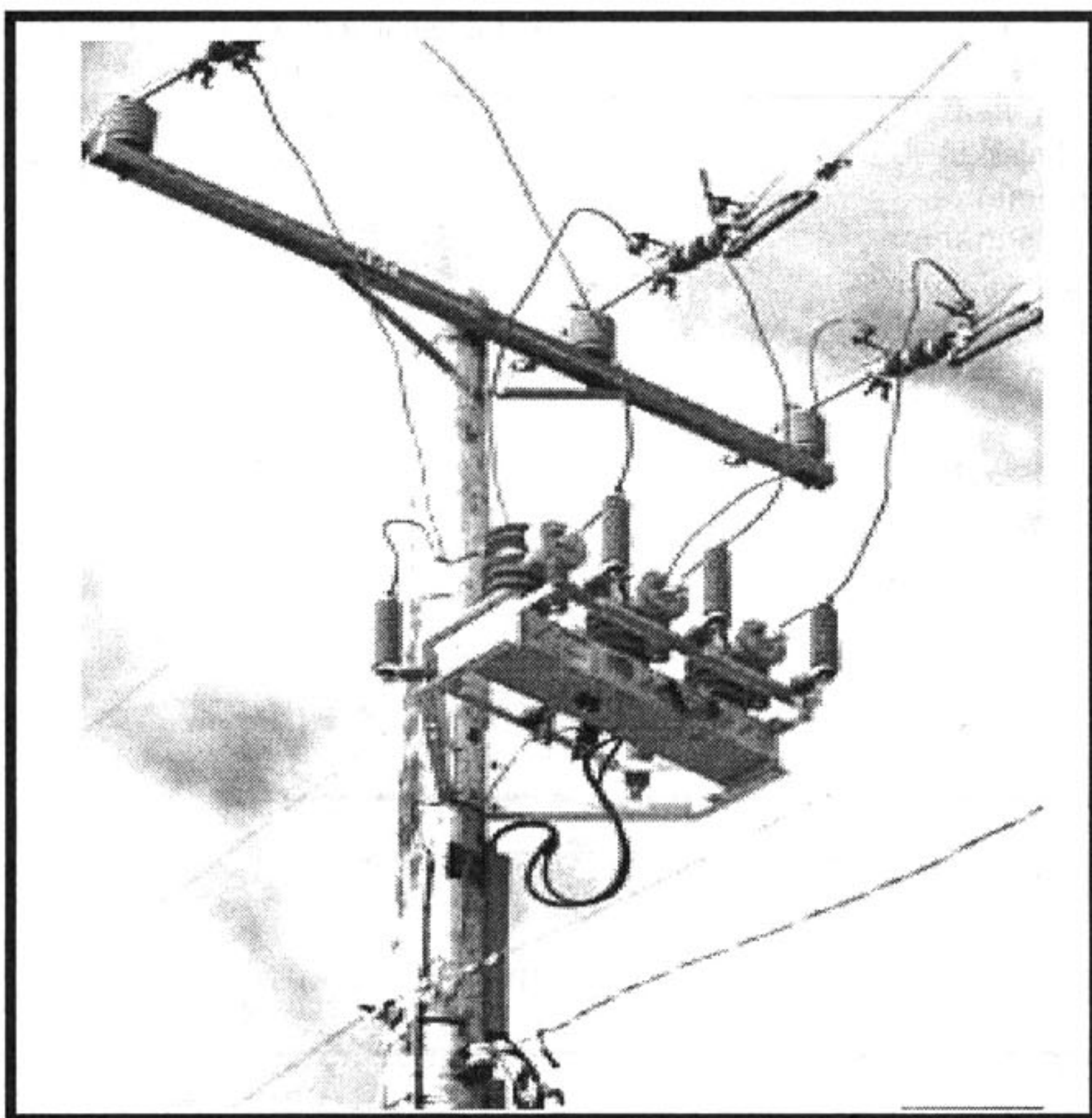


Estado del arte en reconfiguración de sistemas de distribución



RESUMEN

En este artículo se establece la complejidad del problema de reconfiguración en Sistemas de Distribución y las características que justifican que el tema continúe siendo un área de investigación a nivel mundial. Luego se describen los diferentes métodos de optimización utilizados en su solución y se realiza una tabla con los diferentes tópicos que caracterizan el problema. Finalmente, se presentan las ventajas y desventajas de las diferentes técnicas en la solución de la optimización de pérdidas en sistemas de distribución.

PALABRAS CLAVES

Estado del arte, Reconfiguración de Redes, Reducción de Pérdidas de Potencia.

ABSTRACT

In this paper the complexity of the reconfiguration problem in Distribution Systems is established and the characteristics that justify that the topic continues being a research area worldwide are established. Then the different methods of optimization used in the solution of this problem are described and a chart with the different topics that characterize the problem is proposed. Finally the

□ **Rafael Granobles,**
Ingeniero Electricista
Asistente de investigación y
Docencia
Universidad del Valle.

□ **Gladys Caicedo, M.Sc.**
Ingeniera Electricista
Profesora Titular
Universidad del Valle.

□ **Juan Francisco Díaz, Ph.D.**
Ingeniero de Sistemas
Profesor Titular
Universidad del Valle.

□ **Juan Manuel Gers, Ph.D.**
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Universidad del Valle.

*Grupo de Investigación Gralta, Grupo de
Investigación Avispa y Grupo de Estudios
Doctorales Gedi*

* La Revista recibió este artículo en Mayo de 2.001

advantages and disadvantages of the different techniques are presented in the solution of the optimization of losses in distribution systems.

KEYWORDS

Art of state, Network reconfiguration, Losses reduction, Distribution system.

1. INTRODUCCIÓN

El actual esquema competitivo en el sector eléctrico exige de las empresas la implementación de programas para mejorar su desempeño en todas las áreas.

En lo que se refiere a los sistemas de distribución, la nueva reglamentación se basa en los principios relacionados con la eficiencia y la calidad del servicio. Por esta razón, las empresas distribuidoras de energía eléctrica requieren operar los sistemas con criterios técnicos de confiabilidad y seguridad apropiados para garantizar la calidad del servicio a los clientes, cumpliendo con las normas técnicas exigidas y mínimo tiempo de interrupción del servicio.

Para cumplir con estas exigencias y garantizar la competitividad de las empresas se requiere invertir en automatizar funciones en los sistemas de distribución, por medio de hardware y software especializado para mejorar aspectos como restauración del servicio, reducción de pérdidas y monitoreo de armónicos, entre otros.

En 1970 la automatización de sistemas de distribución empezó a desarrollarse como área de investigación. Inicialmente el enfoque se orientó al hardware, principalmente en los temas de esquemas de lectura de medida automática, control y monitoreo de dispositivos de la red y sistemas de comunicaciones. Cuando el desarrollo del hardware se consolidó, las aplicaciones de software empezaron a surgir entre ellas, las de planeamiento y diseño de redes, gestión de carga en transformadores y métodos de reducción de pérdidas. Cada día, la automatización de la distribución está siendo más utilizada por razones de reducción de costos, confiabilidad y mejoramiento del servicio. Es decir, se ha vuelto una necesidad económica.

Con el fin de llevar a cabo la implementación de estas funciones de automatización se requieren-desde el punto de vista del hardware-equipos de:

- Flexibilización con mando remoto
- Comunicación
- Adquisición de datos

- Protección flexible
- Cómputo

Desde el punto de vista de los requerimientos del software, éste puede estar conformado por una amplia cantidad de aplicaciones que en conjunto se conocen como DMS (Distribution Management System). Las más comunes son:

1. Análisis de flujo de carga y cortocircuito
2. Control de voltaje y potencia reactiva en alimentadores
3. Reconfiguración de alimentadores o circuitos de distribución
4. Restauración de alimentadores
5. Monitoreo de armónicos
6. Restablecimiento de servicio
7. Gestión de carga en transformadores (TLM)
8. Gestión de carga de los consumidores (Load Side Management)
9. Gestión de llamadas para reportar fallas en el servicio (Trouble Call Management)
10. Lectura remota de contadores

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La reconfiguración de alimentadores es una función que permite reducir pérdidas y mejorar la calidad del servicio alterando la estructura topológica de la red y puede ser ejecutadas a través de switches manuales o con mando remoto.

La concepción de esta función fue realizada por Merlin y Back en 1975 [1] y actualmente se utiliza como una herramienta de planeación (simulación) o de control en tiempo real (operación). En planeación se utiliza para minimizar los costos de construcción y ubicación óptima de los «switches». Cuando se utiliza en tiempo real se emplea para operar el sistema con mínimas pérdidas, mejorar la calidad del servicio y garantizar la seguridad de los equipos.

La importancia de la implementación de la función de reconfiguración está basada en la reducción de pérdidas. Se estima que las pérdidas de un sistema eléctrico no deben ser mayores del 10% e idealmente debe estar entre 3 y 6%. Sin embargo este objetivo raramente se cumple hasta en los países desarrollados. En los países en vía de desarrollo el porcentaje de pérdidas es mayor al 20%, razón por la cual actualmente las empresas del sector eléctrico están interesadas en disminuir este índice.

Para la disminución de las pérdidas existen diferentes métodos los cuales se comparan en la Tabla 1.

MÉTODO DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS	BENEFICIO / COSTO
Ubicación de condensadores	2 a 8
Cambio de conductores	0.6 a 7
Elevación de los niveles de tensión de servicio	1.5 a 3
Reconfiguración	Mayor de 13

Tabla 1. Relación beneficio / costo de diferentes técnicas de reducción de pérdidas.

El problema de reconfiguración consiste en optimizar una o varias funciones objetivo sujeto a restricciones. Debido al tamaño de la red y a la gran cantidad de opciones de «switcheo», si este problema se ha clasificado como un problema complejo de decisión con las siguientes características: optimización no lineal, objetivo múltiple, sujeto a restricciones y combinatorio de gran escala.

Para la solución del problema se requieren algoritmos efectivos y eficientes que permitan buenos resultados en grandes sistemas.

Para cumplir con estos requisitos la investigación en reconfiguración está orientada a los siguientes temas:

- Técnicas de búsqueda rápida que eliminen opciones de switcheo no factibles.
- Utilización de técnicas computacionales avanzadas para obtener la solución óptima.
- Implementación de flujos de carga radial que permitan rápidamente chequear las restricciones operativas.
- Modelos de los diferentes tipos de carga que permitan una buena aproximación al comportamiento real.

3. ESTADO DEL ARTE

Varios métodos han sido propuestos para solucionar el problema descrito en tiempos aceptables. Cada método tiene sus diferentes ventajas y desventajas. En general los métodos para la reconfiguración de redes de distribución pueden ser clasificados como se muestra en la Figura 1.

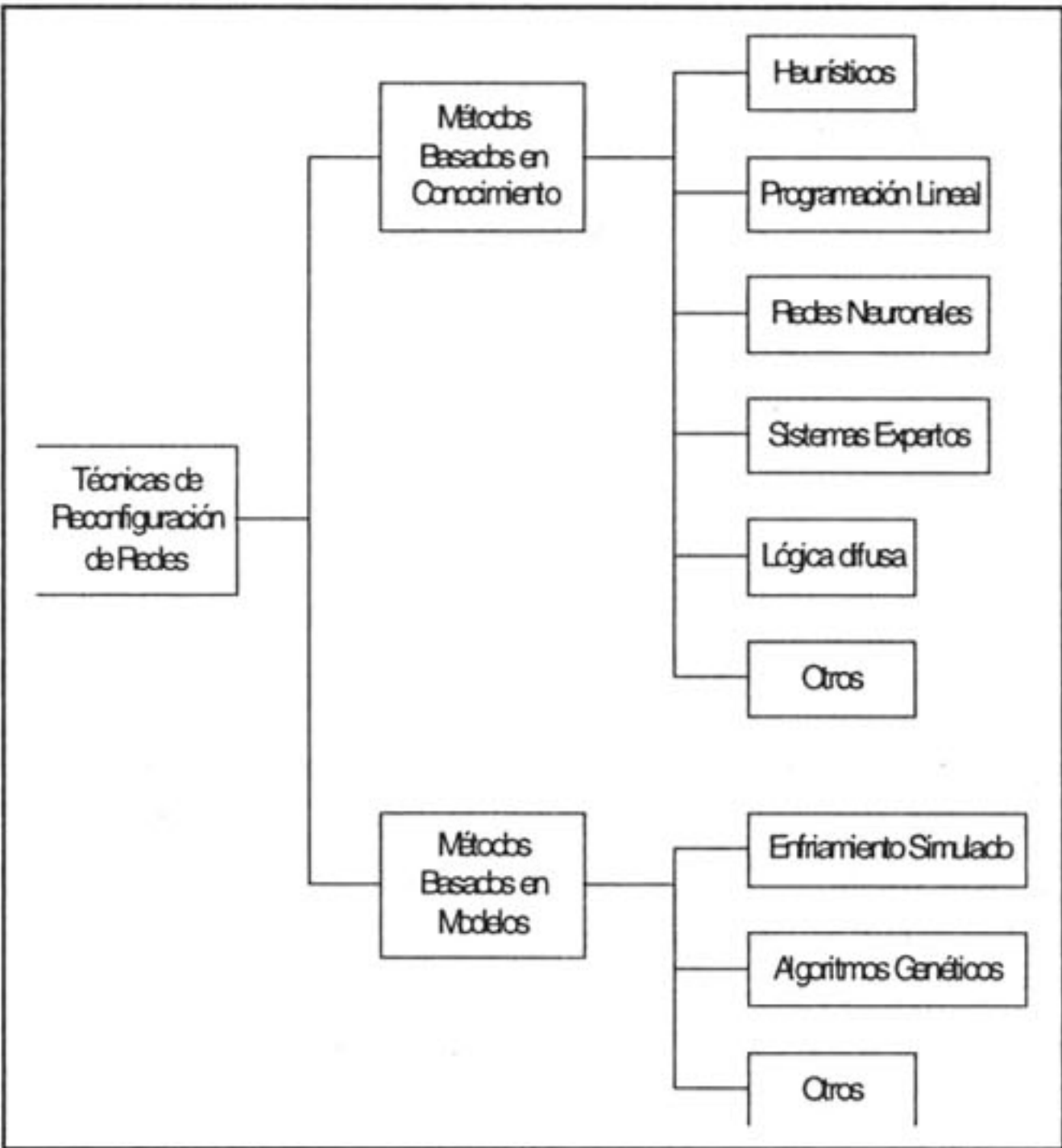


Figura 1. Clasificación de las Técnicas de Reconfiguración de Redes

Los métodos basados en el conocimiento se fundamentan en la experiencia de los operadores sobre las maniobras del sistema. Con base en estos conocimientos se han diseñado varios algoritmos que facilitan la búsqueda de la nueva configuración de la red de distribución, tratando de obtener una opción cercana a la óptima. Dentro de esta categoría se encuentran los métodos más estudiados que son los heurísticos y que además se utilizan en combinación con otros métodos para encontrar mejores respuestas permitiendo de esta manera agilizar la búsqueda. Otra técnica empleada es la programación lineal la cual ha sido utilizada en planeación, para reducir los costos de la expansión del sistema involucrando las pérdidas de potencia. Recientemente técnicas como las de Sistemas Expertos (SE), Lógica Difusa (FL) y Redes Neuronales (ANN) han sido también aplicadas para solucionar el problema de la reconfiguración de redes. Estas técnicas han sido implementadas con reglas heurísticas para solucionar el problema con menos carga computacional.

La segunda categoría corresponde a los métodos basados en técnicas evolutivas. Se basa en la imitación del comportamiento de procesos físicos y biológicos que existen en la naturaleza, los cuales tienen como característica importante la carencia de una formulación matemática rigurosa que permita establecer con certeza su comportamiento en cada situación. Como ejemplo de técnicas en esta categoría están la técnica de algoritmos genéticos y de enfriamiento simulado. Estas técnicas parten de una solución y la mejoran. Los algoritmos genéticos (GA) entregan una solución óptima

que permiten mayor reducción de pérdidas. Los GA buscan soluciones basados en mecanismos de selección y en la genética natural. Estos combinan la naturaleza adaptativa de la genética natural con la optimización funcional.

Otra técnica que permite encontrar una solución más aproximada al óptimo global es el método de enfriamiento simulado. Este método resuelve el problema de optimización por simulación del proceso de enfriamiento del metal. En esta técnica se define un parámetro llamado temperatura el cual tiene las mismas dimensiones que el costo de la función objetivo.

A continuación se describe en forma más detallada cada técnica.

3.1 Método Basado en conocimiento

3.1.1 Técnicas Heurísticas

Las técnicas heurísticas han sido propuestas para encontrar soluciones cercanas a la óptima con tiempos de cómputo rápidos. Estos métodos permiten encontrar un óptimo local y no necesariamente un óptimo global. En la técnicas heurísticas los «switches» se clasifican en dos tipos: los de seccionamiento que son «switches» normalmente cerrados que se abren y los de frontera que son switches normalmente abiertos que separan un circuito de otro. Existen dos métodos de realizar la búsqueda. El primero, el método planteado por Merlyn y Back [1] y posteriormente modificado por Shirmohammadi et al [4], consiste en cerrar todos los «switches» de frontera hasta obtener una red enmallada y a partir de un flujo de carga óptimo comenzar abrir «switches» de seccionamiento, hasta obtener nuevamente una red radial. En este algoritmo se utiliza la regla heurística de abrir la rama con el menor flujo de corriente para obtener una mayor reducción de pérdidas. El segundo, es el método de Civanlar et al [2] y posteriormente mejorado por Baran y Wu [3], que se basa en el intercambio de ramas, manteniendo la radialidad del sistema. Consiste en cerrar un switch de frontera y buscar el «switch» de seccionamiento que debe abrirse. Esta búsqueda se realiza mediante dos reglas heurísticas: (1) cuando se considera la apertura de un switch de frontera es necesario transferir la carga desde el lado con mayor caída de tensión al lado con la caída de tensión más baja, (2) sólo es posible una reducción de pérdidas si existe una sustancial caída de tensión a través del «switch» de frontera. Mediante este procedimiento se escogen las opciones que reducen pérdidas las cuales se calculan a través de una expresión matemática.

De acuerdo con el método empleado se realiza la búsqueda seleccionando la opción de mayor reducción de pérdidas y repitiendo el procedimiento hasta no obtener más opciones que reduzcan pérdidas. Luego,

a las opciones seleccionadas se verifican las restricciones operativas mediante un flujo de carga para verificar que no exista violación. La opción seleccionada será la que más pérdidas reduzca y no viole las restricciones.

3.1.2 Técnicas de Programación Lineal

El método de programación lineal se utiliza para planear la operación y expansión de los sistemas de distribución. Su objetivo fundamental es reducir los costos de capital para la construcción de un sistema nuevo o la expansión de uno existente. La función objetivo que se trabaja es la reducción de costos, que es una función lineal, pero que es una reducción indirecta de las pérdidas.

La programación lineal es una técnica de optimización matemática desarrollada por George Dantzing en 1947 [8]. El problema se formula como la optimización de una función objetivo, sujeta a un conjunto de restricciones que no son de tipo operativo. Por lo tanto no se requiere la utilización de un flujo de carga.

La reconfiguración de los sistemas de distribución se expresa mejor dentro de la programación lineal como un problema de transporte. La función objetivo es el costo total de llevar la potencia suministrada de una fuente a cada uno de los puntos de carga del sistema. Esta función está sujeta a las siguientes restricciones: la potencia suministrada a cada una de las cargas debe ser menor o igual a la potencia suministrada por la fuente, y la potencia suministrada a cada una de las cargas debe ser igual a la potencia demandada. Para solucionar el problema del transporte se utiliza una tabla típica que ayuda al procesamiento de la información y a visualizar mejor el comportamiento de las variables de los resultados obtenidos para cada una de las soluciones factibles que la técnica va arrojando. Este es un procedimiento matemático.

Por ser los sistemas de distribución constituidos por redes radiales, el proceso matemático para la solución se facilita mucho ya que ningún destino va a tener más de un solo proveedor o fuente. Con el fin de obtener mayor precisión en el factor de costos, la función de pérdidas que es no lineal, se linealiza por el método de linealización por partes que tiene mejor precisión cuanto mayor sea la carga de los usuarios pero que requiere también un mayor esfuerzo computacional.

3.1.3 Técnicas utilizando Lógica Difusa

Esta técnica tiene importancia en el direccionamiento de la búsqueda y se utiliza combinada con los métodos heurísticos. Para una búsqueda más eficiente este método define unos coeficientes que cuantifican las reglas heurísticas y permiten orientar la búsqueda. Esta técnica parte de la red enmallada y las decisiones se toman para retornar a una red radial con menores

pérdidas que las iniciales [20]. Para ello se definen tres índices calculados a partir de un flujo de carga de la red enmallada y los parámetros de la línea. Las decisiones de apertura se dan en los tramos donde las corrientes son más bajas, lo cual sucederá donde exista poca diferencia de tensión entre los nodos y la impedancia sea grande. Con los criterios anteriores se utilizan los siguientes índices:

- Índice de tensión: las líneas con alto índice de tensión son las que transportan menos corriente y son mejores candidatas a ser abiertas.
- Índice óhmico: Este índice es proporcional al valor de la resistencia y la admitancia. Valores bajos de este índice implican bajas pérdidas y por lo tanto mayor probabilidad de ser abierto el interruptor.
- Factor de peso: Es un valor que se asigna a las ramas de un lazo. Cuanto más distante este la rama del enlace inicial, el factor de peso es menor y por lo tanto, las ramas más cercanas al enlace tienen más probabilidad de ser seleccionadas.
- Índice de decisión: Este índice es el que toma la decisión de apertura de las ramas y tiene en cuenta los índices anteriores. Las ramas a ser abiertas son las que mayor valor de índice poseen.

Estos índices son calculados para cada malla formada en el sistema. A partir de ellos para cada malla se selecciona el «switch» que se debe abrir para retornar a la configuración radial. El procedimiento de apertura se inicia desde las mallas más cercanas a la fuente y se chequean las restricciones con un flujo de carga. Si las restricciones son violadas entonces se selecciona el siguiente switch con el mayor factor de decisión siguiente hasta que las restricciones no sean violadas.

3.1.4 Técnica utilizando Sistemas Expertos

Este método está basado en el conocimiento del operador de la red [29]. Para el caso de la reconfiguración, esta técnica se ha utilizado como apoyo en la toma de decisiones del operador y no para la toma de decisiones en forma autónoma.

A partir de la experiencia del operador se extraen unas reglas sobre las maniobras tendientes a reducir las pérdidas en el sistema, las cuales se suscriben solo entre dos alimentadores. Con todas las reglas se crea la base de conocimiento del sistema.

En este método no se utiliza el flujo de carga para verificar restricciones sino que se utiliza el sistema SCADA para tener información de las variables de voltaje y corriente. Si al ejecutar una maniobra el operador observa que los límites de las variables se

han violado, deshace la maniobra y de acuerdo con la base de conocimiento procede a realizar la siguiente maniobra.

3.1.5 Técnica utilizando Redes Neuronales:

Esta técnica se ha utilizado en el problema de reconfiguración seleccionando estructuras definidas de redes neuronales. En los artículos estudiados [30] y [31], se mencionan la red de Hopfield y perceptron multi-Layer.

Partiendo de una estructura de red, ésta se adiestra con ejemplos que se encuentran dentro de algoritmos de aprendizaje, los cuales permiten encontrar los factores de peso de interconexión de las neuronas que luego se utilizarán para evaluar las posibles soluciones de reconfiguración.

En este método no se utiliza el flujo de carga para verificar las restricciones debido a que no se modelan las restricciones de tipo operativo. Por esta razón, la solución entrega la configuración óptima de los switches para minimizar pérdidas pero no necesariamente puede ser implementada.

Esta técnica se ha utilizado para reducción de pérdidas de potencia y no garantiza un óptimo global. La formulación del modelo computacional se basa en las leyes de Kirchhoff, las cuales son válidas únicamente para el ejemplo realizado.

3.2 Métodos Basados en Técnicas Evolutivas

3.2.1 Técnica de Enfriamiento Simulado

Está técnica comienza por evaluar las pérdidas del sistema inicial luego genera aleatoriamente una configuración la cual debe cumplir con las restricciones de tipo operativo [14]. Esta validación se realiza a través de un flujo de carga. Para esta configuración se evalúa la función objetivo y se aplica el criterio de aceptación que en algunos casos es el de Boltzmann el cual consiste en que a partir de la variación de pérdidas y la temperatura se calcula un índice de probabilidad, que se compara con uno generado aleatoriamente de 0 a 1. Si el índice calculado es mayor que el generado se acepta la configuración propuesta y se toma como la configuración inicial y se generan nuevas configuraciones hasta que el parámetro de control que es la temperatura, detenga el proceso. Si por el contrario el índice calculado es menor, se regresa a la configuración previa y el proceso se repite hasta que se cumpla el criterio de parada.

3.2.2 Técnica de Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos fueron propuestos en 1975 por Holland, en la Universidad de Michigan [18] y [19].

Estos se basan en los mecanismos de selección y genética natural. El procedimiento de optimización se inicia generando un conjunto de soluciones que se denominan padres, las cuales deben cumplir con las restricciones de tipo operativo. A esta etapa se le conoce como etapa de generación. La segunda etapa consiste en evaluar la función objetivo de cada una de las configuraciones propuestas, por ésto se conoce como etapa de evaluación.

A partir de las evaluaciones se generan copias idénticas de los padres que tienen una reducción mayor de pérdidas ésto con el fin de garantizar que los individuos más aptos tengan mayores posibilidades en las etapas siguientes. Esta etapa se denomina de reproducción. Con las nuevas copias obtenidas se generan nuevas soluciones que se denominan “hijos”, a las cuales se

les debe verificar las restricciones operativas; a esta etapa se le denomina recombinación. Ocasionalmente se modifica una de las soluciones para evitar estancamiento en la evolución; a esta etapa se le denomina mutación. El proceso se detiene cuando transcurrido un número definido de generaciones, no se obtienen mejores individuos. A veces el proceso es detenido si no hay mejoras, así no se hayan completado las generaciones preestablecidas.

4. ANÁLISIS CRONOLÓGICO DE LOS MÉTODOS DE RECONFIGURACIÓN

En la Tabla 2 se hace un resumen de los métodos computacionales utilizados en la reconfiguración de yredes de distribución en orden cronológico. Además se muestra el desarrollo del tema desde el punto de vista de métodos computacionales. La Tabla 2 describe

Ref No.	Año	Método Búsqueda	Función Objetivo	Tipo Restricción	Tipo Flujo Carga	Aplicación	Modelo Carga	Tipo Sw.	Curva Carga	Tipo Sistema	Sistema
1	75	HE	MPP	RA	LVK	PN, OP	PC	-	No	SR	BA
24	80	HE	BC	CA	-	OP	PC	TE	No	SP	BA
2	88	HE	MPP	RA, VM	FCR	PN, TR	PC	TE	No	SR	BA
29	88	SE	MPP, RES	RA	FCR	OP, PN	PC	-	No	SR	BA
3	89	HE	MPP, BC	VM, CM, CON	FCRS	OP	PC	TE	No	SH	BA
4	89	HE	MPP	RA, CA, CM	FCOP	PN, OP	PC	-	No	EJ	BA
5	90	HE	MPP, BC	CM, VM, LT	FCR	OP	PC	-	No	SH	BA
6	90	AS	BC, MPP	VM, CM, NOS	FCR	OP	PC	-	No	SR	BA
16	90	PL	MPP	VM, CM, RA	FCR	OP, PN	-	-	No	SR	BA
8	91	PL + HE	CTO, MPP	VM, CM	FCR	OP, PN	DI	TE	Si	EJ, SR	BA
9	91	HE	MPP	VM	FCR, FCOP	ANL	IC	TE	No	SH	BA
14	91	AS	MPP	VM, CM, CA	FCR	PN	IC, DI	-	No	EJ, SR	BA
19	92	AG	MPP	VM, CM, CA	FCR	PN	DI, IC	-	No	SR	BA
22	92	PL	MPP, CTO	CM, CA	FAC	OP	PC	-	No	SP	BA+DB
25	92	HE	RES	VM, CM	FCOP	OP	PC	-	No	EJ	BA
30	93	RN	MPP	RA	FCR	PN	PC	-	No	EJ	BA
31	93	RN	MPP	VM, CM	FCR	PN	PC	-	No	EJ	BA
10	95	HE	MPE	VM, CM	FCR, FCO	ANL	IC, PC, ZC, MX	-	Si	SR	BA
18	95	AG	MPP, BC	VM, CM, CA	FCR	PN	PC	-	No	SH	BA
34	95	HE	MPP	VM, CM	FCR	OP	PC	-	No	SH	BA
11	96	HE	MPP	RA, VM	FCR	TR	PC	TE	No	EJ	DB
12	96	HE	MPP, BC	VM, CM, CA, NOS	FCR	OP, PN	PC	TE	No	SP	DB
26	96	HE + PL	MPP	RA, VM, CM	FCOP	OP	PC	-	No	SR	BA
27	96	HE	MPP, BC	VM, CM, CA	FCOP	OP	PC	-	No	EJ	BA
13	97	HE	MPE	CM	FCR	OP, PN	PC, IC, ZC	TE	Si	SP	DB
32	97	RN	MPP	VM, CM, CON	FCRS	OP, TR	PC	-	No	EJ	BA
21	97	AG + FL	MPP	VM, CM, LT	FCR	PN	PC	-	No	EJ	BA
23	97	FL + HE	RES, BC	RA, CA	FAC	OP	PC	TE	No	-	BA
28	97	HE	CTO	CA, CM, VM	FCOP	PN	PC	-	No	EJ, SR	BA
20	98	FL + HE	MPP, RES	VM, CM	FAC	OP, PN	PC	-	No	EJ, SR	BA
33	98	HE	MPP	VM	FCR	OP	PC	-	No	EJ, SR	BA
17	99	AS + HE	MPP, RES	VM, CM, NOS	FCR	PN	-	-	No	SH	BA
34	00	HE	MPE	CM, CA	FCR	OP	PC	-	Si	EJ, SR	BA

Tabla 2. Tabla cronológica de los diferentes métodos de reconfiguración de redes



las diferentes metodologías descritas en la sección anterior hace un cuadro comparativo con los siguientes ítems:

- Año de publicación
- Tipo de restricciones que maneja
- Modelos de carga empleados
- Tipo de «switches». Si utiliza la curva de carga
- Función objetivo a optimizar
- Tipo de aplicación: operación o planeación
- Tipo de sistema con que se trabaja
- Sistema balanceado o desbalanceado
- Tipos de flujo de carga que se utilizan
- Método de búsqueda

A continuación se describe la nomenclatura utilizada:

- Restricciones	- Tipo de carga
RA: Radialidad	DI: Distribuida
VM: Voltaje mínimo	PC: Potencia constante
CM: Corriente mínima	IC: Corriente constante
CA: Traslado de Carga	ZC: Impedancia constante
CON: Confiabilidad	
LT: Límite térmico	
NOS: No. Oper. «switcheo»	- Tipo flujo de carga
	FCOP: Flujo carga óptimo patrón
- Tipo «switch»	FAC: Flujo de carga AC
MN: Manual	FCR: Flujo de carga radial
TE: Telecomandado	FCRS: Flujo carga radial simplificado
- Método de búsqueda	- Función objetivo
HE: Heurístico	MPP: Minimizar pérdidas potencia
PL: Programación lineal	BC: Alivio de sobrecarga
SE: Sistemas expertos	MNO: Min. operaciones switcheo
RN: Redes neuronales	CTO: Costos
FL: Lógica difusa	RES: Restauración de servicio
AG: Algoritmos genéticos	MPE: Minimizar pérdidas energía
AS: Enfriamiento simulado	
	- Tipo de sistema utilizado
- Aplicación	EJ: Sistema ejemplo
ANL: Análisis	SH: Sistema hipotético
PN: Planeación	SR: Sistema real
TR: Tiempo real	SP: Sistema piloto
OP: Operación	
- Sistema	
BA: Balanceado	
DB: Desbalanceado	

al programa de aplicación.
Entre 1975 y 1988 no hubo interés en esta temática por parte de los investigadores.
En los años de 1988 y 1990 se utilizan las técnicas heurísticas para resolver el problema. El desarrollo durante esta época estuvo enfocado al aumento del número de restricciones de tipo operativo.
A partir de 1990 aparecen nuevas técnicas para resolver el problema: programación lineal, enfriamiento simulado y algoritmos genéticos, las cuales trabajan como función objetivo la minimización de pérdidas de potencia y las restricciones operativas que se han trabajado anteriormente. Adicionalmente mejoran los modelos de carga con modelos más precisos.
En 1993 aparece al problema resuelto por medio de la técnica de redes neuronales, el cual es modelado inicialmente con pocas restricciones operativas y modelos de carga simple. Luego, en 1997 esta técnica se trabaja para modelos más complejos, es decir, con mayor número de restricciones.

Entre 1995 y 1996 se trabaja la técnica heurística para optimizar pérdidas de energía con modelos de carga más elaborados.
A partir de 1997 hasta la fecha las técnicas trabajadas son combinaciones de las técnicas anteriores, donde se busca complementar las fortalezas de cada método.

5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

A continuación se describirán las principales ventajas y desventajas de las metodologías expuestas anteriormente:

5.1 Técnicas Heurísticas
Ventajas:

- El método de búsqueda es simple, por lo tanto, permite trabajar con sistemas grandes y encontrar una solución en un tiempo corto.
- Las técnicas computacionales utilizadas son robustas y eficientes.
- Los modelos eléctricos se pueden adaptar fácilmente, lo cual permite implementar en estos algoritmos modelos simples y modelos complejos.
- El porcentaje de reducción de pérdidas es aceptable.

Desventajas:

- No obtiene la solución óptima sino una cercana a la óptima, por lo tanto, el porcentaje de reducción de pérdidas no es muy alto.

El tema aparece propuesto como tema de investigación por primera vez en 1975 y modela la función objetivo de minimización de pérdidas de potencia sin incluir restricciones operativas. Después de esta fecha aparecen algunos artículos donde tratan el tema muy general y se interesan por la forma de entrada de datos

5.2 Programación Lineal

Ventajas:

Este método permite obtener una solución óptima, pero a ésta no se obtiene para el problema de reconfiguración, debido a las restricciones en el modelamiento del problema.

Desventajas:

- El modelo matemático del sistema es bastante complejo.
- No es un método apropiado para resolver el problema de reconfiguración pues requiere que la función objetivo sea lineal. Además en este método los costos asociados al suministro de cada carga deben ser linealmente independientes.
- Los tiempos de cómputo para obtener la solución óptima son muy altos por esto se utilizan en aplicaciones de planeación y no de tiempo real.

5.3 Lógica Difusa

Ventajas:

- La implementación del modelo es simple y se puede aplicar a grandes sistemas.
- La velocidad computacional para obtener la solución es satisfactoria.
- Los porcentajes de reducción de pérdidas alcanzan hasta un 20%.
- Este método trabaja con reglas de inferencia, las cuales se obtienen de la experiencia del operador. Esto significa que no son únicas y no son aplicables a cualquier sistema.
- Este método no garantiza un óptimo global.

5.4 Sistemas Expertos

Ventajas:

- El problema se puede modelar de una manera sencilla y puede modificarse fácilmente.
- Si se tiene un buen modelo con reglas simples, la velocidad computacional es satisfactoria.

Desventajas:

- Este método requiere de un modelo de base de conocimiento, la cual se crea a partir de la experiencia de los operadores. Por lo tanto, es un método que no se puede generalizar y no es válido para diferentes tipos de sistemas.
- Para implementar este tipo de metodologías se requiere de un equipo de hardware robusto.

- Esta técnica no garantiza una solución óptima global.

5.5 Redes Neuronales

Ventaja:

- El algoritmo es simple y sus tiempos de ejecución son cortos.

Desventajas:

- El modelo requiere que la red neuronal sea entrenada para cada sistema; esta función de entrenamiento es dispendiosa y necesita de mucho tiempo.
- Este método no garantiza que se encuentre una solución óptima.
- Esta técnica no permite trabajar un modelo genérico que sea aplicable a cualquier sistema.
- En el modelo de la función de entrenamiento se requieren parámetros que se deben estar renovando, para garantizar la exactitud en sus resultados cuando existen cambios en el sistema de distribución.

5.6 Algoritmos Genéticos

Ventajas:

- Permite encontrar óptimos globales, por lo tanto, los resultados de reducción de pérdidas son mejores.
- La metodología permite optimizar más de una función objetivo simultáneamente.
- En esta técnica se puede resolver el problema de reconfiguración de una manera rápida pero sin mucha precisión.

Desventajas:

- El método de búsqueda requiere altos tiempos de cómputo para el proceso por lo que requiere de un buen equipo de cómputo y trabajar con sistemas de distribución pequeños.

5.7 Enfriamiento Simulado

Ventajas:

- Permite encontrar óptimos globales; por lo tanto, los resultados de reducción de pérdidas son mejores.
- La metodología permite optimizar más de una función objetivo simultáneamente.
- Este método se puede implementar para resolver el problema de reconfiguración con buena precisión pero con tiempos de ejecución altos.

Desventajas:

- El método de búsqueda de la solución óptima es complejo, lo cual requiere demasiado tiempo de ejecución.
- Presenta una dificultad en la elección adecuada de sus parámetros ya que estos están fuertemente ligados entre sí lo que hace difícil tratar de encontrar una expresión general que pueda definirlos.

6. CONCLUSIONES

En el artículo se presentó el problema de reconfiguración en redes de distribución y los diferentes enfoques que se han tenido en cuenta en las diferentes investigaciones. La calidad de la solución a este problema se mide con base en los siguientes aspectos: tamaño del sistema de distribución (en cuanto al número de nodos, «switches» de seccionamiento, carga y alimentadores), que se pueda utilizar para cualquier sistema, tiempos de ejecución rápidos, índices de reducción de pérdidas altos, flexibilidad en cuanto a cambios en los modelos eléctricos.

Las técnicas heurísticas son una buena alternativa en la solución de este problema en lo referente a tamaño del sistema, tiempo de ejecución, ya que son aplicables a cualquier tipo de red. En cuanto a la reducción de pérdidas, este método permite reducir porcentajes bajos, ya que no encuentra un óptimo global.

La técnica de lógica difusa también proporciona soluciones posibles de implementar en un sistema real pero al igual que la técnica heurística los índices de reducción de pérdidas se pueden mejorar. El modelo no se puede generalizar para cualquier sistema.

Los métodos de programación lineal, redes neuronales y sistemas expertos no han ofrecido buenas soluciones para este problema.

Finalmente las técnicas de algoritmos genéticos y enfriamiento simulado no han ofrecido buenos resultados en aplicaciones de tiempo real pero aún siguen siendo objeto de estudio.

Algunos tópicos de investigación en este tema que no han sido abordados son:

- Funciones objetivos no sólo relacionadas a la reducción de pérdidas, sino también que relacionen en la calidad del servicio que al igual que la anterior, producen beneficios económicos para las empresas de energía.
- Metodologías que permitan, a través de pruebas de campo obtener modelos de carga más exactos y que sean característicos de cada zona.

El problema de reconfiguración no ha sido resuelto completamente porque no existe una solución para un sistema real que reduzca las pérdidas de manera considerable y a la vez produzca una solución en tiempos adecuados para su implementación en tiempo real.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] MERLIN, G. BACK, "Search for a Minimal – Loss Operating Spanning tree configuration in an urban Power Distribution System", Proc. Of the Fifth Power System Conference (PSCC), Cambridge, pp. 1-18, 1975.
- [2.] S. CIVANLAR, J.J. GRAINGER, H. YIN, S.S. LEE, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 1217-1223.
- [3.] 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, pp. 1401-1407.
- [4.] SHIRMOHAMMADI, H. WAYNE HONG, "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1492-1498.
- [5.] T. TAYLOR, D. LUBKEMAN, "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, January 1990, pp. 239-246.
- [6.] H.D. CHIANG, R. JEAN-JUMEAU, "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems: Part 1: A New Formulation and A Solution Methodology", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1902-1909.
- [7.] H.D. CHIANG, R. JEAN-JUMEAU, "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1568-1574.
- [8.] T.P. WAGNER, A.Y. CHIKHANI, R. HACKAM, "Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: An Application of Distribution Automation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, July 1991, pp. 1922-1931.
- [9.] S.K. GOSWAMI, S. K. BASU, "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992, pp. 1484-1491.
- [10.] G.J. PEPONIS, M.P. PAPADOPOULOS, "Distribution Network Reconfiguration to Minimize Resistive Line Losses", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995, pp. 1338-1342.
- [11.] R.J. SARFI, M.M.A. SALAMA, CHIKHANI A.Y., "Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: An Algorithm Based on Network Partitioning

- Theory", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No.1, February 1996.
- [12.] J.C. WANG, H. D. CHIANG, G.R. DARLING, "An Efficient Algorithm for Real-Time Network Reconfiguration in Large Scale Unbalanced Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, February 1996, pp. 511-517.
- [13.] R. TALESKI, D. RAJIËIÆ, "Distribution Network Reconfiguration for energy Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997, pp. 398-406.
- [14.] K. NARA, M. KITAGAWA, "Distribution Systems Loss Minimum Re-configuration by Simulated Annealing Method", IEE International Conference on Advances in Power System Control. Operation and Management, November 1991, Hong Kong, pp. 461- 466.
- [15.] V. BORAZAN, D. RAJIËIÆ, R. AËKOVSKI, "Minimum Loss Reconfiguration of Unbalanced Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997, pp. 435-442.
- [16.] V. Glamocanin, "Optimal Loss Reduction of Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, August 1990, pp. 774-781.
- [17.] M.A. MATOS, P. MELO, "Multiobjective Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration Using Simulated Annealing" IEEE Power Teach 1999 Conference, Budapest, Hungary, Aug 29 Sep 2, 1999.
- [18.] D.S. CHOI, C.S. KIM, J. HASEGAWA, "An Application of Genetic Algorithms to the Network Reconfiguration in Distribution for Loss Minimization and Load Balancing Problem", IEEE Catalogue No 95TH8130, pp. 376-381.
- [19.] K. NARA, A. SHIOSE, M. KITAGAWA, T. ISHIHARA, "Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 7, No 3, August 1992, pp. 1044-1051.
- [20.] W.M. LIN, H.C. CHIN, "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No 3, July 1998, pp. 870-875.
- [21.] Y.H. SONG, G.S. WANG, A.T. JOHNS, P.Y. WANG, "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Using Fuzzy Controlled Evolutionary Programming", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol 144, No 4, July 1995, pp. 345-350.
- [22.] C.S. CHEN, M.Y. CHO, "Determination of Critical Switches in Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7 No. 3, July 1992.
- [23.] Q. ZHOU, D. SHIRMOHAMMADI, W. H. LIU, "Distribution Feeder Reconfiguration for Service Restoration and Load Balancing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp. 724-729.
- [24.] H. CASTRO, J. B. BUNCH, T. M. TOPKA, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 2, March/April 1980, pp. 549-556.
- [25.] SHIRMOHAMMADI, "Service Restoration in Distribution Networks Via Network Reconfiguration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992, pp. 952-958.
- [26.] J.Y. FAN, L. ZHANG, J.D. McDONALD, "Distribution Network Reconfiguration: Single Loop Optimization", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No 3, August 1996, pp. 1643-47.
- [27.] I. ROYTELMAN, V. MELNIK, S.S.H. LEE, R.I. LUGTU, "Multi-objective Feeder Reconfiguration by Distribution Management System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996, pp. 661-667.
- [28.] S.K. GOSWAMI, "Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12 No. 2, May 1997, pp 718 - 723.
- [29.] C.C. LIU, S.J. LEE, S.S. VENKATA, "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988, pp. 619-626.
- [30.] D. BOUCHARD, A. CHIKHANI, V.L. JOHN, M.M.A. SALAMA, "Applications of Hopfield Neural-Networks to Distribution Feeder Reconfiguration", IEEE 1993, pp. 311-316.
- [31.] H. KIM, Y. KO, K.H. JUNG, "Artificial Neural-Network Based Feeder Reconfiguration For Loss Reduction in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No 3, May 1993, pp. 1356-1366.
- [32.] E. GAUCHE, J. COHELO, R.C. TEIVE, "An On-Line Distribution Feeder Optimal Reconfiguration Algorithm for Resistive Loss Reduction Using Multi-Layer Perceptron", IEEE 1997, pp. 179 - 182.
- [33.] J.M. GERS, "Feeder Reconfiguration for Losses Reduction Considering Harmonic Penetration", Thesis presented for the degree of Doctor, Power System Research Group, University of Strathclyde, Jul 1998.
- [34.] G. Carrillo, I.J. PEREZ, "Optimal reconfiguration of distribution networks for a diversity of regulatory frameworks" International Symposium on Electric Power Engineering, Jun 1995, pp. 784-793.
- [35.] J.L. ANGARITA, "Reducción de Pérdidas Técnicas en Sistemas de Distribución Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Septiembre 2000. ■

8. AUTORES



Gladys Caicedo Delgado.

Ingeniera Electricista y Magister en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle. Profesora Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Integrante del Grupo de

Investigación en Alta Tensión GRALTA. Estudiante del Doctorado en Ingeniería de la Universidad del Valle. glacadel@eiee.univalle.edu.co

Juan Francisco Díaz Frias

Matemático (1985), Ingeniero de Sistemas (1987), Universidad de los Andes. Doctor en Informática (1993), Universidad de París XI. Profesor Titular de la Universidad del Valle. Actualmente Director de la Escuela de Ingeniería de Sistemas y Computación Facultad de Ingeniería Universidad del Valle.

jdiaz@eisc.univalle.edu.co

Rafael Andrés Granobles.

Ingeniero Electricista, Universidad del Valle, 1998. Asistente de Investigación del Grupo de Investigación en Alta Tensión GRALTA. Asistente de docencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Estudiante del Programa de Maestría en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle. Actualmente continúa su investigación en Sistemas de Potencia en el área de Reconfiguración y Automatización de Redes Sistemas de Distribución.

rafgrano@yubarta.univalle.edu.co

rafgrano@yahoo.com



Juan Manuel Gers Ospina.

Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle. Trabajó en el Departamento de Proyectos Eléctricos de CVC (hoy adscrito a EPSA) hasta 1979, como ingeniero de diseño de subestaciones eléctricas. Obtuvo su título de

Magíster en la Universidad de Stanford del Reino Unido, en 1981. Se desempeña como profesor de la Universidad del Valle y como ingeniero consultor en GERS Ltda, empresa de la cual es socio fundador. Es autor de varias publicaciones, entre ellas de un libro sobre aplicación de protecciones eléctricas en sistemas de distribución. Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Stranthclyde, Reino Unido en 1999 jmgers@gersusa.com



Cada fracaso le enseña al hombre algo que necesita aprender

(Charles Dickens)
