



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**Reconfiguración y Expansión de Sistemas de
Distribución Mediante Algoritmos Genéticos y
Técnicas Multi-objetivo para la Reducción de
Depresiones de Voltaje**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta

ING. RAFAEL TAPIA JUÁREZ

Directora de tesis

Doctora en Ingeniería Eléctrica.

ELISA ESPINOSA JUÁREZ

Morelia, Michoacán, Junio del 2013



*A mis padres Elena Juárez Juárez y Rafael Tapia
Salinas*

Agradecimientos

A mis padres Rafael Tapia y Elena Juárez, por ser un ejemplo para mí y apoyarme a lo largo de mi vida.

A mi Asesora la Dra. Elisa Espinosa, por su tiempo, dedicación y sus acertados consejos; que ayudaron a mi formación y permitieron finalizar mis estudios de posgrado.

A mi hermana Melissa, y mis tías, Margarita, Gisela y Lula, por su confianza y motivación.

A Martha por su cariño incondicional y comprensión, ya que siempre será una persona muy especial en mi vida.

A mis amigos de posgrado, Pavel, Celso, Sanzon, Eduardo, Victor Hugo Montesinos, Victor H. Gonzalez, Gerson, Héctor, Ranyart, Eric Iturbide por todos los excelentes momentos que viví con ellos, y por ser parte de esta experiencia.

A los sinodales los Dres: M. Graff, A. Ramos, C. R. Fuerte y M. Madrigal, por sus atenciones y comentarios que enriquecieron esta tesis.

A CONACYT por otorgarme la oportunidad y el apoyo para culminar mis estudios de maestría.

RESUMEN

Las depresiones de voltaje son uno de los fenómenos de calidad de la energía que tienen mayor presencia en un sistema eléctrico, los cuales son ocasionados principalmente por fallas de corto circuito. Los usuarios finales de la energía son los principales afectados cuando una depresión de voltaje ocurre, lo que da origen a deficiencias en el funcionamiento de equipos sensibles de instrumentación y en el peor de los casos, la interrupción de procesos de manufactura. Lo anterior tiene importantes repercusiones económicas, lo cual es la principal razón para realizar la caracterización, análisis y búsqueda de técnicas para mitigar este importante problema.

En esta tesis se estudia a las depresiones de voltaje en sistemas de distribución de topología radial. Con la finalidad de disminuir las depresiones de voltaje en los nodos, se propone la reconfiguración de estos sistemas, mediante la implementación de un algoritmo genético el cual tiene como característica principal evaluar individuos radiales, reduciendo el espacio de búsqueda, y minimizando el esfuerzo computacional.

En esta tesis también se abordan temas expansión de sistemas de distribución, ya que el crecimiento del sistema eléctrico es un tópico que está presente día a día. Para abordar este problema, que se formula como un problema de optimización, se aplica una variante del algoritmo genético que soluciona el problema de reconfiguración.

Se realizan estudios de optimización multiobjetivo, mediante un algoritmo genético, con la finalidad de disminuir las depresiones de voltaje en los nodos del sistema y minimizar las pérdidas de potencia que se presentan en las líneas.

ABSTRACT

The voltage sags are one of the phenomena of power quality with greater presence in a electrical power system, which are mainly caused by short circuit faults. Consumers are the most affected when a voltage sags occurs, which gives rise to deficiencies in the operation of sensitive and instrumentation equipment, and in the worst case the interruption of manufacturing processes. This has important economic implications, which is the main reason for the characterization, analysis and search for efficient techniques to mitigate this important problem.

This thesis studies the voltage depressions in the distribution systems with radial topology. In order to decrease the voltage sags in buses, it is proposed a reconfiguration of these systems through the implementation of a genetic algorithm which has as main characteristic evaluate radial individuals, reducing the search space, and minimizing the computational effort.

This thesis also approaches issues on expansion of distribution systems, since the growth of electric system is a topic that is present every day. To solve this problem, which is formulated as an optimization problem, we apply a variant of the genetic algorithm that solves the problem of reconfiguration.

Finally multiobjective optimization studies are performed by a genetic algorithm, in order to decrease the voltage depressions nodes and to minimize system power losses that occur in the lines.

Índice general

Resumen	VII
Abstract	IX
Lista de Figuras	XV
Lista de Tablas	XVII
Lista de Simbolos y Abreviaturas	XIX
Lista de publicaciones	XXIII
1. Introducción	1
1.1. Revisión del estado del arte	2
1.2. Objetivos principales	5
1.3. Justificación	6
1.4. Metodología	7
1.5. Descripción de Capítulos	7
2. Aspectos generales de los sistemas de distribución y depresiones de voltaje	9
2.1. Sistemas de distribución	10
2.1.1. Componentes del sistema de distribución	10
2.1.2. Topologías en los sistemas de distribución	11
2.1.3. Características y tipos de cargas	15
2.2. Modelado de los elementos del sistema de distribución primario	15
2.2.1. Subestación de distribución	16
2.2.2. Línea de transmisión	17
2.3. Formulación del problema de Flujos de Potencia	19
2.3.1. Pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión	23
2.4. Depresiones de voltaje	23
2.4.1. Definición de depresión de voltaje	24
2.4.2. Origen y consecuencias de las depresiones de voltaje	24
2.4.3. Reducción de depresiones de voltaje	25

2.4.4. Método de posición de fallas	26
2.5. Conclusiones	28
3. Algoritmos genéticos aplicados a la reconfiguración de sistemas de distribución	31
3.1. Algoritmos genéticos	32
3.1.1. Funcionamiento	32
3.1.2. Representación	34
3.1.3. Población inicial	34
3.1.4. Función de aptitud	35
3.1.5. Operador de selección	35
3.1.6. Operador de cruza	35
3.1.7. Operador de mutación	36
3.2. Reconfiguración de sistemas de distribución	36
3.2.1. Reconfiguración de sistemas de distribución para reducir de- presiones de voltaje	37
3.3. Mallas fundamentales y sistemas de distribución	37
3.4. Simplificación de un sistema de distribución	39
3.5. Tipos de representación	41
3.5.1. Representaciones binarias	41
3.5.2. Representaciones con número enteros	42
3.6. Metodología propuesta	43
3.6.1. Representación del cromosoma	43
3.6.2. Formulación del problema	44
3.6.3. Generación de la población inicial	45
3.6.4. Operador de cruza	47
3.6.5. Operador de mutación	48
3.7. Implementación de la metodología propuesta	49
3.8. Casos de estudio	52
3.8.1. Sistema de distribución de 33 nodos	52
3.8.2. Sistema de distribución de 69 nodos	56
3.8.3. Sistema de distribución de 118 nodos	62
3.9. Conclusiones	70
4. Expansión de sistemas de distribución	73
4.1. Expansión y planeación de sistemas eléctricos	73
4.1.1. Planeación dinámica y estática	74
4.1.2. Planeación en transmisión y distribución	74
4.1.3. Expansión en largo y corto plazo	75
4.2. Consideraciones de la expansión en sistemas de distribución	76
4.3. Factores que afectan la planeación	77
4.4. Modelos de planeación y expansión en sistemas de distribución	78
4.5. Metodología propuesta	79
4.5.1. Formulación del problema	79
4.5.2. Algoritmo genético usado	79

4.6. Implementación de la metodología propuesta	80
4.7. Casos de estudio	82
4.7.1. Sistema de distribución de 33 nodos	82
4.7.2. Sistema de distribución de 69 Nodos	85
4.7.3. Sistema de distribución de 84 Nodos	88
4.7.4. Sistema de distribución de 118 nodos	92
4.8. Conclusiones	98
5. Técnicas multiobjetivo aplicados a la reconfiguración de sistemas de distribución	99
5.1. Optimización multiobjetivo	99
5.1.1. Conceptos y definiciones del problema multiobjetivo	100
5.1.2. Proceso de búsqueda y toma de decisiones	103
5.1.3. Métodos tradicionales de optimización multiobjetivo	103
5.1.4. Algoritmos genéticos en optimización multiobjetivo	104
5.2. Metodología propuesta	105
5.2.1. Formulación del problema	106
5.3. Implementación de la metodología propuesta	107
5.4. Casos de estudio	108
5.4.1. Sistema de distribución de 33 nodos	110
5.4.2. Sistema de distribución de 69 nodos	112
5.4.3. Sistema de distribución de 118 nodos	116
5.5. Conclusiones	122
6. Conclusiones generales y trabajos futuros	123
6.1. Conclusiones Generales	123
6.2. Trabajos Futuros	124
A. Funciones usadas de Matlab	127
Bibliografía	129

Índice de figuras

2.1. Componentes de un sistema de distribución típico	11
2.2. Topología de un sistema radial	12
2.3. Topología de un sistema anillo	13
2.4. Topología de un sistema mallado	15
2.5. Sistema eléctrico de potencia	16
2.6. Modelo de la subestación	16
2.7. Representación de la red de dos puertos	17
2.8. Modelo de la línea de transmisión de corta longitud	18
2.9. Modelo de la línea de transmisión de corta longitud	19
3.1. Algoritmo genético típico	33
3.2. Representación de un árbol	38
3.3. Sistema básico con tres alimentadores	39
3.4. Sistema de Cinvalar simplificado	40
3.5. Representación de individuos	41
3.6. Diagrama de flujo del proceso que genera la población inicial	47
3.7. Cruza de individuos	48
3.8. Mutación de individuos	49
3.9. Diagrama de flujo para la reconfiguración de sistemas de distribución	51
3.10. Sistema base y simplificado de 33 nodos	52
3.11. Depresiones de voltaje del sistema base, referencia y reconfiguración	54
3.12. Sistema de 33 nodos reconfigurado	56
3.13. Sistema base y simplificado de 69 nodos	57
3.14. Depresiones de voltaje del sistema base, referencia y reconfiguración	58
3.15. Sistema de 69 nodos reconfigurado	58
3.16. Sistema base de 118 Nodos	63
3.17. Depresiones de voltaje del sistema base, y reconfigurado del sistema de 118 Nodos	65
3.18. Sistema de 118 nodos reconfigurado	65
4.1. Perspectiva de horizonte de tiempo de planeación de un sistema eléctrico	75
4.2. Diagrama de flujo para la expansión de sistemas de distribución	81

4.3. Sistema inicial de 14 nodos antes de la expansión	83
4.4. Valor de aptitud del promedio y mejor individuo, en cada generación	83
4.5. Expansión del sistema de 33 nodos	84
4.6. Sistema inicial de 36 nodos antes de la expansión	85
4.7. Valor de aptitud del promedio y mejor individuo, en cada generación	86
4.8. Expansión del sistema de 69 nodos	86
4.9. Sistema inicial de 41 nodos antes de la expansión	89
4.10. Valor de aptitud del promedio y mejor individuo, en cada generación	89
4.11. Expansión del sistema de 84 nodos	90
4.12. Sistema inicial de 57 nodos antes de la expansión	93
4.13. Valor de aptitud del promedio y mejor individuo, en cada generación	94
4.14. Expansión del sistema de 118 nodos	97
5.1. Dominancia de Pareto para un problema de optimización de dos objetivos	102
5.2. Diagrama de flujo para la reconfiguración multiobjetivo de sistemas de distribución	109
5.3. Sistema de 33 nodos reconfigurado	111
5.4. Depresiones de voltaje del sistema base, referencia y reconfiguración	111
5.5. Sistema de 69 nodos reconfigurado	114
5.6. Frente de Pareto para el sistema de 69 nodos	115
5.7. Depresiones de voltaje del sistema base, referencia y reconfiguración	115
5.8. Frente de Pareto para el sistema de 118 nodos	117
5.9. Depresiones de voltaje del sistema base y reconfiguración	119
5.10. Sistema de 118 nodos reconfigurado	120
5.11. Porcentaje de diferentes umbrales para las soluciones multiobjetivo del sistema de 118 nodos	121

Índice de tablas

3.1. Resultados del sistema de 33 nodos	55
3.2. Nodos de envío y recepción de las líneas desconectadas	56
3.3. Resultados del sistema de 69 nodos	59
3.4. Nodos de envío y recepción de las líneas desconectadas	62
3.5. Nodos de envío y recepción de las líneas desconectadas	64
3.6. Resultados del sistema de 118 nodos	66
3.7. Parámetros de simulación del algoritmo genético, estudios mono- objetivo reconfiguración	70
4.1. Líneas candidatas sistema 33 nodos	84
4.2. Solución mediante GA y Prim Sistema de 33 Nodos	84
4.3. Líneas candidatas sistema 69 nodos	87
4.4. Solución mediante GA y Prim Sistema 69 Nodos	88
4.5. Solución mediante GA y Prim Sistema 84 Nodos	90
4.6. Líneas candidatas sistema 84 nodos	91
4.7. Solución mediante GA y Prim Sistema 118 Nodos	94
4.8. Líneas candidatas sistema 118 nodos	94
4.9. Parámetros de simulación del algoritmo genético, estudios de ex- pansión	97
5.1. Resultados del sistema de 33 nodos	112
5.2. Nodos de envío y recepción de líneas fuera de operación	112
5.3. Conjunto óptimo de Pareto y frente de Pareto	112
5.4. Resultados del sistema de 69 nodos	113
5.5. Nodos de envío y recepción de líneas fuera de operación	114
5.6. Conjunto óptimo de Pareto y frente de Pareto	116
5.7. Resultados del sistema de 118 nodos	118
5.8. Nodos de envío y recepción de líneas fuera de operación	118
5.9. Parámetros de simulación del algoritmo genético, estudios multi- objetivo	121

Lista de Simbolos y Abreviaturas

Simbolos

X_g	Reactancia en serie de la subestación
I_k	Corriente del nodo k
I_m	Corriente del nodo m
V_k	Voltaje del nodo k
V_m	Voltaje en el nodo m
$ABCD$	Parámetros de la línea de transmisión de corta longitud
ℓ	Longitud de la línea en metros
ω	Frecuencia angular $2\pi f$
z	Impedancia en serie por unidad de longitud
y	Admitancia en serie por unidad de longitud
Z	Impedancia total serie
Y	Admitancia total serie
S	Potencia compleja
I_{km}	Corriente que viaja del nodo k al nodo m
Z_{km}	Impedancia de la línea km
y_{km}	Admitancia en la línea km
g_{km}	Conductancia en la línea km
b_{km}	Suceptancia en la línea km
Y_{km}	Elemento complejo de la matriz de admitancia nodal
P_k^{cal}	Potencia activa inyectada en el nodo k
Q_k^{cal}	Potencia reactiva inyectada en el nodo k
P_{Lk}	Potencia activa demanda en el nodo k
Q_{Lk}	Potencia reactiva demanda en el nodo k
P_{Gk}	Potencia activa inyectada por el generador en el nodo k
Q_{Gk}	Potencia reactiva inyectada por el generador en el nodo k

ΔP_k	Balance de potencia activa en el nodo k
ΔQ_k	Balance de potencia reactiva en el nodo k
P_k^{sp}	Potencia activa especificada en el nodo k
Q_k^{sp}	Potencia reactiva especificada en el nodo k
P_{km}	Potencia activa que viaja del nodo k al nodo m
Q_{km}	Potencia reactiva que viaja del nodo k al nodo m
θ_k	Ángulo de fase del voltaje del nodo k
Z_{nodal}	Matriz de impedancia nodal
t	Umbral de voltaje
V_i	Voltaje en el nodo i
V_i^{pf}	Voltaje de prefalla en el nodo i
ΔV_i	Diferencia de voltaje en el nodo i debido a la falla en f
Z_{if}	Impedancia del elemento (i, f) de la matriz de impedancia nodal
I_f	Corriente de falla en el nodo f
λ_f	Número de fallas año
M	Número de líneas necesarias para formar un sistema radial
n	Número de nodos
l	Número de enlaces en un grafo o sistema de distribución
n_f	Número de alimentadores
V_{ref}	Vector de referencia de valores de depresiones de voltaje/año
V_{reconf}	Vector de las depresiones de voltaje/año después de una reconfiguración
V_{ecBand}	Vector binario de nodos que tienen problemas de depresiones de voltaje
$V_{CostoLin_i}$	Costo total de línea
$\mathbf{F}(\mathbf{x})$	Vector de funciones objetivo
$\mathbf{e}(\mathbf{x})$	Conjunto de restricciones
\mathbf{X}	Espacio de decisión
\mathbf{X}_f	Conjunto de soluciones factibles
\mathbf{Y}_f	Conjunto de vectores objetivo factibles
\mathbf{X}_{true}	Conjunto de Pareto Óptimo
\mathbf{Y}_{true}	Frente de Pareto
\succ	Domina a
\sim	No son comparables
$\not\succeq$	No domina a
w_j	Peso asignado a una función objetivo
T_j	Meta asignada a una función objetivo
ε_j	Restricciones asignadas a las funciones objetivo

Ω_l	Conjunto de las líneas del sistema de distribución
I_j	Corriente que circula en la línea j
R_j	Resistencia eléctrica en la línea j

Abreviaciones

GA	<i>Genetic Algorithm</i>
FACTS	<i>Flexible alternating-current transmission systems</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
NOK	<i>Norske Krone Moneda Noruega</i>
AMPL	<i>A modeling language for mathematical programming</i>
CFE	Comisión Federal de Electricidad
LVK	Ley de voltaje de Kirchhoff
LCK	Ley de corriente de Kirchhoff
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
R.M.S	<i>Root Mean Square</i>
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
p.u.	Por Unidad
MINLP	<i>Mixed Integer Nonlinear Programming</i>
ACSR	<i>Aluminum Conductors Steel Reinforced</i>
TPC	<i>Taiwan Power Company</i>
MOGA	<i>Multiobjective Genetic Algorithm</i>
NPGA	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm</i>
NSGA	<i>Non Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>

Lista de publicaciones

E. Espinosa Juárez, R. Tapia, A. Hernández *Estimación de Estado de Depresiones de Voltaje Considerando Errores en las Mediciones: Un caso de Estudio*. 7mo Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología e Innovación Cecti. Morelia, Michoacán Octubre 2012.

E. Espinosa Juárez, R. Tapia, A. Hernández *Un caso de Estudio de Estimación de Estado de Depresiones de Voltaje Bajo Condiciones de Ruido en Mediciones*. Reunión de Otoño de Potencia, Electrónica y Computación, ROPEC 2012 Internacional. Colima, Colima México, Noviembre del 2012.

Rafael Tapia Juárez, Elisa Espinosa Juárez, Mario Graff. *Reconfiguration of Distribution Systems to Reduce Voltage Sags by Using Genetic Algorithms* Aceptado, International Conference on Artificial Intelligence (ICAI'13) Las Vegas Nevada USA 2013.

Introducción

En la actualidad los sistemas eléctricos de potencia crecen día a día con la finalidad de poder suministrar energía eléctrica a más usuarios. Estos a su vez demandan una mejor calidad en el suministro que cumpla con sus necesidades particulares. Los fenómenos de calidad de la energía que se presentan en un sistema eléctrico, afectan principalmente a usuarios industriales ocasionando operaciones deficientes en equipos sensibles a estos fenómenos, teniendo como consecuencia pérdidas económicas importantes.

A consecuencia de estos fenómenos, así como una mayor integración de dispositivos de instrumentación, microprocesadores y cargas sensibles, la calidad de la energía (*Power Quality*) se ha convertido en un problema de suma importancia e interés en la actualidad. Es por esta razón, que la caracterización, análisis y estudio de los fenómenos de calidad de la energía son muy importantes.

La calidad de la energía es un término genérico aplicado a una amplia variedad de fenómenos en un sistema eléctrico. Debido a la extensa variedad de fenómenos, algunas definiciones acerca de los problemas de calidad de la energía, continuamente han sido utilizadas incorrectamente y causan confusión entre los usuarios finales y los proveedores del servicio eléctrico [Ward, 2006]. Algunos autores se refieren en términos de “Calidad de la energía” otros a “Calidad del suministro” así como “Calidad del voltaje”. [Bollen, 2000]. Una definición formal acerca de los problemas de calidad de la energía, sugerida por Dugan *et al.*, [Dugan y McGranaghan, 2004] es la siguiente: “Cualquier problema de energía manifestado como una desviación de voltaje, corriente o frecuencia, que da lugar a una falla o un funcionamiento deficiente del equipo de un usuario final”.

Las depresiones de voltaje o *voltage sags*, son uno de los problemas más comunes y difíciles de resolver asociados a la calidad de la energía. Una depresión de voltaje es una reducción repentina en la tensión de un valor entre el 90 % y 10 % de la tensión nominal y una duración entre 0.5 ciclos y 1 minuto [IEEE Std. 1159-1995, 1995]. Su origen es asociado principalmente a fallas de corto circuito en los sistemas de potencia, aunque también se pueden presentar debido a la energización de grandes cargas como motores; en determinadas circunstancias, la energización de un transformador en un sistema de eléctrico puede originar una depresión de voltaje. Las consecuencias que pueden traer consigo las depresiones de voltaje pueden ser muy costosas, ya que pueden dejar fuera de operación un importante proceso en la industria y también ocasionar problemas graves, por ejemplo; en el sector de la salud donde se cuenta con equipo médico de instrumentación muy sensible y delicado. [Bollen, 2000] [Short, 2004] [Warne, 2005] [Ward, 2006].

Existen algunas prácticas que son auxiliares en la mitigación de las depresiones de voltaje. Algunas de ellas utilizan dispositivos como los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS por sus siglas en inglés). Estos sistemas integran dispositivos de electrónica de potencia con el objetivo de obtener flexibilidad en el control de los flujos de potencia de un sistema eléctrico. Por otra parte el uso de dispositivos de alimentación ininterrumpida (UPS por sus siglas en inglés) permiten suministrar energía eléctrica por algunos minutos cuando se presenta un falla en el sistema eléctrico. A nivel transmisión y distribución se pueden aplicar técnicas de reconfiguración para reducir las depresiones de voltaje.

En esta tesis se propone la reconfiguración de redes de distribución radiales, aplicando un algoritmo genético, con el objetivo de reducir las depresiones de voltaje, siendo este uno de los aportes más relevantes de este documento. También se realizan estudios de expansión y planeación de sistemas de distribución y la aplicación de técnicas multiobjetivo con algoritmos genéticos para disminuir pérdidas en dichos sistemas.

1.1. Revisión del estado del arte

La calidad de la energía es de interés, para usuarios, operadores de la red así como los productores de la energía. Las depresiones de voltaje, son un problema cotidiano al que está sometido un sistema eléctrico

En [Targosz y Chapman, 2008] se presenta un estudio sobre el costo que tiene la mala calidad de la energía, en el cual se estima que las pérdidas anuales en el

sector industrial y de servicios, superan los 150,000 millones de euros en la Unión Europea, de los cuales 85,000 millones de euros corresponden a pérdidas originadas por depresiones de voltaje e interrupciones de corta duración. Un análisis del impacto que tienen las interrupciones y depresiones de voltaje en Noruega, indica costos entre 805 y 1125 millones de NOK ($1\text{Euro} \approx 8\text{NOK}$) de los cuales de 120 a 440 millones de NOK, son debidos a depresiones de voltaje. El evento de una depresión de voltaje puede costar entre 2120 y 4682 euros [Targosz y Chapman, 2012].

De la necesidad de obtener información acerca de las depresiones de voltaje en el sistema, se originan algunas metodologías. Entre los métodos conocidos como estocásticos se encuentran: el método de posición de fallas [Qader y Bollen, 1999] [Bollen, 2000], método de distancias críticas [Bollen, 2000], así como el método analítico para la estimación estocástica propuesto en [Espinosa y Hernández, 2006]. También existen métodos de estimación de estado de depresiones de voltaje, los cuales utilizan datos de la red eléctrica y datos de mediciones con la finalidad de predecir las depresiones de voltaje en los nodos donde no se cuenta con medidores [Wang *et al.*, 2005], [Espinosa y Hernández, 2007].

Los estudios acerca de reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución, han sido una herramienta muy eficaz en la reducción de pérdidas de potencia. Cinvalar *et al.*, [Civanlar *et al.*, 1988] y Baran *et al.*, [Baran y Wu, 1989] fueron algunos de los autores pioneros en abordar los temas de reconfiguración con la finalidad de disminuir las pérdidas de potencia. En [Civanlar *et al.*, 1988], se muestra una estrategia para transferir carga entre los alimentadores del sistema, su algoritmo cuenta con un criterio de entrada y salida de las líneas, además parte de una solución factible, en sistemas con una topología radial. Posteriormente en [Baran y Wu, 1989], se realizan dos métodos de flujos de potencia radiales aproximados, así como una propuesta de reconfiguración y balance de fases llamada *Branch Exchange*. Ambos autores utilizan sistemas de prueba que se siguen usando frecuentemente para realizar estudios de reconfiguración de redes eléctricas de distribución.

En [Wang y Zhong, 2008] se presenta un algoritmo *Plant Growth Simulation*. Este algoritmo simula el crecimiento de las plantas mediante el fototropismo, para resolver el problema de reconfiguración en sistemas de distribución, su principal ventaja consiste en no necesitar parámetros externos, tales como razón de mutación o cruza. En [Garcés, 2005] se resuelve el problema de reconfiguración de alimentadores primarios usando la metodología *Simulated annealing*, utilizando

como índice de sensibilidad para la entrada y salida de las líneas uno muy similar al propuesto en [Civanlar *et al.*, 1988], este índice consiste en determinar que línea produce una reducción en las pérdidas del sistema al formarse un ciclo, pero con algunas simplificaciones adicionales. En [Carreno *et al.*, 2008] se propone una codificación que de una manera eficiente implementa la operación de cruza en un algoritmo genético para garantizar la producción de individuos radiales. La codificación y uso de un algoritmo genético en [Torres *et al.*, 2010] es muy similar a la propuesta en [Carreno *et al.*, 2008], con algunas diferencias en la codificación del cromosoma y las operaciones de mutación y cruza.

Uno de los principales problemas en estudio de la reconfiguración de redes eléctricas de distribución, es la restricción de radialidad, en [Lavorato *et al.*, 2012] se determinan algunas condiciones y un modelo basado en la formulación de flujos de potencia, el cual da lugar a un problema mixto entero no lineal. Este modelo es resuelto mediante un algoritmo *Branch & Bound*, el cual es codificado en lenguaje AMPL, y resuelto mediante KNITRO.

Aunque la reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución, ha sido continuamente aplicada a la disminución de pérdidas de potencia, estos estudios también han demostrado ser efectivos en la mitigación de las depresiones de voltaje. En [Chen *et al.*, 2002] se sugiere la reconfiguración de sistemas radiales a mallados. En [Lucio, 2009] y [Espinosa y Lucio, 2012] se propone la reconfiguración del sistema eléctrico de potencia con la finalidad de mitigar las depresiones de voltaje, las cuales son evaluadas mediante el método analítico de [Espinosa y Hernández, 2006] y el uso de un algoritmo genético. En [García y Espinosa, 2011] se propone la reconfiguración mediante un algoritmo de Búsqueda Tabú para minimizar índices de depresiones de voltaje. Los autores [Cebrian y Kagan, 2008], abordan el tema de la reconfiguración en sistemas de distribución, considerando el costo de depresiones de voltaje e interrupciones, implementando el algoritmo de Prim así como Kruskal para generar la población inicial. Con un enfoque muy similar al del autor anterior, en [Bahadoorsingh *et al.*, 2007] se realiza un estudio de reconfiguración por medio de un algoritmo genético, considerando costos, es decir, encuentra la topología de menor costo debido a la presencia de depresiones de voltaje, a su vez evalúa que cada topología cumpla con las leyes de Kirchhoff's y que cada nodo se encuentre en límites de voltaje aceptables.

El constante crecimiento de consumidores de energía eléctrica, así como la necesidad de que estos cuenten con un suministro de energía confiable y de calidad,

ha dado lugar a métodos de planeación y de expansión de redes eléctricas. Entre los métodos de planeación se pueden encontrar; estudios estáticos, dinámicos, planeación a nivel transmisión y distribución, planeación a corto y largo plazo y planeación de potencia reactiva [Seifi y Sadegh, 2011], [Lee y El-Sharkawi, 2008]. En [Córtes *et al.*, 2009] se aborda el uso de un algoritmo *Hybrid Simulated Annealing*, para resolver el problema de planeación estática a nivel transmisión, y se incorpora una búsqueda local (*Local Search*), con la finalidad de encontrar mejores soluciones en cada nivel de temperatura del material. En [Rider J. *et al.*, 2007], se muestra un algoritmo heurístico constructivo que resuelve el problema de expansión en transmisión a corto plazo, el problema se formula como mixto entero no lineal y se usa un modelo de flujos de carga de CA. En [Lavorato *et al.*, 2012] se usa la misma metodología que en [Rider J. *et al.*, 2007] pero con el objetivo de realizar la planeación de sistemas de distribución. En [Nahman y Perić, 2008] mediante el uso de un algoritmo *Simulated Annealing*, propone la planeación de un sistema de distribución radial, con el objetivo de encontrar la ruta que lleve a un costo total anual mínimo.

En [Lavorato *et al.*, 2012] también se realizan estudios de expansión y planeación de redes eléctricas de distribución. El modelo que usa es el mismo que se utiliza en [Lavorato *et al.*, 2010], añadiendo las restricciones de radialidad y las ecuaciones de flujos de potencia. En los estudios de planeación también es importante la consideración de fenómenos de calidad de la energía, en [Da Silva *et al.*, 2008] se aplica un algoritmo de Búsqueda Tabú para resolver el problema de expansión de transmisión considerando pérdidas y costos de interrupción de suministro.

Existen diversas publicaciones en las que se ha presentado la reconfiguración sistemas de distribución para reducir pérdidas de potencia. La expansión de estos sistemas juega un papel muy importante, ya que de esto depende que los nuevos usuarios cuenten con un suministro de calidad. En esta tesis mediante el uso de un algoritmo genético se propone resolver los problemas asociados; a la reconfiguración y expansión de sistemas de distribución radiales considerando depresiones de voltaje y costos de las líneas respectivamente.

1.2. Objetivos principales

Los objetivos principales de esta tesis son los siguientes:

- Plantear un problema de optimización para la reconfiguración y expansión de sistemas de distribución radiales, considerando la reducción de depresiones de voltaje.
- Desarrollar las funciones de un algoritmo genético: población inicial, cruce y mutación, para generar individuos que cumplan con la restricción de radialidad.
- Mediante el uso del método de posición de fallas y la implementación computacional de las funciones anteriores, solucionar con un algoritmo genético el problema de optimización de reconfiguración, manteniendo una topología radial.
- Solucionar el problema de optimización de expansión de redes de distribución mediante el algoritmo genético propuesto, considerando costos en las líneas y manteniendo una topología radial.
- Mediante el uso de un algoritmo genético multi-objetivo, realizar estudios para la reducción de depresiones de voltaje y pérdidas de potencia en las líneas. Analizar los resultados multi-objetivo.

1.3. Justificación

La reconfiguración de redes eléctricas es un instrumento de gran ayuda en la reducción de pérdidas de potencia, también se ha demostrado su eficiencia reduciendo considerablemente depresiones de voltaje. Realizando una reconfiguración a nivel distribución y mitigando depresiones de voltaje, una mejora se ve reflejada en la calidad de suministro. Hay que recordar que el sistema de distribución es uno de los últimos eslabones entre el cliente y un sistema eléctrico, es por eso que índices aceptables de depresiones de voltaje son una necesidad para los usuarios finales de la energía.

Los métodos de planeación y de expansión de redes eléctricas han sido objeto de estudio durante muchos años, esto se debe a que los sistemas eléctricos se encuentran en constante crecimiento. Estos sistemas tienen un objetivo final, suministrar energía eléctrica de calidad a un cliente. Esta razón da origen a la necesidad de examinar métodos efectivos, para determinar una expansión de redes eléctricas a un bajo costo y manteniendo estándares razonables en cuanto a calidad de la energía se refiere.

1.4. Metodología

Para conseguir los objetivos planteados en esta tesis, se ha seguido la siguiente metodología:

- Revisión de estado del arte en lo relacionado con la evaluación de depresiones de voltaje en los sistemas eléctricos, reconfiguración de sistemas de distribución, expansión y estudios multiobjetivo, así como aplicación de algoritmos genéticos para su solución; con la finalidad de comprender las técnicas y metodologías usadas para la solución de este tipo de problemas y obtener el conocimiento necesario para el correcto desarrollo de esta tesis.
- Planteamiento y desarrollo de una metodología, para realizar la reconfiguración de sistemas de distribución radiales, generando las funciones que componen a un algoritmo genético; con el propósito de que se generen topologías siempre válidas.
- Simulación de las funciones en conjunto con un algoritmo genético, utilizando como plataforma de desarrollo MATLAB®2012a y haciendo uso del toolbox *Global Optimization Toolbox*, con el objetivo de verificar su correcto funcionamiento.
- Mediante el algoritmo genético desarrollado, realizar diversos casos de estudio de reconfiguración y expansión aplicados a redes eléctricas de distribución, considerando depresiones de voltaje y costos respectivamente.
- Realizar estudios multiobjetivo de reconfiguración tomando en cuenta: pérdidas de potencia en las líneas y depresiones de voltaje. Posteriormente, analizar y revisar los resultados obtenidos.

1.5. Descripción de Capítulos

En este capítulo se han presentado conceptos preliminares que son auxiliares para la comprensión y desarrollo de esta tesis. Se realizó una breve investigación acerca de fenómenos de calidad de la energía, poniendo especial atención en las depresiones de voltaje. También se revisaron los estudios que se han realizado acerca de reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución. Se exponen los objetivos principales de esta tesis, y se explica la metodología para conseguirlos.

El Capítulo 2 trata temas acerca de los sistemas de distribución, algunas características que se presentan en los mismos, así como conceptos generales, con la finalidad de conocer la importancia de este sistema y la interacción directa que mantiene con el usuario final. Por otra parte se describe el fenómeno de las depresiones de voltaje, sus orígenes y prácticas que sirven para su reducción.

En el Capítulo 3 se da una introducción a los algoritmos genéticos, y se plantea una metodología para resolver el problema de reconfiguración de sistemas de distribución usando esta técnica. De manera adicional se realizan los casos de estudio correspondientes, donde se plantea la reducción de depresiones de voltaje utilizando la reconfiguración para tres sistemas eléctricos de distribución.

El Capítulo 4 aborda el tema de planeación y expansión para sistemas eléctricos de distribución. Se presentan, algunos aspectos de la expansión, técnicas que han sido usadas para resolver este problema y se mencionan algunos factores que se deben de tomar en cuenta para la planeación y expansión de un sistema. También se realizan los estudios de expansión considerando costo de la inclusión de las líneas.

El Capítulo 5, se da una introducción a las técnicas multiobjetivo, con la finalidad de comprender y plantear un algoritmo genético multiobjetivo, para reducir depresiones de voltaje y disminuir pérdidas de potencia en sistemas eléctricos de distribución.

Finalmente en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de esta tesis, y se sugieren trabajos futuros, que siguen la misma línea de investigación del presente documento.

Capítulo 2

Aspectos generales de los sistemas de distribución y depresiones de voltaje

La obligación de los proveedores de energía eléctrica y la exigencia de los consumidores de un suministro de calidad, ha dado lugar al interés sobre los fenómenos de calidad de la energía. Los sistemas eléctricos son constantemente sometidos a fallas de corto circuito que ocasionan depresiones de voltaje en el mismo. Las depresiones de voltaje son uno de los problemas asociados a la calidad de la energía que mayor repercusión tiene en procesos industriales y especialmente en equipos de instrumentación muy sensibles.

Un sistema eléctrico de potencia se compone de tres principales etapas: generación, transmisión y distribución. La estación de generación produce energía eléctrica, la cual es transportada mediante las líneas de transmisión a subestaciones de distribución para ser suministrada a los clientes finales. El objetivo principal de esta tesis se centra en los sistemas de distribución.

En este capítulo se da una introducción a los sistemas de distribución, sus componentes principales, las topologías en las que pueden operar, también se abordan temas acerca de las depresiones de voltaje y algunas prácticas importantes para tratar con este problema de calidad de la energía.

2.1. Sistemas de distribución

Los sistemas de distribución son un elemento muy importante de un sistema eléctrico, ya que contribuye directamente con los consumidores o clientes al proveerles el suministro de energía eléctrica. En otras palabras, el objetivo principal de un sistema de distribución es alimentar un conjunto de clientes de: zonas rurales, zonas industriales, residenciales y urbanas. La infraestructura de los sistemas de distribución es muy extensa debido a que se suministra y distribuye energía eléctrica a la gran variedad de clientes existentes.

2.1.1. Componentes del sistema de distribución

Un sistema de distribución generalmente se encuentra compuesto por seis principales etapas [Parsons y Barnett, 1964], [Glover *et al.*, 2012] [Fardo y Patrick, 2008] [Casazza y Delea, 2010]:

1. **Circuitos de subtransmisión.** Su función consiste en transportar energía a las subestaciones de distribución, sus rangos de operación se encuentran entre 12.47 y 345 KV
2. **Subestación de distribución.** El voltaje proveniente de subtransmisión es reducido para ser utilizado como voltaje primario. En esta etapa existe equipo de regulación de voltaje, interruptores de protección, reconectores etc.
3. **Alimentadores primarios.** También llamada distribución primaria. El rango de operación de esta etapa se encuentra entre 4.16 y 34.5 KV, y suministra la carga en un área geográfica bien definida, o en su defecto alimentan grandes cargas comerciales e industriales.
4. **Transformadores de distribución.** Disminuyen el voltaje primario, a “voltajes utilizables” su rango típico se encuentra entre 10 a 2500 KV. Frecuentemente son instalados en postes para líneas aéreas, o en tierra para sistemas subterráneos.
5. **Circuitos secundarios.** Consiste en un servicio de conexión como líneas monofásicas o trifásicas, que transportan la energía eléctrica directamente a los clientes consumidores. Los voltajes típicos son 240 y 120 V.

6. **Clientes consumidores.** Pueden ser vistos desde un punto de vista como cargas residenciales, comerciales e industriales.

Los componentes principales de un sistema de distribución se muestra en la Figura 2.1, en un diagrama de bloques simple.

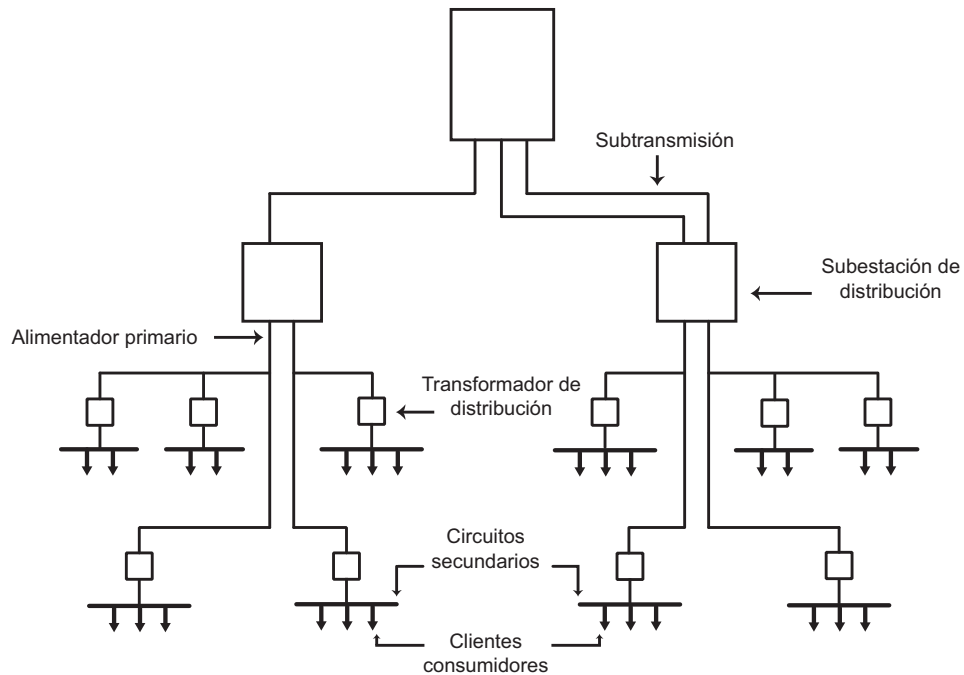


Figura 2.1: Componentes de un sistema de distribución típico

2.1.2. Topologías en los sistemas de distribución

En general existen tres topologías básicas que se pueden encontrar en los sistemas de distribución, específicamente en los alimentadores primarios. Estas topologías son:

1. Radial.
2. Anillo.
3. Mallada.

A continuación se da una breve explicación acerca de estas topologías.

2.1.2.1. Radial

Radial. Es la configuración más sencilla que se puede encontrar, es la más adecuada para distribuir en áreas con poca densidad de carga, o en áreas remotas donde otro tipo de topología no es económicamente factible. Es el sistema menos confiable cuando se habla de servicio continuo, ya que si una línea es abierta y no se cuenta con algún suministro de emergencia varias cargas pueden ser interrumpidas [Schlabbach y Rofalski, 2007], [Glover *et al.*, 2012].

Algunas características de esta topología son:

- Bajo costo de planeación.
- Bajo costo de inversión.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Estructura simple.
- Operación sencilla bajo condiciones de funcionamiento normal.
- Su perfil de voltaje no es muy bueno.
- Tiene pérdidas de potencia elevadas comparada con otras topologías.

En la Figura 2.2 se muestra una topología radial, alimentada por una subestación.

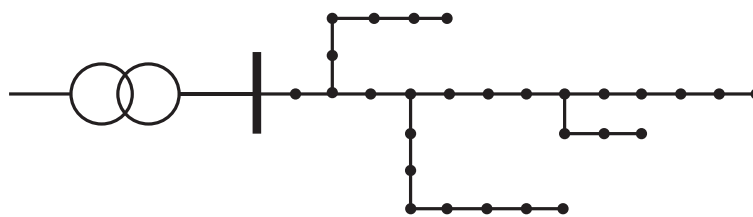


Figura 2.2: Topología de un sistema radial

2.1.2.2. Anillo

Anillo. La topología anillo puede ser obtenida comenzando de una topología radial, y conectando un nodo final o algún nodo intermedio mediante una línea que regrese al alimentador primario, esta línea es conocida como *tie line* y su estado de operación se encuentra *normalmente abierto*. Cuando el sistema se encuentra

sometido a una falla en una línea y algún nodo de carga queda sin suministro, mediante el cambio de operación del interruptor *tie line* la carga es transferida a otra rama, en otras palabras otras cargas no sufren interrupción de suministro. Lo anterior es una de las principales razones de que la topología en anillo opere con una línea desconectada o abierta [Schlabach y Rofalski, 2007].

Las características de esta topología son:

- Costo de planeación moderado.
- Costo de inversión no es muy alto.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Provee un suministro continuo comparado con un sistema radial.
- Su nivel de confiabilidad es alto.
- Cuenta con una estructura simple.
- Su operación es sencilla bajo condiciones de funcionamiento normal.
- Las pérdidas pueden ser minimizadas y su perfil de voltaje puede ser optimizado mediante el cambio de operación de las líneas.

En la Figura 2.3 se muestra una topología en anillo, la cual cuenta con dos líneas de enlace.

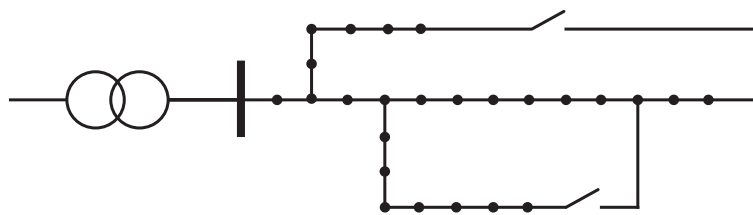


Figura 2.3: Topología de un sistema anillo

En la norma de distribución de Comisión Federal de Electricidad, CFE-MT-IDP [CFE-MT-IDP, 1992], se aborda la construcción de sistemas de distribución de media tensión subterráneas, en la cual se establecen configuraciones en anillo operación radial, de una hasta tres fuentes de alimentación. Las aplicaciones de esta norma en general son aplicadas a:

- a) Desarrollos residenciales de nivel, alto medio e interés social.

- b) Áreas comerciales que requieren alta confiabilidad.
- c) Áreas de ciudades o poblaciones consideradas como centros históricos o turísticos.
- d) Zonas consideradas como reservas ecológicas.
- e) Avenidas y calles con alto tráfico vehicular.
- f) Plazas cívicas.
- g) Lugares de concentración masiva como mercados, centrales de autobuses, aeropuertos, estadios, centros religiosos importantes etc.

2.1.2.3. Mallada

Mallada. Este tipo de topología es una combinación entre un sistema radial y uno de anillo. Esta topología puede ser obtenida cuando un interruptor *tie line* se encuentra en estado de operación *normalmente cerrado*. En este tipo de arreglo se generan una serie de ciclos o mallas principales dependiendo de las líneas que lo conforman [Schlabach y Rofalski, 2007] [von Meier, 2006].

Sus principales características son las siguientes:

- Costo de operación de moderado a alto.
- Alto costo de inversión.
- Alto costo de mantenimiento.
- Su nivel de confiabilidad y calidad son superiores a los sistemas radiales y en anillo.
- Puede llegar a ser un sistema muy complejo.
- Regularmente dos o más alimentadores primarios suministran la energía.
- El perfil de voltaje es el óptimo y las pérdidas de potencia son mínimas.

En la Figura 2.4 se muestra un sistema mallado.

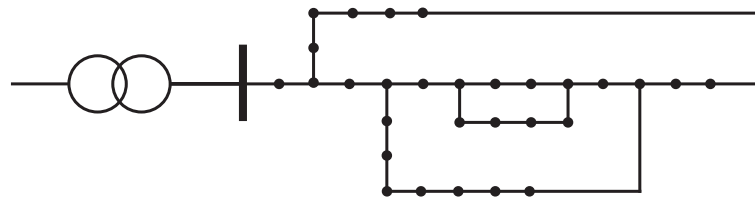


Figura 2.4: Topología de un sistema mallaado

2.1.3. Características y tipos de cargas

En los sistemas de distribución, se puede encontrar una amplia variedad de cargas [Grigsby, 2007]. Esto depende de la población o las necesidades de los consumidores finales. De manera general, las cargas se pueden dividir en las categorías siguientes:

- Residencial o doméstica: principalmente está compuesta de lámparas, refrigeradores, ventiladores, aire acondicionado, hornos eléctricos así como pequeños motores.
- Comerciales: consiste en iluminación para tiendas, oficinas, aire acondicionado, en general todo el equipo usado en establecimientos comerciales tales como mercados, centros comerciales y restaurantes.
- Cargas industriales: estas cargas están conformadas por industrias pequeñas, medianas y en gran escala, principalmente se encuentran conformadas por grandes motores de inducción, variadores de frecuencia, hornos de arco y maquinaria soldadora.

En la Figura 2.5 se muestra un sistema eléctrico, en este se pueden observar sus principales etapas; generación transmisión y distribución. En la zona de distribución se observa las diferentes cargas alimentadas por el mismo.

2.2. Modelado de los elementos del sistema de distribución primario

En esta tesis se realiza un estudio de la ocurrencia de las depresiones de voltaje, el cual esta basado en el análisis de corto circuito. Por lo que los modelos que se utilizan en la misma, corresponden a estos estudios. Los sistemas que son utilizados en esta tesis corresponden a sistemas de distribución primaria, por lo que

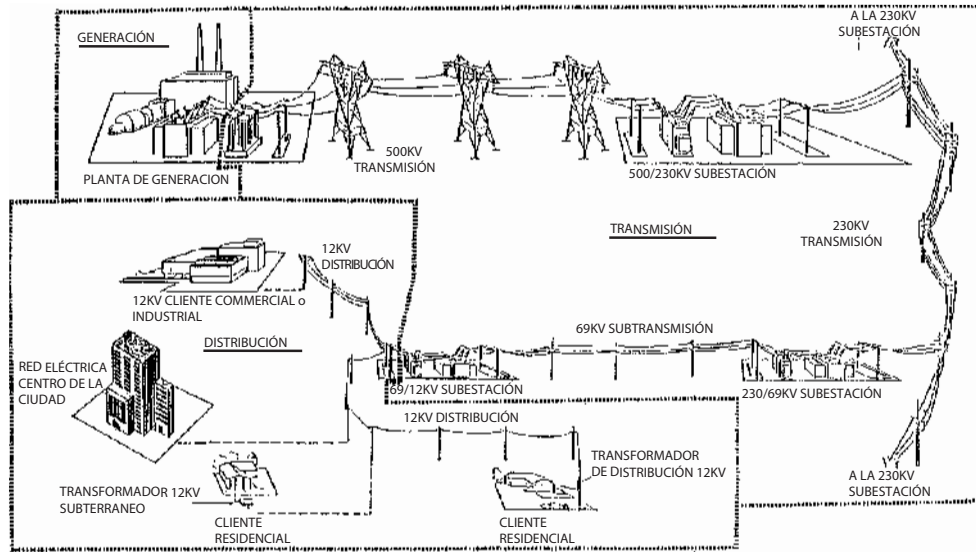


Figura 2.5: Sistema eléctrico de potencia

sus principales elementos son la subestación generadora y líneas de transmisión de corta longitud, que se encargan de suministrar energía a transformadores de distribución secundaria o cargas industriales conectadas directamente. Además se considera que la distribución primaria es balanceada.

2.2.1. Subestación de distribución

La subestación de generación puede ser modelada como un generador con una reactancia en serie. El valor de la reactancia puede ser calculado tomando en cuenta las características particulares del transformador de la subestación [Glover *et al.*, 2012]. La Figura 2.6 muestra el modelo de la subestación utilizado, el cual contiene una reactancia en serie X_g .

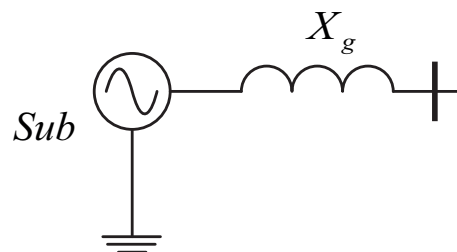


Figura 2.6: Modelo de la subestación

2.2.2. Línea de transmisión

Como se ha mencionado las líneas de transmisión en un sistema de distribución son de longitudes cortas. Con la finalidad de modelar una aproximación de la línea de transmisión corta es apropiado representarla como una red de dos puertos. La Figura 2.7 muestra una red de dos puertos donde V_k e I_k corresponden al voltaje y corriente en el nodo de envío, y V_m e I_m son el voltaje y corriente en el nodo de recepción.



Figura 2.7: Representación de la red de dos puertos

La relación entre las cantidades del extremo de envío y recepción pueden escribirse como:

$$V_k = AV_m + BI_m \quad \text{volts} \quad (2.1)$$

$$I_k = CV_m + DI_m \quad \text{A} \quad (2.2)$$

en forma matricial

$$\begin{bmatrix} V_k \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & D \\ B & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ I_m \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Los parámetros $ABCD$ dependen de las constantes R , L , C y G . A y D no tienen dimensiones. B tiene unidades de ohms y C , de siemens.

La representación de una línea de transmisión corta se muestra en la Figura 2.8, este tipo de representación es válida para líneas aéreas con una longitud menor de 80km ($\ell < 80\text{km}$).

La admitancia en derivación se desprecia en este modelo, y solo se incluye la resistencia y la reactancia en serie. El modelo del circuito es válido para líneas monofásicas o trifásicas que operen en condiciones balanceadas. La notación usada en la Figura 2.8 es la siguiente:

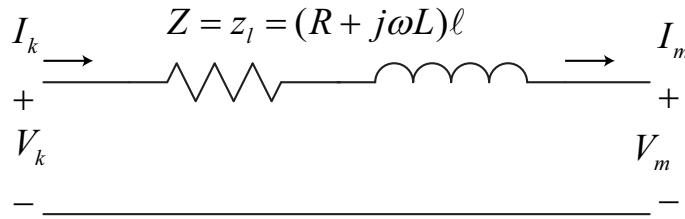


Figura 2.8: Modelo de la línea de transmisión de corta longitud

z	$= R + j\omega L$	Ω/m ,	impedancia en serie por unidad de longitud
y	$= G + j\omega C$	S/m ,	admitancia en serie por unidad de longitud
Z	$= z\ell$	Ω ,	impedancia total en serie
Y	$= y\ell$	S ,	admitancia total en derivación
ℓ	$=$ longitud de línea	m ,	metros

Los parámetros $ABCD$ del modelo de la línea corta de la Figura 2.8, pueden ser encontrados aplicando las leyes de voltaje y corriente de kirchhoff (LVK y LCK respectivamente).

$$V_k = V_m + ZI_m \quad (2.4)$$

$$I_k = I_m \quad (2.5)$$

o en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} V_k \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ I_m \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Comparando las ecuaciones (2.3) y (2.6), los parámetros de la línea corta son deducidos como:

$$\begin{aligned} A &= 1 \text{ p.u.} \\ B &= Z \ \Omega \\ C &= 0 \ S \\ D &= 1 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Se puede verificar la relación $AD - BC = 1$. La igualdad $A = D$ indica que la línea es la misma cuando se ve desde cualquier extremo. La capacidad de carga de las líneas cortas, se determina por el límite termico del conductor.

Ya que se han dado los modelos que corresponden al sistema de distribución que será simulado, es posible formular el problema de flujos de potencia. Posteriormente en esta tesis se consideran estudios de depresiones de voltaje y pérdidas de potencia en los sistemas de distribución, por lo que son imprescindibles los estudios de flujos de potencia.

2.3. Formulación del problema de Flujos de Potencia

Los estudios de flujo de potencia son importantes debido a que proporcionan información valiosa acerca de la operación de los sistemas eléctricos. La información que se obtiene de un estudio de flujos de potencia es la magnitud y ángulo de fase del voltaje en estado estacionario en cada nodo, así las potencias real y reactiva que fluyen en cada línea. A continuación se formula el problema de flujos de potencia, analizando una línea de transmisión de corta longitud.

Las ecuaciones de flujos de potencia inyectada en terminales de una línea de transmisión se derivan a partir del concepto de potencia compleja [Acha *et al.*, 2004]:

$$S = P + jQ = VI^* \tag{2.7}$$

El modelo de la línea de transmisión corta se representa en la Figura 2.9:

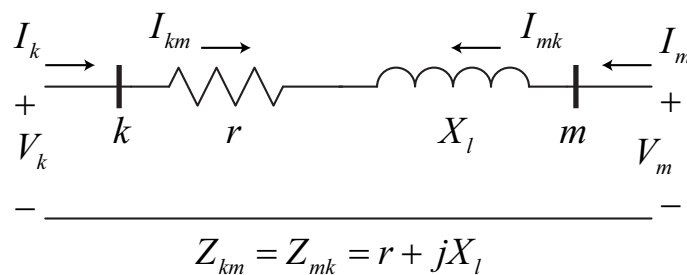


Figura 2.9: Modelo de la línea de transmisión de corta longitud

De la Figura 2.9 se pueden deducir las siguientes identidades:

$$I_k = I_{km} \quad (2.8)$$

$$I_k = \frac{V_k - V_m}{Z_{km}} \quad (2.9)$$

$$I_k = (V_k - V_m)y_{km} \quad (2.10)$$

$$I_m = (V_m - V_k)y_{mk} \quad (2.11)$$

donde y_{km} es la admitancia primitiva serie. Ya que la línea de distribución se modela como de corta longitud su admitancia es calculada de la siguiente manera:

$$y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} \quad (2.12)$$

$$y_{km} = \frac{1}{r + jX_l} = \frac{1}{r + jX_l} \cdot \frac{r - jX_l}{r - jX_l} \quad (2.13)$$

$$y_{km} = \frac{r}{r^2 + X_l^2} - \frac{jX_l}{r^2 + X_l^2} \quad (2.14)$$

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.15)$$

Las ecuaciones de corriente pueden ser escritas de manera matricial como:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{km} & -y_{km} \\ -y_{mk} & y_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

o en admitancias nodales

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{kk} & Y_{km} \\ Y_{mk} & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

donde los elementos de la matriz de admitancia y los voltajes nodales pueden ser expresados en coordenadas rectangulares y polares:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.18)$$

$$V_i = V_i e^{j\theta_i} = V_i (\cos\theta_i + j \sin\theta_i) \quad (2.19)$$

donde $i = k, m$ y $j = k, m$.

La potencia compleja inyectada en el nodo k es expresada en función al voltaje nodal y la corriente inyectada en el nodo:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (2.20)$$

$$S_k = V_k (Y_{kk} V_k + Y_{km} V_m)^* \quad (2.21)$$

donde I_k^* es la corriente conjugada inyectada en el nodo k . Sustituyendo (2.18) y (2.19) en (2.21) se obtiene:

$$S_k = V_k e^{j\theta_k} [V_k e^{-j\theta_k} (G_{kk} - jB_{kk}) + V_m e^{-j\theta_m} (G_{km} - jB_{km})] \quad (2.22)$$

aplicando la identidad de Euler, simplificando y separando la parte imaginaria de la real se pueden deducir las expresiones P_k^{cal} y Q_k^{cal}

$$P_k^{cal} = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.23)$$

$$Q_k^{cal} = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.24)$$

Las ecuaciones de balance de potencia para niveles de generación y carga especificados en el nodo k se encuentran dadas por las expresiones (2.25) y (2.26).

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - P_k^{cal} = 0 \quad (2.25)$$

$$\Delta Q_k = P_{Gk} - P_{Lk} - Q_k^{cal} = 0 \quad (2.26)$$

donde P_{Gk} y Q_{Gk} representan la potencia activa y reactiva respectivamente inyectada por un generador en el nodo k . P_{Lk} y Q_{Lk} representan la potencia activa y reactiva que demanda el nodo k . Ya que estas variables son conocidas, se puede definir una relación entre ellas llamada potencia activa especificada P_k^{sp} y potencia reactiva especificada Q_k^{sp} :

$$P_k^{sp} = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (2.27)$$

$$Q_k^{sp} = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (2.28)$$

Es posible realizar un análisis similar para encontrar los flujos de potencia para un unico elemento conectado entre los nodos k y m considerando las admitancias primitivas serie, ya que en las líneas del sistema de distribución no se considera la susceptancia en derivación. Tomando en cuenta la ecuación (2.8), la ecuación (2.20) se puede escribir de la siguiente forma:

$$S_{km} = P_{km} + jQ_{km} = V_k I_{km}^* \quad (2.29)$$

$$S_{km} = V_k [y_{km} (V_k - V_m)]^* \quad (2.30)$$

expresando los voltajes de la forma (2.19) y la admitancia de la forma (2.15) se obtiene:

$$S_{km} = V_k e^{j\theta_k} [(g_{km} - jb_{km})(V_k e^{-j\theta_k} - V_m e^{-j\theta_m})] \quad (2.31)$$

realizando las simplificaciones correspondientes y separando la parte real de la imaginaria se obtienen las siguientes expresiones, las cuales pertenecen al flujo de potencia activa y reactiva respectivamente, que viajan del nodo k hacia el nodo m :

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m [g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.32)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 b_{km} - V_k V_m [g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.33)$$

Para obtener las ecuaciones del flujo de m hacia k , solamente se cambia el orden de los subíndices.

2.3.1. Pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión

Las pérdidas de potencia activa en la línea de transmisión pueden ser calculadas mediante la siguiente expresión:

$$P_{erdidas} = P_{km} + P_{mk} \quad (2.34)$$

al realizar las simplificaciones correspondientes y usando las identidades trigonométricas de senos y cosenos, se obtiene la ecuación (2.35), la cual representa las pérdidas de potencia activa de la línea de transmisión que se encuentra entre los nodos k y m :

$$P_{erdidas} = g_{km}[V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m\cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.35)$$

Las pérdidas de potencia activa en la línea de transmisión también pueden ser calculadas mediante el efecto Joule, esta relación se define como:

$$P_{erdidas} = |I_k|^2 R = |I_m|^2 R \quad (2.36)$$

Las ecuaciones (2.32), (2.33) y (2.35) son presentadas en [Lavorato *et al.*, 2012], como parte del modelo de flujos de potencia para resolver el problema de optimización de reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución, y son usadas en esta tesis para calcular las pérdidas de potencia activa en las líneas en capítulos posteriores.

2.4. Depresiones de voltaje

En esta sección, se abordan los principios básicos de las depresiones de voltaje, sus definiciones, causas que las originan, un método para la estimación de depresiones de voltaje, así como una descripción breve de prácticas auxiliares para tratar con este problema de calidad de la energía.

2.4.1. Definición de depresión de voltaje

Las depresiones de voltaje son reducciones en el valor eficaz o R.M.S (*Root Mean Square* por sus siglas en inglés) del voltaje de una duración breve. Son ocasionadas principalmente por fallas en el sistema así como arranques de grandes cargas. Existen dos importantes normas que dan definiciones acerca de las depresiones de voltaje. La norma IEEE Std. 1159-1995 [IEEE Std. 1159-1995, 1995], define una depresión como una disminución en el voltaje o corriente, en el valor R.M.S, entre 0.1 y 0.9 p.u. a la frecuencia de operación del sistema, con una duración entre 0.5 ciclos y 1 minuto. El estándar europeo EN 50106 [EN50106, 1999] define las depresiones de voltaje como una reducción repentina en el voltaje a un valor entre 90 % y 10 % del voltaje nominal, seguida de un restablecimiento del voltaje después de un corto lapso de tiempo, convencionalmente de 10 ms a 1 minuto. El termino de voltaje residual es utilizado comúnmente, y corresponde al mínimo valor eficaz al que se decrementa el voltaje durante la depresión.

2.4.2. Origen y consecuencias de las depresiones de voltaje

Las depresiones de voltaje son originadas principalmente por fallas de corto circuito que se presentan en el sistema, ya sea de transmisión, de subtransmisión o de distribución. Las fallas pueden presentarse como monofásicas, dos fases a tierra, entre dos fases, o trifásicas siendo las primeras las más comunes. A continuación se mencionan algunas de las principales causas que generan depresiones de voltaje:

- Fenómenos atmosféricos: descargas atmosféricas, condiciones de lluvia, nieve, viento, acumulación de oxido y sarro.
- Maniobras operativas en el sistema: operaciones de cierre, recierres en las protecciones del sistema.
- Condiciones geográficas: contacto no deseado con árboles o estructuras ajenas al sistema, animales.
- Arranque de grandes cargas: grandes motores, hornos de arco, soldadoras y conexión de transformadores.
- Otros factores: vandalismo, accidentes vehiculares.

Ya que muchas de las fallas son ajenas al sistema no es posible poder predecirlas, pero mediante algunas prácticas es posible reducir las depresiones de voltaje.

El impacto que tienen las depresiones de voltaje, se presenta principalmente en los equipos de los usuarios finales del suministro de energía eléctrica. Los equipos más comunes que presentan mal funcionamiento debido a las depresiones de voltaje, son [Bollen, 2000], [Baggini, 2008]:

- Dispositivos electrónicos sensibles.
- Dispositivos de control y operación.
- Dispositivos de instrumentación biomédica e industrial.
- Variadores de velocidad de motores CA, CD.
- Motores síncronos y de inducción.
- Equipo de cómputo.
- Lámparas ahorradoras y de descarga.

Las principales consecuencias de las depresiones de voltaje son de índole económica, ya que un evento puede dejar fuera de operación un importante proceso industrial y a su vez causar una pérdida monetaria importante. Restablecer algún proceso puede llevar tiempo y tener pérdidas excesivas de horas hombre. Es principalmente por esta razón, la necesidad del estudio de las depresiones de voltaje y buscar soluciones a estos problemas.

2.4.3. Reducción de depresiones de voltaje

Afortunadamente existen soluciones para prevenir el daño que ocasionan las depresiones de voltaje. Típicamente estas soluciones pueden ser categorizadas en tres clases [Baggini, 2008]:

1. Soluciones en el proceso de manufactura y fabricación.
2. Soluciones entre el proceso y la red eléctrica.
3. Soluciones en la red eléctrica.

Entre las estrategias más importantes para reducir las depresiones de voltaje se encuentran [Bollen, 2000] [Baggini, 2008]:

- Reducción del número de fallas.
- Reducción en el tiempo de liberación de la falla.
- Modificaciones en la configuración del suministro.
- Instalación de dispositivos.
- Mejora de la inmunidad del equipo.
- Reconfiguración del sistema.

En esta tesis, con el objetivo de minimizar las depresiones de voltaje del sistema, es usada una estrategia de reconfiguración. En niveles de transmisión y sub-transmisión esta técnica ha demostrado buenos resultados, disminuyendo la cantidad de depresiones de voltaje en los nodos [Lucio, 2009], [Espinosa y Lucio, 2012], [García y Espinosa, 2011]. El costo de una reconfiguración en estos niveles puede llegar a ser alto debido a los niveles de voltaje y la salida de operación de una línea. En sistemas de distribución que operan en forma anillo radial, se cuenta con líneas de enlace las cuales facilitan los procesos de reconfiguración. Es por esta razón que en un sistema de distribución sea más común la reconfiguración pero se tiene la desventaja que es un problema con alta dificultad combinatorial debido a la cantidad de configuraciones que se pueden obtener.

2.4.4. Método de posición de fallas

El método de posición de fallas, es catalogado como un método estocástico de predicción. Mediante este tipo de métodos se pueden realizar estudios de calidad de la energía en sistemas que no pueden ser monitoreados mediante un equipo físico instalado en un nodo. Este es un método de estimación de depresiones de voltaje que se usa actualmente y es aplicado por varios autores para realizar estudios de calidad de la energía en sistemas eléctricos de prueba.

Mediante el método de posición de fallas se puede determinar la probabilidad de aparición de depresiones de voltaje en un sistema eléctrico en un lapso de tiempo. El principio de este método, es establecer un número de posiciones de falla, previamente seleccionadas y dispersas en todo el sistema eléctrico. Por medio

de datos estadísticos en cada posición de falla en nodos y líneas, un número de eventos esperados en determinado tiempo se asigna a cada posición de falla. El número esperado de depresiones de voltaje debido a fallas puede ser calculado de manera directa [Qader y Bollen, 1999],[Bollen, 2000]. Para obtener la magnitud de las depresiones de voltaje se aplican las técnicas convencionales para el cálculo de cortocircuito en sistemas eléctricos, la frecuencia de ocurrencia se calcula mediante la combinación de datos estadísticos de probabilidad de falla. A continuación se describe este método.

Sea un sistema eléctrico en el cual es conocida la matriz de impedancia nodal Z_{nodal} de n número de nodos, el voltaje en un nodo cuando se presenta un falla en un nodo f , el voltaje V_i en el nodo i , a consecuencia de esta falla se calcula de la siguiente manera [Grainger y Stevenson, 1996]:

$$V_i = V_i^{pf} + \Delta V_i \quad (2.37)$$

donde V_i^{pf} se refiere al voltaje de prefalla en el nodo i y ΔV_i indica el cambio en el voltaje del nodo i debido a la falla que se presentó en el nodo f , el cual se calcula como sigue:

$$\Delta V_i = -Z_{if} I_f \quad (2.38)$$

donde Z_{if} es la impedancia del elemento (i, f) de la matriz de impedancia nodal, I_f corresponde a la corriente de falla en el nodo f . Cuando el sistema se somete a una falla trifásica sólida balanceada, I_f se calcula mediante:

$$I_f = \frac{V_f^{pf}}{Z_{ff}} \quad (2.39)$$

Z_{ff} corresponde al elemento (f, f) de la matriz de impedancia nodal y V_f^{pf} indica el voltaje de prefalla del nodo f . Al sustituir las ecuaciones (2.37) y (2.39) en (2.38) se obtiene:

$$V_i = V_i^{pf} - \frac{Z_{if}}{Z_{ff}} V_f^{pf} \quad (2.40)$$

con la cual se puede calcular el voltaje en el nodo i , al momento de la falla en el nodo f . Otros tipos de fallas pueden ser consideradas, y sus ecuaciones análogas

a (2.40) se pueden obtener siguiendo los procedimientos convencionales para el cálculo de cortocircuito.

Para considerar fallas a lo largo de las líneas del sistema, se suponen nodos ficticios en cada una de las posiciones de falla que se consideren a lo largo de la línea. El método de posición de fallas consiste en calcular el voltaje residual que se produce en los todos los nodos del sistema cuando ocurren fallas, tanto en los nodos ficticios de las líneas y en los nodos del sistema mediante expresiones análogas a la ecuación (2.40) [Bollen, 2000].

Para estimar la frecuencia de aparición de las depresiones de voltaje se utilizan los datos de los componentes del sistema. En el caso de las líneas de transmisión, generalmente se dispone del número de fallas en la línea que depende de su longitud para un periodo de tiempo determinado, típicamente un año. Es posible asignar a cada una de las posiciones de falla un número de fallas al año λ_f , proporcional a la longitud del segmento representado por dicha posición. Esta información y las características calculadas del voltaje residual de la depresión producida al ocurrir una falla, proporciona una estimación del número esperado de depresiones de voltaje [Bollen, 2000] [Qader y Bollen, 1999].

Generalmente se agrupa la frecuencia de ocurrencia de las depresiones de voltaje clasificándolos dentro de rangos de voltaje residual [Qader y Bollen, 1999], [Bollen, 2000]. La precisión de este método depende del número de posiciones de falla, un gran número de ellas tienen que ser simuladas para realizar una predicción de depresiones de voltaje precisas.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se dio una introducción acerca de las principales características de los sistemas de distribución, entre las que destacan, los tipos de cargas, y las topologías en las que se les puede encontrar. Generalmente los sistemas de distribución operan en topologías anillo-radial, con la finalidad de poder reconfigurar el sistema si se presenta una falla y no dejar sin suministro a los clientes finales.

De manera adicional, se dieron los principios básicos de las depresiones de voltaje, y la importancia de su estudio, ya que estas ocasionan que el equipo sensible tenga mal funcionamiento. Se modelaron los componentes básicos del sistema de distribución primario, se formuló el problema de flujos de potencia y se presentaron las ecuaciones para calcular las pérdidas de potencia activa en las líneas de

transmisión. También se presentó el método de posición de fallas, con el cual se pueden determinar las depresiones de voltaje en un sistema eléctrico en un determinado periodo de tiempo. Mediante algunas prácticas se pueden reducir las depresiones de voltaje con la finalidad de obtener mejoras en el suministro del sistema eléctrico.

Capítulo 3

Algoritmos genéticos aplicados a la reconfiguración de sistemas de distribución

La reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución ha sido un tema ampliamente estudiado. Se han dado distintos enfoques a este tipo de problema, siendo el principal objetivo la disminución de pérdidas de potencia en el sistema [Civanlar *et al.*, 1988] [von Meier, 2006]. La reconfiguración consiste básicamente en cambiar la topología de un sistema con la finalidad de obtener una nueva configuración que cumpla con ciertos criterios. Uno de los principales problemas que se pueden encontrar en los estudios de reconfiguración, es cumplir con la condición de radialidad ya que los sistemas de distribución operan generalmente con este tipo de topología.

En este capítulo se aborda el tema de la reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución. Se dan las bases del funcionamiento de los algoritmos genéticos. Se tratan también temas de los sistemas de distribución, simplificaciones y consideraciones que se deben tomar en cuenta. Se propone la metodología para solucionar el problema de reconfiguración usando un algoritmo genético propuesto, y por último se analizan tres casos de estudio para probar su efectividad.

3.1. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos o GA's (por sus siglas en inglés) son un método para resolver problemas de optimización con y sin restricciones, basados en el pensamiento Darwiniano de selección y evolución natural. La idea surgió de John Henry Holland en los años 70's [Holland, 1975]. No fue sino hasta 1989 cuando Goldberg proporcionó una base científica de los GA's [Goldberg, 1989]. Los GA's operan con una población de individuos, donde cada individuo es una solución potencial a un problema dado. Dependiendo del tipo de problema, se codifica cada individuo en un cromosoma que puede tener determinadas características.

3.1.1. Funcionamiento

Un algoritmo genético funciona en base a la selección natural y el proceso evolutivo de los seres vivos. Un GA, simula este proceso con la finalidad de encontrar una solución óptima de un problema. Este tipo de algoritmo opera con un conjunto de individuos llamados población, en donde cada uno de los individuos representa una solución potencial. Cada individuo se encuentra codificado en un cromosoma el cual contiene una cadena de genes que caracteriza a cada individuo.

Debido a la gran cantidad de problemas que un GA es capaz de resolver, la representación del individuo es clave para el desempeño óptimo del mismo, esto debido a la necesidad de representar todas las posibles combinaciones y soluciones al problema que se quiere resolver. Cuando se obtiene una adecuada representación del individuo, es necesario evaluar cada individuo con el objetivo de asignar un valor o puntuación el cual corresponde a su nivel de aptitud. El individuo que cuente con una adaptación mayor, tendrá mejores posibilidades de reproducirse con otro individuo seleccionado con el mismo criterio. Mediante una operación de cruce se generan nuevos individuos descendientes de los anteriores, los cuales comparten material genético de sus padres. De esta manera una nueva población es generada y reemplaza a la anterior, lo cual garantiza que los nuevos individuos contienen los mejores genes en comparación con la población anterior. Esto asegura que las siguientes generaciones cuenten con individuos bien adaptados y que sus características son transmitidas a través de la población.

Un algoritmo genético cuenta con tres operadores básicos: selección, cruce y mutación.

Los algoritmos genéticos pueden resolver una variedad de problemas de diferentes áreas con éxito debido a lo robusto de esta técnica. En algunas ocasiones el costo computacional también se reduce comparado con otras técnicas de búsqueda. En algunas ocasiones existen problemas para los cuales no existen técnicas especializadas para su solución, en estos casos un algoritmo genético bien desarrollado puede ser auxiliar en la solución de este tipo de problemas [Goldberg, 1989]. En la Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo típico de un algoritmo genético.

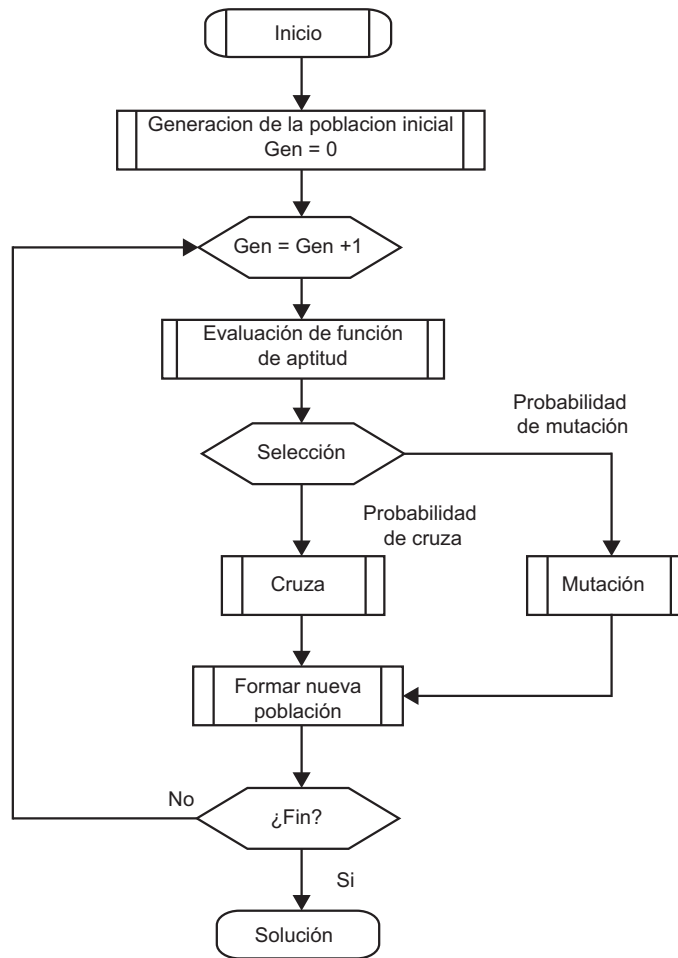


Figura 3.1: Algoritmo genético típico

Algunas de las principales ventajas que ofrece un GA son las siguientes:

- Debido a su naturaleza evolutiva, los algoritmos genéticos buscan soluciones sin tener en cuenta el funcionamiento específico del problema.
- Sus operadores de evolución hacen que sea muy efectivo en la búsqueda de soluciones.
- Operan de manera simultánea con varias soluciones, tomando información de varios puntos del espacio de búsqueda como guía.

En los siguientes apartados se describen los elementos principales que conforman a un GA.

3.1.2. Representación

Para aplicar un GA a un problema en específico, la primera decisión que se debe tomar, es qué tipo de genotipo necesita el problema. Esto significa que se deben de tomar en cuenta los parámetros del problema, y deben de ser representados en una cadena finita de genes, codificada como posible solución al problema. El conjunto de genes es conocido como cromosoma. La decodificación del genotipo da lugar al fenotipo el cual representa la solución real al problema planteado.

Existen varios tipos de representaciones. Las siguientes pueden ser consideradas como básicas ya que alguna variante puede ser representada mediante cualquiera de ellas o alguna combinación [Caballero *et al.*, 2003]:

- Representación real.
- Representación binaria.
- Representación entera.

Al comienzo de las investigaciones acerca de los GA, la representación binaria era la recomendada debido a su supuesto ajuste en un gran número de esquemas refiriéndose específicamente a problemas. Actualmente cromosomas conformados por genes que contienen valores enteros y continuos son usados en funciones de optimización de gran escala obteniéndose excelentes resultados [Lee y El-Sharkawi, 2008].

3.1.3. Población inicial

La población inicial constituye el componente inicial de material genético. Generalmente la población inicial es producida aleatoriamente.

La población inicial también puede ser generada a partir de un conocimiento *a priori* sobre la solución. Este procedimiento no debería ser drásticamente restrictivo en el sentido de la diversidad de la población, de otra manera podría ocurrir una convergencia prematura. Para problemas de optimización de gran escala, las poblaciones típicas varían entre 30 y 200 individuos. El tamaño de

la población generalmente se encuentra en función del tamaño del cromosoma [Lee y El-Sharkawi, 2008].

3.1.4. Función de aptitud

Después de generar la población inicial cada individuo es evaluado para asignarle un valor de aptitud. La función de aptitud permite que los individuos puedan ser ordenados en base a su calidad. La calidad de un individuo está relacionada directamente con la probabilidad de que sea seleccionado para reproducirse y así sus mejores genes puedan ser usados en futuras generaciones.

3.1.5. Operador de selección

Es el operador responsable para determinar las características de convergencia de los GA's. El operador de selección es el encargado de especificar cómo serán elegidos los individuos de acuerdo a la calidad de aptitud. Este operador genera nuevos individuos seleccionando individuos de la población anterior. Los individuos mejor adaptados tendrán una mayor probabilidad de reproducirse y cruzar su material genético. En las nuevas generaciones creadas mediante este operador deberán existir copias de los mejores individuos y algunos de los peores, esto con la esperanza de que los individuos que no se encuentran bien adaptados puedan contener información genética útil para las siguientes generaciones. Entre los operadores de selección se encuentran; selección por torneo, elitista, por ruleta, uniforme estocástica, por *ranking* lineal y exponencial [Caballero *et al.*, 2003].

3.1.6. Operador de cruza

Este operador especifica como el algoritmo genético combina dos individuos (en este caso padres) para formar un nuevo individuo el cual hereda información genética de cada uno de ellos. De esta manera la información de la población actual es combinada para crear nuevos individuos. Algunos operadores usados frecuentemente, son: cruza de un punto, cruza de dos puntos y cruza uniforme [Lee y El-Sharkawi, 2008] [Caballero *et al.*, 2003].

3.1.7. Operador de mutación

Un inconveniente del operador cruza, es el hecho de que en alguna posición particular, el valor del gen puede estar sujeto a no cambiar. Para evitar este tipo de problema el operador de mutación juega un papel muy importante ya que introduce inadvertidamente un gen nuevo en el cromosoma. En otras palabras este operador se aplica a un cromosoma de manera individual y los genes son remplazados de manera aleatoria, de esta manera se asegura que el algoritmo genético pueda explorar un espacio de búsqueda mayor evitando quedar atrapado en un mínimo local [Lee y El-Sharkawi, 2008].

3.2. Reconfiguración de sistemas de distribución

El problema asociado a la reconfiguración de redes eléctricas de distribución, consiste en cambiar el estado de los interruptores de abierto a cerrado o viceversa, con la finalidad de encontrar una estructura de operación radial. Numerosos estudios acerca de reconfiguración han sido desarrollados mediante metodologías y algoritmos que hacen uso de métodos heurísticos y estocásticos.

El principal objetivo al realizar una reconfiguración de un sistema en general, es encontrar una topología que presente una mejora operacional comparada con el sistema base u original. Entre los principales propósitos se pueden encontrar: reducción de pérdidas de potencia, mejoras en la confiabilidad del sistema, balance de energía en redes trifásicas, reducción de costos debidos a interrupciones en el suministro, etc [Gonzalez, 2007] [Cebrian y Kagan, 2008] [Garcés, 2005]. En todos los casos se deben de tomar en cuenta restricciones operacionales como la conectividad de la red, configuraciones radiales, flujos de potencia en las líneas y voltajes en los nodos [Lavorato *et al.*, 2012].

Debido a la gran cantidad de interruptores candidatos y combinaciones que pueden ser generadas mediante estos, la reconfiguración de redes eléctricas de distribución tiene una índole combinatorial altamente compleja. La naturaleza discreta de la conmutación de los interruptores dificulta el uso de técnicas de optimización clásicas para resolver el problema de reconfiguración [Wang y Zhong, 2008].

En la operación de sistemas de distribución y expansión de los mismos, la aplicación de técnicas evolutivas y otras técnicas de inteligencia artificial ofrecen buenas alternativas en la búsqueda de una solución [Lee y El-Sharkawi, 2008].

3.2.1. Reconfiguración de sistemas de distribución para reducir depresiones de voltaje

El objetivo principal de la reconfiguración de un sistema de distribución en esta tesis, es reducir el número de depresiones de voltaje esperada en los nodos. Para explicar por qué un sistema con nueva topología tiene un menor número de depresiones de voltaje es necesario tomar en cuenta la siguiente ecuación, la cual se dedujo en la Subsección 2.4.4:

$$V_i = V_i^{pf} - \frac{Z_{if}}{Z_{ff}} V_f^{pf} \quad (3.1)$$

esta describe el voltaje en el nodo i , al momento de la falla en el nodo f . Cuando se consideran estudios con voltajes de prefalla unitarios, el voltaje de falla en el nodo i depende exclusivamente del valor de las impedancias.

En el caso de que se consideren voltajes de prefalla distintos a la unidad, el voltaje de falla en el nodo i dependerá, tanto de los voltajes de prefalla como de las impedancias. Hay que recordar que los estudios de reconfiguración son usados principalmente para disminuir pérdidas de potencia activa, lo que tiene como consecuencia un perfil de voltaje más alto. Entonces, una nueva topología puede tener un perfil de voltaje más alto con impedancias menores.

3.3. Mallas fundamentales y sistemas de distribución

Un sistema eléctrico en general puede ser representado mediante un grafo, lo que permite poder aplicar toda la teoría de grafos existente. Un grafo muestra la interconexión geométrica de los elementos de un sistema [Stagg y Abiad, 1968]. Un grafo que conecta todos los nodos sin contar con trayectorias cerradas es llamado árbol. Los elementos que conectan al árbol son llamadas ramas. El número de ramas M necesarias para formar un árbol está dada por:

$$M = n - 1 \tag{3.2}$$

donde: n es el número de nodos en el grafo.

Los elementos que no se incluyen en el árbol son llamados enlaces y forman un subgrafo, que no necesariamente se encuentra conectado y es llamado coárbol. El número de enlaces l en un grafo se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$l = n_l - n + 1 \tag{3.3}$$

donde: n_l representa el número de ramas totales del grafo.

Si un enlace es añadido al árbol se genera una trayectoria cerrada llamada malla. La adición de cada enlace puede formar una o más mallas, las mallas que contienen solamente un enlace son independientes y son llamadas mallas fundamentales o básicas. En consecuencia el número de mallas fundamentales es igual al número de enlaces dado por la ecuación (3.3).

En la Figura 3.2 se muestra un grafo de un sistema eléctrico [Stagg y Abiad, 1968], este consiste de 5 nodos y 7 ramas. De acuerdo a lo descrito el número de ramas necesarias para que el grafo sea un árbol es $M = 4$ y el número de enlaces es $l = 3$ que también representa el número de mallas fundamentales que se forman en el grafo. Los enlaces corresponden a l_6 , l_5 y l_7 .

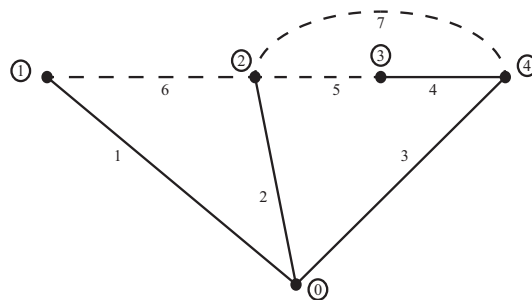


Figura 3.2: Representación de un arbol

Algunas definiciones descritas anteriormente pueden ser asociadas a términos técnicos que han sido utilizados anteriormente. Ya que estos términos serán utilizados durante esta tesis, es posible realizar la analogía de un grafo con un sistema de distribución. A continuación se enumeran los principales términos:

1. Las ramas corresponden a las líneas encargadas de transportar la energía entre cada nodo.

2. En un grafo que es representado como un árbol, en un sistema de distribución se refiere a una topología radial ya que no se permiten ciclos o trayectorias cerradas debido a su característica de operación.
3. Un enlace, es conocido como *tie line* en un sistema de distribución y corresponde a una línea que opera en estado normalmente abierto; al igual que en teoría de grafos al cambiar su estado a cerrado genera una malla fundamental.

3.4. Simplificación de un sistema de distribución

En algunos casos es necesario realizar una simplificación del sistema de distribución con la finalidad de excluir operaciones innecesarias y reducir un poco la complejidad del problema. Con el propósito de ejemplificar la simplificación se elige un sistema de distribución de tamaño reducido, el cual ha sido ampliamente usado en la literatura para realizar pruebas de reconfiguración. Los datos del sistema pueden ser encontrados en [Civanlar *et al.*, 1988]. El sistema consiste de 3 alimentadores, un total de 16 nodos, 16 líneas de las cuales 3 son *tie line* en estado normalmente abierto. El sistema es mostrado en la Figura 3.3, donde también se muestra un subárbol formado solamente por la línea 20 que conecta el nodo 9 con el 12.

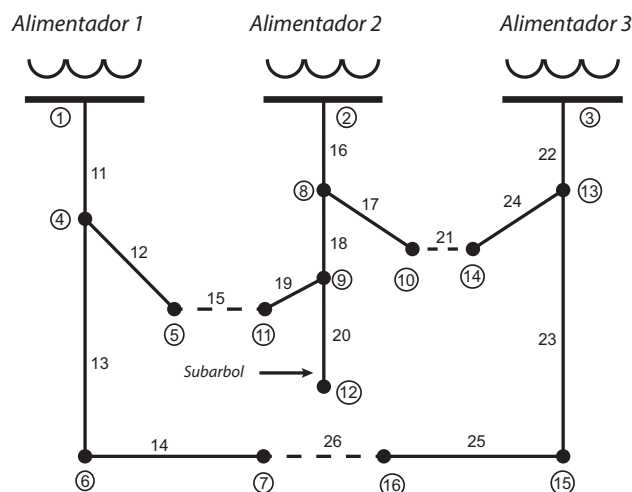


Figura 3.3: Sistema básico con tres alimentadores

Las líneas necesarias para mantener una topología radial no pueden ser calculadas mediante la ecuación (3.2), ya que esta tiene que ser generalizada para un

sistema con n_f número de alimentadores. La ecuación que representa el número de líneas necesarias en operación para mantener una estructura radial es:

$$M = n - n_f \tag{3.4}$$

donde n_f es el número de alimentadores.

El sistema de la Figura 3.3 puede ser simplificado y representado como se muestra en la Figura 3.4. Un supernodo contiene a todos los alimentadores con la finalidad de que no se tenga un camino que una a los alimentadores. La línea 20 no se contempla ya que no se encuentra en las mallas fundamentales y su cambio de operación sólo ocasiona que el nodo 12 se quede aislado del sistema. Al evaluar cada topología el subárbol conformado por la línea 20 se añade al sistema ya que forma parte de este. Por último, al realizar una reconfiguración exitosa el supernodo se desintegra con la finalidad de que en la topología que se encontró como solución se pueda observar como cada alimentador suministra las cargas correspondientes.

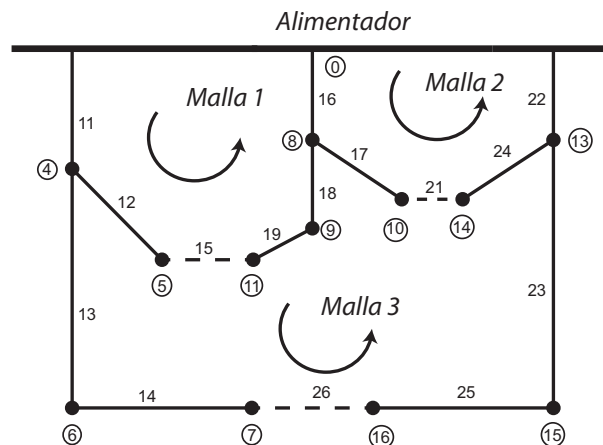


Figura 3.4: Sistema de Cinvalar simplificado

Las mallas fundamentales están conformadas con los elementos que se indican en los arreglos siguientes:

Malla 1 = [11 12 16 18 19 15]

Malla 2 = [16 17 22 24 21]

Malla 3 = [11 13 14 22 23 25 26]

Este sistema también será usado con la finalidad de ejemplificar los operadores y funciones del algoritmo genético que ha sido implementado.

3.5. Tipos de representación

La representación del cromosoma y sus genes juegan un papel muy importante, ya que deben de contemplar los parámetros del problema y ser capaces de representar todas las posibles soluciones. Mediante una buena elección de la representación del cromosoma se puede desarrollar la metodología adecuada que solucione el problema de reconfiguración de sistemas de distribución.

Como ejemplo la Figura 3.5 muestra un sistema mallado con la finalidad de ejemplificar las representaciones que han sido utilizadas para realizar reconfiguraciones de sistemas de distribución. Esta figura se presenta en [Mendoza *et al.*, 2006]

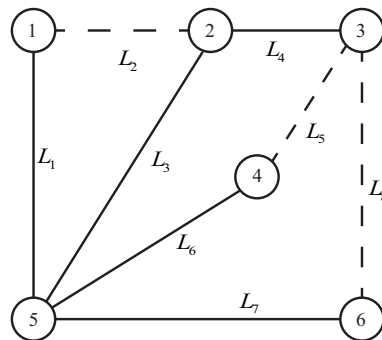


Figura 3.5: Representación de individuos

3.5.1. Representaciones binarias

Este tipo de representación ha sido muy usada en la literatura existente, se presenta por ejemplo en [Lavorato *et al.*, 2012] y [Espinosa y Lucio, 2012]. Cada línea se representa mediante un vector binario, en el cual si un elemento del vector tiene un valor de 1 la línea se encuentra conectada, si por el contrario el valor es 0 la línea se encuentra desconectada.

$$X = \begin{matrix} & l_1 & l_2 & l_3 & l_4 & l_5 & l_6 & l_7 & l_8 \\ \left[\begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Otro tipo de representación [Nara *et al.*, 1992], utiliza el término *arco* que significa la línea que se encuentra entre dos nodos, y el interruptor (*swt*) se refiere a la sección del arco que se encuentra normalmente abierto, esto debido a que un arco pueda contener secciones de dos o más interruptores, esto es:

$$X = \begin{matrix} & \text{Arc2-swt1} & \text{Arc5-swt1} & \text{Arc8-swt1} \\ \left[\begin{array}{ccc} 000101 & 010101 & 010001 \end{array} \right] \end{matrix}$$

En [Zhu, 2002] se propone una representación donde, cada interruptor en estado abierto es representado por una cadena binaria que corresponde al valor decimal de la línea:

$$X = \begin{matrix} & l_2 & l_5 & l_8 \\ \left[\begin{array}{ccc} 0010 & 0101 & 1000 \end{array} \right] \end{matrix}$$

3.5.2. Representaciones con número enteros

Algunas representaciones donde los genes se encuentran conformados por números enteros, han sido propuestas por varios autores, a continuación se mencionan algunas de estas representaciones:

En [Carreno *et al.*, 2008], se propone una representación que consiste en incluir las líneas en su totalidad, donde el primer conjunto representa las líneas que se encuentran conectadas o normalmente cerradas. El conjunto más pequeño localizado a la derecha representa las *tie line* o interruptores en estado normalmente abiertos.

$$X = \left[\begin{array}{cccccc|ccc} l_1 & l_3 & l_4 & l_6 & l_7 & & l_2 & l_5 & l_8 \\ 1 & 3 & 4 & 6 & 7 & & 2 & 5 & 8 \end{array} \right]$$

En este tipo de representación el cromosoma se encuentra compuesto solamente de las líneas que se encuentran en estado normalmente cerrado y fue presentado en [Torres *et al.*, 2010].

$$X = \begin{matrix} & l_1 & l_3 & l_4 & l_6 & l_7 \\ \left[\begin{array}{ccccc} 1 & 3 & 4 & 6 & 7 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Otra alternativa de cromosoma, al igual que en [Zhu, 2002] muestra solamente las líneas que se encuentran desconectadas, con la diferencia que no están codificadas mediante una cadena binaria, se encuentran en forma decimal. Esta representación se usa en [Mendoza *et al.*, 2006]

$$X = \begin{matrix} & l_2 & l_5 & l_8 \\ \left[\begin{array}{ccc} 2 & 5 & 8 \end{array} \right] \end{matrix}$$

3.6. Metodología propuesta

Con la finalidad de resolver el problemas asociado a la reconfiguración de sistemas de distribución radiales en esta tesis se propone una metodología para solucionar dicho problema. Esta metodología se basa en el diseño específico de un GA con la finalidad de evaluar individuos en forma de árbol o radiales. Evaluando solamente individuos radiales, el espacio de búsqueda se reduce, lo que tiene como ventaja un costo computacional menor. Las funciones principales para que el algoritmo genético genere individuos de topología radial son:

1. *Población inicial*: una población inicial variada y generada de manera aleatoria. Para que el algoritmo tenga material genético con el cual operar. Todos los individuos son válidos desde el punto de vista de su topología.
2. *Operador de cruza*: operador que encargado de intercambiar material genético entre los individuos, y respetar que el individuo generado sea radial.
3. *Operador de mutación*: operador encargado de buscar soluciones en todo el espacio de búsqueda, asegurando que el individuo sea de topología válida.

A continuación se formula el problema asociado a la reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución.

3.6.1. Representación del cromosoma

Como se ha mencionado anteriormente una representación adecuada es de gran utilidad y uno de los principales pilares para obtener resultados favorables en un algoritmo genético. La representación que se usa en esta tesis es similar a la propuesta por [Zhu, 2002] en combinación con la que se propone en [Mendoza *et al.*, 2006], con la diferencia que en el cromosoma cada gen tiene un índice de posición, el cual indica que la línea es elemento del vector de malla fundamental correspondiente. En la codificación del cromosoma, se representan las líneas fuera de operación, o normalmente abiertas para que el sistema opere de forma radial. Cada línea se codifica en una cadena binaria. Por ejemplo la primera cadena binaria corresponde a línea 2 que es elemento del conjunto de la malla fundamenta número 1.

$$X = \begin{bmatrix} \text{Malla1-l}_2 & \text{Malla2-l}_5 & \text{Malla3-l}_8 \\ 0100 & 1010 & 0001 \end{bmatrix}$$

Hay que observar que el bit menos significativo de cada cadena binaria esta asociado a la primera columna de la línea correspondiente. Mediante esta representación se puede tener bien identificadas que líneas que corresponden a cada malla principal y evitar que al cruzar o mutar se cambie el estado de operación de una línea que pueda compartir información genética con más de una malla fundamental, en otras palabras, que una línea que forme parte de dos o más mallas fundamentales se repita en el cromosoma.

3.6.2. Formulación del problema

En esta tesis, el objetivo principal de la reconfiguración de un sistema de distribución, es obtener la configuración que tenga el menor número de depresiones de voltaje esperada en los nodos. Las depresiones de voltaje se encuentran sujetas a variaciones que dependen de parámetros y características de un sistema. Cambiando la topología de la red se pueden lograr resultados favorables y desfavorables dependiendo el caso que sea analizado.

Para formular el problema de reconfiguración es posible definir una serie de vectores que serán de ayuda para comprender la metodología propuesta. Estos son:

$$\begin{aligned} V_{ref} &= [V_{ref_1} \quad V_{ref_2} \quad V_{ref_3} \quad \cdots \quad V_{ref_n}] \\ V_{reconf} &= [V_{reconf_1} \quad V_{reconf_2} \quad V_{reconf_3} \quad \cdots \quad V_{reconf_n}] \\ V_{ecBand} &= [V_{ecBand_1} \quad V_{ecBand_2} \quad V_{ecBand_3} \quad \cdots \quad V_{ecBand_n}] \end{aligned}$$

V_{ref} corresponde al vector de referencia de los valores de depresiones de voltaje por año en los nodos. Este vector contiene un valor de referencia de depresiones de voltaje por año, para un n número de nodos del sistema. V_{reconf} corresponde a las depresiones de voltaje por año después de una reconfiguración. Cada elemento corresponde a las depresiones de voltaje de la configuración actual para cada uno de los nodos. V_{ecBand} es un vector binario donde V_{ecBand_i} se define como 1 si $V_{reconf_i} > V_{ref_i}$ y 0 de otra manera, n es el número de nodos.

La ocurrencia de depresiones de voltaje en un sistema eléctrico se encuentran ligadas a datos estadísticos. Es posible utilizar esta información para considerar valores típicos en algún nodo en particular. De acuerdo a su clasificación y datos estadísticos se pueden considerar valores de referencia para los nodos del sistema [Lucio, 2009]. Se considera un umbral de voltaje t_1 , el vector de referencia se

encuentra conformado por las depresiones de voltaje que tienen un voltaje residual igual o menor al especificado en t_1 . Una vez que se han definido los vectores, se puede plantear la función objetivo del problema.

El propósito de reconfigurar un sistema eléctrico en esta tesis, es encontrar el estado de operación de las líneas (abierto/cerrado), que minimice el número de depresiones de voltaje, con respecto a un valor especificado de las mismas en los nodos. De acuerdo a lo anterior, el problema es formulado como:

$$\min \sum_{i=1}^n V_{ecBand_i} \quad (3.5)$$

$$\text{Sujeto a: } M = n - n_f \quad (3.6)$$

Donde:

n_f Número de alimentadores o subestaciones;

M Número de líneas en operación para obtener un sistema radial.

La evaluación de las depresiones de voltaje que se requiere para obtener el vector V_{ecBand} es realizada utilizando el método de posición de fallas. La ecuación (3.6) representa la restricción de radialidad, la cual es necesaria pero no suficiente para asegurar radialidad en el sistema.

Cuando el problema de optimización es resuelto, la topología obtenida representa la configuración con el menor número de las depresiones de voltaje en nodos que presentan este tipo de problemas, para el umbral seleccionado.

3.6.3. Generación de la población inicial

En las secciones anteriores se han dado las bases sobre de las mallas fundamentales y la codificación del cromosoma, considerando esto, se realiza la función correspondiente, con la finalidad de generar una población inicial que cumpla con las características de operación de un sistema de distribución, principalmente con la de que sea una topología radial. Algunos autores han propuesto generar la población inicial mediante algoritmo de Prim y Kruskal los cuales generan árboles de expansión mínima [Cebrian y Kagan, 2008].

El algoritmo propuesto en esta tesis genera topologías radiales aleatorias basándose en las mallas fundamentales. Cuando una *tie line* es cerrada y se forma una malla

principal, se puede regresar a la topología radial cambiando el estado de una línea que corresponda a dicha malla. Para ello se propone el siguiente procedimiento:

1. Generar un vector de aleatorio de selección de las mallas fundamentales.
2. De cada malla fundamental se escoge aleatoriamente una línea.
3. La línea es eliminada de los siguientes conjuntos de mallas fundamentales con la finalidad de que no pueda ser seleccionada.
4. Se repite los pasos 2 y 3 para el conjunto de mallas restantes.
5. Ya que el individuo se encuentra completo se verifica su radialidad.

Para verificar la radialidad del sistema se usa la función *graphisspantree* que pertenece a *Bioinformatics Toolbox* de Matlab2012a®. Esta función entrega un 1 lógico si el grafo es un árbol de expansión mínima, de lo contrario; si se obtiene un 0 lógico, el grafo no es un árbol de expansión mínima por lo tanto no es un sistema radial, esto se debe a que uno más nodos pueden quedar sin conexión formando islas. Véase apéndice A

Si el vector no cumple con la condición de radialidad se repite el proceso. Cuando el individuo cumple con la condición de radialidad, es almacenado aumentando el apuntador o contador *Ind* en una unidad, y se prosigue generando el siguiente individuo repitiendo el proceso. De esta manera se generan topologías radiales, las cuales en el individuo siempre respetan las posiciones de las mallas fundamentales. Este tipo de metodología asegura tener diversidad en los individuos al seleccionar los genes siempre de manera distinta, esta función se describe en el apéndice A.

Hay que destacar que la topología base del sistema de distribución es el primer individuo que se suministra como población inicial, los individuos restantes son generados mediante el proceso descrito.

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de flujo de este proceso, donde *Ind* es el apuntador o contador que corresponde al número de individuos a generar, *Ti* es el número de individuos totales requeridos para que la población inicial se encuentre completa. Cuando *Ind* es igual *Ti*, la población inicial esta completa, y el algoritmo finaliza.

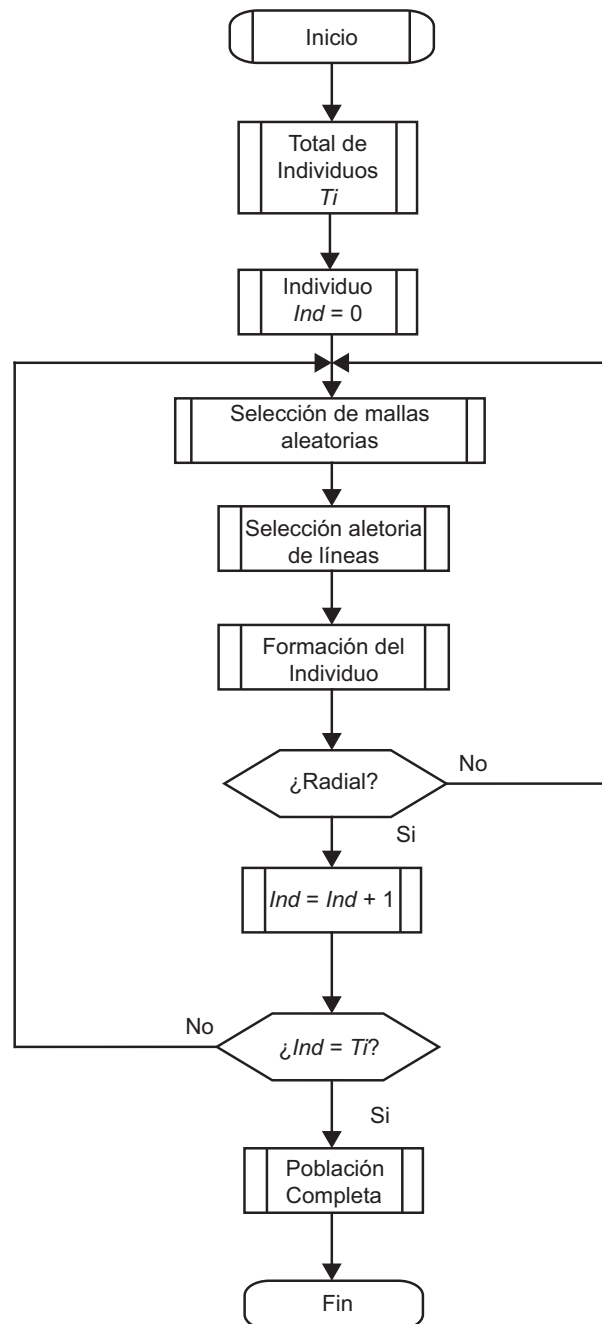


Figura 3.6: Diagrama de flujo del proceso que genera la población inicial

3.6.4. Operador de cruza

Mediante este operador se realiza la combinación de dos individuos, esta es generada en base a una máscara binaria propuesta, en la cual, si el elemento es 1, el gen situado en esa posición del padre 1 pasa al descendiente, de manera análoga si el elemento es 0 el gen se copia del padre 2 al descendiente en su posición correspondiente. Para ejemplificar la cruza se seleccionan dos padres, considerando

el sistema de distribución simplificado de la Figura 3.4. La Figura 3.7 muestra la máscara binaria propuesta y su operación sobre dos individuos.

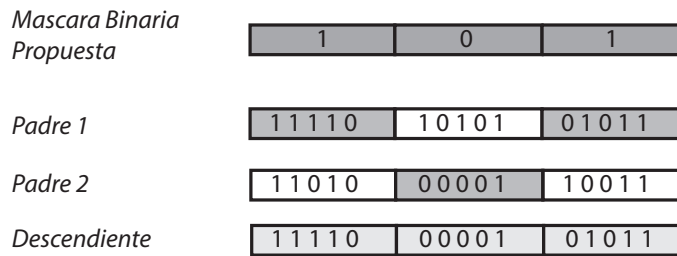


Figura 3.7: Cruza de individuos

Este tipo de cruza asegura que se transfiera la mayor parte de material genético, a los nuevos descendientes. Este operador, ha demostrado obtener buenos resultados para cromosomas que contienen hasta 5 genes o líneas fuera de operación, para cromosomas con más de 5 líneas se proponen nuevos operadores de cruza ya que el problema se vuelve más complejo y la probabilidad de que esta máscara binaria genere un hijo radial es limitada.

Al realizar la cruza se verifica la radialidad del sistema, si en la cruza resulta un individuo que no cumpla con esta condición, una nueva máscara es implementada. Esta máscara se genera aleatoriamente y mantiene el mismo criterio descrito anteriormente. En el apéndice A se describe los datos de entrada y salida de esta función.

3.6.5. Operador de mutación

Este operador asegura que no se estanque el método en un mínimo local, en el caso de la metodología propuesta este operador es implementado seleccionando aleatoriamente un interruptor en estado normalmente abierto para cambiar su operación. Para implementar el operador de mutación se proponen los siguientes pasos:

1. Seleccionar aleatoriamente una línea del cromosoma.
2. Identificar la malla principal a la que pertenece y eliminar la línea del conjunto.
3. Seleccionar aleatoriamente una línea del conjunto de la malla principal y reemplazar la línea en el cromosoma.

4. Verificar la radialidad del sistema.

Si el sistema no cumple con la condición de radialidad, se vuelve a repetir el proceso, seleccionando otra línea, de esta manera el operador de mutación garantiza que el algoritmo pueda realizar una búsqueda en un espacio de soluciones más amplio.

Para ejemplificar este proceso, se seleccionó aleatoriamente el gen número tres del cromosoma. La línea que corresponde a esa posición es eliminada de la malla fundamental tres, que en este caso corresponde a la línea número 26:

$$\text{Malla 3} = [11 \ 13 \ 14 \ 22 \ 23 \ 25 \ \cancel{26}]$$

Para remplazar esta línea, se selecciona una línea del conjunto de la malla principal 3:

$$\text{Malla 3} = [11 \ 13 \ 14 \ 22 \ \underline{23} \ 25]$$

La Figura 3.8 muestra el individuo obtenido mediante la operación de mutación.

<i>Descendiente</i>	11110	10101	10011
<i>Mutación del descendiente</i>	11110	10101	11101

Figura 3.8: Mutación de individuos

3.7. Implementación de la metodología propuesta

La metodología de reconfiguración propuesta basada en algoritmos genéticos se implementó en la plataforma Matlab®. A continuación se describen los pasos que se siguen para su implementación:

- Se realiza una lectura de los parámetros eléctricos del sistema, se incluyen la referencia de depresiones de voltaje, el rango de voltaje residual considerado y el número de posición de fallas.

- Los datos que corresponden a las líneas, específicamente nodos de envío y de recepción son ordenados y las líneas son numeradas. Las líneas de enlace o *tie line* son las últimas líneas que se numeran. Se considera que todas las líneas del sistema pueden ser conectadas y desconectadas.
- Se identifica el sistema base que corresponde a las líneas de enlace en su estado normalmente abierto. Esta configuración representa el primer individuo de la población inicial.
- Una vez que se determina el sistema base y los enlaces, se generan las mallas fundamentales del sistema, las cuales son el conjunto de las líneas, que conforman el ciclo que se forma al añadir cada uno de los enlaces al sistema original. Las líneas que no se encuentran contenidas en ninguna malla fundamental no son candidatas a cambiar su estado de operación, de esta manera se simplifica el sistema.
- Se inicia la rutina de algoritmos genéticos. Los individuos restantes de la población inicial se generan aleatoriamente mediante la función de población inicial descrita en la Sección 3.6.3, todos los individuos generados son de topología radial. Las funciones de cruce y mutación generan individuos respetando la topología radial.
- Una vez que se obtienen las posibles soluciones del sistema (individuos), se modifican los parámetros del sistema, eliminando las líneas fuera de operación.
- Ya que se tienen los nuevos parámetros del sistema se realiza la evaluación de las depresiones de voltaje, del sistema reconfigurado.
- Se realiza una evaluación de los resultados obtenidos en el paso anterior con respecto a los valores de referencia mediante la función objetivo.
- Este proceso se repite para los individuos de la población a lo largo de cada generación. El algoritmo se detiene si cumple con algún criterio de paro establecido previamente. El criterio de paro corresponde a que se evalúen el total de generaciones del algoritmo genético.
- Finalmente, se obtiene el resultado del problema de optimización. La topología obtenida representa la configuración con el menor número de las depresiones de voltaje en nodos que presentan este tipo de problemas, para el umbral seleccionado.

En la Figura 3.9 se muestra el diagrama de flujo de los pasos para realizar la reconfiguración radial de un sistema de distribución.

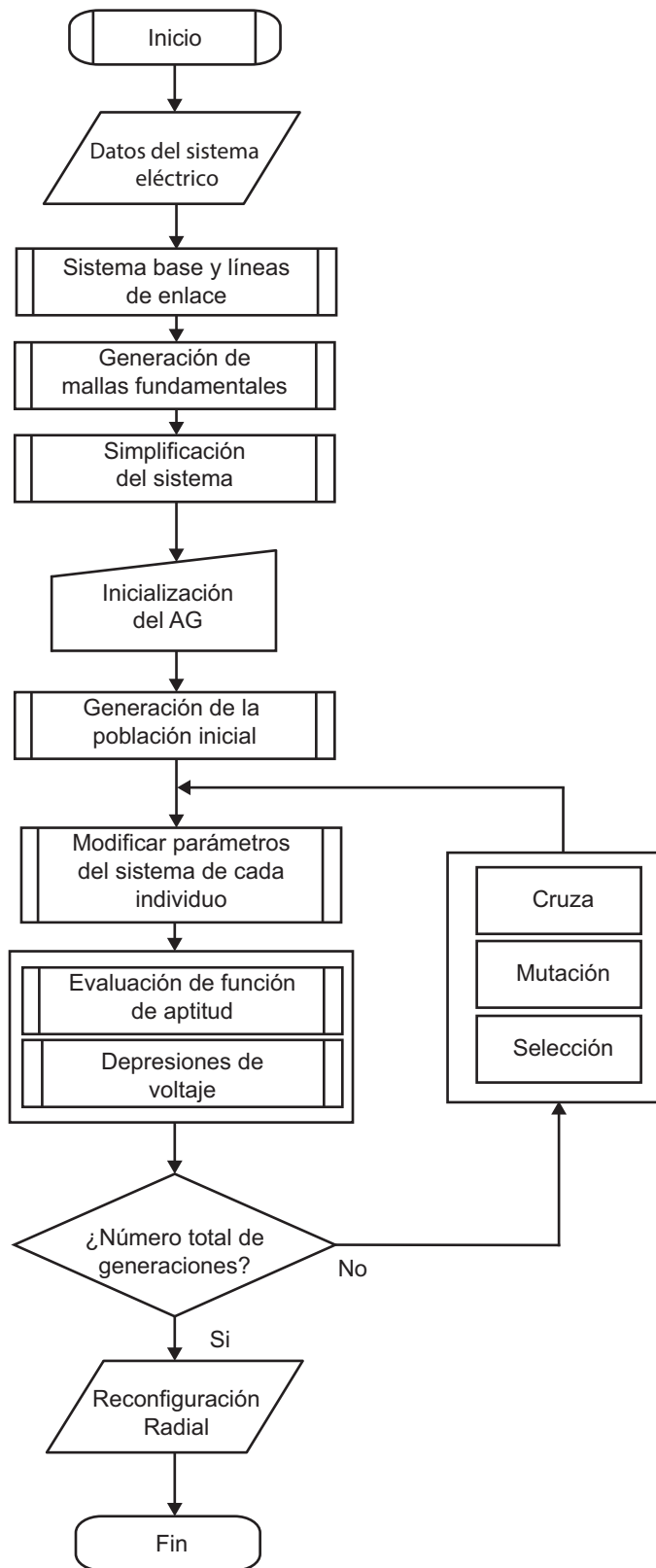


Figura 3.9: Diagrama de flujo para la reconfiguración de sistemas de distribución

3.8. Casos de estudio

Con la finalidad de probar la metodología implementada para la reconfiguración de sistemas de distribución, tres casos de estudio son analizados. Los casos de estudio son sistemas de distribución que han sido ampliamente reportados en la literatura. Se considera que los sistemas se encuentran balanceados y están sometidos a fallas trifásicas. Los voltajes de prefalla se consideran unitarios.

3.8.1. Sistema de distribución de 33 nodos

Es un sistema de prueba de distribución radial de 12.66kV. Se encuentra compuesto de una subestación, 33 nodos, 37 líneas, de las cuales 5 corresponden a *tie line* o interruptores normalmente abiertos y 32 a interruptores normalmente cerrados. El total de cargas de potencia activa y reactiva es 3715kW y 2300kVAR respectivamente. Se suponen 10 posiciones de falla, en cada línea. Los datos del sistema pueden ser encontrados en [Baran y Wu, 1989].

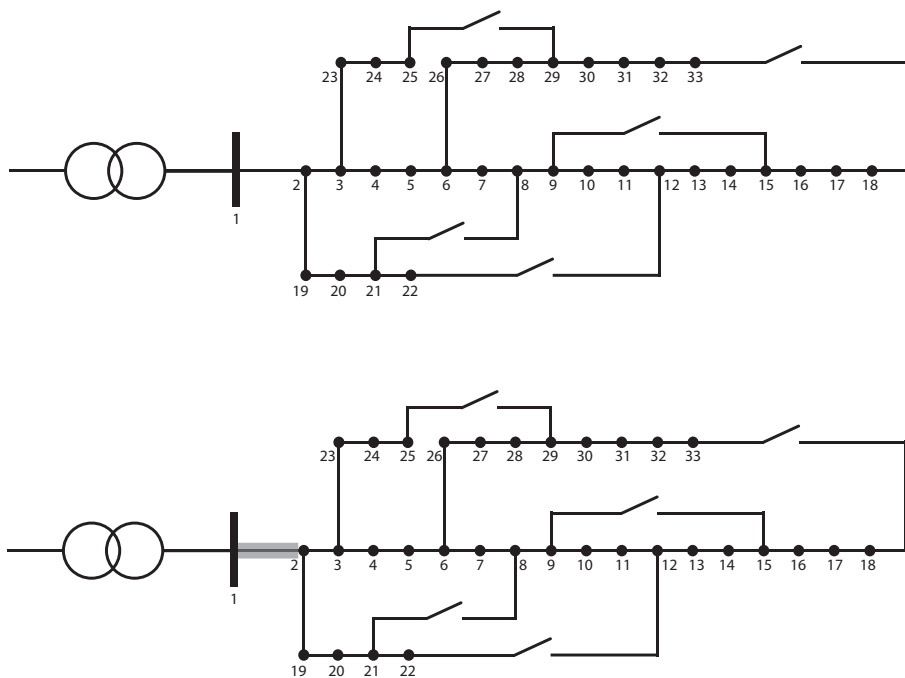


Figura 3.10: Sistema base y simplificado de 33 nodos

Para obtener el número de referencia de depresiones en cada nodo, se aplica el método de posición de fallas, al sistema base. Ya que se ha encontrado el número de depresiones de voltaje en cada nodo, se obtienen los valores de la referencia con valores cercanos al caso base.

De acuerdo a la Sección 3.4 se simplifica el sistema, para el caso de este sistema en particular, el cambio de operación de una línea puede dejar desconectado a todo el sistema, ya que no forma parte de ninguna malla fundamental. Es por esto que la línea 1 no se toma en cuenta como posible interruptor. Los posibles interruptores son las 36 líneas restantes. La Figura 3.10 muestra el sistema base de 33 nodos así como su sistema simplificado, en donde se le da relevancia a la línea entre los nodos 1 y 2, la cual se muestra sombreada.

Para la función de mutación se especificó una tasa de mutación de 0.3, adicionalmente se usaron las herramientas del “*Global Optimization Toolbox*” de Matlab® [MathWorks, 2012b], la función *@selectionroulette* para la selección de los padres, y la función *@fitscalingprop* que escala los valores de la función fitness crudos de manera proporcional. El primer individuo de la población inicial es el que corresponde al sistema base, los individuos restantes son generados mediante la función de población inicial descrita en la Sección 3.6.3.

Las mallas fundamentales se encuentran conformadas por las líneas:

Malla 1 = [3 4 5 22 23 24 25 26 27 28 37]

Malla 2 = [2 3 4 5 6 7 18 19 20 33]

Malla 3 = [6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 25 26 27 28 29 30 31 32 36]

Malla 4 = [2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 18 19 20 21 35]

Malla 5 = [9 10 11 12 13 14 34]

La Figura 3.11 muestra la gráfica donde se pueden apreciar las depresiones de voltaje que se presentan en el sistema reconfigurado línea negra (*Reconf*), en el sistema base línea roja (*SagsBase*) y el vector de referencia línea azul (*Referencia*). El eje de las abscisas corresponde a los nodos totales del sistema de distribución, mientras que el eje de las ordenadas corresponde a el número de depresiones de voltaje/año. Se puede observar, que la reconfiguración ha disminuido las depresiones de voltaje en los nodos que violaban al vector de referencia, algunos nodos que antes de la reconfiguración no presentaban problemas de depresiones de voltaje, están sujetos a estas y son los nodos 20, 21 y 22, esto se debe al cambio en la topología. Sin embargo se logra una disminución general en las depresiones de voltaje del sistema.

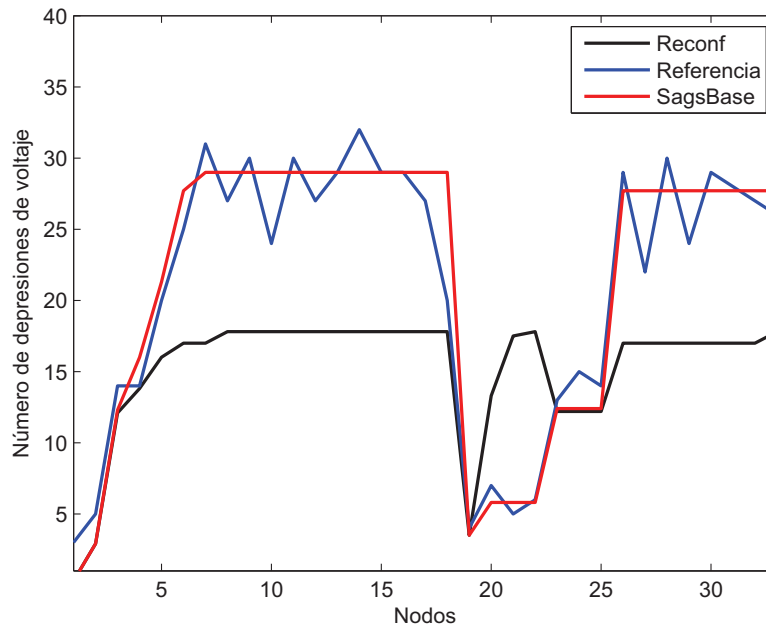


Figura 3.11: Depresiones de voltaje del sistema base, referencia y reconfiguración

La Tabla 3.1 muestra un resumen de los resultados obtenidos para un umbral de 0.8 p.u., antes y después de la reconfiguración del sistema de distribución. La columna número 1 contiene el total de nodos del sistema de distribución. La columna número 2 o muestra los valores de depresiones de voltaje/año de referencia, la columna número 3 muestra los valores de depresiones de voltaje/año a las que se encuentra sujeto el sistema base o sistema inicial de distribución. La columna número 3 VecBand corresponde a un vector binario, un valor de 1 corresponde a un nodo que tiene problemas de depresiones de voltaje, es decir el número de depresiones de voltaje en el nodo viola el valor de la referencia ($V_{Base_i} > V_{ref_i}$), por el contrario un valor de 0 indica que el nodo no tiene problemas de depresiones de voltaje. La suma total del vector VecBand corresponde a la función objetivo, el sistema inicial contaba con 13 nodos con problemas de depresiones de voltaje. La columna número 4 contiene los valores de depresiones de voltaje/año del sistema después de ser reconfigurado. La suma de la columna 5 o VecBand del sistema reconfigurado, indica que la nueva configuración, solamente tiene 3 nodos con problemas de depresiones de voltaje. De manera adicional se muestra el vector solución, es decir, las líneas que tienen que ser desconectadas para que el sistema opere de manera radial.

Tabla 3.1: Resultados del sistema de 33 nodos

Número de depresiones de voltaje/año umbral de 0.8 p.u.					
		Antes de la reconfiguración		Después de la reconfiguración	
Nodos	Referencia	Sistema Base	VecBand	Reconfiguración	VecBand
1	3	0.3	0	0.3	0
2	5	2.9	0	2.9	0
3	14	12.3	0	12.1	0
4	14	16	1	13.8	0
5	20	21.3	1	16	0
6	25	27.7	1	17	0
7	31	29	0	17	0
8	27	29	1	17.8	0
9	30	29	0	17.8	0
10	24	29	1	17.8	0
11	30	29	0	17.8	0
12	27	29	1	17.8	0
13	29	29	0	17.8	0
14	32	29	0	17.8	0
15	29	29	0	17.8	0
16	29	29	0	17.8	0
17	27	29	1	17.8	0
18	20	29	1	17.8	0
19	4	3.5	0	3.5	0
20	7	5.8	0	13.3	1
21	5	5.8	1	17.5	1
22	6	5.8	0	17.8	1
23	13	12.4	0	12.2	0
24	15	12.4	0	12.2	0
25	14	12.4	0	12.2	0
26	29	27.7	0	17	0
27	22	27.7	1	17	0
28	30	27.7	0	17	0
29	24	27.7	1	17	0
30	29	27.7	0	17	0
31	28	27.7	0	17	0
32	27	27.7	1	17	0
33	26	27.7	1	17.8	0
Total	695	708.2	13	500.4	3
Líneas desconectadas		37 33 36 35 34		37 33 32 7 9	

Para el sistema inicial, 13 nodos violan la referencia, es decir, presentan problemas de depresiones de voltaje, después de que el sistema es reconfigurado, solamente 3 nodos siguen con problemas, lo que representa una reducción del 76.92%. La suma total de las depresiones de voltaje/año del sistema inicial es de 708.2, el sistema reconfigurado tiene 500.4, lo cual corresponde a una reducción de 29.34%.

La Figura 3.12 muestra el sistema reconfigurado. La Tabla 3.2 muestra los nodos de envío y recepción que corresponden al vector solución de la reconfiguración del sistema, es decir, las líneas desconectas.

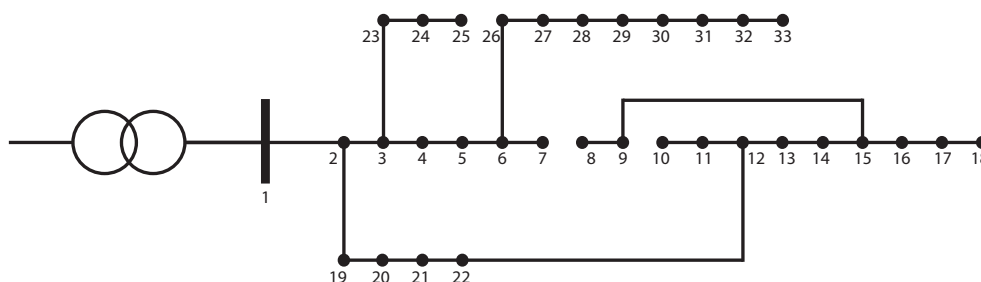


Figura 3.12: Sistema de 33 nodos reconfigurado

Con la finalidad de verificar que la reconfiguración obtenida es válida vista desde el punto de una operación correcta del sistema, un estudio de flujos de potencia se realiza al sistema obtenido. Este estudio se realiza mediante el paquete de simulación de sistemas de potencia MATPOWER (*Power System Simulation Package*) [Ziemmerman *et al.*, 2011]. El sistema base presenta un voltaje mínimo de 0.9131 p.u. en el nodo 18. Cuando el sistema es reconfigurado el voltaje mínimo se presenta en el nodo 8 obteniéndose una magnitud de voltaje de 0.9214 p.u. En general el sistema presenta una mejora en el perfil de voltaje.

Tabla 3.2: Nodos de envío y recepción de las líneas desconectadas

Nodo de envío	Nodo de recepción	Número de línea
25	29	37
8	21	33
32	33	32
7	8	7
9	10	9

3.8.2. Sistema de distribución de 69 nodos

Es este caso de estudio se presenta un sistema de distribución radial de 12.66kV, consiste de 69 nodos, 73 líneas, de las cuales 5 son *tie line*. La demanda total del

sistema de potencia activa y reactiva es de 3802kW y 2694kVAR. Los datos del sistema se encuentran en [Savir y Das, 2007].

De la misma manera que el caso anterior se suponen 10 posiciones de falla entre las líneas, y se realizan estudios para umbrales de depresiones de voltaje de 0.8 p.u. El sistema base y su sistema simplificado se muestra en la Figura 3.13. Un total de 57 líneas posibles pueden ser elegidas para cambiar su estado de operación, ya que 13 líneas pueden llegar a dejar un nodo desconectado, estas líneas no forman parte de ninguna malla fundamental y se muestran como sombreadas.

Las mallas fundamentales de este sistema son mostradas a continuación.

Malla 1 = [3 4 5 6 7 8 9 10 35 36 37 38 39 40 41 42 69]

Malla 2 = [13 14 15 16 17 18 19 20 70]

Malla 3 = [3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 71]

Malla 4 = [4 5 6 7 8 46 47 48 49 52 53 54 55 56 57 58 72]

Malla 5 = [9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 52 53 54 55 56
57 58 59 60 61 62 63 64 73]

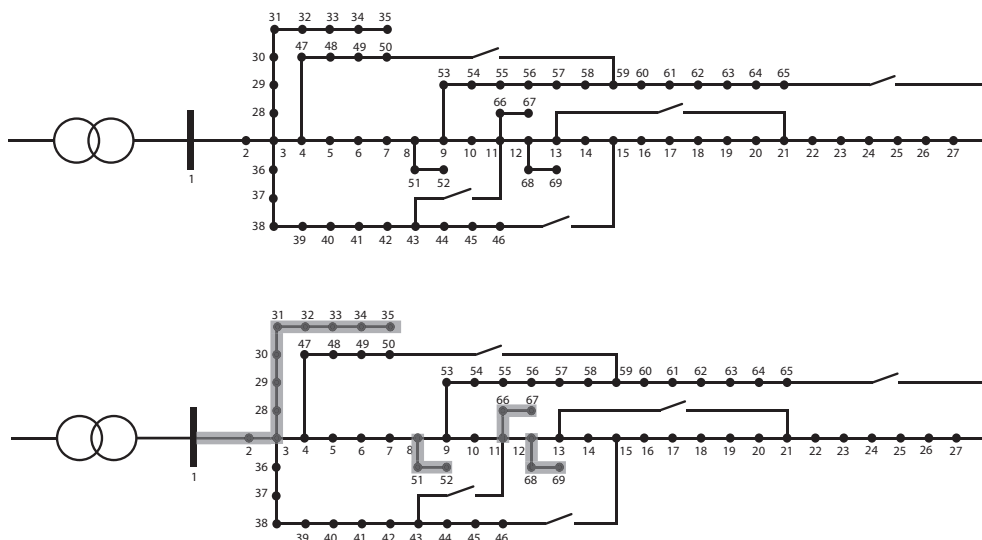


Figura 3.13: Sistema base y simplificado de 69 nodos

En la Figura 3.14 se puede apreciar la gráfica correspondiente a las depresiones de voltaje del sistema base en línea color rojo (*SagsBase*), el sistema reconfigurado en línea negra (*Reconf*) y la referencia en línea azul (*Referencia*), para un umbral de 0.8 p.u. Se puede observar que el sistema reconfigurado ofrece reducciones significativas en el número de depresiones de voltaje en los nodos 1 hasta 36, mientras que en los nodos conformados por 37 hasta 46 se incrementan las depresiones de voltaje; estos nodos violaban la referencia en la configuración base y

continúan con problemas de depresiones de voltaje un poco más severos. Aun así la reconfiguración del sistema presenta resultados favorables esto se puede observar en línea negra que corresponde al sistema reconfigurado ya que se encuentra por debajo de la referencia y del sistema base, con excepción en los nodos mencionados anteriormente.

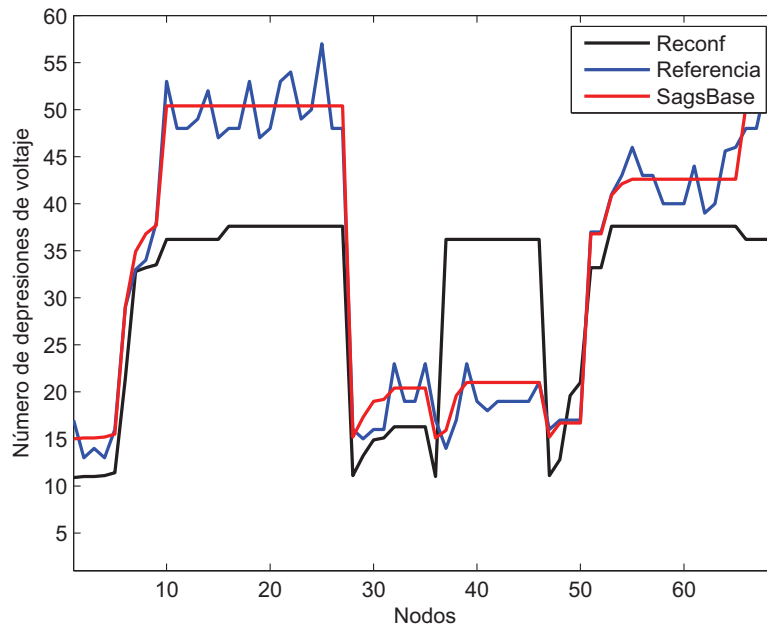


Figura 3.14: Depresiones de voltaje del sistema base, referencia y reconfiguración

El sistema reconfigurado se muestra en la Figura 3.15

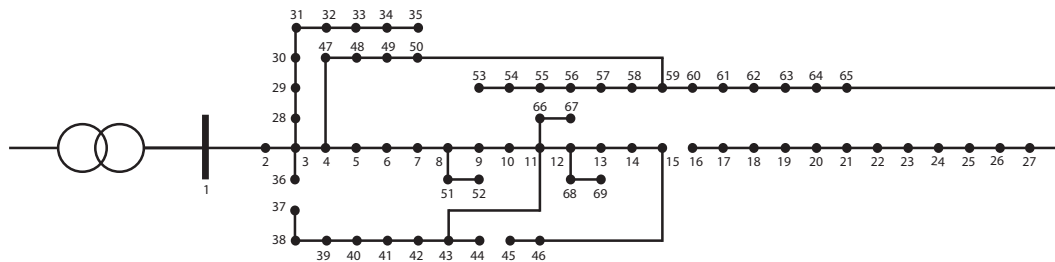


Figura 3.15: Sistema de 69 nodos reconfigurado

La Tabla 3.3 muestra el resumen de los resultados del sistema de 69 nodos antes y después de la reconfiguración. La columna número 2 muestra las depresiones de voltaje/año de referencia. Las columnas número 3 y 5 contienen las depresiones de voltaje año del sistema base y del sistema reconfigurado respectivamente. Las columnas número 4 y 6 corresponden a la función objetivo VecBand del sistema base y del sistema reconfigurado respectivamente.

Tabla 3.3: Resultados del sistema de 69 nodos

Número de depresiones de voltaje/año umbral de 0.8 p.u.					
		Antes de la reconfiguración		Después de la reconfiguración	
Nodos	Referencia	Sistema Base	VecBand	Reconfiguración	VecBand
1	17	15	0	10.9	0
2	13	15.1	1	11	0
3	14	15.1	1	11	0
4	13	15.2	1	11.1	0
5	16	15.5	0	11.4	0
6	29	29	0	21.4	0
7	33	34.9	1	32.8	0
8	34	36.8	1	33.2	0
9	38	37.7	0	33.5	0
10	53	50.4	0	36.2	0
11	48	50.4	1	36.2	0
12	48	50.4	1	36.2	0
13	49	50.4	1	36.2	0
14	52	50.4	0	36.2	0
15	47	50.4	1	36.2	0
16	48	50.4	1	37.6	0
17	48	50.4	1	37.6	0
18	53	50.4	0	37.6	0
19	47	50.4	1	37.6	0
20	48	50.4	1	37.6	0
21	53	50.4	0	37.6	0
22	54	50.4	0	37.6	0
23	49	50.4	1	37.6	0
24	50	50.4	1	37.6	0
25	57	50.4	0	37.6	0
26	48	50.4	1	37.6	0
27	48	50.4	1	37.6	0
28	16	15.2	0	11.1	0
29	15	17.3	1	13.2	0
30	16	19	1	14.9	0
31	16	19.2	1	15.1	0

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.3 Resultados del sistema de 69 nodos – continuación

Número de depresiones de voltaje/año umbral de 0.8 p.u.					
		Antes de la reconfiguración		Después de la reconfiguración	
Nodos	Referencia	Sistema Base	VecBand	Reconfiguración	VecBand
32	23	20.4	0	16.3	0
33	19	20.4	1	16.3	0
34	19	20.4	1	16.3	0
35	23	20.4	0	16.3	0
36	17	15.1	0	11	0
37	14	15.9	1	36.2	1
38	17	19.6	1	36.2	1
39	23	21	0	36.2	1
40	19	21	1	36.2	1
41	18	21	1	36.2	1
42	19	21	1	36.2	1
43	19	21	1	36.2	1
44	19	21	1	36.2	1
45	19	21	1	36.2	1
46	21	21	0	36.2	1
47	16	15.2	0	11.1	0
48	17	16.7	0	12.8	0
49	17	16.7	0	19.6	1
50	17	16.7	0	21	1
51	37	36.8	0	33.2	0
52	37	36.8	0	33.2	0
53	41	40.9	0	37.6	0
54	43	42.1	0	37.6	0
55	46	42.6	0	37.6	0
56	43	42.6	0	37.6	0
57	43	42.6	0	37.6	0
58	40	42.6	1	37.6	0
59	40	42.6	1	37.6	0
60	40	42.6	1	37.6	0
61	44	42.6	0	37.6	0
62	39	42.6	1	37.6	0
63	40	42.6	1	37.6	0

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.3 Resultados del sistema de 69 nodos – continuación

Número de depresiones de voltaje/año umbral de 0.8 p.u.					
		Antes de la reconfiguración		Después de la reconfiguración	
Nodos	Referencia	Sistema Base	VecBand	Reconfiguración	VecBand
64	46	42.6	0	37.6	0
65	46	42.6	0	37.6	0
66	48	50.4	1	36.2	0
67	48	50.4	1	36.2	0
68	53	50.4	0	36.2	0
69	47	50.4	1	36.2	0
Total	2346	2384.5	38	2101.7	12
Líneas desconectadas		69 70 71 72 73		36 70 44 52 15	

El número de nodos que tienen problemas de depresiones de voltaje son 38, después de la reconfiguración del sistema, una reducción de 26 nodos es lograda para que el sistema tenga solamente 12 nodos con depresiones de voltaje, por arriba de los valores de referencia especificados, lo que corresponde a una reducción de 68.42%. El número total de depresiones de voltaje del sistema base muestra una reducción de 11.85%, al ser reconfigurado.

Al ser un sistema de una dimensión mediana, se muestran reducciones favorables en el sistema, y se verifica que el algoritmo genético cumple con la función objetivo de minimizar nodos que cuentan con problemas de depresiones de voltaje. El sistema reconfigurado se muestra en la Figura 3.15. Mediante la información de la Figura 3.14, la Tabla 3.3 y la Figura 3.15 se puede concluir que los nodos que contienen menor número de depresiones de voltaje son los que se encuentran eléctricamente más cerca de la subestación, estos tienen 11 depresiones de voltaje/año, .

En la Tabla 3.4, se muestran los nodos de envío y recepción de las líneas desconectadas para que el sistema tenga una topología radial.

Tabla 3.4: Nodos de envío y recepción de las líneas desconectadas

Nodo de envío	Nodo de recepción	Número de línea
36	37	36
13	21	70
44	45	44
9	53	52
15	16	15

3.8.3. Sistema de distribución de 118 nodos

El sistema de prueba de 118 nodos, consiste en 1 subestación, 118 nodos y 132 líneas de las cuales 15 son *tie line* o interruptores normalmente abiertos, las restantes operan normalmente cerradas. El voltaje de operación de este sistema es de 11kV, la potencia activa que demanda es de 22709.7 kW y 17041.1 kVar de potencia reactiva. La Figura 3.16 muestra el sistema base, las líneas punteadas corresponden a los interruptores normalmente abiertos o líneas desconectadas. Los datos del sistema se encuentran en [Zhang *et al.*, 2007].

El vector de referencia se calcula tomando en cuenta el sistema base y aplicando el método de posición de fallas como se explicó anteriormente. Para este caso se consideran 5 posiciones de falla en las líneas.

El número de mallas fundamentales es el mismo que los interruptores normalmente abiertos, estas se muestran a continuación:

Malla 1 = [3 9 10 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 37 38 39 40 41 42 43 44 45 118]

Malla 2 = [11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 119]

Malla 3 = [3 4 5 6 7 9 10 17 18 19 20 21 22 23 120]

Malla 4 = [29 30 31 32 33 34 37 38 39 40 41 42 46 47 48 49 50 51 52 53 121]

Malla 5 = [29 30 31 32 33 34 46 47 48 54 55 56 57 58 59 60 61 122]

Malla 6 = [29 35 36 54 55 56 57 58 59 60 61 123]

Malla 7 = [4 5 6 7 8 27 28 37 38 39 124]

Malla 8 = [1 3 27 28 54 55 56 57 62 63 64 88 89 90 95 125]

Malla 9 = [65 66 67 68 69 70 71 72 88 89 90 126]

Malla 10 = [64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 77 78 85 86 87 127]

Malla 11 = [65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 88 89 90 95 96 97 98 128]

Malla 12 = [62 63 77 78 79 80 81 82 99 100 101 102 103 104 105 106 107 129]

Malla 13 = [62 63 77 78 85 99 100 101 102 103 104 130]

Malla 14 = [100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 113 114 115 116 117 131]

Malla 15 = [3 9 10 17 18 19 20 21 22 23 24 27 28 29 30 31 32 33 34 132]

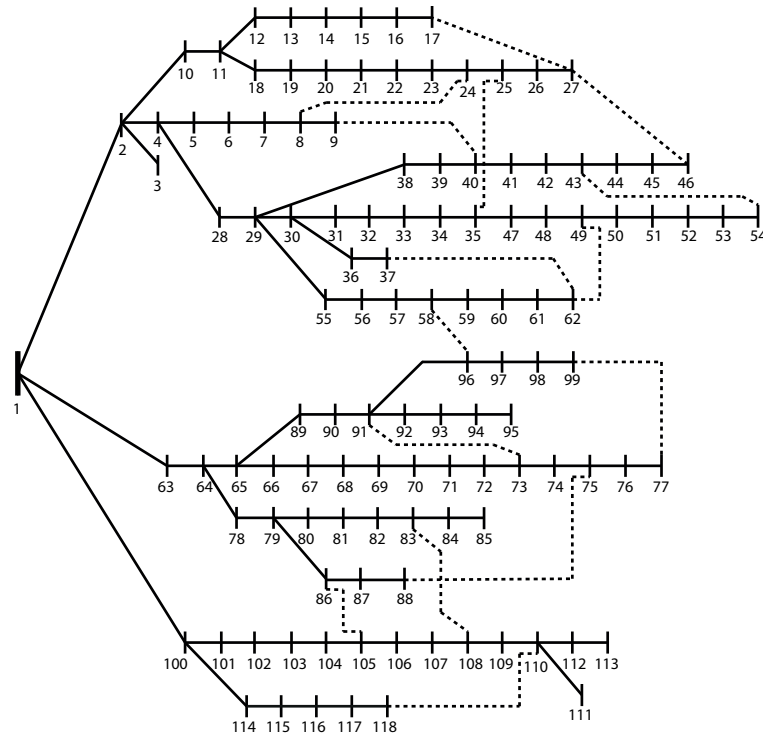


Figura 3.16: Sistema base de 118 Nodos

Del total de las 132 líneas, 122 pueden cambiar su estado de operación de abierto a cerrado, ya que las líneas restantes provocan que alguna parte del sistema quede sin conexión. Este sistema es de un tamaño moderado y su dificultad es mayor debido al gran número de topologías y posibles soluciones que se tienen para el mismo.

Para este sistema 55 nodos cuentan con problemas de depresiones de voltaje. La solución que se obtiene mediante el algoritmo genético es de 26 nodos con problemas de depresiones de voltaje del sistema reconfigurado, esto corresponde a una reducción de 52.72%. El sistema base contaba con un total de 2553.5 depresiones de voltaje por año, la nueva topología del sistema de distribución tiene un total de 2369.2 depresiones de voltaje por año, la reducción corresponde a un total del 6.08%.

Las líneas que se encuentran desconectadas se muestran en la Tabla 3.5, y los nodos entre los que se encuentran dichas líneas también se muestran en esta Tabla.

Tabla 3.5: Nodos de envío y recepción de las líneas desconectadas

Nodo de envío	Nodo de recepción	Número de línea
45	46	45
14	15	4
5	6	5
43	54	121
49	62	122
37	62	123
8	9	8
58	96	125
73	91	126
73	74	73
96	97	96
80	81	80
86	105	130
108	109	108
25	35	132

A pesar de la dificultad combinatorial que presenta el sistema, el algoritmo genético propuesto realiza un buen trabajo, ya que se logran reducciones importantes en los nodos que tienen problemas de voltaje. La Figura 3.17 muestra, en el eje de las abscisas, el número de depresiones de voltaje por año del sistema base en línea azul y del sistema reconfigurado en línea negra. El eje de las ordenadas corresponde a él número total de nodos del sistema. En esta gráfica se puede observar que el sistema reconfigurado presenta problemas de depresiones de voltaje en nodos donde antes no se tenían este tipo de problemas, pero la reconfiguración también los reduce en la mayoría de nodos donde eran evidente estos problemas. Una mejora global se presenta en la reducción de las depresiones de voltaje en el sistema reconfigurado y los nodos que tenían este tipo de problemas.

El sistema reconfigurado se muestra en la Figura 3.18 en esta se observa la topología final del sistema de 118 nodos. La Tabla 3.6 muestra los resultados antes y después de realizar la reconfiguración del sistema de distribución, mediante esta Tabla y la Figura 3.17, se pueden comentar algunos resultados, el sistema reconfigurado tiene problemas en los nodos 6, 7 y 8 donde antes no se tenían problemas, esto se debe básicamente, a que se alejan de la subestación generadora, y forman parte a una sección donde los nodos tienen depresiones de voltaje más severas. De manera similar se puede explicar el comportamiento de depresiones de voltaje/año de los nodos 15, 16 y 17. Ahora bien, en los nodos 72, 73 y 74, se

tenían problemas de depresiones de voltaje, las cuales se reducen con el cambio de topología ya que los nodos 74, 75, 76 y 77 son transferidos a una nueva rama.

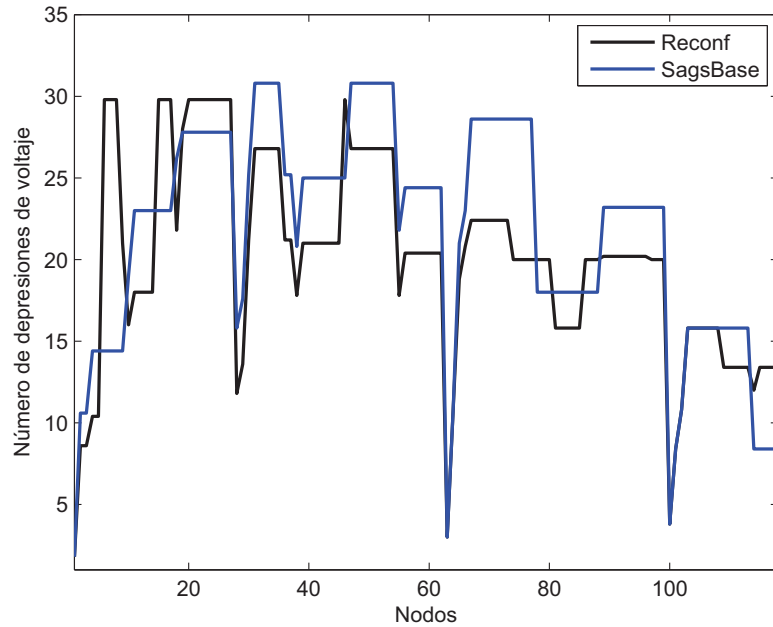


Figura 3.17: Depresiones de voltaje del sistema base, y reconfigurado del sistema de 118 Nodos

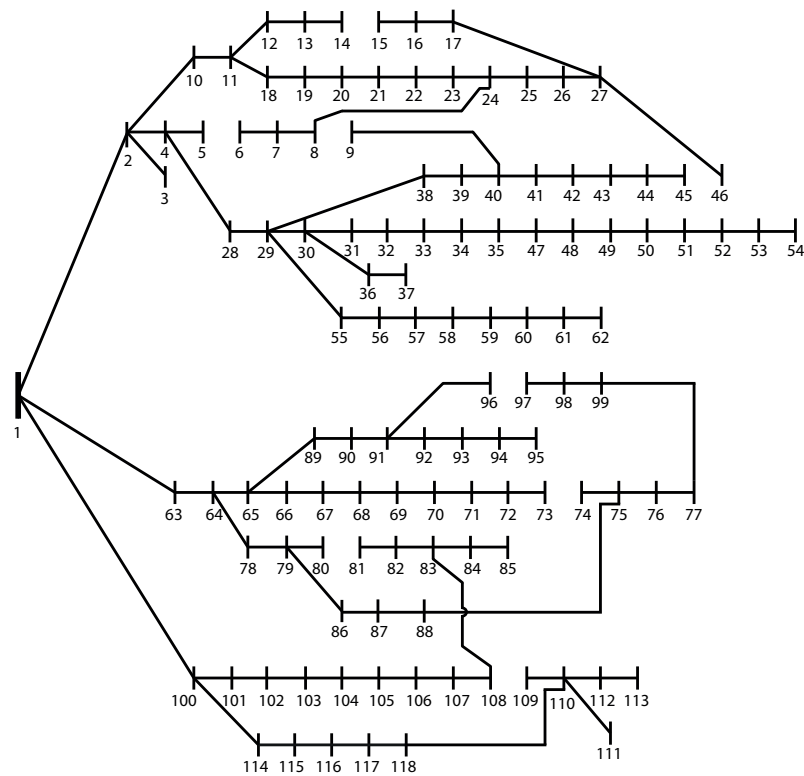


Figura 3.18: Sistema de 118 nodos reconfigurado

Tabla 3.6: Resultados del sistema de 118 nodos

Número de depresiones de voltaje/año umbral de 0.8 p.u.					
		Antes de la reconfiguración		Después de la reconfiguración	
Nodos	Referencia	Sistema Base	VecBand	Reconfiguración	VecBand
1	3	1.8	0	1.8	0
2	11	10.6	0	8.6	0
3	11	10.6	0	8.6	0
4	16	14.4	0	10.4	0
5	12	14.4	1	10.4	0
6	18	14.4	0	29.8	1
7	12	14.4	1	29.8	1
8	13	14.4	1	29.8	1
9	17	14.4	0	21	1
10	20	19	0	16	0
11	20	23	1	18	0
12	21	23	1	18	0
13	28	23	0	18	0
14	22	23	1	18	0
15	27	23	0	29.8	1
16	20	23	1	29.8	1
17	21	23	1	29.8	1
18	25	26.2	1	21.8	0
19	33	27.8	0	28	0
20	26	27.8	1	29.8	1
21	29	27.8	0	29.8	1
22	35	27.8	0	29.8	0
23	32	27.8	0	29.8	0
24	24	27.8	1	29.8	1
25	25	27.8	1	29.8	1
26	29	27.8	0	29.8	1
27	30	27.8	0	29.8	0
28	14	15.8	1	11.8	0
29	15	17.6	1	13.6	0
30	24	25.2	1	21.2	0
31	36	30.8	0	26.8	0

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.6 Resultados del sistema de 118 nodos – continuación

Número de depresiones de voltaje/año umbral de 0.8 p.u.					
		Antes de la reconfiguración		Después de la reconfiguración	
Nodos	Referencia	Sistema Base	VecBand	Reconfiguración	VecBand
32	33	30.8	0	26.8	0
33	29	30.8	1	26.8	0
34	27	30.8	1	26.8	0
35	28	30.8	1	26.8	0
36	27	25.2	0	21.2	0
37	23	25.2	1	21.2	0
38	18	20.8	1	17.8	0
39	23	25	1	21	0
40	28	25	0	21	0
41	29	25	0	21	0
42	30	25	0	21	0
43	23	25	1	21	0
44	23	25	1	21	0
45	24	25	1	21	0
46	28	25	0	29.8	1
47	28	30.8	1	26.8	0
48	29	30.8	1	26.8	0
49	27	30.8	1	26.8	0
50	27	30.8	1	26.8	0
51	28	30.8	1	26.8	0
52	35	30.8	0	26.8	0
53	35	30.8	0	26.8	0
54	35	30.8	0	26.8	0
55	19	21.8	1	17.8	0
56	22	24.4	1	20.4	0
57	23	24.4	1	20.4	0
58	27	24.4	0	20.4	0
59	28	24.4	0	20.4	0
60	23	24.4	1	20.4	0
61	27	24.4	0	20.4	0
62	23	24.4	1	20.4	0
63	5	3	0	3	0

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.6 Resultados del sistema de 118 nodos – continuación

Número de depresiones de voltaje/año umbral de 0.8 p.u.					
		Antes de la reconfiguración		Después de la reconfiguración	
Nodos	Referencia	Sistema Base	VecBand	Reconfiguración	VecBand
64	11	10.8	0	10.8	0
65	19	21	1	18.8	0
66	20	23	1	20.8	1
67	27	28.6	1	22.4	0
68	31	28.6	0	22.4	0
69	30	28.6	0	22.4	0
70	30	28.6	0	22.4	0
71	31	28.6	0	22.4	0
72	27	28.6	1	22.4	0
73	25	28.6	1	22.4	0
74	25	28.6	1	20	0
75	32	28.6	0	20	0
76	33	28.6	0	20	0
77	30	28.6	0	20	0
78	30	18	0	20	0
79	16	18	1	20	1
80	16	18	1	20	1
81	23	18	0	15.8	0
82	16	18	1	15.8	0
83	22	18	0	15.8	0
84	17	18	1	15.8	0
85	15	18	1	15.8	1
86	23	18	0	20	0
87	22	18	0	20	0
88	22	18	0	20	0
89	24	23.2	0	20.2	0
90	25	23.2	0	20.2	0
91	26	23.2	0	20.2	0
92	21	23.2	1	20.2	0
93	24	23.2	0	20.2	0
94	22	23.2	1	20.2	0
95	24	23.2	0	20.2	0

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.6 Resultados del sistema de 118 nodos – continuación

Número de depresiones de voltaje/año umbral de 0.8 p.u.					
		Antes de la reconfiguración		Después de la reconfiguración	
Nodos	Referencia	Sistema Base	VecBand	Reconfiguración	VecBand
96	20	23.2	1	20.2	1
97	25	23.2	0	20	0
98	25	23.2	0	20	0
99	26	23.2	0	20	0
100	7	3.8	0	3.8	0
101	7	8.4	1	8.4	1
102	13	10.8	0	10.8	0
103	17	15.8	0	15.8	0
104	14	15.8	1	15.8	1
105	13	15.8	1	15.8	1
106	19	15.8	0	15.8	0
107	14	15.8	1	15.8	1
108	18	15.8	0	15.8	0
109	13	15.8	1	13.4	1
110	17	15.8	0	13.4	0
111	18	15.8	0	13.4	0
112	12	15.8	1	13.4	1
113	18	15.8	0	13.4	0
114	14	8.4	0	12	0
115	14	8.4	0	13.4	0
116	7	8.4	1	13.4	1
117	13	8.4	0	13.4	1
118	14	8.4	0	13.4	0
Total	2620	2553.5	55	2369.3	26
Líneas desconectadas		118 119 120 121 122		45 14 5 121 122	
		123 124 125 126 127		123 8 125 126 73	
		128 129 130 131 132		96 80 130 108 132	

Un análisis más extenso de este sistema es verificado al realizar una corrida de flujos de potencia mediante el paquete MATPOWER. En el sistema base se

presenta un voltaje mínimo de 0.869 p.u. en el nodo 77, cuando el sistema es reconfigurado una mejora se presenta en el perfil de voltaje, el voltaje mínimo es de 0.910 p.u. en el nodo 54. De esta manera se observa que el sistema en general presenta mejoras tanto en las depresiones de voltaje como en el perfil de voltaje de este sistema de distribución.

La Tabla 3.7 muestra los parámetros usados en el algoritmo genético, así como los tiempos de simulación de cada sistema de distribución. El equipo de computo usado para la simulación, consta de un procesador Intel Quad Core 2 @ 2.40 GHz y Memoria Ram de 4gb.

Tabla 3.7: Parámetros de simulación del algoritmo genético, estudios mono-objetivo reconfiguración

	Número de generaciones	Tamaño de la población	Taza de cruza	Taza de mutación	Tiempo de simulación
33 Nodos	13	10	1	0.3	1706 s
69 Nodos	15	13	1	0.3	10,766 s
118 Nodos	40	45	1	0.3	83,079 s

Ya que el método de posición de fallas introduce nodos ficticios entre las líneas de transmisión, el sistema simulado crece demasiado. Lo que se traduce en un alto costo computacional y tiempos de computo muy extensos.

3.9. Conclusiones

En este capítulo se dieron las bases del funcionamiento de los algoritmos genéticos. Una metodología basada en algoritmos genéticos se propone con la finalidad de resolver el problema, asociado a la reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución, considerando depresiones de voltaje en los nodos. Una de las principales ventajas que tiene el algoritmo es generar posibles soluciones de tipo árbol o radiales, reduciendo el espacio de búsqueda. Tres sistemas de distribución fueron evaluados obteniéndose resultados favorables, es decir, reduciendo el número de nodos que cuentan con depresiones de voltaje en los sistemas, sin importar la dificultad combinatorial que se presenta en estos problemas.

Se obtuvo información importante de los casos de estudio de estos sistemas. Hay que mencionar que los cambios de las topologías presentan mejoras, reduciendo el número de depresiones de voltaje que presenta el sistema eléctrico inicial. Estas

reducciones representan una mejora en el suministro de la energía a los clientes finales.

Expansión de sistemas de distribución

La planeación de un sistema, consiste en *dónde, cuándo y cuántos* elementos y circuitos deben de ser instalados con la finalidad de poder suministrar energía eléctrica a las nuevas cargas y demandas que se generan con el crecimiento del sistema eléctrico. Es por esta razón que la planeación y expansión es muy importante ya que factores económicos y de operación deben de tomarse en cuenta para que un sistema sea confiable y seguro para los clientes que reciben el suministro.

En este Capítulo se darán a conocer algunos aspectos generales de la planeación y expansión en sistemas eléctricos, con una orientación hacia los sistemas eléctricos de distribución así como explicaciones breves acerca de aspectos económicos y geográficos. También se dan a conocer algunos métodos que han sido utilizados para resolver los problemas de expansión. En este capítulo se propone una metodología para realizar la expansión de una red de distribución así como la implementación de dicha metodología. Para finalizar se analizan 4 casos de estudio en sistemas de distribución, donde es necesaria una expansión del mismo. También se presenta el análisis de los resultados y las conclusiones correspondientes a este capítulo.

4.1. Expansión y planeación de sistemas eléctricos

El problema asociado a la expansión de sistemas eléctricos, es un estudio de gran importancia ya que el sistema eléctrico se encuentra en constante crecimiento. Esto quiere decir que con el aumento de los clientes, la demanda crece dando lugar

a la necesidad de la planeación y expansión del sistema para cumplir con los requerimientos de las nuevas cargas instaladas.

En [Seifi y Sadegh, 2011] es definido un concepto de planeación. *La planeación del sistema potencia es un proceso en el cual el objetivo es decidir sobre instalar nuevos elementos o realizar alguna mejora a los elementos ya existentes, para satisfacer las cargas de manera adecuada en un futuro previsible.*

Los estudios de planeación involucran varios aspectos y son aplicables a todos los niveles del sistema eléctrico. Entre los principales estudios y modelos acerca de la expansión de redes eléctricas se encuentran entre otras: la planeación dinámica y estática, de transmisión y distribución, en largo y corto plazo.

4.1.1. Planeación dinámica y estática

En general los estudios de planeación y expansión toman en cuenta un periodo de tiempo determinado en el cual se considera cierto crecimiento del sistema.

Asumiendo por ejemplo, un periodo de tiempo de 4 años (2017-2020) donde un estudio de cargas o demanda quieren ser investigadas, los estudios involucran cuatro condiciones de carga (uno a través de cada año). El estudio de cada año independiente de los otros años se refiere a un estudio de *planeación estática* la cual se enfoca en la planificación de cada etapa. Un modelo estático encuentra *dónde* y *cuál* tipo de equipo deberá ser instalado de una manera óptima que minimice costos de operación e instalación.

Si el estudio se centra en la planificación de las cuatro etapas de forma simultánea, el estudio se denomina *planeación dinámica*. Este tipo de modelo responde a preguntas como *dónde*, *cuál* y *cuándo* deberán instalarse redes adicionales creando un plan de inversión. [Seifi y Sadegh, 2011], [Lee y El-Sharkawi, 2008].

4.1.2. Planeación en transmisión y distribución

La planeación de sistemas de transmisión como de distribución es tratada de manera diferente debido a las características particulares de cada sistema. Los sistemas de transmisión generalmente operan en una topología mallada, en la cual los niveles de confiabilidad son muy altos. En cambio un sistema de distribución como se ha mencionado en esta tesis, opera de generalmente de manera radial. El

modelo deberá contemplar estas restricciones, así como los conductores utilizados y costos de mantenimiento. Es por eso que los estudios a nivel de distribución y transmisión son tratados de forma separada, aunque los objetivos principales son muy similares.

4.1.3. Expansión en largo y corto plazo

Dependiendo del periodo de tiempo asociado a la duración de un problema de planeación y expansión puede ser clasificado en largo o corto plazo. Normalmente cuando el periodo de éste tiempo es menor a un año se refiere a una planeación operacional. En un tiempo mayor a un año se refiere a alguna de las etapas de corto o largo plazo.

Al predecir el comportamiento del sistema y la instalación de nuevos equipos o componentes, en un periodo de tiempo de 1 a 3 años para un sistema de distribución, se habla de una expansión a corto plazo. Más de 3 años puede ser descrita como una expansión o planeación a largo plazo, típicamente en sistemas de transmisión [Seifi y Sadegh, 2011]. La Figura 4.1 se muestra un diagrama del horizonte de tiempo necesario al que un sistema eléctrico puede estar sometido.

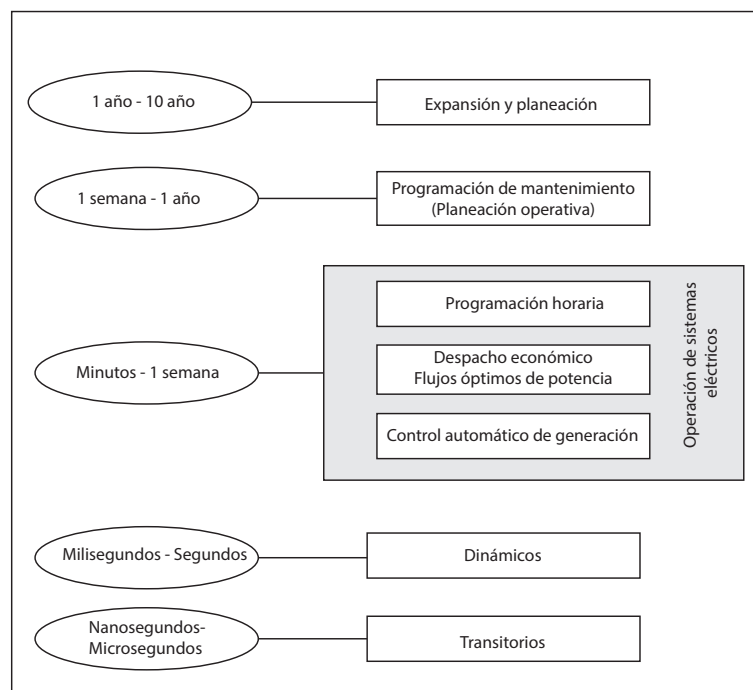


Figura 4.1: Perspectiva de horizonte de tiempo de planeación de un sistema eléctrico

4.2. Consideraciones de la expansión en sistemas de distribución

Los estudios de expansión en esta tesis se basan principalmente en sistemas de distribución. Como se ha mencionado estos sistemas son de gran importancia ya que su interacción es directa con los usuarios finales o clientes. Algunas consideraciones de diseño son de gran utilidad, para el desarrollo, planeación y expansión del sistema, esto debido a que cada cliente ya sea industrial, residencial o industrial tiene diferentes requerimientos específicos.

Entre algunas consideraciones básicas que deben de ser tomadas en cuenta para realizar estudios de planeación se pueden encontrar las siguientes:

Confiabilidad del sistema. El grado de confiabilidad del sistema depende principalmente del tipo de carga que se esté alimentando. En procesos industriales que requieren continuidad de servicio, el sistema deberá ser capaz de aislar la falla. Algunos factores importantes que influyen en la confiabilidad de un sistema de distribución, [Chen, 1990] [Casazza y Delea, 2010] son:

- Confiabilidad en el sistema de suministro, generación local y general.
- Simplicidad del sistema.
- Simplicidad en la operación y mantenimiento.
- Confiabilidad del equipo y su instalación.

Costos y economía. Son estudios que se deberán de tomar en cuenta, ya que son muy importantes. Estos deben de considerar los costos de los elementos como transformadores, relevadores de protección, cables y otros equipos, así como la instalación de los mismos. La selección del voltaje de operación y los costos de operación tienen un impacto importante en cuanto a la economía del sistema [Gönen, 2008].

Flexibilidad. El crecimiento de las cargas, lo cual se traduce en una demanda mayor entre los clientes. Un cliente comercial puede aumentar su demanda considerablemente al añadir algún sistema de refrigeración o de aire acondicionado, un cliente industrial mediante un nuevo proceso de manufactura puede modificar su demanda de manera drástica. Es por eso que el sistema de distribución

deberá de ser flexible con la finalidad de poder suministrar estos procesos sin mayores cambios en el sistema y con inversiones mínimas y tiempos de instalación pequeños [Chen, 1990]. El sistema, también deberá tener la flexibilidad para una futura expansión [Chen, 1990].

Calidad del suministro. La estabilidad y regulación del voltaje son factores importantes en el buen diseño de un sistema de distribución. Los transitorios, elevaciones y depresiones de voltaje, pueden causar daños a sistemas sensibles. Es por esta razón que el diseño deberá considerar estos disturbios con la finalidad de minimizarlos [Chen, 1990].

4.3. Factores que afectan la planeación

Algunos factores afectan la planeación y expansión y también deben de ser tomados en cuenta en modelos y estudios más completos. Estos factores son entre otros, pronóstico de carga, expansión de subestaciones y la selección del lugar de la subestación [Gönen, 2008].

Pronóstico de carga: los pronósticos de crecimiento de carga son una de las principales herramientas en la planeación y expansión de un sistema de distribución. Cuando se realizan pronósticos de carga los principales factores que afectan la toma de decisiones y deben ser tomados en cuenta son: factores geográficos, planos de ciudades y parques industriales, generación de energía alternativa, densidad de carga y crecimiento de la población.

Expansión de subestaciones: las decisiones acerca de la mejora o modernización de una subestación o en su defecto la construcción de una nueva deberán ser tomadas en base a algunos factores. La configuración actual del sistema, capacidad y el pronóstico de nuevas cargas son las principales y más importantes: capacidad actual, pronóstico de crecimiento de carga, pérdidas de potencia, factores económicos, limitación de los alimentadores.

Selección de lugar de la subestación: aunque pudiera pasar a segundo término, la elección de un sitio para una subestación es muy importante ya que se pueden tener limitaciones operacionales y económicas como la distancia entre centros de carga y líneas de subtransmisión. Algunos de los principales factores que afectan la selección de un lugar para una subestación son las siguientes: localización de las líneas de subtransmisión, pronóstico de crecimiento de carga, densidad de carga, disponibilidad de suelo, regulaciones de suelo, limitación de los alimentadores.

4.4. Modelos de planeación y expansión en sistemas de distribución

El problema de expansión y planeación de sistemas de distribución, puede ser considerado como un problema de optimización. Algunos de los objetivos que se pueden investigar mediante un problema de expansión y planeación son los siguientes [Gönen, 2008]:

1. Localización óptima de subestaciones.
2. Expansión óptima de subestaciones.
3. Transferencia óptima de cargas entre subestaciones y centros de demanda.
4. Rutas y tamaño de los alimentadores para suministrar cargas.

Los modelos que son utilizados para describir el problema de la expansión de redes pueden llegar a ser muy complejos, ya que como se ha mencionado anteriormente existen muchos factores que se pueden tomar en cuenta. Por lo regular en la expansión de redes son usados estudios de flujos de potencia, tanto en el modelo de flujos de CA como en el modelo simplificado de CD. Dependiendo del enfoque que se le dé al problema el modelo puede ser mixto entero no lineal *MINLP*, el cual presenta un nivel de dificultad mayor en la solución que un modelo de índole más simple, por ejemplo, donde se considere solamente costo o localización óptima de subestaciones. La solución al problema de expansión se puede resolver mediante métodos matemáticos y métodos heurísticos.

Entre los métodos matemáticos se pueden encontrar: programación lineal, programación no lineal, programación dinámica, algoritmo *Branch&Bound*, métodos de descomposición y programación mixta entera.

Por otro lado los métodos heurísticos han demostrado ser muy efectivos en la solución de problemas asociados a la expansión y llegan a ser una excelente elección siempre y cuando el problema sea adecuado a alguna técnica heurística. Entre ellas se pueden encontrar con frecuencia las siguientes: algoritmos evolutivos, algoritmos genéticos, algoritmos de colonia de hormigas, búsqueda tabú, algoritmo *simulated annealing*, algoritmo de emjambre de partículas.

4.5. Metodología propuesta

Ya que se han dado algunas definiciones y algunas características que afectan la planeación y expansión de los sistemas de distribución, es tiempo de formular el problema para posteriormente realizar los casos de estudio correspondientes en sistemas de distribución.

4.5.1. Formulación del problema

Para los casos que serán evaluados se considera el costo de instalación de las líneas de distribución en base a su longitud, de esta manera la función objetivo se encuentra representada mediante la siguiente expresión matemática:

$$\min \sum_{i=1}^n V_{CostoLin_i} \quad (4.1)$$

$$\text{Sujeto a: } M = n - n_f \quad (4.2)$$

donde:

$V_{CostoLin_i}$ Costo total de línea.

4.5.2. Algoritmo genético usado

El algoritmo genético usado para resolver el problema de expansión de sistemas eléctricos de distribución, es el mismo descrito en el Capítulo 3, con la diferencia que las líneas que cambian su estado de operación son las posibles candidatas para suministrar la nueva carga instalada. Las líneas del sistema inicial se mantienen fijas y estas no pueden cambiar su estado de operación. Estas son eliminadas del conjunto de mallas fundamentales con la finalidad de que no puedan ser seleccionadas por el algoritmo genético.

4.6. Implementación de la metodología propuesta

La metodología propuesta para la expansión de un sistema de distribución, está basada en el algoritmo genético que soluciona el problema de reconfiguración pero realizando algunas modificaciones. Esta metodología se resume en los siguientes pasos:

- Se realiza la lectura de los parámetros del sistema inicial, es decir, el sistema parcial que deberá ser expandido.
- Se realiza la lectura de los datos adicionales del sistema, las líneas candidatas y los nuevos nodos a los que se les debe suministrar la nueva demanda.
- Las líneas candidatas son consideradas como interruptores y las líneas del sistema inicial son líneas fijas.
- Se calculan los costos de los interruptores en base a su longitud.
- Se identifican las mallas fundamentales del sistema, y las respectivas líneas que las conforman. Las líneas fijas son eliminadas de las mallas fundamentales.
- Se inicia la rutina de algoritmos genéticos. Todos los individuos de la población inicial se generan aleatoriamente mediante la función de población inicial descrita en la Sección 3.6.3, todos los individuos generados son de topología radial. Las funciones de cruce y mutación generan individuos respetando la topología radial.
- Para cada posible solución, se evalúa la función objetivo considerando las nuevas líneas en operación.
- Cuando se cumple la condición de paro el algoritmo se detiene, el criterio de paro corresponde a que se evalúen el total de generaciones del algoritmo genético. La solución obtenida corresponde al costo de expansión mínimo en topología radial.

Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos mediante el algoritmo genético propuesto, el problema también es resuelto mediante el algoritmo de Prim, el cual encuentra un árbol de expansión mínima.

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo, correspondiente a los pasos que se deben seguir para realizar los estudios de expansión de redes de distribución.

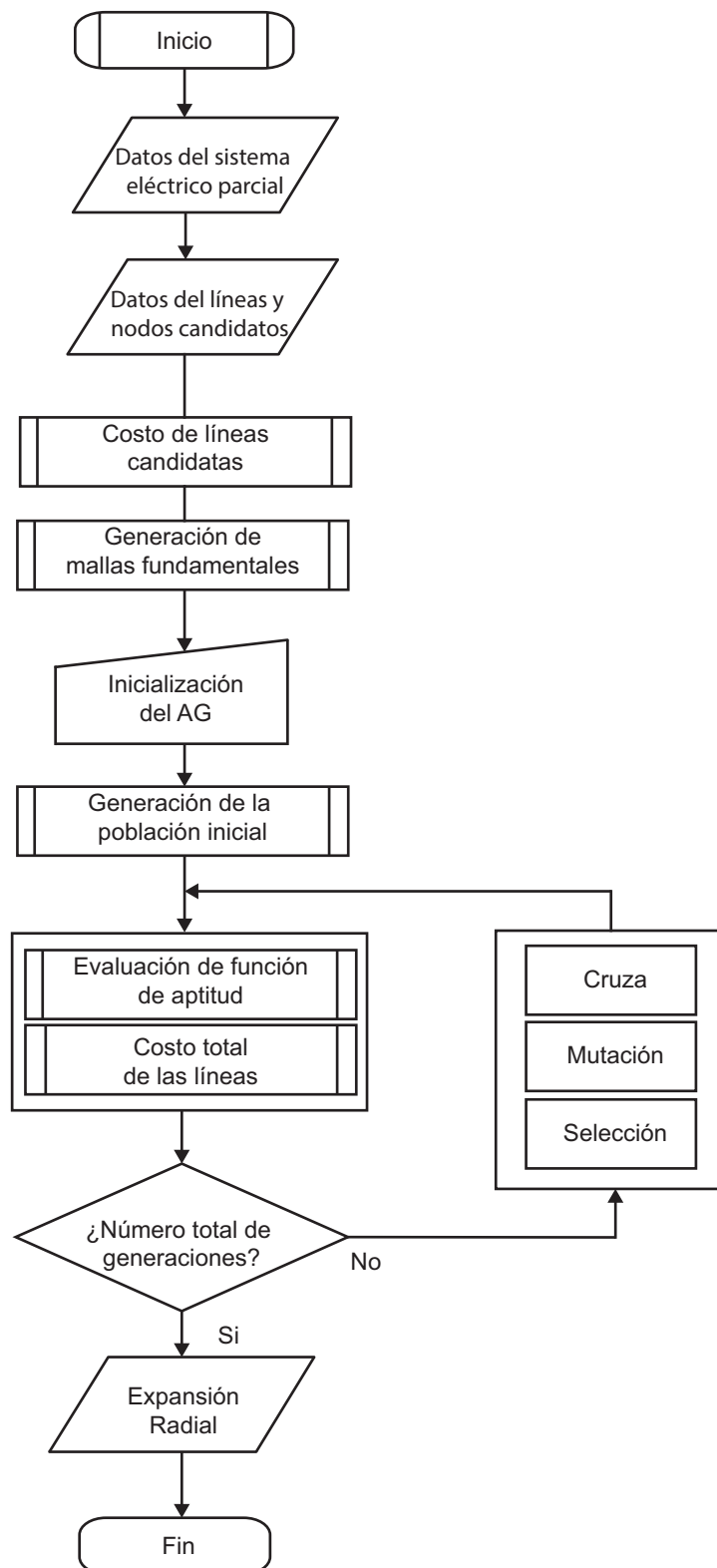


Figura 4.2: Diagrama de flujo para la expansión de sistemas de distribución

4.7. Casos de estudio

Con la finalidad de realizar estudios de expansión de redes de distribución, los sistemas usados en el capítulo de reconfiguración, son también usados en este capítulo. Para este estudio se supone que el sistema tiene construidas un número determinado de líneas, las líneas restantes son posibles candidatas para conectar la nueva demanda del sistema. Ya que el sistema es de distribución, una topología radial es necesaria como restricción.

En los casos de estudio se toman en cuenta los costos de las líneas en base a la longitud de las mismas. Para los sistemas se toman en cuenta líneas aéreas de un calibre de 477 Kcmil *ACSR* el cual es un conductor de aluminio reforzado con acero. La longitud total de la línea se obtiene encontrando la impedancia total de la línea candidata sobre el valor típico de impedancia que puede ser consultada en [Short, 2004]. La longitud de la línea está dada en millas, el costo por milla incluyendo la instalación que varía dependiendo de las circunstancias de desarrollo, dificultad de construcción y tamaño de conductores. El costo puede variar de \$10,000dls/mi hasta \$250,000dls/mi [Gönen, 2008] [Short, 2004]. Para los siguientes casos de estudio se considera un costo de \$75,000dls/mi.

4.7.1. Sistema de distribución de 33 nodos

El sistema inicial cuenta con 14 nodos conectados mediante 13 líneas construidas. El voltaje de operación de este sistema es de 12.66kV y se cuenta con una subestación, la demanda inicial es de 1200kW de potencia activa y 1715kVar y se supone que en un periodo de tiempo crecerá 2525kW y 585VAR, la cual se distribuye en 28 nodos. Se cuentan con 24 posibles líneas para suministrar la nueva demanda.

El sistema inicial se muestra en la Figura 4.3 donde las líneas instaladas se muestran remarcadas en gris, las posibles líneas de expansión se muestran sólidas. El nuevo sistema deberá operar de forma radial. Para realizar el estudio, se utilizan 45 generaciones y una población de 10 individuos. La población inicial se genera con la función descrita en la Sección 3.6.3.

La Figura 4.4 muestra la gráfica de la evolución del algoritmo genético, en esta se puede apreciar la aptitud promedio y la mejor del individuo en cada generación. El resultado obtenido para la expansión de este sistema es de 325,575.40

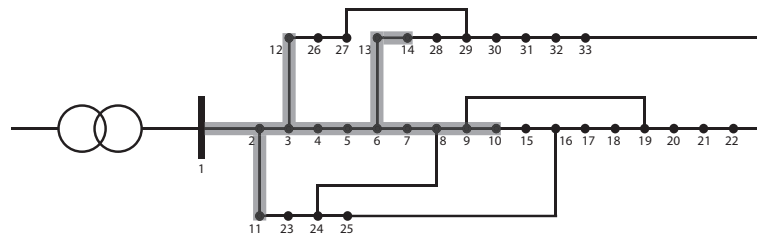


Figura 4.3: Sistema inicial de 14 nodos antes de la expansión

dlls. Ya que el algoritmo genético es el usado para realizar la reconfiguración, el vector solución corresponde a las líneas que no se encuentran en operación. Estas líneas así como sus respectivos nodos de recepción y envío, así como su costo se encuentran descritos en la Tabla 4.1

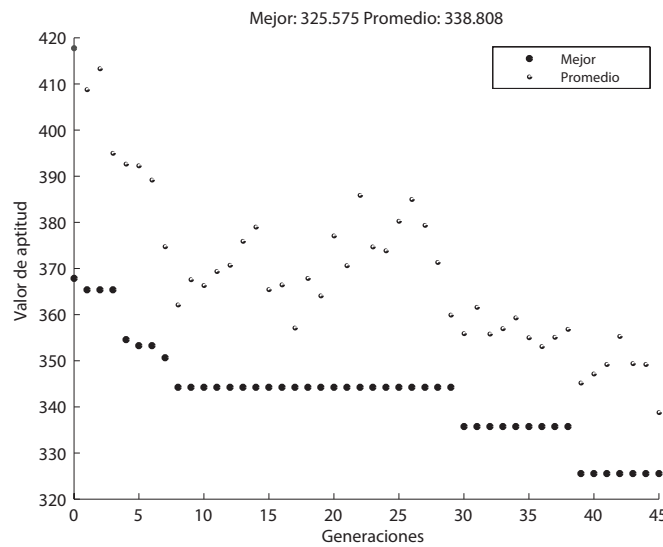


Figura 4.4: Valor de aptitud del promedio y mejor individuo, en cada generación

Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos, se usa el paquete *Bioinformatics Toolbox* [MathWorks, 2012a] el cual cuenta con herramientas de teoría de grafos. La función *graphminspanintree* mediante el uso del algoritmo de Prim encuentra un subconjunto donde no se forman ciclos pero se conectan todos los nodos, para este subconjunto los pesos de cada arista o arco se reducen al mínimo. El sistema que se obtiene es el mismo que el algoritmo genético encuentra. La Tabla 4.2 muestra las líneas que se encuentran fuera de operación para que el sistema sea radial, así como los resultados obtenidos mediante el algoritmo genético y el algoritmo de Prim.

La Figura 4.5 muestra el sistema cuando se realiza la expansión, en el cual se aprecia que todos los nodos se encuentran conectados, y la nueva demanda es suministrada.

Tabla 4.1: Líneas candidatas sistema 33 nodos

Nodo de envío	Nodo de recepción	Número de línea	Costo de línea
10	15	14	3.8212
15	16	15	7.2740
16	17	16	34.4561
17	18	17	16.5154
18	19	18	14.5943
19	20	19	17.0457
20	21	20	39.6648
21	22	21	17.1588
11	23	22	37.3516
23	24	23	11.6170
24	25	24	21.6787
12	26	25	21.1073
26	27	26	20.9857
14	28	27	26.0442
28	29	28	19.6756
29	30	29	10.5055
30	31	30	25.2721
31	32	31	8.7959
32	33	32	11.6294
8	24	33	52.1782
9	19	34	52.1782
16	25	35	52.1782
22	33	36	13.0456
27	29	37	13.0456

Tabla 4.2: Solución mediante GA y Prim Sistema de 33 Nodos

	Algoritmo genético	Algoritmo de Prim
Líneas eliminadas	33 34 35 20 27	33 34 35 20 27
Costo Total dlls	325,575.40	325,575.40

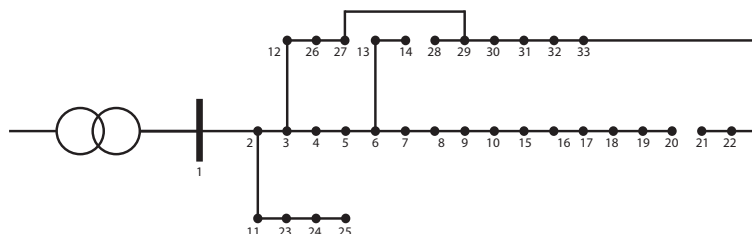


Figura 4.5: Expansión del sistema de 33 nodos

Al igual que el algoritmo de Prim el algoritmo genético obtiene la mejor reconfiguración, y cumple con las condiciones de radialidad dejando todos los nodos conectados y suministrando la demanda a la que el sistema estará sometido en un futuro.

La desventaja que presenta el algoritmo de Prim, es que en él no se consideran los parámetros eléctricos del sistema, solamente se consideran los costos de cada línea. En cambio cuando se ejecuta la metodología propuesta en esta tesis los parámetros eléctricos del sistema, como las impedancias de las líneas, cargas en los nodos, se toman en cuenta lo cual presenta una ventaja mayor ya que también se pueden hacer estudios de depresiones de voltaje, flujos de potencia o hacer uso de un modelo matemático más complejo. El algoritmo genético propuesto se encargará de encontrar un topología radial considerando cualquiera de los aspectos anteriores.

4.7.2. Sistema de distribución de 69 Nodos

Para este sistema se suponen 35 líneas instaladas que alimentan a 36 nodos, la demanda de potencia reactiva del sistema inicial es 617.5KW y 442.5kVar. La demanda del sistema crecerá, y se tendrá la necesidad de instalar 33 nodos adicionales los cuales en su conjunto demandaran un total de 3184.4kW de potencia activa y 2251.6kVAR de potencia reactiva. Para cumplir con el objetivo anterior 38 líneas pueden ser instaladas, y el sistema deberá cumplir con el criterio de radialidad.

Para los fines de este estudio se suponen que las líneas son aéreas y están compuestas de cable de aluminio reforzado de acero, el calibre es de 477 Kcmil, y el costo por milla es de \$75,000.00 dlls.

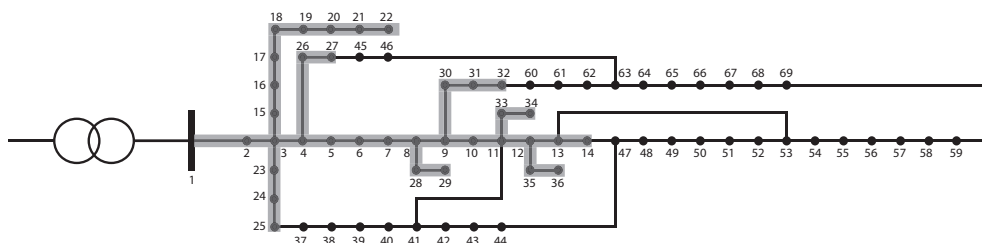


Figura 4.6: Sistema inicial de 36 nodos antes de la expansión

La Figura 4.6 muestra el sistema que se necesita expandir, las líneas sombreadas en gris representan el sistema inicial y las líneas sólidas son las posibles

líneas candidatas para alimentar los nuevos nodos. Los parámetros del algoritmo genético, fue una población de 20 individuos y 45 generaciones. El costo total encontrado fue de \$22,774.70 dls y adicionalmente el sistema opera en topología radial, conectando todos los nodos y suministrando la demanda requerida.

El costo de las líneas candidatas, y sus nodos de envío y recepción se encuentran en la Tabla 4.3.

La evolución del algoritmo genético se muestra en la Figura 4.7. El resultado es verificado mediante el algoritmo de Prim, obteniendo resultados favorables, es decir se obtiene el mismo resultado en la expansión mínima del sistema. La Tabla 4.4 muestra el resultado de la expansión mínima del sistema para ambos casos, y las líneas que tienen que estar fuera de operación para que el sistema sea radial.

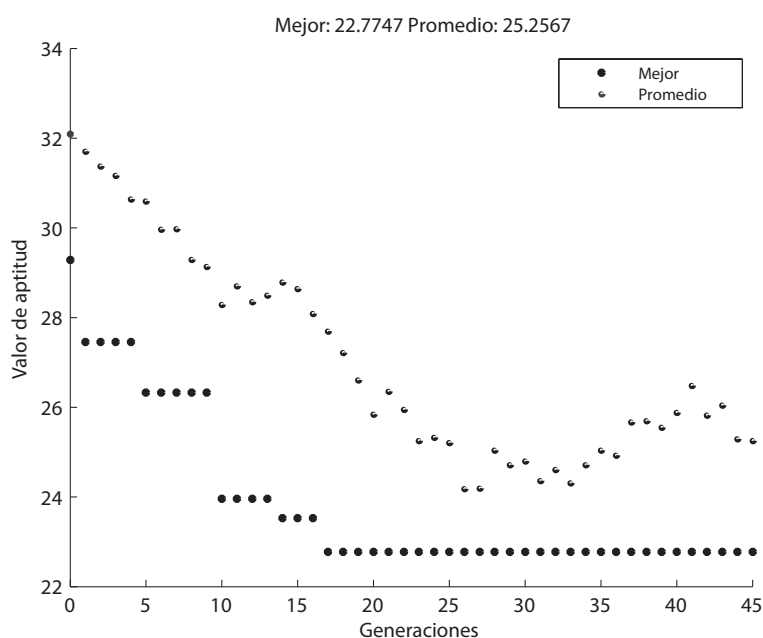


Figura 4.7: Valor de aptitud del promedio y mejor individuo, en cada generación

La Figura 4.8 muestra el sistema cuando se expande, la topología es radial, y un total de 69 nodos son suministrados.

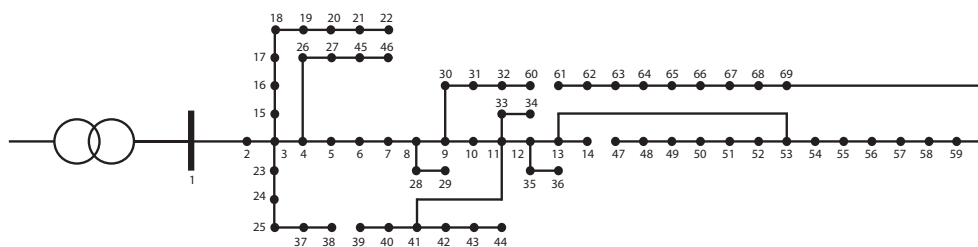


Figura 4.8: Expansión del sistema de 69 nodos

Tabla 4.3: Líneas candidatas sistema 69 nodos

Nodo de envío	Nodo de recepción	Número de línea	Costo de línea
14	47	36	2.0555
47	48	37	0.3820
48	49	38	0.7274
49	50	39	0.0092
50	51	40	0.6365
51	52	41	0.4088
52	53	42	0.6637
53	54	43	0.0272
54	55	44	0.3091
55	56	45	0.6728
56	57	46	1.4548
57	58	47	0.6001
58	59	48	0.3365
25	37	49	0.0862
37	38	50	0.0051
38	39	51	2.0661
39	40	52	0.8796
40	41	53	0.1162
41	42	54	0.0273
42	43	55	0.3233
43	44	56	0.0028
27	45	57	1.4131
45	46	58	0.4008
32	60	59	0.5824
60	61	60	3.0939
61	62	61	1.5249
62	63	62	0.5910
63	64	63	0.7443
64	65	64	1.0506
65	66	65	0.2016
66	67	66	0.3001
67	68	67	1.4709
68	69	68	2.1551
11	41	69	1.3044
13	53	70	1.3044
44	47	71	2.0624
46	63	72	4.1249
59	69	73	2.0624

Aunque el sistema es de tamaño mediano, el algoritmo genético propuesto encuentra la solución de expansión mínima cumpliendo con el criterio de radialidad y generando individuos en este tipo de topologías con la finalidad de reducir el

Tabla 4.4: Solución mediante GA y Prim Sistema 69 Nodos

	Algoritmo genético	Algoritmo de Prim
Líneas eliminadas	51 36 71 72 60	51 36 71 72 60
Costo Total dlls	227,774.70	227,774.70

espacio de búsqueda.

4.7.3. Sistema de distribución de 84 Nodos

Este sistema, corresponde a un sistema de distribución práctico de la compañía de Taiwan, (*Taiwan Power Company TPC*). El sistema original cuenta con 11 alimentadores. Para fines prácticos el sistema se simplifica mediante el criterio que se describió en la Sección 3.4. Se considera que los alimentadores corresponden a solo un alimentador formando un supernodo entre ellos. Líneas aéreas son consideradas con un conductor de calibre 477 kcmil de aluminio reforzado con acero. Inicialmente se tiene una demanda total de 10,820kW potencia activa y 7950KVar de potencia reactiva. Un estudio revela que la demanda se incrementará, y se deberá suministrar 17,530kW y 12,750kVAR de potencia activa y reactiva respectivamente. Los datos de este sistema pueden ser encontrados en: [Chiou *et al.*, 2005] y [Su y Lee, 2003]

El sistema actual consiste en 41 nodos conectados mediante 40 líneas, inicialmente el sistema opera de manera radial, y su expansión deberá cumplir con esta condición. 43 nodos deberán ser conectados mediante 56 posibles líneas. En la Figura 4.9 se muestra el sistema inicial sombreado en gris, y las posibles líneas se muestran solidas.

La población inicial para el algoritmo genético es de 25 individuos, y 55 generaciones. El resultado obtenido de la expansión mínima es de \$229,921.30 dlls. En la Figura 4.10 se muestra la gráfica de la evolución del algoritmo para este sistema, a partir de la generación número 33 el algoritmo encuentra la solución. Para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo genético, se verifica utilizando el algoritmo de Prim. Los resultados de ambas metodologías se muestran en la Tabla 4.5, los cuales son los mismos.

La Tabla 4.6 muestra las líneas que se utilizaron como candidatas, sus nodos de envío y recepción así como el costo total de cada línea.

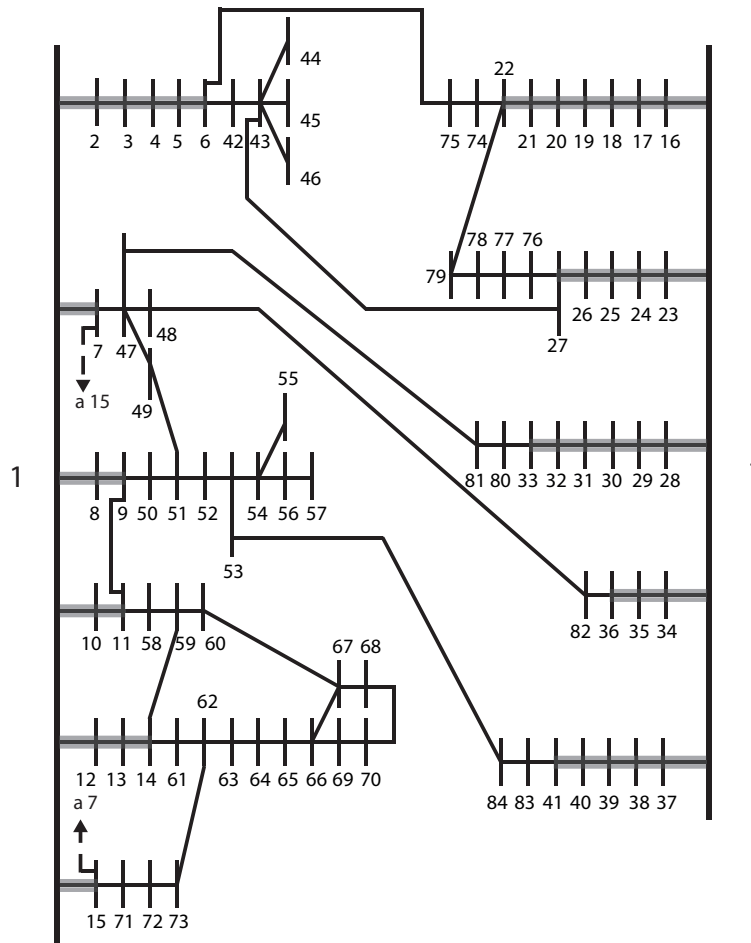


Figura 4.9: Sistema inicial de 41 nodos antes de la expansión

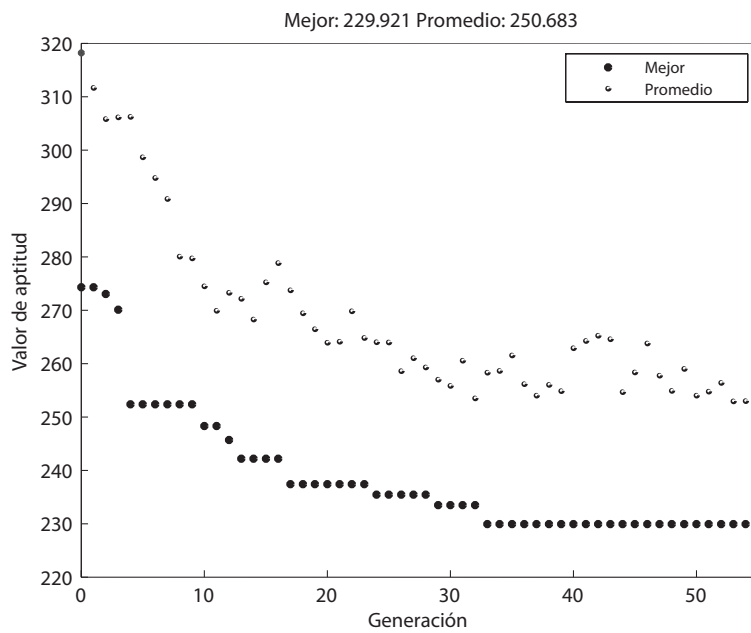


Figura 4.10: Valor de aptitud del promedio y mejor individuo, en cada generación

Tabla 4.5: Solución mediante GA y Prim Sistema 84 Nodos

	Algoritmo genético	Algoritmo de Prim
Líneas eliminadas	74 85 86 87 88 89 90 83 57 63 72 69 77	74 85 86 87 88 89 90 83 57 63 72 69 77
Costo Total dls	229,921.30	229,921.30

En la Figura 4.11 se muestra el sistema total de 84 nodos cuando se realiza la expansión, la topología es radial, y todos los nodos se encuentran conectados.

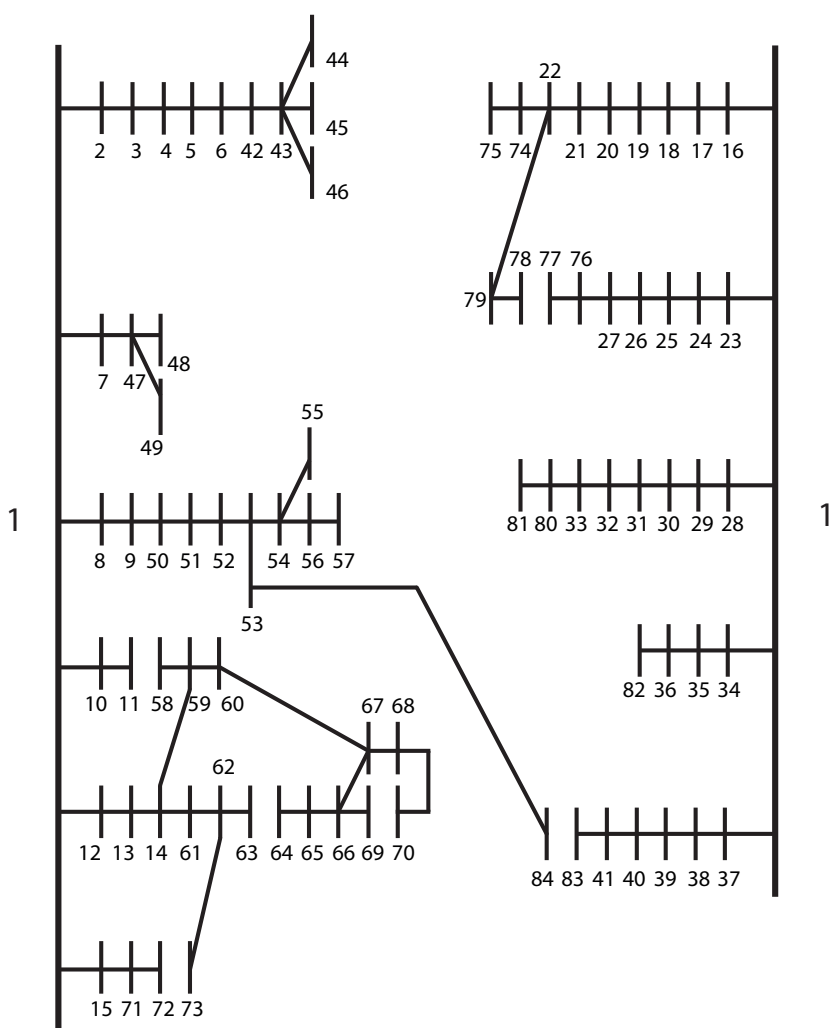


Figura 4.11: Expansión del sistema de 84 nodos

Tabla 4.6: Líneas candidatas sistema 84 nodos

Nodo de envío	Número recepción	Número de línea	Costo de línea
6	42	41	2.0421
42	43	42	3.2719
43	44	43	5.4455
43	45	44	12.2524
43	46	45	5.4455
7	47	46	17.5958
47	48	47	1.3614
47	49	48	4.0841
9	50	49	2.7228
50	51	50	8.1683
51	52	51	2.0421
52	53	52	8.8490
53	54	53	12.2524
54	55	54	8.1683
54	56	55	10.2104
56	57	56	6.8069
11	58	57	12.9331
58	59	58	3.9263
59	60	59	6.8069
14	61	60	1.3614
61	62	61	8.8490
62	63	62	2.7228
63	64	63	25.8662
64	65	64	2.0421
65	66	65	2.0421
66	67	66	4.0841
67	68	67	10.8911
66	69	68	10.2104
69	70	69	10.8911
15	71	70	2.0421
71	72	71	6.8069
72	73	72	12.2524
22	74	73	2.7228

Continua en la siguiente página

Tabla 4.6 Líneas candidatas sistema 84 nodos – continuación

Nodo de envío	Número recepción	Número de línea	Costo de línea
74	75	74	6.8069
27	76	75	1.3614
76	77	76	5.4455
77	78	77	12.2524
78	79	78	1.9632
33	80	79	4.5807
80	81	80	1.3410
36	82	81	3.9263
41	83	82	4.7648
83	84	83	16.3366
6	75	84	6.8069
43	27	85	6.8069
7	15	86	6.8069
47	81	87	17.6980
48	82	88	23.8242
49	51	89	27.4898
9	11	90	4.7648
53	84	91	4.0841
59	14	92	2.7228
60	67	93	4.0841
62	73	94	1.3614
68	70	95	10.2104
22	79	96	2.0421

4.7.4. Sistema de distribución de 118 nodos

Para este sistema también se realizan estudios de expansión, el sistema inicial cuenta con 56 líneas que interconectan un total de 57 nodos. Estos nodos tienen un total de demanda de 11,589kW de potencia activa y 8,484.3kVar de potencia reactiva. En un futuro el sistema aumentará su demanda a 11,120.7kW y 8,556.8kVAR, para poder suministrar la energía eléctrica 76 líneas posibles pueden ser instaladas.

El voltaje al que opera este sistema es de 11kV, y corresponde a un sistema de distribución.

Al igual que los casos anteriores se asume un costo de \$75,000.00 dls, y conductores de aluminio reforzados con acero para cada línea, el sistema se muestra en la Figura 4.12. Las líneas sombreadas, corresponden al sistema actual, las líneas solidas son candidatas para suministrar la demanda requerida. En la Tabla 4.8 se muestran las líneas que pueden ser instaladas y sus respectivos nodos de envío y recepción también se muestra el costo total de la línea.

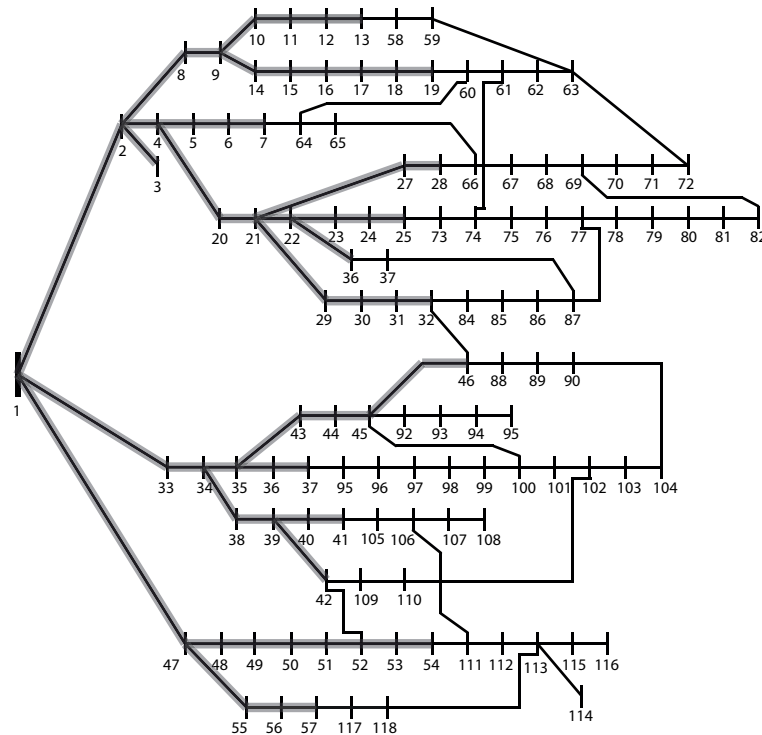


Figura 4.12: Sistema inicial de 57 nodos antes de la expansión

Una población de 35 individuos y 85 generaciones son necesarias para que el algoritmo genético encuentre la expansión mínima del sistema la cual corresponde a un costo de \$446,669.60 dls, 15 líneas se encuentran desconectadas para asegurar que el sistema sea radial. Al ser un sistema de mayor dimensión, un costo computacional mayor se presenta en la búsqueda de la solución. La evolución del algoritmo genético se muestra en la Figura 4.13 en ella se puede apreciar que a partir de la generación 58 la solución es encontrada.

La comparación de la solución del algoritmo de Prim y el algoritmo genético se muestra en la Tabla 4.7, esta Tabla muestra que ambos resultados son iguales.

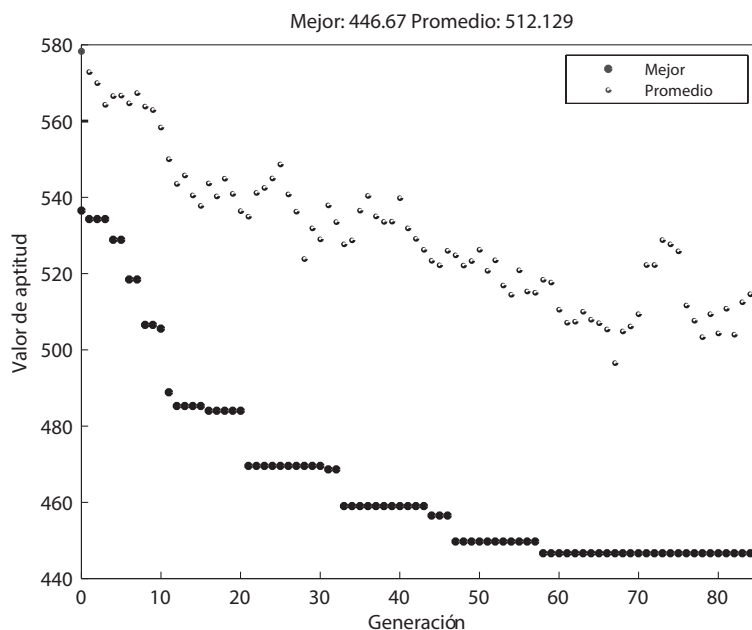


Figura 4.13: Valor de aptitud del promedio y mejor individuo, en cada generación

Tabla 4.7: Solución mediante GA y Prim Sistema 118 Nodos

	Algoritmo genético	Algoritmo de Prim
Líneas eliminadas	118 119 120 67 86 123 124 125 126 96 102 129 130 131 132	118 119 120 67 86 123 124 125 126 96 102 129 130 131 132
Costo Total dlls	446,669.60	446,669.60

En la Figura 4.14 se muestra el sistema total después de realizar el estudio de expansión. El nuevo sistema tiene un total de 118 nodos, también se puede apreciar que el sistema opera en una topología radial.

Tabla 4.8: Líneas candidatas sistema 118 nodos

Nodo de envío	Número recepción	Número de línea	Costo de línea
3	58	57	5.8849
58	59	58	5.6728
19	60	59	7.8794
60	61	60	4.1259
61	62	61	5.4431
62	63	62	5.4431
7	64	63	0.5583

Continúa en la siguiente página

Tabla 4.8 Líneas candidatas sistema 118 nodos – continuación

Nodo de envío	Número recepción	Número de línea	Costo de línea
64	65	64	1.6240
28	66	65	5.7049
66	67	66	7.7620
67	68	67	35.5350
68	69	68	11.8634
69	70	69	7.0105
70	71	70	8.8052
71	72	71	7.8993
25	73	72	7.1841
73	74	73	5.4625
74	75	74	6.1453
75	76	75	3.5097
76	77	76	4.3888
77	78	77	4.3888
78	79	78	7.0219
79	80	79	3.5097
80	81	80	10.5176
81	82	81	10.5176
26	83	82	4.0506
32	84	83	8.7782
84	85	84	8.7782
85	86	85	5.3776
86	87	86	22.6218
46	88	87	6.5036
88	89	88	5.4468
89	90	89	7.9813
45	91	90	7.1568
91	92	91	7.1568
92	93	92	6.3495
93	94	93	12.5791
37	95	94	14.7239
95	96	95	10.5418
96	97	96	29.9705
97	98	97	4.2912

Continúa en la siguiente página

Tabla 4.8 Líneas candidatas sistema 118 nodos – continuación

Nodo de envío	Número recepción	Número de línea	Costo de línea
98	99	98	7.8690
99	100	99	7.8690
100	101	100	6.1402
101	102	101	6.0528
102	103	102	15.0757
103	104	103	3.2704
41	105	104	5.2193
105	106	105	6.4324
106	107	106	6.6811
107	108	107	5.6947
42	109	108	7.4482
109	110	109	10.3681
54	111	110	9.9172
111	112	111	4.2225
112	113	112	9.9172
113	114	113	6.3492
113	115	114	5.4244
115	116	115	5.9761
57	117	116	13.3544
117	118	117	16.0406
72	63	118	14.7003
59	63	119	14.6903
64	60	120	11.0965
82	69	121	12.4657
87	77	122	9.3485
83	87	123	19.7315
65	66	124	15.3176
32	46	125	10.2763
100	45	126	22.9515
110	102	127	10.5504
90	104	128	12.0200
111	106	129	16.9031
52	42	130	21.1006
113	118	131	18.4119

Continúa en la siguiente página

Tabla 4.8 Líneas candidatas sistema 118 nodos – continuación

Nodo de envío	Número recepción	Número de línea	Costo de línea
61	74	132	17.2771

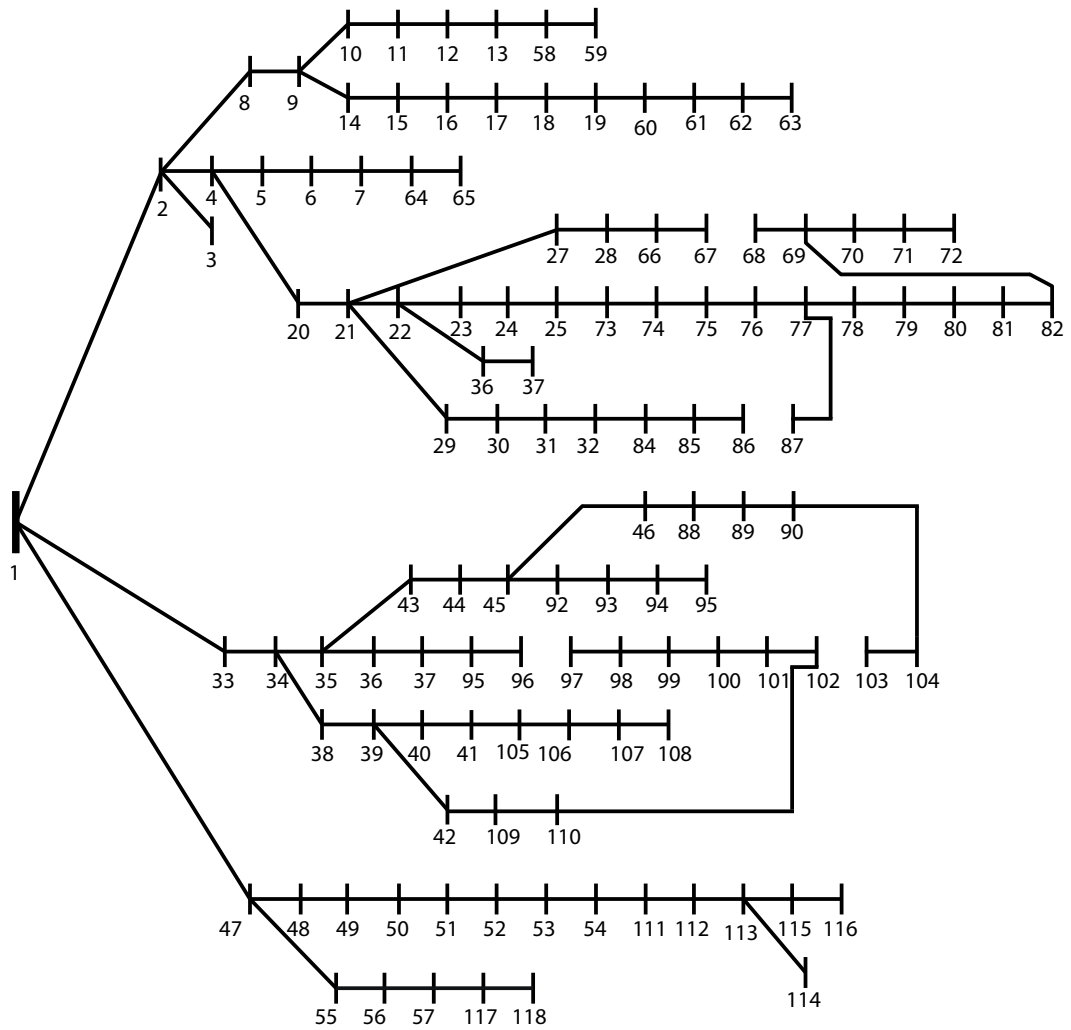


Figura 4.14: Expansión del sistema de 118 nodos

Tabla 4.9: Parámetros de simulación del algoritmo genético, estudios de expansión

	Número de generaciones	Tamaño de la población	Taza de Cruza	Taza de mutación
33 Nodos	45	10	1	0.3
69 Nodos	45	20	1	0.3
84 Nodos	55	25	1	0.3
118 Nodos	85	35	1	0.3

La Tabla 4.9 muestra los parámetros que se usaron en el algoritmo genético para los estudios de expansión. De los resultados obtenidos, se pueden realizar los siguientes comentarios: Los sistemas de distribución usados para los estudios de expansión son iguales a los sistemas de reconfiguración, con la diferencia que en expansión se considera el sistema de manera parcial para poder ser expandido. Las topologías solución obtenidas en este capítulo son muy parecidas a los sistemas base u originales de los estudios de reconfiguración, esto debido a que las líneas de enlace o *tie line* tienen longitudes mayores y por lo tanto su costo es mayor. El equipo utilizado para las simulaciones es el descrito en el Capítulo 3.

4.8. Conclusiones

En este capítulo se abordó el tema de expansión de sistemas eléctricos, al cual se le da un enfoque dirigido a los sistemas de distribución radiales. Algunas de las características de los estudios de planeación y expansión fueron revisadas para realizar una formulación del problema, la metodología propuesta se basa en el algoritmo genético usado en el Capítulo 3 pero con algunas modificaciones.

Con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del algoritmo y la formulación del modelo de expansión cuatro casos de estudio fueron evaluados, considerando costos de construcción en las líneas. Los resultados que se obtienen se compararon con un algoritmo de expansión mínima, en todos los casos el algoritmo converge al mínimo global. Las ventajas de usar una metodología propuesta radica en trabajar con los parámetros eléctricos del sistema, con los cuales se pueden realizar estudios de depresiones de voltaje en el sistema, estudios de flujos de potencia o en su defecto estudios de optimización multiobjetivo. El algoritmo genético propuesto buscará una topología radial considerando cualquier función objetivo.

Técnicas multiobjetivo aplicados a la reconfiguración de sistemas de distribución

Un sistema de distribución deberá operar de manera confiable, con la finalidad de suministrar energía de calidad, y mantenerse en niveles de voltaje aceptables, ya que los usuarios finales de la energía tienen la necesidad de que su equipo trabaje en determinados rangos. Es por esta razón que surge la necesidad de utilizar optimización multiobjetivo, en este caso en particular, se pretende disminuir depresiones de voltaje en los nodos, y minimizar las pérdidas del sistema reconfigurando la red.

En este Capítulo se abordan definiciones básicas de los problemas multiobjetivo, como se encuentran formulados, métodos de solución también se mencionan algunos algoritmos genéticos multiobjetivo. De manera adicional se formula un problema de dos objetivos, el cual se resuelve mediante un algoritmo genético multiobjetivo y es aplicado a tres sistemas de distribución que se han usado en capítulos previos.

5.1. Optimización multiobjetivo

Cuando se trata un problema de optimización, de un solo objetivo se tiene únicamente una solución, la cual se encuentra bien definida. La solución a problemas multiobjetivo consiste en un conjunto de soluciones que presentan ventajas y desventajas entre los objetivos, es decir, un conjunto de *soluciones de compromiso*

también llamadas *óptimos de Pareto*. El propósito de una optimización multiobjetivo consiste en encontrar el conjunto de las soluciones compromiso con la finalidad de poder seleccionar la más adecuada según un criterio previamente establecido.

Entre algunas de las características que se presentan en los problemas de optimización multiobjetivo se encuentran las siguientes [von Lüken, 2003]:

- Los objetivos pueden ser conflictivos entre sí, tener distintas unidades de medida o ser inconmensurables.
- Al existir objetivos contradictorios no existe una solución única que sea mejor que otras con respecto a todos los objetivos, si no que se tiene un conjunto de alternativas de solución, las cuales representan los mejores compromisos entre los distintos objetivos.
- De las alternativas existentes sólo interesa el conjunto de soluciones que cumple con ciertas restricciones.
- Al existir un conjunto de alternativas, es necesaria información para tomar una decisión acerca de la solución que deberá ser implementada.

5.1.1. Conceptos y definiciones del problema multiobjetivo

Un problema de optimización multiobjetivo se caracteriza por optimizar de forma simultánea un conjunto de dos o más funciones objetivo, donde normalmente se tienen conflictos entre los objetivos, es decir, la mejora de una función objetivo da lugar a que las funciones restantes empeoren.

Con la finalidad de comprender y familiarizarse con los problemas de optimización multiobjetivo, algunas definiciones matemáticas y la formulación del mismo se presentan a continuación [Duarte, 2001], [Galeano y Montoya, 2008], [Crichigno, 2004] y [von Lüken, 2003]:

Problema de optimización multiobjetivo: un problema multiobjetivo consta de un conjunto h variables de decisión, un conjunto de k funciones objetivo y un conjunto de m restricciones. Las funciones objetivo y las restricciones se encuentran en función de las variables de decisión. Matemáticamente se formula como:

$$\begin{aligned}
 &\text{Optimizar } \mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})) \\
 &\text{sujeto a: } \mathbf{e}(\mathbf{x}) = (e_1(\mathbf{x}), e_2(\mathbf{x}), \dots, e_m(\mathbf{x})) \geq 0 \\
 &\text{donde: } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_h) \in \mathbf{X} \\
 &\qquad \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_h) \in \mathbf{Y}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

siendo \mathbf{y} el vector objetivo y \mathbf{x} el vector de decisión. El espacio de decisión se denota mediante \mathbf{X} , y el espacio objetivo por \mathbf{Y} . El conjunto de restricciones $\mathbf{e}(\mathbf{x}) \geq 0$ determina el conjunto de soluciones factibles \mathbf{X}_f y su correspondiente conjunto de vectores objetivo factibles \mathbf{Y}_f . Dependiendo del problema se puede minimizar o maximizar

Conjunto factible: el conjunto de soluciones factibles \mathbf{X}_f , se define como el conjunto de vectores de decisión \mathbf{x} , que satisfacen $\mathbf{e}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{X}_f = \{\mathbf{x} \in \mathbf{X} \mid \mathbf{e}(\mathbf{x}) \geq 0\} \tag{5.2}$$

La región factible del espacio objetivo se denota por:

$$\mathbf{Y}_f = \mathbf{F}(\mathbf{X}_f) = \bigcup_{x \in \mathbf{X}_f} \{\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x})\} \tag{5.3}$$

Cada solución del problema de optimización multiobjetivo consiste de una n -tupla $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_h)$, donde cada x debe cumplir con el conjunto de restricciones $\mathbf{e}(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0}$. El problema de optimización consiste en encontrar x para el “mejor valor” de $\mathbf{F}(\mathbf{x})$. Generalmente existe un conjunto de soluciones, entre éstas ninguna se puede considerar mejor que las demás si se tienen en cuenta todos los objetivos simultáneamente. Es por esta razón que en un problema de optimización multiobjetivo deberá de ser definido un concepto nuevo de óptimo.

Dominancia de Pareto en el contexto de minimización: para dos vectores de decisión \mathbf{u} y \mathbf{v}

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u} \succ \mathbf{v} (\mathbf{u} \text{ domina a } \mathbf{v}) &\quad \text{si y solo si } \mathbf{f}(\mathbf{u}) < \mathbf{f}(\mathbf{v}) \\
 \mathbf{v} \succ \mathbf{u} (\mathbf{v} \text{ domina a } \mathbf{u}) &\quad \text{si y solo si } \mathbf{f}(\mathbf{v}) < \mathbf{f}(\mathbf{u}) \\
 \mathbf{u} \sim \mathbf{v} (\mathbf{u} \text{ y } \mathbf{v} \text{ no son comparables}) &\quad \text{si y solo si } \mathbf{f}(\mathbf{u}) \not< \mathbf{f}(\mathbf{v}) \wedge \mathbf{f}(\mathbf{v}) \not< \mathbf{f}(\mathbf{u})
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Una vez definido el concepto de dominancia de Pareto, el criterio de óptimo de Pareto puede ser definido:

Óptimo de Pareto: dado un vector de decisión $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f$, se dice que \mathbf{x} es no dominado respecto a un conjunto $\mathbf{V} \subseteq \mathbf{X}_f$ si y solo si:

$$\forall \mathbf{v} \in \mathbf{V} : (\mathbf{x} \succ \mathbf{v} \vee \mathbf{x} \sim \mathbf{v}) \quad (5.5)$$

En caso que \mathbf{x} sea no dominada respecto a todo el conjunto \mathbf{X}_f , y solo en ese caso, se dice que \mathbf{x} es una solución óptima de Pareto. En otras palabras la solución no puede ser mejorada en uno de los objetivos sin afectar adversamente a por lo menos uno de los otros objetivos.

Conjunto óptimo de Pareto: dado el conjunto de vectores de decisión factibles \mathbf{X}_f , se denomina conjunto de Pareto óptimo \mathbf{X}_{true} al conjunto de vectores de decisión no dominados de \mathbf{X}_f , es decir:

$$\mathbf{X}_{\text{true}} = \{\mathbf{x} \in \mathbf{X}_f \mid \mathbf{x} \text{ es no dominado con respecto a } \mathbf{X}_f\} \quad (5.6)$$

El conjunto correspondiente de vectores objetivos $\mathbf{Y}_{\text{true}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}_{\text{true}})$ constituye el *frente de Pareto*.

La Figura 5.1 muestra de manera gráfica las definiciones de dominancia de Pareto, óptimo de Pareto, y frente de Pareto.

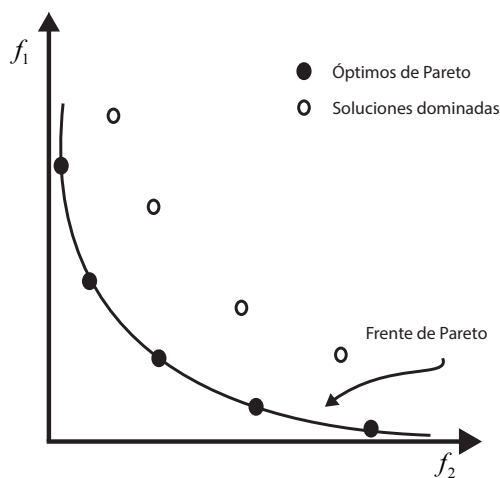


Figura 5.1: Dominancia de Pareto para un problema de optimización de dos objetivos

5.1.2. Proceso de búsqueda y toma de decisiones

En un problema de optimización multiobjetivo, se deben de tomar en cuenta dos etapas que se presentan al resolver el mismo. La primera etapa se refiere al concepto de optimización, en la cual se realiza la búsqueda en el espacio de las soluciones factibles con la finalidad de encontrar los óptimos de Pareto. Una vez que el conjunto óptimo de Pareto ha sido encontrado, las soluciones contenidas en él son óptimas para todos los objetivos, sin embargo, debe ser tomada una decisión al seleccionar una única solución del conjunto. En esta etapa, generalmente la decisión es tomada por una persona, o automatizada mediante un algoritmo que haga uso de información adicional al problema de optimización.

Tomando la información de ambas etapas los métodos de optimización multiobjetivo pueden clasificarse en tres categorías diferentes:

1. Métodos de decisión *a priori*.
2. Métodos de decisión *a posteriori*.
3. Métodos de decisión interactivos.

5.1.3. Métodos tradicionales de optimización multiobjetivo

Para resolver problemas de optimización multiobjetivo una variedad de métodos han sido aplicados. Entre los métodos tradicionales se pueden encontrar los siguientes [Lee y El-Sharkawi, 2008] [von Lüken, 2003]:

5.1.3.1. Método de la suma con pesos

En este método se combinan las funciones objetivo en una sola función, donde a cada función se le da cierta importancia. Este peso se asigna tomando una decisión *a priori* basada en información de la importancia de cada objetivo.

$$\min Z = \sum_{j=1}^N w_j f_j(\mathbf{x}) \quad \text{con } w_j \geq 0 \text{ y } \sum_{j=1}^N w_j = 1 \quad (5.7)$$

5.1.3.2. Programación de metas

En este método en base a un conocimiento *a priori*, se asignan metas que se desean alcanzar para cada función objetivo. Estos valores se incorporan como restricciones. La formulación más simple de este método es la siguiente:

$$\min Z = \sum_{j=1}^N |f_j(\mathbf{x}) - T_j| \quad \text{sujeto a } \mathbf{x} \in \mathbf{X}_f \quad (5.8)$$

donde: T_j denota la meta u objetivo establecida previamente para la j -ésima función objetivo f_j . La técnica tratará de minimizar la suma de las desviaciones absolutas de cada objetivo con respecto al valor deseado.

5.1.3.3. Método de las ε restricciones

Este método consiste en la optimización de un objetivo mientras los objetivos restantes son tratados como restricciones que tienen límites ε_j . El problema se repite para solucionar diferentes valores de ε_j y de esta manera generar las soluciones pertenecientes al frente de Pareto. La formulación simple de este método está dada por:

$$\begin{aligned} \min & f_h(\mathbf{x}) \\ \text{Sujeto a: } & f_j(\mathbf{x}) \leq \varepsilon_j \quad 1 \leq j \leq k \quad j \neq h \\ & \mathbf{x} \in \mathbf{X}_f \end{aligned} \quad (5.9)$$

5.1.4. Algoritmos genéticos en optimización multiobjetivo

Para los problemas de optimización multiobjetivo se han desarrollado metodologías basadas en algoritmos genéticos, esto debido a las ventajas y características propias de estos algoritmos, y los buenos resultados al resolver problemas de un solo objetivo. Principalmente se pueden considerar dos generaciones de algoritmos genéticos multiobjetivo, las cuales se basan en conceptos de óptimos de Pareto. La segunda generación introduce el elitismo, donde normalmente se utiliza una población externa.

La primera generación esta basada en la jerarquización de Pareto. Algunos de ellos son:

1. Primera generación.

- MOGA *Multiobjective Genetic Algorithm* propuesto por Fonseca y Fleming [Fonseca y Fleming, 1993]
- NPGA *Niched Pareto Genetic Algorithm* propuesto por Horn *et al* [Horn *et al.*, 1994]
- NSGA *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm* propuesto por Srinivas y Deb [Srinivas y Deb, 1994]

La segunda generación introduce el elitismo, donde normalmente se utiliza una población externa. Entre estos algoritmos se pueden encontrar los siguientes:

2. Segunda generación.

- NSGA2 *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm 2* propuesto por Deb *et al.*, [Deb *et al.*, 2000]
- NPGA2 *Niched Pareto Genetic Algorithm 2* propuesto por Erikson Mayer y Horn [Erikson *et al.*, 2001]
- Micro-Genetic Algorithm propuesto por Coello Coello y Toscano Pulido [Coello y Toscano, 2001]

5.2. Metodología propuesta

Anteriormente realizaron estudios de reconfiguración en sistemas de distribución con la finalidad de reducir depresiones de voltaje, en determinados nodos que cuentan con estos problemas. Un aspecto muy importante el cual se ha mencionado en esta tesis, son las pérdidas de potencia que se presentan en los sistemas eléctricos. El estudio de las pérdidas de potencia es de importancia ya que se encuentra ligado a costos económicos. Estas razones son relevantes para realizar estudios de optimización donde se tomen en cuenta ambos problemas. En esta tesis se propone una técnica de reconfiguración multiobjetivo basada en algoritmos genéticos con la finalidad de reducir depresiones de voltaje en los nodos del sistema, y disminuir las pérdidas de potencia que se presentan en las líneas. El algoritmo genético usado, es el que se propone en el Capítulo 3.

5.2.1. Formulación del problema

La reconfiguración de sistemas de distribución tiene como objetivo obtener una topología que presente una mejora sobre la topología inicial. En esta ocasión se pretende minimizar dos objetivos, lo cual hace que el problema sea más complicado. El primer objetivo, es encontrar el estado de operación del sistema que minimice el número de depresiones de voltaje, con respecto a un valor especificado de las mismas. El segundo objetivo es disminuir las pérdidas de potencia que se presentan a través de las líneas, las pérdidas son calculadas como la suma del cuadrado de la corriente por la resistencia que presenta la línea. El problema de optimización multiobjetivo se encuentra dado por la siguiente expresión:

$$\min F(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})) \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeto a:} \quad & M = n - n_f \\ & V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \\ & P_{Gk} - P_{Lk} - P_k(V, \theta) = 0 \\ & Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_k(V, \theta) = 0 \end{aligned} \quad (5.11)$$

donde:

- $f_1(\mathbf{x})$ $\sum_{k=1}^n V_{ecBand_k}$;
- $f_2(\mathbf{x})$ $\sum_{(km) \in \Omega_l} g_{km} [V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)]$;
- Ω_l Es el conjunto de las líneas del sistema de distribución;
- g_{km} Conductancia de la línea km
- V_k Magnitud de voltaje en el nodo k ;
- θ_k Ángulo de fase en el nodo k ;
- V_{min} Magnitud de voltaje mínimo;
- V_{max} Magnitud de voltaje máximo;
- P_{Gk} Potencia activa inyectada por el generador en el nodo k ;
- Q_{Gk} Potencia reactiva inyectada por el generador en el nodo k ;
- P_{Lk} Potencia activa demanda en el nodo k ;
- Q_{Lk} Potencia reactiva demanda en el nodo k ;
- $P_k(V, \theta)$ Potencia activa inyectada en el nodo k ;
- $Q_k(V, \theta)$ Potencia reactiva inyectada en el nodo k

Cuando se soluciona el problema de optimización multiobjetivo, se obtiene un conjunto óptimo de Pareto que da lugar al frente de Pareto, entonces se realiza

la selección de un resultado, dando preferencia a la disminución de depresiones de voltaje en los nodos. La configuración obtenida presentará una solución compromiso, entre la disminución de pérdidas de potencia y la disminución de depresiones de voltaje en los nodos donde se tienen estos problemas.

5.3. Implementación de la metodología propuesta

La metodología de optimización multiobjetivo propuesta se basa en el uso de un algoritmo genético multiobjetivo, el cual mediante las funciones desarrolladas en el Capítulo 3, y el uso de la función *@gamultiobj*. Esta función utiliza una variante del algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II, pero se controla el elitismo mediante el parámetro *ParetoFraction* y *DistanceFcn*. La función *@gamultiobj* se encuentra en las herramientas de “*Global Optimization toolbox*” [MathWorks, 2012b]. Esta metodología puede ser resumida en los siguientes pasos:

- Se realiza una lectura de los parámetros eléctricos del sistema, se incluyen la referencia de depresiones de voltaje, el rango de voltaje residual considerado y el número de posición de fallas.
- Los datos que corresponden a las líneas, específicamente nodos de envío y de recepción son ordenados y las líneas son numeradas. Las líneas de enlace o *tie line* son las últimas líneas que se numeran. Se considera que todas las líneas del sistema pueden ser conectadas y desconectadas.
- Se identifica el sistema base que corresponde a las líneas de enlace en su estado normalmente abierto. Esta configuración representa el primer individuo de la población inicial.
- Una vez que se determina el sistema base y los enlaces, se generan las mallas fundamentales del sistema, las cuales son el conjunto de las líneas, que conforman el ciclo que se forma al añadir cada uno de los enlaces al sistema original. Las líneas que no se encuentran contenidas en ninguna malla fundamental no son candidatas a cambiar su estado de operación, de esta manera se simplifica el sistema.
- Se inicia la rutina de algoritmos genéticos multiobjetivo. Los individuos restantes de la población inicial se generan aleatoriamente mediante la función

de población inicial descrita en la Sección 3.6.3. Las funciones de cruce y mutación generan individuos respetando la topología radial.

- Una vez que se obtienen las posibles soluciones del sistema (individuos), se modifican los parámetros del sistema, eliminando las líneas fuera de operación.
- Ya que se tienen los nuevos parámetros del sistema se realiza una corrida de flujos de potencia mediante MATPOWER (*Power System Simulation Package*) [Ziemmerman *et al.*, 2011] del sistema reconfigurado, se calculan los voltajes de prefalla y las pérdidas de potencia.
- Se realiza la evaluación de las depresiones de voltaje utilizando los voltajes de prefalla del sistema reconfigurado.
- Se realiza una evaluación de los resultados obtenidos en el paso anterior con respecto a los valores de referencia mediante la función objetivo.
- Este proceso se repite para los individuos de la población a lo largo de cada generación. El algoritmo se detiene si cumple con algún criterio de paro establecido previamente, el cual corresponde a que se evalúen el total de generaciones del algoritmo genético.
- Finalmente, se obtiene un conjunto de resultados, y se toma la decisión de seleccionar el resultado más adecuado dando prioridad al sistema que presenta el menor número de depresiones de voltaje, siempre y cuando las pérdidas sean menores al sistema base.

En la Figura 5.2 se muestra el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del algoritmo genético de optimización multiobjetivo.

5.4. Casos de estudio

Los sistemas que serán evaluados para realizar los estudios de optimización multiobjetivo, son los sistemas de distribución utilizados en la Sección 3.8. Las referencias de depresiones de voltaje, son las mismas con la finalidad de poder realizar una comparación entre los resultados. Las fallas a las que se encuentran sometidos los sistemas son trifásicas balanceadas. Los voltajes de prefalla, se calculan mediante una corrida de flujos en el programa MATPOWER [Ziemmerman *et al.*, 2011], con el cual también se calculan las pérdidas de potencia activa en las líneas e

transmisión. La restricción V_{min} que corresponde al voltaje mínimo en los nodos se fija en un valor de 0.93 p.u. y V_{max} voltaje máximo en 1.1 p.u., los individuos que no cumplen con esta restricción son penalizados en la función objetivo.

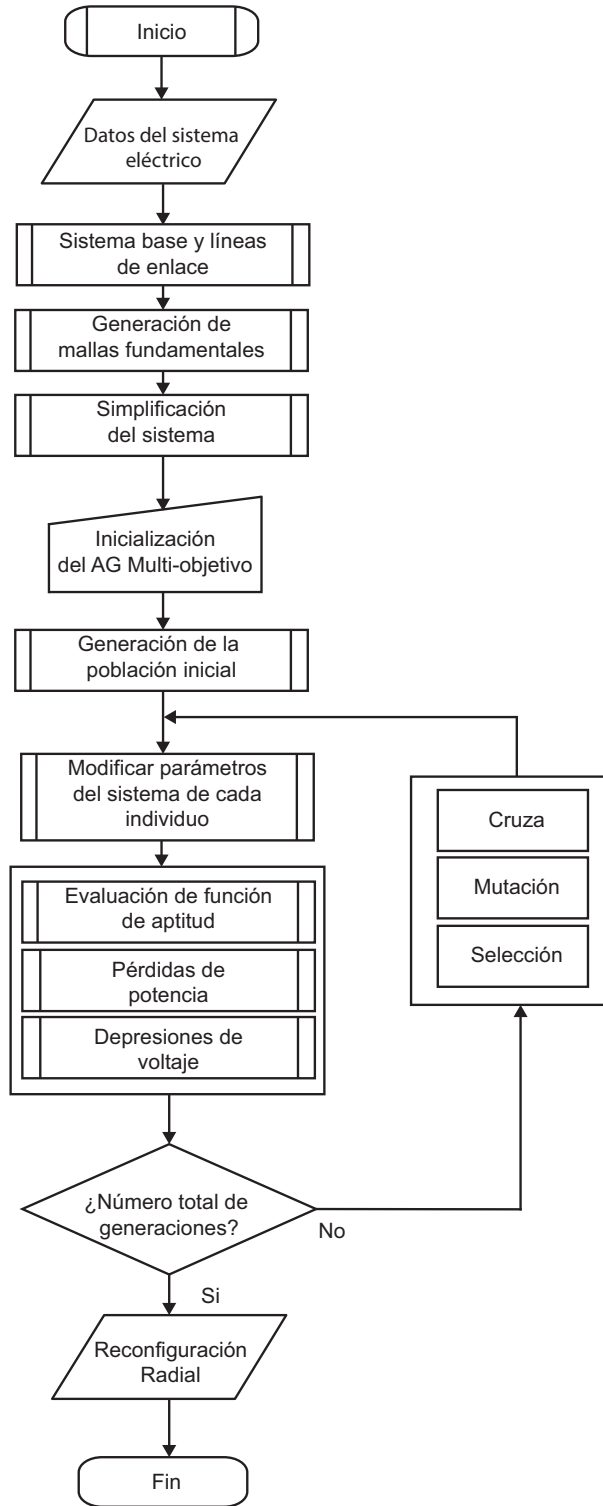


Figura 5.2: Diagrama de flujo para la reconfiguración multiobjetivo de sistemas de distribución

5.4.1. Sistema de distribución de 33 nodos

El sistema de distribución de 33 nodos, se describió en el Capítulo 3. El sistema base tiene un total de 202.67 kW de pérdidas de potencia activa, y 19 nodos que tiene problemas de depresiones de voltaje. El voltaje mínimo se presenta en el nodo número 18, este tiene 0.913 p.u.

Los parámetros que se usan para el algoritmo genético son los siguientes; se usa la función *@selectiontournament* que selecciona los individuos por torneo, esta función se encuentra en el toolbox “*Global Optimization toolbox*”. Las funciones de población inicial, cruza y mutación, son las desarrolladas y propuestas en esta tesis.

Al analizar los resultados obtenidos por el algoritmo genético multiobjetivo, se tiene un solamente un punto dominante o no dominado, esto quiere decir que de las posibles soluciones, esta es mejor que cualquiera de ellas. Para este problema en particular la solución presentada es la mejor para ambas funciones objetivos.

Después de realizar la reconfiguración del sistema, se tienen pérdidas de 142.75 kW y los nodos que tienen problemas de voltaje en la nueva configuración corresponden solamente a 4. El voltaje mínimo se presenta en el nodo 32 con 0.9378 p.u. La función objetivo número 1, la cual corresponde a los nodos que violaban la referencia de depresiones de voltaje, tiene una reducción de 84.21 %. La suma total de las depresiones de voltaje del sistema base presenta una reducción de 29.97 % con respecto al sistema reconfigurado. Las pérdidas de potencia que corresponden a la función objetivo número 2 se reducen 29.56 % en comparación con el sistema inicial.

Los resultados del sistema base o inicial, y el sistema reconfigurado se muestran en la Tabla 5.1. En esta tabla se muestran el total de depresiones de voltaje/año, la función objetivo número 1 VecBand, que corresponde a los nodos con problemas de depresiones de voltaje, y las pérdidas de potencia activa en las líneas de transmisión. También se muestran las líneas desconectadas para que el sistema opere en una topología radial.

La Tabla 5.2 muestra las líneas desconectadas y sus correspondientes nodos de envío y recepción.

El sistema reconfigurado se muestra en la Figura 5.3, la topología final es radial. La Figura 5.4 muestra la gráfica de los nodos totales del sistema en el eje de

las abscisas, en el eje de las ordenadas se muestra el número total de depresiones de voltaje/año. En esta gráfica se observa el vector de referencia en línea azul (*Referencia*), el sistema reconfigurado en línea negra (*Reconf*) y el sistema base línea roja (*SagsBase*). También se aprecian los nodos que continúan con problemas de depresiones de voltaje. Los nodos 20, 21 y 22, tienen depresiones de voltaje más severas debido a la topología final. La rama lateral donde se encontraban estos nodos, se le transfiere una mayor cantidad de nodos con carga. Sin embargo el sistema en general presenta una reducción tanto en los nodos que tenían problemas de depresiones de voltaje como en el número total de estas en el sistema de distribución.

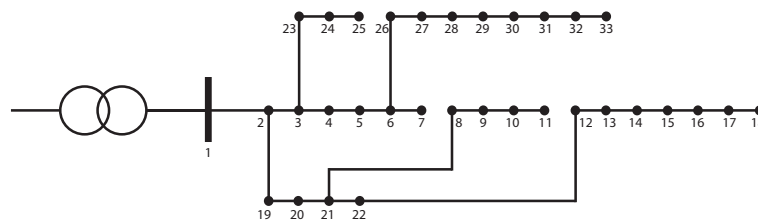


Figura 5.3: Sistema de 33 nodos reconfigurado

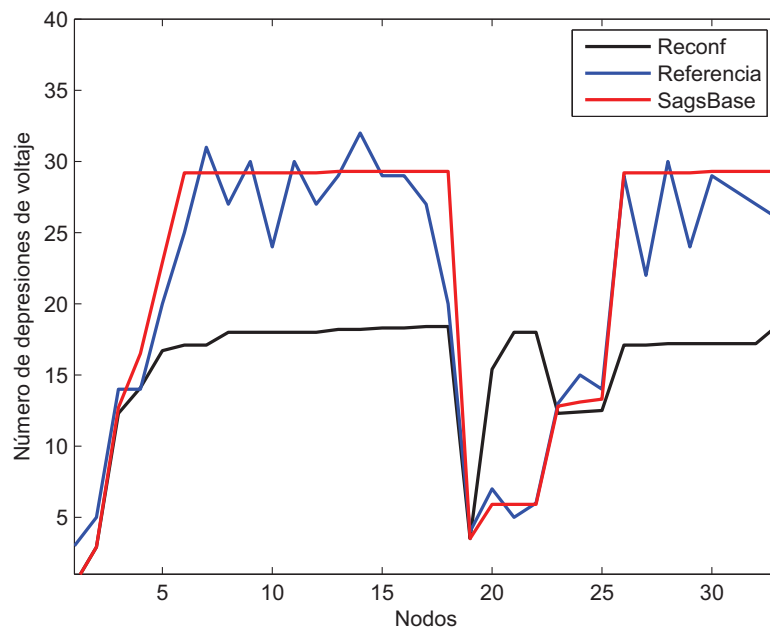


Figura 5.4: Depresiones de voltaje del sistema base, referencia y reconfiguración

Al analizar los resultados del sistema, se puede verificar que la reconfiguración, disminuye pérdidas de potencia, y depresiones de voltaje en los nodos que tenían estos problemas, el perfil de voltaje también presenta una mejora general comparado con el perfil del sistema base.

Tabla 5.1: Resultados del sistema de 33 nodos

Número de depresiones de voltaje/año y pérdidas de potencia. Umbral de 0.8 p.u.					
Antes de la reconfiguración			Después de la reconfiguración		
Total de Depresiones de Voltaje/año	VecBand $f_1(x)$	Pérdidas de Potencia $f_2(x)$	Total de Depresiones de Voltaje/año	VecBand $f_1(x)$	Pérdidas de Potencia $f_2(x)$
729.89	19	202.67kW	511.09	4	142.75kW
Líneas desconectadas 37 33 36 35 34			Líneas desconectadas 37 7 32 11 34		

Tabla 5.2: Nodos de envío y recepción de líneas fuera de operación

Nodo de envío	Nodo de recepción	Número de línea
25	29	37
7	8	7
32	33	32
11	12	11
9	15	34

5.4.2. Sistema de distribución de 69 nodos

Este sistema de distribución tiene pérdidas de potencia activa en su sistema base de 224.95 kW y 53 nodos violan la referencia de depresiones de voltaje. El voltaje mínimo se presenta en el nodo 65, donde se tiene 0.909 p.u. Al solucionar el problema de optimización se obtiene el conjunto óptimo de Pareto (soluciones no dominadas) y el frente de Pareto, los cuales se observan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Conjunto óptimo de Pareto y frente de Pareto

Conjunto óptimo de Pareto	Frente de Pareto		
Líneas fuera de operación	VecBand	Pérdidas de potencia kW	Depresiones de Voltaje/año
42 20 11 52 26	17	143.41	2211.50
42 17 11 52 26	15	144.52	2198.80
38 16 11 52 24	14	148.95	2235.00
10 70 12 56 63	19	105.00	2137.10

Ya que ninguna de las soluciones presentadas en la Tabla 5.3, puede ser considerada mejor entre ellas mismas, es decir, todas son consideradas óptimas, es

necesario tomar una decisión al seleccionar alguna de estas, el criterio es tomar la solución que presente un menor número de nodos con problemas de depresiones de voltaje, siempre y cuando las pérdidas de potencia activa sean menores que las del sistema base.

De esta manera, el sistema reconfigurado tiene 14 nodos con problemas de depresiones de voltaje ($VecBand = 14$), lo que corresponde a una reducción de 73.58% en los nodos que tenían este tipo de problemas. La reducción de la suma total de las depresiones de voltaje del sistema base corresponde a 13.12%. Las pérdidas de potencia se reducen en 33.78%, el nuevo sistema tiene solamente 148.95 kW de pérdidas de potencia activa en las líneas de transmisión. El voltaje mínimo se localiza en el nodo 26, con un valor de 0.9315 p.u.

La nueva reconfiguración obtenida, reduce ambas funciones objetivo, para las cuales se obtienen resultados favorables, y una mejora en el perfil de voltaje. La Tabla 5.4 los muestra estos resultados, el total de depresiones de voltaje, pérdidas de potencia activa y el número de nodos con problemas de depresiones de voltaje ($VecBand$) del sistema inicial y del sistema reconfigurado. También se presentan las líneas que deberán ser desconectadas para que el sistema tenga una topología radial.

Tabla 5.4: Resultados del sistema de 69 nodos

Número de depresiones de voltaje/año y pérdidas de potencia. Umbral de 0.8 p.u.					
Antes de la reconfiguración			Después de la reconfiguración		
Total de Depresiones de Voltaje/año	$VecBand$ $f_1(x)$	Pérdidas de Potencia $f_2(x)$	Total de Depresiones de Voltaje/año	$VecBand$ $f_1(x)$	Pérdidas de Potencia $f_2(x)$
2572.70	53	224.95kW	2235.00	14	148.95kW
Líneas fuera de operación 69 70 71 72 73			Líneas fuera de operación 38 16 11 52 24		

La Figura 5.5 muestra el sistema de 69 nodos reconfigurado, la topología final es radial. Esta reconfiguración disminuye pérdidas de potencia y depresiones de voltaje con respecto al sistema base.

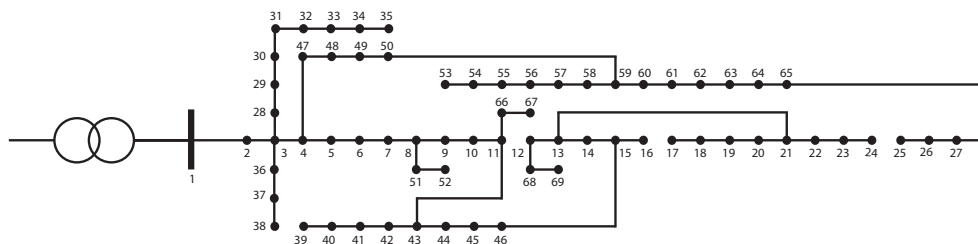


Figura 5.5: Sistema de 69 nodos reconfigurado

La Tabla 5.5 contiene los nodos de envío y recepción de las líneas fuera de operación para que el sistema mantenga una topología radial.

Tabla 5.5: Nodos de envío y recepción de líneas fuera de operación

Nodo de envío	Nodo de recepción	Número de línea
38	39	38
16	17	16
11	12	11
9	53	52
24	25	24

La Figura 5.6 muestra la gráfica del frente de Pareto para este problema de optimización. En esta se aprecian los valores que se mostraron en la Tabla 5.3. La función objetivo de las pérdidas es graficada en el eje de las ordenadas, y la función objetivo de las depresiones de voltaje se muestra en el eje de las abscisas. Debido a la naturaleza del problema que se está resolviendo, las funciones objetivo tienen conflictos entre sí. Con la información de la Tabla 5.3 y la Figura 5.6 se pueden analizar estos resultados. Analizando los puntos de los extremos, se puede observar que la configuración con un menor número de nodos con problemas de depresiones de voltaje ($VecBand = 14$), corresponde a la configuración con mayor pérdidas de potencia del sistema ($Pérdidas = 148.92$ kW). El punto que corresponde a la reconfiguración con un mayor número de nodos con problemas de depresiones de voltaje ($VecBand = 19$), tiene la mayor reducción de pérdidas de potencia activa ($Pérdidas = 105.00$ kW).

La Figura 5.7 muestra las depresiones de voltaje del vector de referencia línea azul, reconfiguración línea negra y el sistema base línea roja, contra los nodos totales del sistema. Se puede apreciar la reducción que se tiene del sistema reconfigurado con respecto al sistema inicial. Los nodos que van desde el nodo 40 hasta 46, presentan problemas de depresiones de voltaje severas, sin embargo una

mejora se logra al en el sistema reconfigurado, ya que la mayoría de los nodos se reducen este tipo de problemas.

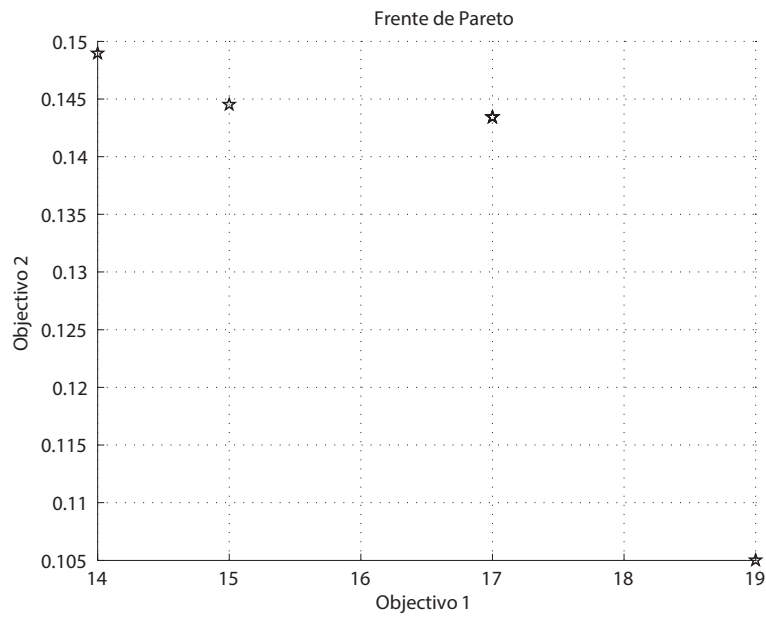


Figura 5.6: Frente de Pareto para el sistema de 69 nodos

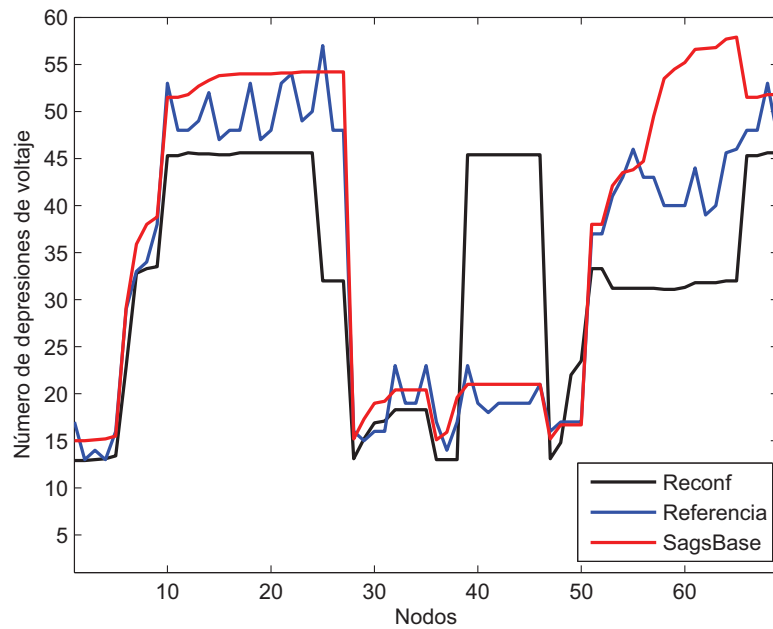


Figura 5.7: Depresiones de voltaje del sistema base, referencia y reconfiguración

5.4.3. Sistema de distribución de 118 nodos

Para finalizar, se evalúa el sistema de 118 nodos, el cual presenta una dificultad considerablemente mayor. Esto se debe principalmente al número de líneas candidatas a cambiar de operación y el total de topologías posibles. El sistema inicial cuenta con pérdidas de potencia activa de 1298.09 kW, y 77 nodos que cuentan con problemas de depresiones de voltaje. El voltaje mínimo es de 0.8688 p.u. y se presenta en el nodo 77.

La Tabla 5.6, muestra el conjunto de soluciones óptimas de Pareto o compromiso entre los objetivos. Esta tabla muestra un total de 7 nuevas reconfiguraciones, las cuales son óptimas desde el punto de vista del problema multiobjetivo. De estas soluciones es necesario tomar una decisión de selección. En este caso se utiliza el mismo criterio que se ha usado, seleccionar la solución que presente menor número de depresiones de voltaje siempre y cuando las pérdidas de potencia sean menores que el sistema base.

Tabla 5.6: Conjunto óptimo de Pareto y frente de Pareto

Conjunto óptimo de Pareto					Frente de Pareto		
Líneas fuera de operación					VecBand	Pérdidas de potencia kW	Depresiones de Voltaje/año
43	14	21	53	46	59	942.66	2682.60
60	38	95	126	73			
128	82	130	109	34			
42	26	21	53	46	60	904.83	2632.40
60	37	95	70	73			
128	82	130	109	34			
43	14	21	53	46	58	945.60	2642.20
60	37	95	126	73			
98	82	130	109	34			
43	14	21	53	46	57	945.62	2645.19
60	37	95	126	73			
128	82	130	109	34			
42	26	4	53	46	54	980.51	2599.40
60	124	95	70	73			
128	82	130	109	33			
42	26	4	53	46	52	980.54	2601.20
60	124	95	70	73			
98	82	130	109	33			
42	26	21	53	46	63	902.28	2669.60
60	38	95	70	73			
128	82	130	109	34			

Entonces, el sistema reconfigurado presenta 52 nodos que tienen problemas de depresiones de voltaje, lo que representa una reducción de 32.46 % en la función objetivo número 1. El número total de depresiones del sistema base se reduce en un 8.53 %. Las pérdidas de potencia se reducen en 24.46 %, y el voltaje mínimo es de 0.9321 p.u. el cual se presenta en el nodo 111.

El sistema reconfigurado en general tiene una reducción de ambas funciones objetivo y también se tiene una mejora en el perfil de voltaje.

En la Figura 5.8, se graficó el frente de Pareto, en esta se pueden apreciar ambos objetivos, el objetivo 1 se graficó en el eje de las abscisas, el objetivo 2 en el eje de las ordenadas. El conjunto de los valores de esta Figura corresponde a las 7 soluciones presentadas en la Tabla 5.6. Al igual que en el sistema de 69 nodos, se puede observar que los puntos de los extremos, describen que, las topologías que tienen más reducciones en las pérdidas de potencia tienen más nodos con problemas de depresiones de voltaje, de manera análoga pasa con las topologías que tienen menos nodos con problemas de depresiones de voltaje, las pérdidas de potencia son más elevadas.

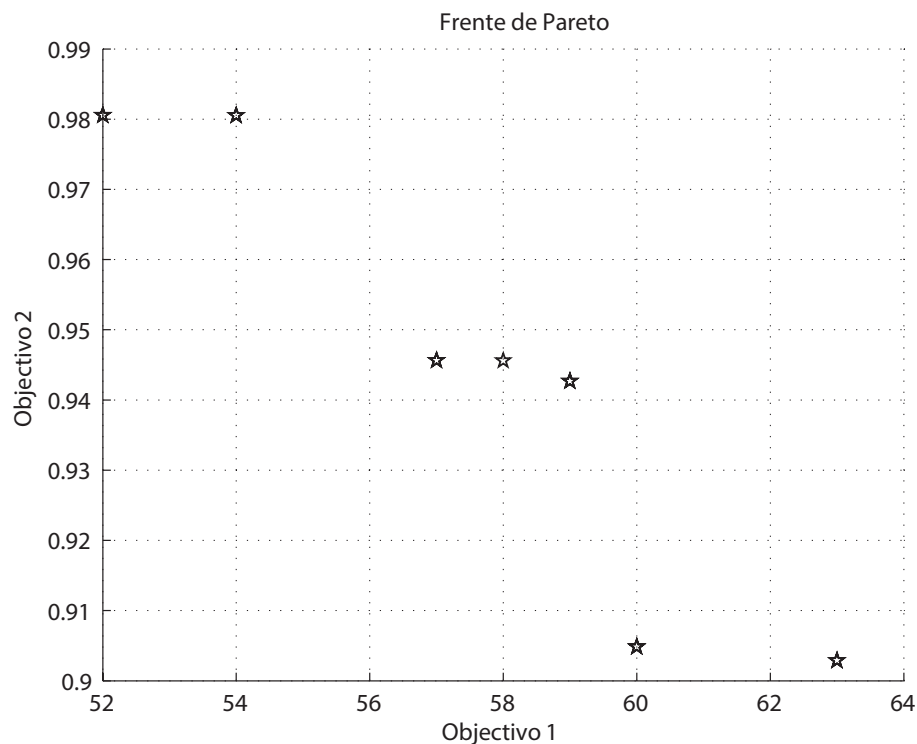


Figura 5.8: Frente de Pareto para el sistema de 118 nodos

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados del sistema de distribución, antes y después de la reconfiguración. En esta Tabla se pueden apreciar el total de

depresiones de voltaje, el número de nodos con problemas de depresiones de voltaje, así como las pérdidas de potencia activa que se presentan en las líneas de transmisión.

Tabla 5.7: Resultados del sistema de 118 nodos

Número de depresiones de voltaje/año y pérdidas de potencia. Umbral de 0.8 p.u.					
Antes de la reconfiguración			Después de la reconfiguración		
Total de Depresiones de Voltaje/año	VecBand $f_1(x)$	Pérdidas de Potencia $f_2(x)$	Total de Depresiones de Voltaje/año	VecBand $f_1(x)$	Pérdidas de Potencia $f_2(x)$
2843.80	77	1298.09kW	2601.20	52	980.54kW
Líneas desconectadas 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132			Líneas desconectadas 42 26 4 53 46 60 124 95 70 73 98 82 130 109 33		

La Tabla 5.8 muestra los nodos de envío correspondientes a las líneas en estado normalmente abierto para que el sistema reconfigurado opere en una topología radial.

Tabla 5.8: Nodos de envío y recepción de líneas fuera de operación

Nodo de envío	Nodo de recepción	Número de línea
42	43	42
26	27	26
4	5	4
53	54	53
35	47	46
60	61	60
9	40	124
91	96	95
70	71	70
73	74	73
98	99	98
82	83	82
105	86	130
109	110	109
33	34	33

La Figura 5.9 muestra la gráfica de las depresiones de voltaje del sistema base línea azul, y las del sistema reconfigurado línea negra, para los 118 nodos del

sistema; en está se puede apreciar que el sistema reconfigurado presenta una disminución de las depresiones de voltaje comparado con el sistema inicial. Pero también se presentan depresiones de voltaje donde antes no se tenían estos problemas, especialmente en los nodos del 5 al 9. En esta gráfica se puede apreciar la reducción de las depresiones de voltaje comparadas con el sistema inicial. Los nodos que presentan depresiones de voltaje menores, corresponden a los picos de la línea azul, estos nodos se encuentran eléctricamente muy cerca de la subestación generadora.

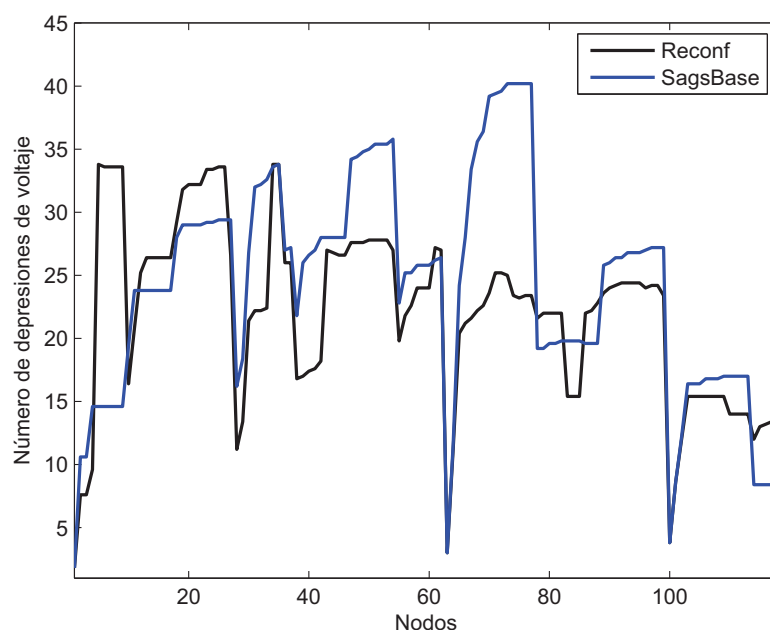


Figura 5.9: Depresiones de voltaje del sistema base y reconfiguración

La Figura 5.10 muestra el sistema reconfigurado de 118 nodos.

Con la finalidad de realizar un estudio más a fondo de los resultados obtenidos en este caso de estudio en particular, se analizan las depresiones de voltaje totales del sistema considerando los distintos umbrales de estas. Para los valores de la Tabla 5.6 estos grafican en la Figura 5.11. El total de depresiones de voltaje/año se presentan en una escala de 0 a 100%, considerando umbrales de 0.1 p.u. hasta 0.8 p.u. para cada una de las 7 soluciones no dominadas.

De la Figura 5.11 se puede obtener información importante, se puede observar que las reconfiguraciones que tienen más pérdidas de potencia se debe a que tiene depresiones de voltaje más profundas, es decir se tiene un mayor número de depresiones de 0.1 p.u., esto debido a que las corrientes de falla son más elevadas. La solución que tiene menores pérdidas de potencia contiene un mayor contenido de

depresiones de voltaje de 0.8 p.u., es decir depresiones de voltaje menos severas. Las pérdidas de potencia activa y las depresiones de voltaje se encuentran muy ligadas a través de los voltajes nodales, ya que cuando se realiza una reconfiguración tanto el perfil de voltaje como la impedancia cambian, lo que tiene como consecuencia que las nuevas reconfiguraciones tengan reducciones de depresiones de voltaje y pérdidas de potencia activa. Las depresiones de voltaje más profundas son gráficas en color rojo, estas corresponden a umbrales de 0.1, 0.2 y 0.3 p.u. Las depresiones de voltaje de 0.4, 0.5 y 0.6 p.u. son gráficas en color azul, mientras que las depresiones menos profundas 0.7, y 0.8 p.u. se muestran de color verde.

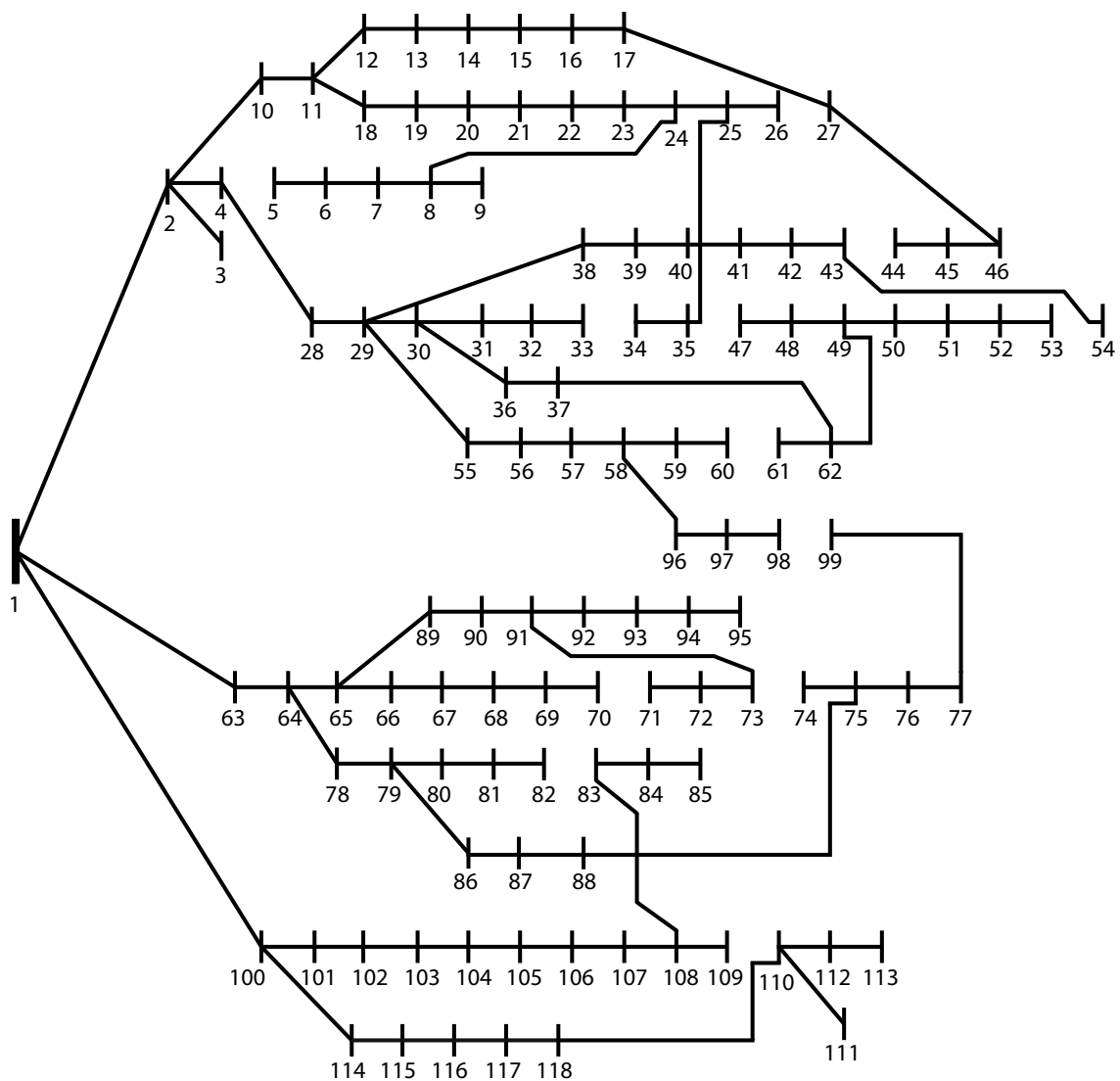


Figura 5.10: Sistema de 118 nodos reconfigurado

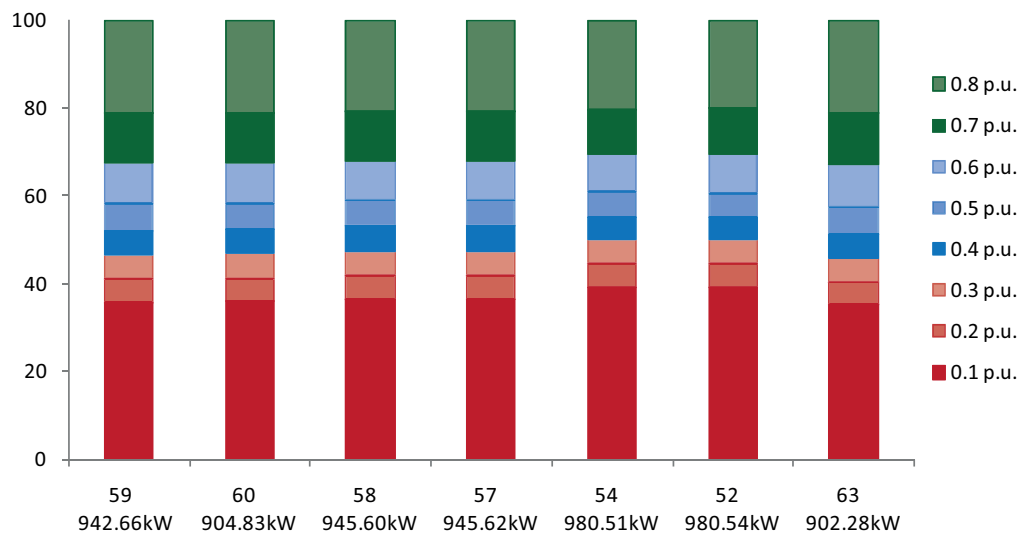


Figura 5.11: Porcentaje de diferentes umbrales para las soluciones multiobjetivo del sistema de 118 nodos

Tomar en cuenta los voltajes de prefalla reales en cada reconfiguración tiene como consecuencia, que los valores de depresiones de voltaje cambien, de manera que se obtiene un mayor número de depresiones de voltaje totales en el sistema, lo que ocasiona que VecBand o los nodos con problemas de depresiones de voltaje sean de mayores. Tomando en cuenta que el problema es multiobjetivo y tiene restricciones de voltaje, tiene una dificultad elevada. De manera que no se pueden comparar los estudios multiobjetivo y mono-objetivo ya son problemas distintos.

Los parámetros que se usaron en el algoritmo genético, así como los tiempos de computo, se encuentran resumidos en la Tabla 5.9. Hay que destacar que los tiempos de computo son elevados debido a que se usa el método de posición de fallas. Al agregar nodos ficticios entre las líneas de transmisión del sistema este crece y es necesario realizar un mayor número de cálculos extras. El equipo utilizado para las simulaciones es el descrito en el Capítulo 3.

Tabla 5.9: Parámetros de simulación del algoritmo genético, estudios multi-objetivo

	Número de generaciones	Tamaño de la población	Taza de Cruza	Taza de mutación	Tiempo de simulación
33 Nodos	21	15	1	0.3	7232 s
69 Nodos	36	15	1	0.3	38,935 s
118 Nodos	52	45	1	0.3	145,364 s

5.5. Conclusiones

En este Capítulo se abordaron temas de optimización multiobjetivo, se dieron las bases de la formulación de estos problemas también se mencionaron algunos métodos tradicionales para la optimización de este tipo de problemas. De manera adicional se propuso una metodología basada en un algoritmo genético multiobjetivo para resolver el problema de reconfiguración de sistemas de distribución minimizando pérdidas de potencia y reduciendo el número de depresiones de voltaje en el sistema.

Se analizaron 3 casos de estudio considerando voltajes de prefalla distintos a la unidad, en los cuales se obtienen resultados favorables al realizar la reconfiguración. Un problema multiobjetivo presenta una dificultad mayor, adicionalmente a esto, se deben de tomar decisiones con la finalidad de seleccionar la solución que es más adecuada para el problema, ya que se tiene un conjunto óptimo de soluciones.

Ya que el problema de reconfiguración mono-objetivo difiere con el problema multiobjetivo debido a los voltajes de prefalla, las depresiones de voltaje son diferentes y no pueden ser comparados directamente. Cuando se consideran los voltajes de prefalla, el número de depresiones de voltaje crece considerablemente.

Conclusiones generales y trabajos futuros

6.1. Conclusiones Generales

En esta tesis se analizaron y realizaron estudios de depresiones de voltaje en sistemas eléctricos de distribución, siendo el objetivo principal reducir la cantidad de estos fenómenos que causan problemas importantes en la calidad del suministro. La técnica de optimización usada fue un algoritmo genético debido a la alta dificultad combinatorial que presenta el problema. Los objetivos planteados en esta tesis se cumplieron, ya que se obtienen resultados favorables en la variedad de casos de estudio presentados. A continuación se presentan las conclusiones más relevantes que podemos concluir en esta tesis:

- Se mostró el funcionamiento de los algoritmos genéticos. Se presentó una analogía de un grafo con un sistema de distribución. También se presentaron algunas operaciones y simplificaciones a un sistema de distribución para solucionar el problema de reconfiguración, con la finalidad de disminuir la complejidad asociada a este problema de optimización y plantear una metodología de solución.
- Se diseñó e implementó una metodología basada en un algoritmo genético, desarrollando las funciones de población inicial, cruce y mutación, para la solución del problema de reconfiguración de sistemas de distribución, considerando depresiones de voltaje. Esta metodología se implementó mediante la plataforma de Matlab® , las funciones que se desarrollaron evalúan individuos radiales, con la finalidad de minimizar el espacio de búsqueda.

- Se realizaron los casos de estudio correspondiente de reconfiguración de sistemas de distribución mediante la técnica propuesta, los sistemas evaluados demuestran que el algoritmo genético evoluciona a las mejores soluciones, disminuyendo la cantidad de depresiones de voltaje en los nodos.
- Para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo genético desarrollado, los resultados obtenidos de los casos de estudio de expansión, son comparados con el algoritmo de Prim, el cual encuentra la expansión mínima del sistema. Los resultados son favorables para todos los casos de estudio evaluados. La metodología propuesta tiene ventajas sobre el algoritmo de Prim, ya que, pueden ser utilizadas nuevas funciones con la finalidad de resolver problemas más complejos.
- Se dió a conocer el planteamiento de un problema de optimización multiobjetivo, y las bases para solucionar este tipo de problemas, entre las que se encuentran los algoritmos genéticos. Un problema de optimización multiobjetivo presenta una dificultad mayor y nuevas definiciones del concepto de óptimo, las cuales fueron abordadas.
- Se formuló un problema de optimización multiobjetivo, el cual considera dos importantes aspectos de los sistemas eléctricos; las depresiones de voltaje y las pérdidas de potencia en las líneas. Para la disminución de pérdidas de potencia activa y la reducción del número de depresiones de voltaje se propuso una reconfiguración del sistema, el cual es solucionado mediante una metodología basada en algoritmos genéticos multiobjetivo. Al ser solucionado el problema se obtiene un conjunto de resultados óptimos, los cuales dan la flexibilidad de seleccionar el más adecuado desde el punto de vista de depresiones de voltaje.

6.2. Trabajos Futuros

El desarrollo de esta tesis puede ser ampliado, tomando en cuenta los siguientes tópicos:

- En los estudios de expansión y planeación, considerar la instalación de nuevas subestaciones, también adicionar a la formulación matemática estudios de flujos de potencia, restricciones de voltaje en los nodos, así como también considerar depresiones de voltaje.

- En la evaluación de las depresiones de voltaje se pueden utilizar métodos analíticos cuya precisión no depende de un valor especificado por el usuario, como es el caso del método de posición de fallas.
- Se puede mejorar la función propuesta para generar la población inicial que obtiene individuos radiales, generando una parte de la población mediante el algoritmo de Prim y algoritmo de Kruskal, con la finalidad de tener una mayor diversidad y variedad en la población. También se puede mejorar la función de cruce tomando en cuenta nuevos operadores que generen individuos radiales.
- Implementar índices de sensibilidad que indiquen que líneas deben de ser abiertas con la finalidad de disminuir depresiones de voltaje, y pérdidas de potencia en las líneas, con el cual es posible agilizar la convergencia del algoritmo genético.
- Debido a que el método de posición de fallas para predecir depresiones de voltaje depende del número de nodos ficticios, un gran número de estos debe ser seleccionado para obtener mayor precisión, lo cual se traduce en un gran costo computacional y la necesidad de tiempos de simulación extensos. La implementación de técnicas de procesamiento en paralelo pueden mejorar considerablemente el tiempo de solución de estos problemas.
- Automatizar la toma de decisiones de la solución en el algoritmo genético multiobjetivo, aportando información sobre la prioridad de cada una de las funciones objetivo. Considerar restricciones de corriente en las líneas.

Apéndice A

Funciones usadas de Matlab

En este apéndice se describen algunas de las funciones de Matlab que se usaron para planetar y resolver el problema de reconfiguración, expansión y multiobjetivo.

length Para un arreglo encuentra la dimensión o tamaño del arreglo. Esta función se usa continuamente para encontrar la longitud de un vector

randi Genera vectores enteros aleatorios con distribución uniforme, esta función es necesaria para generar números aleatorios en las funciones del algoritmo genético.

find Encuentra la posición donde se encuentra un número en un vector o arreglo, puede ser acompañado de operadores lógicos $=, \leq, \geq$. Esta función se usa principalmente, para quitar los números que se repiten en las mallas fundamentales.

sparse(Nenv, Nrep, W, nodos, nodos) Genera una matriz dispersa. Esta función se usa para generar la conexión de un grafo, *Nenv* corresponde a los nodos de envío del sistema *Nrep* a los nodos de recepción, *W* al peso de cada línea, *nodos* al número de nodos que tiene el grafo.

graphisspanntree Esta función entrega una salida lógica de 1 o 0. 1 cuando el grafo corresponde a un árbol de expansión mínima y 0 cuando no cumple con esta condición. Por ejemplo $DF = \text{graphisspanntree}(UG)$ determina si la matriz dispersa *UG* (conexión del grafo) es árbol de expansión mínima (radial)

de2bi Convierte un número decimal a binario donde el primer elemento del arreglo corresponde al bit más significativo.

bi2de Convierte un arreglo binario a decimal.

runpf Realiza una corrida de flujos de potencia de un sistema eléctrico, es necesario tener MATPOWER en la ruta de Matlab.

Las funciones que se desarrollaron en esta tesis, corresponden a la función de cruce, población inicial y función de mutación.

xoverKids=crossoverGA

(parents, options, GenomeLength, FitnessFcn, unused, thisPopulation)

esta función contiene la estructura que se menciona en la ayuda de Matlab, la cual es la siguiente: *parents* corresponde a un vector que contiene los padres que fueron seleccionados por la función de selección del algoritmo genético. *options* estructura de opciones *GenomeLength* longitud del cromosoma *FitnessFcn* Función fitness, *thisPopulation* Representa la población actual, es una matriz que tiene longitud de la población actual y el número de variables o *GenomeLength*. La salida *xoverKids* corresponde a una matriz que contiene los hijos cruzados.

CrossAux(parents, thisPopulation, GenomeLength) es llamada por la función anterior y realiza la cruce como se describió en la Sección 3.6.4.

Population = InitialPop(GenomeLength, FitnessFcn, options) Esta función tiene la estructura mencionada anteriormente, y es la función que llama directamente Matlab en el algoritmo genético. En esta función también llama a una función propia *PopIniV2(individualsToCreate)*, la cual fue descrita en la Sección 3.6.3, la cual genera a los individuos radiales después los convierte en arreglos binarios, el parámetro *individualsToCreate* corresponde al número de individuos que deberán ser creados por la función.

child = MutAuxV2(child, GenomeLength, mutationRate) La función para realizar la mutación, donde *child* corresponde al individuo que mutará, *mutationRate* es la tasa de mutación para el individuo. La función realiza la mutación y entrega un individuo binario tan como fue descrito en la Sección 3.6.3.

Bibliografía

- [Acha *et al.*, 2004] Acha E., Fuerte-Esquivel C.R., Ambriz-Perez H., y Angeles-Camacho C. (2004). *Modelling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [Baggini, 2008] Baggini A. (2008). *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [Bahadoorsingh *et al.*, 2007] Bahadoorsingh S., Milanović J.V., Zhang Y., y Gupta C.P. (2007). Minimization of Voltage Sag Costs by Optimal Reconfiguration of Distribution Network Using Genetic Algorithms. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22(no. 3):pp 2271–2278.
- [Baran y Wu, 1989] Baran M.E. y Wu F. (1989). Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4(no. 2):pp 1401–1407.
- [Bollen, 2000] Bollen M. (2000). *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press Series on Power Engineering.
- [Caballero *et al.*, 2003] Caballero R., Molina J., Luque M., Torrico A., y T. G. (2003). Algoritmos Genéticos para la Resolución de Problemas de Programación por Metas Entera. Aplicación a la Economía de la Educación, Departamento de Economía Aplicada Universidad de Málaga. Disponible en <http://www.uv.es/asepuma/X/J01C.pdf>.
- [Carreno *et al.*, 2008] Carreno E.M., Romero R., y Padilha-Feltrin A. (2008). An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23(no. 4):pp 1542–1551.

- [Casazza y Delea, 2010] Casazza J. y Delea F. (2010). *Understanding Electric Power System*. Wiley IEEE Press.
- [Cebrian y Kagan, 2008] Cebrian J.C. y Kagan N. (2008). Evolutionary Algorithms for the Reconfiguration of Radial Distribution Networks Considering Long Interruption and Voltage Sag Disruption Cost. *13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2008.*, páginas pp 1–7.
- [CFE-MT-IDP, 1992] CFE-MT-IDP (1992). Diseño y proyecto de baja y media tensión.
- [Chen, 1990] Chen K. (1990). *Industrial Power Distribution and Illuminating Systems*. CRC Press.
- [Chen *et al.*, 2002] Chen S.L., Chen G.B., Hsu S.C., Chen A.Y.T., Guo T.Y., Huang F.F., y C. H.Y. (2002). Mitigation of Voltage Sags by Network Reconfiguration of a Utility Power System. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002*, vol. 3:pp 2067–2072.
- [Chiou *et al.*, 2005] Chiou F., Chang C., y Su C. (2005). Variable Scaling Hybrid Differential Evolution for Solving Network Reconfiguration of Distribution Systems. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20(no. 2):pp 668–674.
- [Civanlar *et al.*, 1988] Civanlar S., Grainger J., Yin H., y S. L. (1988). Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 3(no. 3):pp 1217–1223.
- [Coello y Toscano, 2001] Coello C. y Toscano P. (2001). Multiobjective Optimization using Micro-Genetic Algorithm. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'2001)*, páginas pp 274–282.
- [Condumex, 2010] Condumex (2010). Manual técnico de cables de energía.
- [Córtes *et al.*, 2009] Córtes C.M., Palma R., y Moya O. (2009). Transmission Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm. *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 2009.*, páginas pp 1–7.
- [Crichigno, 2004] Crichigno J. (2004). *Enrutamiento Multicast Utilizando Optimización Multiobjetivo*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción.

- [Da Silva *et al.*, 2008] Da Silva L.A., Fonseca L.A., de Resende L., y Rezende L. (2008). Tabu Search Applied to Transmission Expansion Planning Considering Losses and Interruption Costs. *10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008. PMAPS '08.*, páginas pp 1–7.
- [Deb *et al.*, 2000] Deb K., Agrawal S., Pratab A., y Meyarivan T. (2000). A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II. *KanGal report 200001, Indian Institute of Technology.*
- [Duarte, 2001] Duarte F. (2001). *Optimización Multiobjetivo de Redes Empleando Algoritmos Evolutivos Paralelos.* Proyecto Fin de Carrera, Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción.
- [Dugan y McGranaghan, 2004] Dugan R. y McGranaghan M.F. (2004). *Electrical Power Systems Quality.* M. McGranaghan.
- [EN50106, 1999] EN50106 (1999). Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems.
- [Erikson *et al.*, 2001] Erikson M., Mayer A., y Horn J. (2001). The Niche Pareto Genetic Algorithm 2 Applied to the Design of Groundwater Remediation Systems. *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, (No. 1993):pp 681–695.
- [Espinosa y Lucio, 2012] Espinosa E. y Lucio J. (2012). Improvement of Voltage Sags Indices by Applying a Reconfiguration Technique Based on Genetic Algorithms. *9th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2012*, páginas pp 1–6.
- [Espinosa y Hernández, 2006] Espinosa J.E. y Hernández A. (2006). An Analytical Approach for Stochastic Assessment of Balanced and Unbalanced Voltage Sags in Large Systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21(no. 3):pp 1493–1500.
- [Espinosa y Hernández, 2007] Espinosa J.E. y Hernández A. (2007). A Method for Voltage Sag State Estimation in Power Systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22(no. 4):pp 2517–2526.
- [Fardo y Patrick, 2008] Fardo S.W. y Patrick D.R. (2008). *Electrical Power Systems Technology.* CRC Press.

- [Fonseca y Fleming, 1993] Fonseca M.C. y Fleming J.P. (1993). Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, páginas pp 416–423.
- [Galeano y Montoya, 2008] Galeano S. y Montoya C. (2008). *Optimización multiobjetivo de la operación en sistemas automatizados de distribución de energía eléctrica*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Tecnológica de Pereira.
- [Garcés, 2005] Garcés R.A. (2005). *Reconfiguración de alimentadores primarios usando una metodología combinatorial bajo un modelamiento trifásico*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Tecnológica de Pereira.
- [García y Espinosa, 2011] García M.S. y Espinosa E. (2011). Reconfiguration of Power Systems by Applying Tabu Search to Minimize Voltage Sag Indexes. *North American Power Symposium (NAPS), 2011*, páginas pp 1–6.
- [Glover *et al.*, 2012] Glover J.D., Sarma M., y Overbye T. (2012). *Power Systems Analysis and Design*. Cengage Learning.
- [Goldberg, 1989] Goldberg D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, The University of Alabama. Addison Wesley Longman.
- [Gönen, 2008] Gönen T. (2008). *Electric Power Distribution System Engineering*. CRC Press.
- [Gonzalez, 2007] Gonzalez A.A. (2007). *Mejoramiento de la confiabilidad en sistemas de distribución mediante la reconfiguración de alimentadores primarios*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Tecnológica de Pereira Colombia.
- [Grainger y Stevenson, 1996] Grainger J. y Stevenson W. (1996). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.
- [Grigsby, 2007] Grigsby L.L. (2007). *Power System Stability and Control*. CRC Press.
- [Holland, 1975] Holland J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press. Addison Wesley Longman.
- [Horn *et al.*, 1994] Horn J., Nafpliotis N., y Goldberg D.E. (1994). A Niche Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. *Proceedings of the Firts IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, vol. 1:pp 82–87.

- [IEEE Std. 1159-1995, 1995] IEEE Std. 1159-1995 (1995). *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*.
- [Lavorato *et al.*, 2012] Lavorato M., Franco J.F., Rider M.J., y R. R. (2012). Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27(no. 1):pp 172–180.
- [Lavorato *et al.*, 2010] Lavorato M., Rider J., A. G., y and R.R. (2010). A Constructive Heuristic Algorithm for Distribution System Planning. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 25(no. 3):pp 1734–1742.
- [Lee y El-Sharkawi, 2008] Lee Y.K. y El-Sharkawi M.A. (2008). *Modern Heuristic Optimization Techniques*. Wiley-Interscience.
- [Lucio, 2009] Lucio D.J. (2009). *Aplicación de Algoritmos Genéticos a la Estimación de Estado de Depresiones de Voltaje y la Reconfiguración de Redes Eléctricas*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Michoacan de San Nicolás de Hidalgo.
- [MathWorks, 2012a] MathWorks (2012a). Bioinformatics toolbox.
- [MathWorks, 2012b] MathWorks (2012b). Global optimization toolbox.
- [Mendoza *et al.*, 2006] Mendoza J., Lopez R., Morales D., Lopez P., Dessante P., y Moraga R. (2006). Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms with Restricted Population and Addressed Operators: Real Application. *EEE Trans. on Power Systems*, vol. 21(no. 2):pp 948–954.
- [Nahman y Perić, 2008] Nahman J.M. y Perić D.M. (2008). Optimal Planning of Radial Distribution Networks by Simulated Annealing Technique. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23(no. 2):pp 790–795.
- [Nara *et al.*, 1992] Nara K., Shoise A., Kitagawa M., y Ishihara T. (1992). Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Re-configuration. *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 7(no. 3):pp 1044–1051.
- [Parsons y Barnett, 1964] Parsons J.S. y Barnett H.G. (1964). Distribution systems. En C.S.E. of Westinghouse Electric Corporation, editor, *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*.
- [Qader y Bollen, 1999] Qader M.R. y Bollen M.H. (1999). Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System. *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35(no. 1):pp 152–162.

- [Rider J. *et al.*, 2007] Rider J. M.J., Gallego L.A., R. R., y A. G. (2007). Heuristic Algorithm to Solve the Short Term Transmission Network Expansion Planning. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.*, páginas pp 1–7.
- [Savier y Das, 2007] Savier J.S. y Das D. (2007). Impact of Network Reconfiguration on Loss Allocation of Radial Distribution Systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22(no. 4):pp 2473–2480.
- [Schlabback y Rofalski, 2007] Schlabback J. y Rofalski K.H. (2007). *Power System Engineering*. Wiley-VCH.
- [Seifi y Sadegh, 2011] Seifi H. y Sadegh M.S. (2011). *Electric Power System Planning*. Springer.
- [Short, 2004] Short T. (2004). *Electric Power Distribution Handbook*. CRC Press.
- [Srinivas y Deb, 1994] Srinivas N. y Deb K. (1994). Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, páginas pp 221–248.
- [Stagg y Abiad, 1968] Stagg y Abiad (1968). *Computer Methods in Power System Analysis*. McGraw-Hill.
- [Su y Lee, 2003] Su C. y Lee C. (2003). Network Reconfiguration of Distribution Systems Using Improved Mixed-Integer Hybrid Differential Evolution. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18(no. 3):pp 1022–1027.
- [Targosz y Chapman, 2008] Targosz R. y Chapman D. (2008). *Leonardo Energy European Power Quality Survey Report*. <http://www.leonardo-energy.org/european-power-quality-survey-report>.
- [Targosz y Chapman, 2012] Targosz R. y Chapman D. (2012). *Leonardo Energy Cost Of Poor Power Quality*. Disponible en: www.leonardo-energy.org/node/141781.
- [Torres *et al.*, 2010] Torres J.J., Guardado J.L., Rivas F., Maximov S., E. M., y A. S. (2010). Optimización de Redes Eléctricas de Distribución Utilizando Algoritmos Genéticos y Árboles de Cobertura. *XII Reunión de Otoño de Potencia, Electrónica y Computación, INTERNACIONAL ROPEC 2010*, páginas pp 255–261.

- [von Lücken, 2003] von Lücken C.D.M. (2003). *Algoritmos Evolutivos para Optimización Multiobjetivo: Un Estudio Comparativo En Un Ambiente Paralelo*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Nacional de Asunción.
- [von Meier, 2006] von Meier A. (2006). *Electrical Power Systems a Conceptual Introduction*. Wiley Interscience.
- [Wang *et al.*, 2005] Wang B., Xu W., y Pan Z. (2005). Voltaje Sags State Estimation for Power Distribution Systems. *IEEE Trans.Power Syst*, vol. 20(no. 2):pp 806–812.
- [Wang y Zhong, 2008] Wang C. y Zhong H. (2008). Optimization of Network Configuration in Large Distribution System Using Plant Growth Simulation Algorithm. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23(no. 1):pp 119–126.
- [Ward, 2006] Ward D.J. (2006). Power distribution. En D.G. Fink y H.W. Beaty, editores, *Standard Handbook for Electrical Engineers*. McGraw-Hill Professional.
- [Warne, 2005] Warne D. (2005). *Newnes Electrical Power Engineer's Handbook*. Newnes.
- [Zhang *et al.*, 2007] Zhang D., Fu Z., y Zhang L. (2007). An Improved Tabu Search Algorithm for Loss Minimum Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems. *Elect. Power Energy Syst*, vol. 77(no. 5-6):pp 685–694.
- [Zhu, 2002] Zhu J.Z. (2002). Optimal Reconfiguration of Electrical Distribution Network Using the Refined Genetic Algorithm. *Elect. Power System Research*, vol. 62:pp 37–42.
- [Ziemmerman *et al.*, 2011] Ziemmerman R.D., Murillo-Sánchez C.E., y Thomas R.J. (2011). MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 26(no. 1):pp 12–19.