan R, "Reliability evaluation of power systems", second edition, Plenum Press, 1996.
- [8] Zapata C. J, "Confiabilidad de sistemas Eléctricos", Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.
- [9] Zapata C. J, Piñeros L. C, Castaño D. A, "El método de simulación de Montecarlo en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica", Revista Scientia et Técnica No. 24, 2004.
- [10] Garcés Ruiz Alejandro, Galvis Manso Juan Carlos, Gallego Rendón Ramón Alfonso. "Solución al problema de balance de fases y reconfiguración de alimentadores primarios bajo un modelamiento trifásico usando Simulated Annealing". Revista Scientia et Technica Año XII, No 30, Mayo de 2006.
- [11] Gunther R. Raidl, Dryant A. Julstrom. "Edge sets: an effective evolutionary coding of spanning trees". IEEE Transactions on evolutionary computation. Vol. 7, No. 3, June 2003
- [12] González Arias, Alfonso. "Mejoramiento de la confiabilidad en sistemas de distribución mediante reconfiguración de circuitos primarios". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electricista. Universidad Tecnológica de Pereira. www.utp.edu.co
- [13] B. Venkatesh, Rakesh Ranjan, and H. B. Gooi. "Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability". IEEE Transactions on power systems Vol. 19, No. 1, february 2004