

SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE RESTAURACIÓN DE SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN USANDO LOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN
METAHEURÍSTICOS RECOCIDO SIMULADO Y BÚSQUEDA TABÚ

ÁLVARO LINARES BRAVO
ANDRÉS FELIPE RIOS TAMAYO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE RESTAURACIÓN DE SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN USANDO LOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN
METAHEURÍSTICOS RECOCIDO SIMULADO Y BÚSQUEDA TABÚ

ÁLVARO LINARES BRAVO
ANDRES FELIPE RÍOS TAMAYO

Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero
Electricista

Director: Ph.d. Ramón Alfonso Gallego Rendon

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
2. DESCRIPCIÓN Y MODELO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA	10
2.1. Descripción del problema	10
2.2. Modelo matemático	12
2.3. Codificación	13
3. METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN	14
3.1. Técnicas heurísticas	14
3.2. Técnicas metaheurísticas	15
3.3. Flujo de carga	15
3.3.1. Ordenamiento nodal	15
3.3.2. Algoritmo de barrido iterativo	20
3.4. Técnica de solución (Búsqueda Tabú)	25
3.4.1. Introducción	25
3.4.2. Memoria de corto plazo	26
3.4.3. Vecindad	27
3.4.4. Factor de sensibilidad (Nodo con mayor reserva de voltaje)	28
3.4.5. Memoria a largo plazo	28
3.4.6. Memoria basada en frecuencia	29
3.5. Técnica de solución (Recocido Simulado)	33
3.5.1. Introducción	33
3.5.2. Recocido simulado: Teoría	34
3.5.3. Convergencia	41
3.5.4. Comportamiento de la probabilidad de aceptación ($E_i > E_j$):	41
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
4.1. Caso de prueba con sistema de 19 nodos	43
4.2. Solución del problema de 19 nodos con restricciones no estrictas	45
4.3. Solución del problema de 19 nodos con restricciones estrictas	50
4.3.1. Restricciones estrictas de corriente	50
4.3.2. Restricciones estrictas de Voltaje	55
4.4. Caso de prueba con sistema de 92 nodos	59
4.5. Solución del problemas de 92 nodos con restricciones no estrictas	61
4.6. Solución del problema de 92 nodos con restricciones estrictas	66
4.6.1. Restricciones de corriente	67
4.7. Comparación de resultados entre los métodos Recocido simulado y Búsqueda Tabú.	74
4.7.1. Sistema de 19 nodos	74
4.7.2. Sistema de 92 nodos	75

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
5.1. Conclusiones	77
5.2. Recomendaciones	77
6. Anexo	81
6.1. Anexo A	81
6.2. Anexo B	82

Índice de figuras

2.1. Sistema de 19 nodos	11
2.2. Sistema tras falla en la rama 13	11
2.3. Sistema restaurado	12
3.1. Diagrama de flujo de ordenamiento	16
3.2. Sistema desordenado	16
3.3. Sistema ordenado por niveles descendentes	17
3.4. Sistema reenumerado	20
3.5. Tramo de red considerando el modelo de línea larga	21
3.6. Tramo de red considerando el modelo de línea corta	22
3.7. Ejemplo de barrido hacia arriba	22
3.8. Ejemplo del barrido hacia abajo	23
3.9. Diagrama de flujo del algoritmo de barrido iterativo	25
3.10. prohibicion de ciclaje	27
3.11. Vecindad	28
3.12. Diagrama de flujo de la solución del problema usando búsqueda tabu	30
3.13. proceso de intensificación y diversificación	30
3.14. Diagrama de flujo del proceso de intensificación implementado	32
3.15. Diagrama de flujo de la diversificación implementada	33
3.16. Algoritmo Recocido Simulado	35
3.17. Exploración de espacio de soluciones	36
3.18. Selección de Temperatura inicial	37
3.19. Sistema de prueba 19 nodos.	38
3.20. Tasa de enfriamiento de 0.98	38
3.21. Tasas de enfriamiento de 0.9	39
3.22. Tasas de enfriamiento de 0.8	39
3.23. Tasas de enfriamiento de 0.5	40
3.24. Probabilidad de aceptación en función de delta	42
4.1. Sistema de prueba de 19 nodos	44
4.2. Sistema de 19 con falla en la rama 13	45
4.3. Resultados al restaurar usando Recocido simulado	46
4.4. Relación Temperatura esfuerzo computacional	47
4.5. Sistema restaurado	48
4.6. Evolución de la incumbente y la función objetivo	49
4.7. Restauración usando Recocido simulado	51
4.8. Evolución de la metodología BT	52
4.9. Sistema restaurado con restricciones de corriente RS	53
4.10. Comportamiento de las metodología RS	54
4.11. Sistema restaurado restricción fuerte en voltaje	55
4.12. Evolución de la metodología BT	56
4.13. Sistema restaurado restricción fuerte en voltaje	57
4.14. Restauración del sistema de 19 nodos con restricciones de voltaje RS	58
4.15. Sistema de prueba 2	60

4.16. Sistema de prueba 2 bajo falla	61
4.17. Resultados de aplicación de la metodología de Recocido Simulado	62
4.18. Resultados de la aplicación de búsqueda tabú	63
4.19. Sistema de prueba 2 restaurado	64
4.20. Sistema de 92 nodos restaurado usando BT	67
4.21. Evolución del algoritmos BT	70
4.22. Sistema restaurado usando RS	71
4.23. Restauración del sistema de 92 nodos RS	73
6.1. Sistema de prueba 1	81
6.2. Sistema de prueba 2	83

Índice de cuadros

3.1. Matriz de incidencia	17
3.2. Matriz de incidencia	18
3.3. Analogía física y presentación de la Metaheurística	34
4.1. Comparación de los resultados del flujo	44
4.2. Impedancias de las líneas y carga en los nodos	45
4.3. Variables de control	46
4.4. Voltajes nodales del sistema de 19 nodos restaurado	48
4.5. Corrientes de rama del sistema de 19 nodos restaurado	48
4.7. Parámetros de control de búsqueda tabú	49
4.6. Resultados Generales del recocido simulado	49
4.8. Variables de control restricciones estrictas	50
4.9. Estado operativo sistema 19 restaurado con BT	51
4.10. Resultados Generales BT	52
4.11. Estado operativo del sistema de 19 nodos obtenido con RS	53
4.12. Resultados Generales RS	55
4.13. Estado operativo restricción de voltaje RS	55
4.14. Resultados Generales BT	56
4.15. Resultados con restricciones de voltaje	57
4.16. Resultados generales RS	59
4.17. Voltajes nodales	65
4.18. Resultados Generales RS en el Sistema de prueba 2	65
4.19. Corrientes por las ramas del sistema de prueba 2	66
4.20. Datos de voltajes BT	68
4.21. Datos de Corriente BT	69
4.22. Resultados generales búsqueda tabú	70
4.23. Datos de voltaje usando RS	72
4.24. Datos de corrientes usando RS	72
4.25. Resultados generales Recocido simulado	74
4.26. Comparación de resultados para la restauración del sistema de 19 nodos	74
4.27. Comparación de resultados RS y BT	75
4.28. Comparación de resultados RS y BT	76
6.2. Voltajes y angulos nodales	82
6.1. Datos líneas y carga sistema de prueba 1	82
6.3. Datos líneas y cargas del sistema de prueba 2	84
6.4. Continuación datos sisteams de prueba 2	85
6.5. Voltajes nodales del sistema de prueba 2	86

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de energía eléctrica se conforman por el sistema de generación, transmisión y distribución. El sistema de generación se encarga de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, el sistema de transmisión transporta la energía de los centros de generación a los centros de demanda, y por último, el sistema de distribución distribuye la energía entre los usuarios finales.

Los sistemas de distribución lo constituyen las redes primarias y los alimentadores secundarios. Los primarios efectúan el enlace entre la red de subtransmisión y los transformadores de distribución. Los alimentadores secundarios efectúan el enlace entre los transformadores de distribución y los usuarios residenciales. Los alimentadores primarios son diseñados con una topología levemente enmallada y generalmente se operan de manera radial, efectuando la apertura de switches de la red. Dada esta característica, se instalan switches en la red primaria que permiten obtener diferentes configuraciones cuya topología sea radial, mejorando de esta forma los índices de confiabilidad en la operación de estas redes. Aprovechando lo anterior, los alimentadores primarios pueden controlar su disposición topológica radial para estados de operación normal o fuera de lo normal. En el primer caso el objetivo es cambiar de topología para minimizar las pérdidas, el segundo caso se debe a la presencia de fallas en los alimentadores primarios que pueden dejar fuera de servicio gran parte de los usuarios que se sirven de la red; en consecuencia lo que se quiere es obtener topologías que logren energizar la mayor cantidad de cargas que sea posible, sin violar las restricciones operativas de la red.

Con el fin de restaurar el servicio de los usuarios que han sido desconectados, la red de alimentadores primarios es sujeta a cambios topológicos usando para esto switches normalmente abiertos y cerrados. El objetivo de esta aplicación es minimizar la energía no servida, la cual depende tanto del número de switches como de la localización que estos tengan en la red de alimentadores primarios. A continuación se encuentra un breve resumen de los documentos y recursos informáticos usados para el desarrollo del proyecto. Para llevar a cabo este trabajo fue de gran utilidad la referencia [1] puesto que este documento contiene información detallada acerca de los diferentes métodos aquí implementados.

Una de las investigaciones pioneras en restauración/re configuración, la hace Morelato et al en [2], en la que propone un marco general a partir del cual es posible diseñar algoritmos que solucionen el problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución. Este marco, propone resolver la búsqueda heurística a partir de un árbol de decisión binario que introduce reglas heurísticas obtenidas a partir de la experiencia de los operadores de red, lo cual ayuda a reducir el espacio de búsqueda.

Akduman et al en [3], exponen un modelo matemático multiobjetivo con múltiples restricciones que da solución al problema de la restauración por medio de un algoritmo evolutivo, en este se consideran las siguientes funciones objetivo: maximizar el suministro de potencia a las cargas prioritarias, maximizar la alimentación de las cargas regulares y minimizar las pérdidas del sistema.

E. M. Carreno et al en [4] proponen un algoritmo evolutivo que por medio de una cod-

ificación eficiente resuelve el problema de la reconfiguración; en esta codificación se halla el punto de recombinación a partir de una ecuación que determina el número mínimo de líneas que deben ser sustraídas para que las topologías resultantes sean radiales.

L.P. Hernandez et al en [5] resuelven el problema del planeamiento de sistemas de distribución utilizando búsqueda tabú en la cual se considera como vecindad reducida a todas aquellas líneas que conecten nodos conectados con nodos desconectados, evitándose así la formación de mallas en las configuraciones propuestas.

S. Curcic et al en [6] hacen uso de un algoritmo heurístico para solucionar el problema de la restauración, en el cual además de minimizar la energía no servida, también se tiene como objetivo minimizar el número de operaciones de los dispositivos de cierre y/o apertura y minimizar las pérdidas del sistema. Además incluye un módulo que permite seleccionar las cargas críticas, y garantizarles una conexión después de ocurrida una falla.

O. Duque et al en [7] implementan un algoritmo de búsqueda tabú compuesto únicamente por la estrategia de intensificación para solucionar el problema de la restauración, los autores consideran una optimización multiobjetivo que busca minimizar la energía no servida, el tiempo de operación de los switches y las pérdidas del sistema resultante, con el fin de distinguir cual es el óptimo del problema.

V. J. Garcia et al en [8] solucionan el problema de la restauración a través de un algoritmo genético, el cual toma como función objetivo minimizar la energía no servida y el número de operaciones de los switches. en este documento se implementa una codificación eficiente y novedosa, ya que logran hacer que cualquier configuración sea factible. Esto se logra hallando todos los posibles caminos que energizan a todos los nodos del sistema, y codificándolos en el vector de decisiones.

Rajneesh K.Karn, Yogendra Kumar y Gayatri Agnihotri en [9] solucionaron el problema de restauración de sistemas de distribución con múltiples objetivos usando un algoritmo híbrido entre AG y OCA. Los objetivos de este algoritmo son disminuir la carga desconectada tras una falla, minimizar el número de maniobras o de accionamiento de los dispositivos de apertura y/o cierre (Switches) y disminuir las pérdidas. También se realiza una comparación entre el algoritmo genético simple y colonia de hormigas; obteniendo mejores resultados el algoritmo híbrido.

En [10] Stephane Moins publica un documento para el Instituto Tecnológico de Linköping en Suiza en donde implementa en Matlab el algoritmo de recocido simulado para la configuración de circuitos análogos con el fin de aumentar la eficiencia del circuito y por tanto tener una mayor transferencia de potencia.

Este proyecto está organizado de la siguiente forma.

en el capítulo 2 se dará una descripción general del problema, además se expone el modelo matemático y la codificación implementada, seguidamente en el capítulo 3 se explica el funcionamiento del flujo de potencia iterativo y el respectivo ordenamiento nodal implementado, se dan a conocer las técnicas de optimización utilizadas para la solución del problema de restauración, en el capítulo 4 se muestran los resultados y se hace su respectivo análisis, finalmente en el capítulo 5 se dan las conclusiones, recomendaciones y se aportan algunas ideas para los futuros trabajos que se realicen en restauración.

Capítulo 2

2. DESCRIPCIÓN Y MODELO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del problema

Los sistemas de distribución se componen de diversos elementos que permiten llevar la energía a los usuarios residenciales, comerciales e industriales. Debido al crecimiento progresivo de la demanda y a las exigencias de una alta calidad en el servicio, las redes de distribución están siendo equipadas con diversos dispositivos que son cada vez más especializados lo que aumenta la complejidad de la operación de los sistemas de distribución. La energía eléctrica es en gran medida el pilar de la economía moderna, ya que permite la producción de bienes y servicios al ritmo que la sociedad lo demanda, es por esta razón que es de suma importancia contar con sistemas eléctricos que garanticen un servicio continuo y de alta calidad, lo cual se logra a través de entes que regulan el desempeño de las empresas electrificadoras.

La mayor parte del tiempo los sistemas de distribución se encuentran en un régimen normal de operación, en el cual, todas las cargas son alimentadas y todas las restricciones operativas están siendo cumplidas. Sin embargo el sistema está expuesto a sufrir contingencias tales como: descargas atmosféricas, corto circuitos y sobre cargas, entre otras, las cuales ocasionan cortes de energía temporales o permanentes, que impactan en gran medida la operación del sistema por la pérdida de carga, o la violación de los límites establecidos. Como solución al problema anteriormente mencionado, las compañías electrificadoras comenzaron una campaña de modernización de activos instalando en sus redes dispositivos de maniobra y/o protección (reconectores, seccionadores y fusibles) los cuales por medio de operaciones de apertura o cierre aíslan a la zona de fallo y posteriormente a través de una secuencia de switcheos, tratan de restaurar el servicio a los usuarios en el menor tiempo posible.

A continuación se muestra a grandes rasgos el procedimiento de restauración para un sistema de 19 nodos, 3 alimentadores y 3 enlaces que se muestra en la figura 2.1.

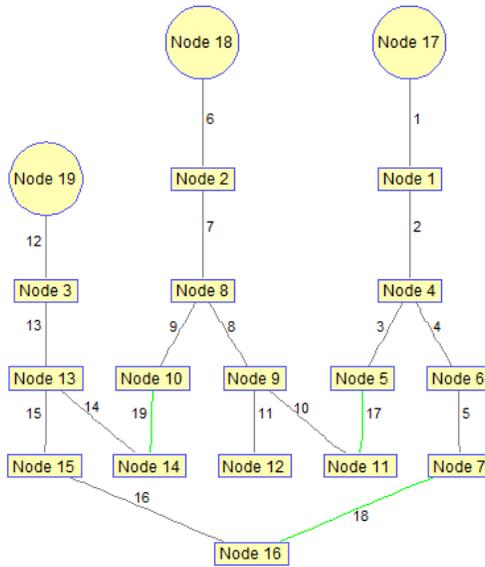


Figura 2.1: Sistema de 19 nodos

En la figura 2.1 se puede observar el sistema en estado de operación normal, el cual cambia de topología (2.2) al efectuarse una falla en la rama 13. La apertura de los seccionadores instalados en los extremos de esta línea, además de aislarla, dejan sin alimentación toda la carga conectada aguas abajo del nodo 3. En color rojo se identifica la parte del sistema que queda desenergizada.

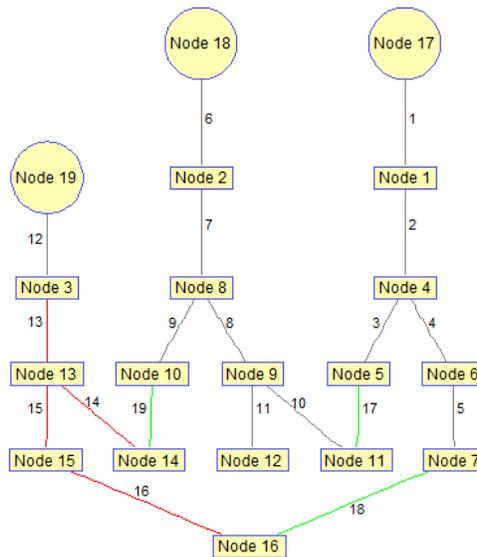


Figura 2.2: Sistema tras falla en la rama 13

Al aplicar alguna estrategia de restauración, una de las posibles soluciones al problema podría ser la topología que se muestra en la figura 2.3. Esta solución tendrá que estar sujeta al

cumplimiento de las restricciones operativas del sistema (corrientes menores a las nominales de los elementos y voltajes por encima de los mínimos de regulación).

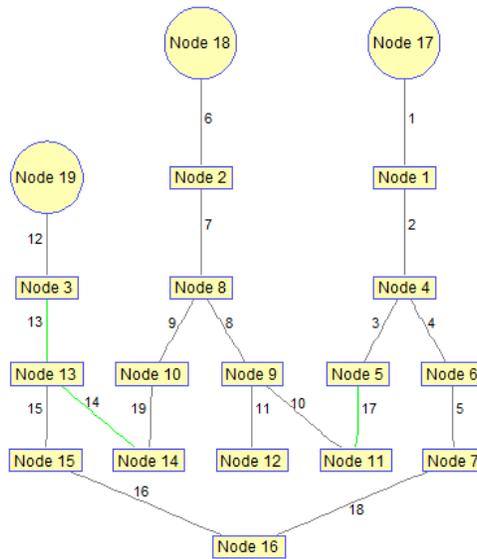


Figura 2.3: Sistema restaurado

2.2. Modelo matemático

Para el caso de la restauración en sistemas de distribución, el objetivo principal es conectar tanta carga como sea posible luego de una falla [3], por medio de dispositivos de apertura y/o cierre. Estos dispositivos le dan la capacidad al sistema de transferir carga a otros alimentadores o a otras ramas del mismo alimentador, cumpliendo así con los exigencias de la industria eléctrica las cuales son prestar suministro de calidad y con continuidad.

La función objetivo implementada para solucionar el problema de restauración es la siguiente:

$$Fo = \min \sum_{k=1}^G S_k * Y_k \quad (2.1)$$

Donde,

- G=nodos-alimentadores+enlaces
- S_k es la carga en el nodo K.
- Y_k es la variable binaria de decisión.

$$Y_k = \begin{cases} 0 & \text{si la carga del nodo k es restaurada.} \\ 1 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

- La corriente por las líneas no debe exceder la capacidad máxima.

$$\left| \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \right| \leq I_{m\acute{a}x} \quad (2.2)$$

- El voltaje nodal debe estar dentro de límites permitidos.

$$V_{n\acute{m}in} \leq V_n \leq V_{n\acute{m}ax} \quad (2.3)$$

- Topología radial

2.3. Codificación

Con el propósito de solucionar el problema de la restauración del sistema de distribución por medio de un modelo matemático, se suponen instalados en la red switches de apertura y/o cierre en las líneas del sistema de distribución, cuya función es proveer una conexión alternativa con otro nodo perteneciente al mismo alimentador, o perteneciente a otro alimentador cercano. La metodología usada para resolver el problema de la restauración consiste en conocer el estado de los dispositivos de apertura y/o cierre, y a partir de este, proponer configuraciones que satisfagan las restricciones. La lógica del proceso es obtener combinaciones óptimas de las variables de decisión binarias que conforman el vector Y_k , las cuales pueden tomar el valor de 0 ó 1, para denotar que los dispositivos están abiertos o cerrados, es decir, que la línea se encuentra desenergizada o energizada. Debido a la gran cantidad de posibles combinaciones que existen en el espacio de soluciones, el problema se debe considerar de tipo combinatorial y por lo tanto pueden ser usadas técnicas de optimización combinatorial exactas y/o aproximadas, las cuales proporcionan valores exactos o aproximados del problema. La codificación del conjunto de variables puede ser representada por un vector de variables binarias de decisión de la siguiente manera:

$$Y_k = [Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_{n-1}, Y_{n-2},] \quad (2.4)$$

Donde:

$$Y_k \in \{0, 1\} \quad (2.5)$$

Capítulo 3

3. METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN

Los sistemas de distribución operados de forma radial y sin generación distribuida están limitados a transportar la energía en un solo sentido, del nodo raíz a cada uno de los nodos de consumo, Tal característica vuelve altamente vulnerable a esta clase de redes ya que cualquier evento de falla tiene un gran impacto debido a que afecta a los usuarios que se encuentren aguas abajo, dejándolos sin el suministro del servicio. Actualmente existen resoluciones expedidas por los entes regulatorios de energía, las cuales penalizan el mal servicio al restringir el precio que las compañías pueden cobrar por este, e incentivar a las empresas que cumplen los parámetros establecidos permitiéndoles aumentar el precio que estas pueden cobrar a sus usuarios por su servicio. Es por esta razón que las compañías electrificadoras se han propuesto aumentar sus beneficios a partir de la mejora en la calidad de la energía suministrada, lo que implica renovar y adquirir dispositivos de protección que les facilite esta labor, como reconectores o seccionadores normalmente abiertos o cerrados, que le dan una flexibilidad al sistema de aislar zonas bajo fallo, y reestablecer el servicio a los usuarios que estén desenergizados. El problema de restauración del servicio es del tipo combinatorial de difícil solución el cual puede ser resuelto usando técnicas exactas, las cuales requieren tiempos elevados de computación que no son aceptables para este tipo de aplicación. Es por esta razón que en la literatura especializada se han dado a la labor de buscar estrategias no exactas que permitan encontrar soluciones de buena calidad a este tipo de problemas en tiempos de computación razonables, lo que hace a estas últimas mucho más prácticas. Las técnicas heurísticas y metaheurísticas aparecen entonces como estrategias aplicables a problemas como el de la restauración de los sistemas de distribución ya que se ajustan a las exigencias de encontrar buenas soluciones en tiempos aceptables.

3.1. Técnicas heurísticas

Las heurísticas son los algoritmos que encuentran soluciones de buena calidad en tiempos razonables para problemas combinatoriales complejos del tipo NP. Los algoritmos heurísticos son más fáciles de implementar y encuentran buenas soluciones con esfuerzos computacionales relativamente pequeños. Sin embargo los algoritmos heurísticos renuncian, por lo menos desde el punto de vista teórico a encontrar la solución óptima global de un problema. En problemas de gran tamaño, pocas veces un algoritmo heurístico encuentra la solución óptima global. Un algoritmo heurístico es por lo tanto una estrategia de búsqueda de soluciones que utiliza un conjunto de procedimientos simples, muchas veces basados en el sentido común, que encuentran soluciones de buena calidad (no necesariamente la óptima) de manera simple y rápida. La premisa para que una heurística funcione es que las soluciones de alta calidad no se encuentran uniformemente distribuidas en el espacio de soluciones, si no que existe diferenciación entre regiones de alta calidad y regiones de baja calidad. Esto es equivalente a decir que las soluciones de alta calidad no se encuentran uniformemente distribuidas en el espacio de soluciones [1].

3.2. Técnicas metaheurísticas

A diferencia de las técnicas heurísticas las cuales avanzan a cada paso del proceso hacia la mejor solución, las técnicas metaheurísticas permiten un empeoramiento de la función objetivo, logrando escapar de los óptimos locales que se encuentran en el espacio de soluciones y seguir en la búsqueda de soluciones de mejor calidad.

3.3. Flujo de carga

El flujo de carga es una herramienta de análisis que permite conocer el estado operativo de una red eléctrica en un instante determinado. Su objetivo es encontrar las tensiones nodales y con base en estas calcular flujos de corriente, de potencia y pérdidas en las líneas. Existen diversos métodos de flujo de carga empleados en sistemas radiales de distribución, como lo son el método de Newton Raphson, el flujo por el método de Renato Cespedes [13], el método de D.shirmohammadi [12] y de barrido iterativo. El primero requiere de inversión de matrices, los demás se basan en barridos a través de la topología de la red y son de fácil implementación. En este trabajo es usado el método de barrido iterativo.

3.3.1. Ordenamiento nodal

Para implementar el flujo de potencia de barrido iterativo, es necesario hacer uso de una etapa previa en la cual se lleve a cabo una enumeración ordenada de los nodos del sistema con el fin de aplicar de forma ordenada la primera y segunda ley de kirchhoff las cuales estan dentro del modelo matemático a ser implementado en el problema del flujo de carga. Los sistemas pueden ser ordenados de diferentes formas, ya sea enumerándolos por niveles ascendentemente, descendentemente, o por ramales. En este trabajo, las redes serán ordenadas por niveles de forma descendente. La figura 3.2, muestra un sistema de distribución radial desordenado, y para ordenarlo se implemento la lógica que se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.1, tras aplicar la metodología de ordenamiento podemos ver el resultado en en la figura 3.3.

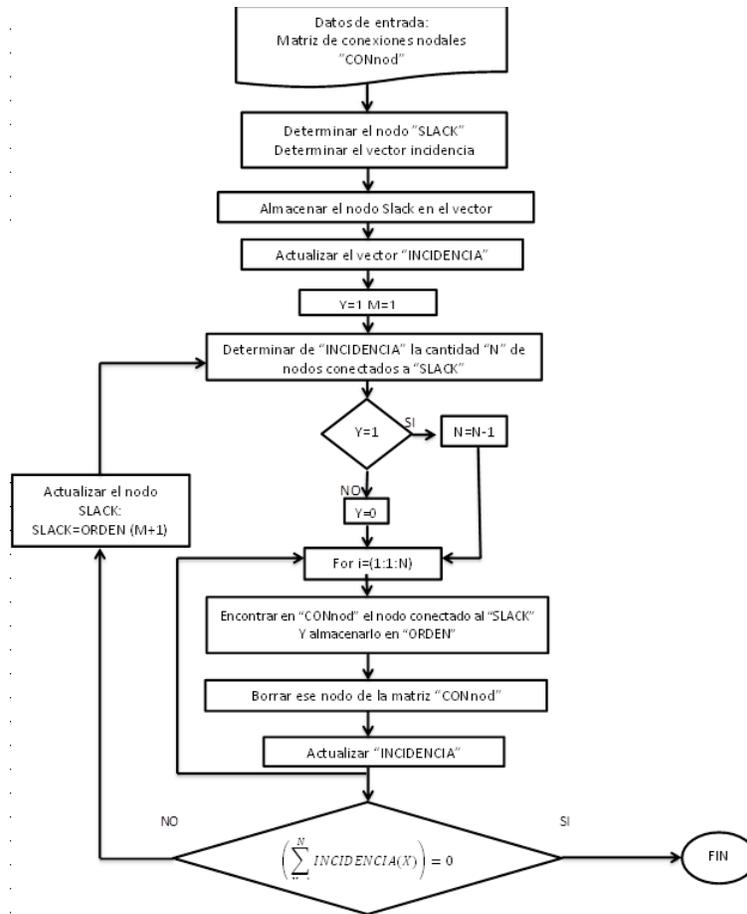


Figura 3.1: Diagrama de flujo de ordenamiento

A continuación se realizará un ejemplo de las metodologías de ordenamiento implementada en este trabajo

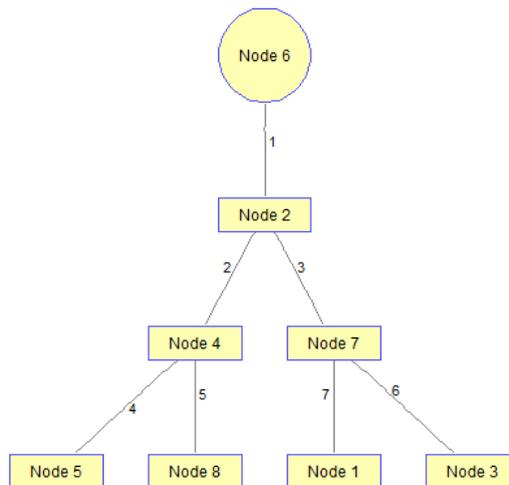


Figura 3.2: Sistema desordenado

Nodo	INCIDENCIA
6	2
2	4
2	7
4	5
4	8
7	3
7	1

Cuadro 3.1: Matriz de incidencia

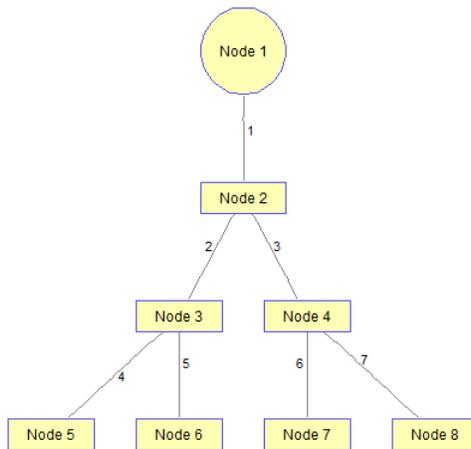


Figura 3.3: Sistema ordenado por niveles descendentes

Cuando se analiza detenidamente la matriz de conexiones de un sistema radial, se puede concluir que

- El nodo slack solo aparece en la columna de nodos de envío
- Los nodos nunca se repiten en la columna de nodos de recibo
- Se puede definir la matriz incidencia contando el número de veces que se repiten los nodos en ambas columnas

El primer paso del algoritmo de ordenamiento es definir el nodo Slack, lo que se logra comparando el vector de nodos de envío con el vector de nodos de recibo y determinando cual es el único nodo que se encuentra en envío, pero no en Recibo; en el ejemplo se puede inferir de la matriz de conexiones que el nodo slack es el nodo número 6. El siguiente paso del algoritmo es definir el vector de incidencia del sistema. Para obtenerlo, se cuenta el número de veces que se repite cada nodo en el vector de envío, y le suma el número de veces que se encuentra el mismo nodo en recibo.

Envío	Recibo
1	1
2	3
3	1
4	3
5	1
6	1
7	3
8	1

Cuadro 3.2: Matriz de incidencia

Habiendo definido tanto el vector incidencia como el nodo slack, el algoritmo inicia a hacer el ordenamiento nodal de la siguiente manera: Se crea una matriz en la cual se almacenan los nodos que se van hallando a lo largo de la topología.

Orden
6

Seguidamente busca en la matriz incidencia, el número de ramas que se conectan a ese nodo. $INCIDENCIA(6)=1$ indica cuántas veces se debe habilitar la búsqueda de nodos conectados al slack. Se busca en la matriz de conexiones cual es el nodo recibo de 6, en este caso es 2. Se guarda ese nodo en el vector Orden.

Orden
6
2

Se elimina el nodo Slack de la columna Envío de la matriz de conexiones

Envío	Recibo
0	2
2	4
2	7
7	3
7	1
4	5
4	8

Se actualiza el vector de INCIDENCIA:

Nodo	INCIDENCIA
1	1
2	3→2
3	1
4	3
5	1
6	1→0
7	3
8	1

Se actualiza el nodo Slack. El cual va a tomar el valor del siguiente nodo en el vector Orden Slack=2

Seguidamente busca en la matriz INCIDENCIA, el número de ramas que se conectan a ese nodo. $INCIDENCIA(2)=2$ esta cantidad indica las veces que se debe habilitar la búsqueda de nodos conectados al slack.

Se habilita entonces el primer ciclo de búsqueda. Se busca en la matriz de conexiones cual es el nodo recibo de 2, en este caso es 4. Se guarda ese nodo en el vector Orden.

Orden
6
2
4

Se borra de la matriz de conexiones el nodo envío del nodo 4:

Envío	Recibo
0	2
0	4
2	7
7	3
7	1
4	5
4	8

Se actualiza el vector de INCIDENCIA:

Nodo	INCIDENCIA
1	1
2	2→1
3	1
4	3→2
5	1
6	1
7	3
8	1

Se habilita el segundo ciclo de búsqueda para nodos que se conectan al nodo 2.

Se busca en la matriz de conexiones cual es el nodo recibo de 2, en este caso es 7. Se guarda ese nodo en el vector Orden

Orden
6
2
4
7

Se borra de la matriz de conexiones el nodo envío del nodo 7:

Envío	Recibo
0	2
0	4
0	7
7	3
7	1
4	5
4	8

Se actualiza el vector INCIDENCIA:

Nodo	INCIDENCIA
1	1
2	1→0
3	1
4	3→2
5	1
6	0
7	3→2
8	1

Ya habiendo terminado los dos ciclos de búsqueda correspondientes al nodo 2, se actualiza el valor del nodo slack, escogiendo el próximo nodo del vector Orden: Slack=4. El proceso se repite hasta que todos los elementos del vector de incidencia sumen cero. Finalmente el vector Orden queda de la siguiente manera:

Orden	Orden	Nuevo orden
6	6	1
2	2	2
4	4	3
7	7	4
5	5	5
8	8	6
3	3	7
1	1	8

Con el cual podemos reenumerar los nodos de la siguiente manera:

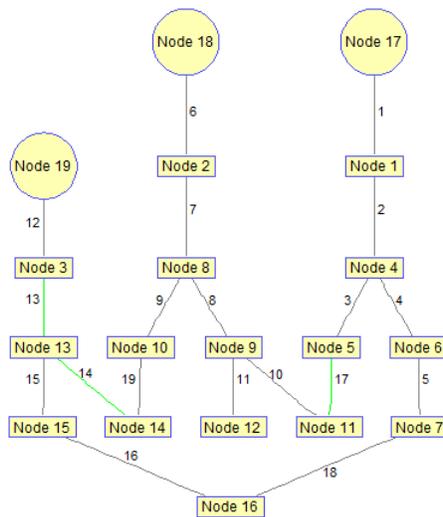


Figura 3.4: Sistema reenumerado

Con la red reenumerada de una forma ordenada, se hace más simple el cálculo de las leyes de kirchhoff, ya que los barridos pueden ser sintetizados en procedimientos secuenciales lógicos.

3.3.2. Algoritmo de barrido iterativo

Para evaluar las diferentes configuraciones propuestas por los algoritmos metaheurísticos, se implementó un algoritmo de flujo de potencia que aprovecha la radialidad topológica, lo que permite reducir el esfuerzo computacional ya que se evita la inversión de matrices. Se utiliza entonces el barrido iterativo como método de solución el cual consiste en aplicar la primera y segunda ley de Kirchhoff de forma iterativa, hasta que se cumpla el criterio de convergencia.

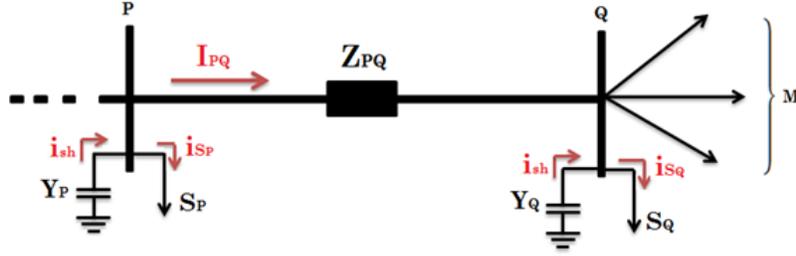


Figura 3.5: Tramo de red considerando el modelo de línea larga

El proceso iterativo consta basicamente de 3 pasos en cada iteración, así: en el primero se hace el cálculo de corrientes nodales inyectadas en función de los valores de demanda nodal y voltaje nodal, en el segundo se aplica la primera ley de Kirchhoff a cada nodo usando las corrientes calculadas en el paso anterior y teniendo en cuenta el orden nodal y en el tercero se aplica la segunda ley de Kirchhoff, partiendo del nodo slack, hasta llegar a los nodos terminales de la red. Los primeros dos pasos conforman el barrido hacia arriba, y el tercer paso conforma el barrido hacia abajo.

Calculo de las corrientes inyectadas: Previo a la aplicación de la primera ley de Kirchhoff, es necesario calcular las corrientes nodales, lo cual se hace de la siguiente forma:

$$i_{sq} = \left(\frac{S_Q}{V} \right)^* \quad (3.1)$$

La corriente inyectada por la Y_{sh} se calcula así:

$$i_{sh} = V_Q \cdot Y_Q \quad (3.2)$$

A partir de los valores calculados anteriormente, se halla la corriente inyectada de esta manera:

$$i_Q = i_{SQ} - i_{sh} \quad (3.3)$$

Teniendo en cuenta que las líneas de los alimentadores primarios son consideradas cortas si el nivel de tensión es menor a 115KV, entonces se les aplica el modelo serie de la línea de transmisión, por lo tanto se desprecia el efecto capacitivo de la línea. Esto es:

$$Y_{sh} = 0 \quad (3.4)$$

Obteniéndose un tramo de red como el que se muestra en la figura 3.6.

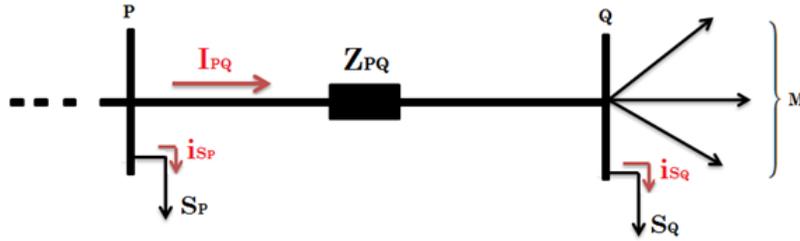


Figura 3.6: Tramo de red considerando el modelo de línea corta

En consecuencia:

$$i_{sh} = V_Q, 0 \quad (3.5)$$

$$i_Q = i_{SQ} - 0 \quad (3.6)$$

$$i_Q = i_{SQ} \quad (3.7)$$

De esta manera se simplifican los cálculos requeridos por el flujo de carga.

Aplicación de la primera ley de Kirchhoff (barrido hacia arriba): Después de calcularse las corrientes nodales, se pasa a calcular las corrientes por las líneas lo cual se logra a partir del ordenamiento nodal, empezando el proceso en los nodos extremos, y terminando en el nodo slack. De la siguiente manera:

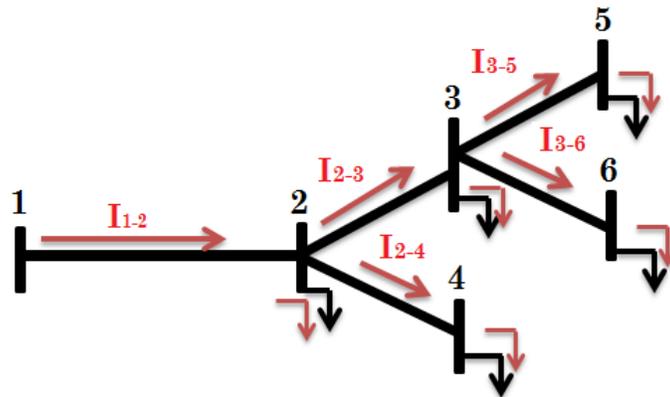


Figura 3.7: Ejemplo de barrido hacia arriba

Las corrientes por las líneas son:

$$I_{3-5} = i_5$$

$$I_{3-6} = i_6$$

$$I_{2-4} = i_4$$

$$I_{2-3} = i_3 + I_{3-5} + I_{3-6}$$

$$I_{1-2} = i_2 + I_{2-3} + I_{2-4}$$

La ecuación que generaliza el proceso anterior es:

$$I_{PQ} = i_Q + \sum_{m \in M} I_{QM} \quad (3.8)$$

Donde,

- I_{PQ} corriente por la línea.
- i_Q corriente demandada en el nodo de recibo.
- I_{QM} corrientes demandadas por las líneas conectadas al nodo de recibo.
- M es el conjunto de líneas conectadas al nodo de recibo.

Después de haberse calculado las corrientes de todas la líneas, se pasa a ejecutar el barrido hacia abajo.

Segunda ley Kirchhoff (barrido hacia abajo): después de calcular las corrientes por las líneas, se procede a calcular los voltajes nodales a partir de la caída de tensión que se presenta en cada tramo de red, iniciando el proceso en el nodo slack y finalizando en los nodos terminales como se muestra a continuación:

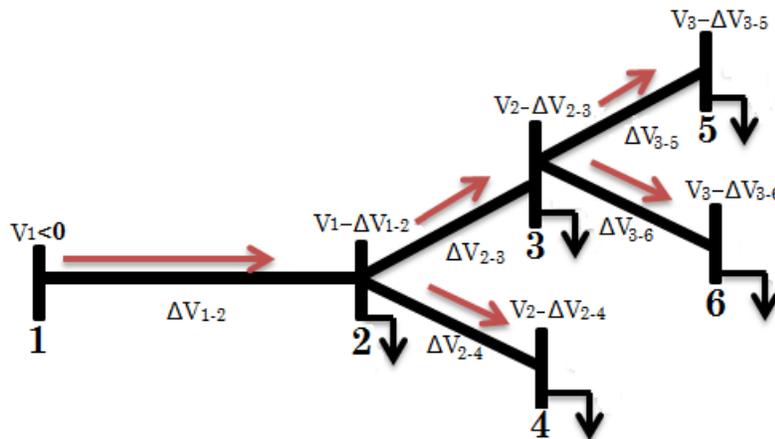


Figura 3.8: Ejemplo del barrido hacia abajo

Los voltajes en los nodos son:

$$V_1 = 1 \angle 0$$

$$V_2 = V_1 - Z_{1-2} * I_{1-2}$$

$$V_3 = V_2 - Z_{2-3} * I_{2-3}$$

$$V_4 = V_2 - Z_{2-4} * I_{2-4}$$

$$V_5 = V_3 - Z_{3-5} * I_{3-5}$$

$$V_6 = V_3 - Z_{3-6} * I_{3-6}$$

La ecuación que generaliza el procedimiento anterior es:

$$V_Q = V_P - Z_{P-Q} * I_{P-Q} \quad (3.9)$$

Criterio de convergencia: Después de completada una iteración, se calcula la diferencia entre las pérdidas totales del sistema en la iteración actual y la iteración anterior, y se compara con el criterio de convergencia, como se muestra a continuación:

Cálculo de las pérdidas totales:

$$Perdidas_{Totales} = \sum_{X=1}^N I_X^2 \cdot R_X \quad (3.10)$$

Donde N es el número de ramas

Comparación del delta de pérdidas y la tolerancia

Si el delta de pérdidas es mayor a una tolerancia dada, se itera una vez mas, si no, se para.

$$|Perdidas_{Totales(k)} - Perdidas_{Totales(k-1)}| < Tolerancia \quad (3.11)$$

El flujo de potencia iterativo fue programado siguiendo la lógica del siguiente diagrama de flujo:

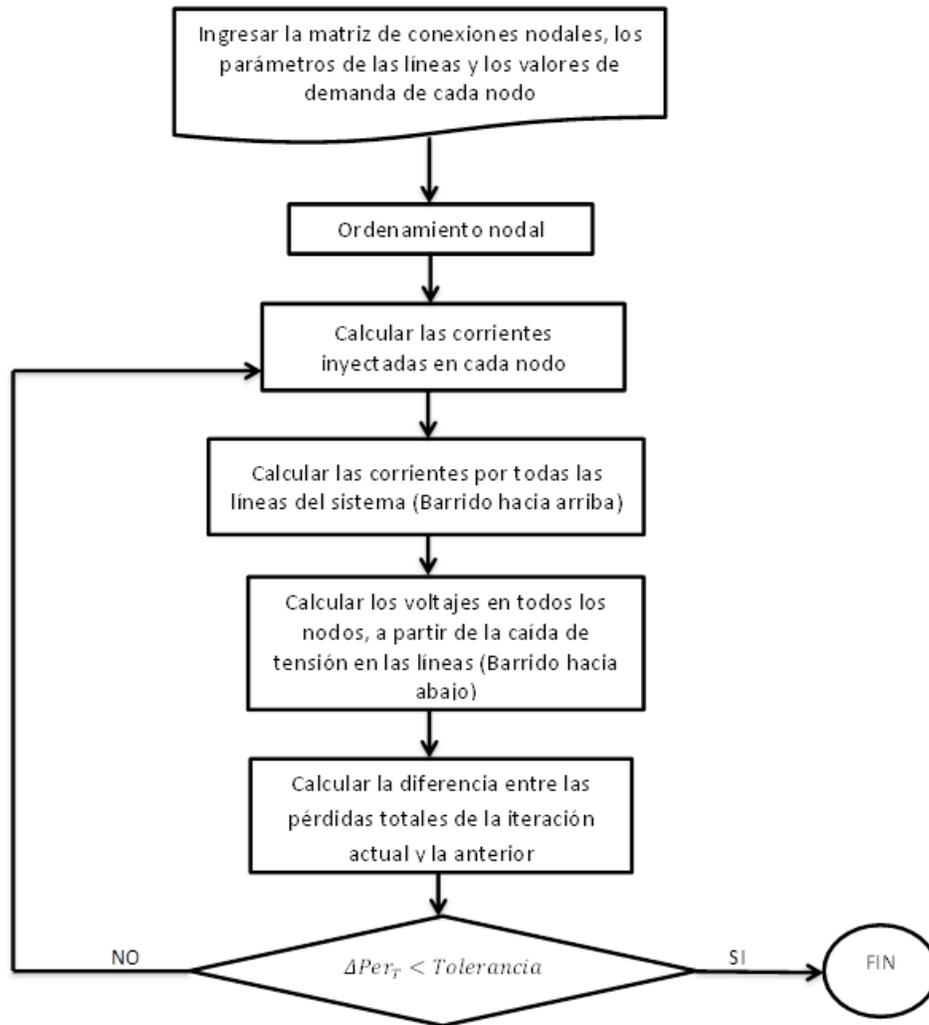


Figura 3.9: Diagrama de flujo del algoritmo de barrido iterativo

3.4. Técnica de solución (Búsqueda Tabú)

3.4.1. Introducción

Búsqueda tabú es una técnica metaheurística que guía un algoritmo de búsqueda local con la finalidad de evitar que el proceso quede atrapado en un óptimo local, permitiendo una exploración adecuada del espacio de configuraciones. De forma semejante a la búsqueda

local, la búsqueda tabú selecciona agresivamente el mejor de los movimientos posibles en cada paso, no obstante, acepta movimientos aun cuando no sean tan buenos como el actual, lo que le da la capacidad de escapar de óptimos locales. Este método heurístico (búsqueda tabú) está diseñado para escapar de la optimalidad local, basado en el manejo y uso de una colección de principios que sirven para resolver el problema de manera "inteligente", esto es, haciendo uso de memoria flexible para involucrar dos procesos, el de la adquisición y el de mejoramiento de la información; así al tener cierta "historia" de los caminos ya recorridos y de los óptimos encontrados, se puede evitar permanecer en las mismas regiones, y recorrer regiones nuevas para encontrar otras mejores soluciones. Para evitar regresar a regiones con óptimos locales ya explorados y se den ciclos repetitivos de búsqueda, la técnica clasifica los movimientos más recientes como "movimientos tabú" evitando así que una configuración sea recurrentemente visitada.

Este método utiliza dos tipos de memoria: memoria a corto plazo y memoria a largo plazo. La memoria de corto plazo contiene los eventos ocurridos recientemente y la de largo plazo almacena datos de la frecuencia con que ocurren determinados eventos.

Para considerar efectos de largo plazo, el método utiliza una memoria basada en frecuencia. Esta contiene información relacionada con el número de veces que ciertos atributos, han estado presentes o no en las soluciones visitadas. Esta información es fundamental para definir las estrategias de diversificación, las cuales permiten explorar regiones no visitadas anteriormente.

TS también aplica estrategias de intensificación y diversificación. En la primera se establece una búsqueda detallada alrededor de buenas soluciones(explotación); en la segunda se favorece la exploración de nuevos subespacios [1].

3.4.2. Memoria de corto plazo

La memoria de corto plazo usa básicamente la información de atributos de configuraciones que fueron modificadas recientemente. La idea de esta estrategia es considerar todos los atributos seleccionados en el pasado reciente como prohibidos; por lo tanto, todas las configuraciones candidatas que posean alguno de los atributos prohibidos(tabú activos) son excluidas de la formación del conjunto configuraciones vecinas para ser evaluadas, creándose una vecindad reducida que es subconjunto de la vecindad de la configuración actual. En caso de que uno de los movimientos prohibidos mejore la incumbente, entonces se implementa una estrategia de olvido conocida como el criterio de aspiración, el cual libera el atributo de la prohibición impuesta [1]. En este trabajo se usaron dos memorias de corto plazo "LISTA TABÚ DE ENTRADA" y "LISTA TABÚ DE SALIDA", la primera registra las líneas que fueron retiradas, y las prohíbe de ser adicionadas en las próximas k iteraciones, y la segunda memoria registra las líneas que fueron adicionadas, y las prohíbe de ser retiradas en las próximas k iteraciones.

La figura 3.10 ilustra como la memoria a corto plazo evita el ciclaje.

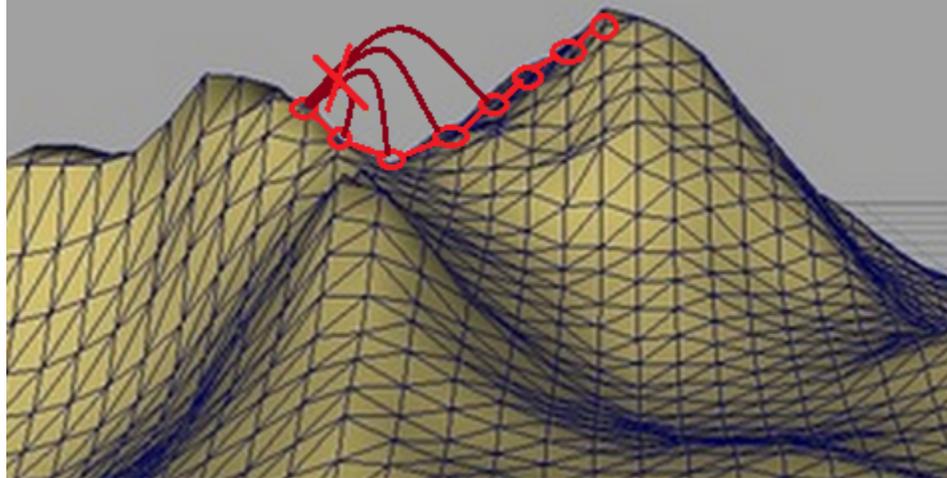


Figura 3.10: prohibición de ciclaje

3.4.3. Vecindad

La vecindad es el mecanismo a través del cual se proponen configuraciones para ser exploradas que corresponden al conjunto de todas las configuraciones, que pueden ser obtenidas por la aplicación de un mecanismo de transición a partir de la configuración actual [1], la estructura de vecindad define las condiciones para que la siguiente configuración sea vecina de la actual. En este trabajo, se definió como vecino de una configuración X a todas aquellas configuraciones obtenidas a partir de X con la adición o retirada de una línea.

Selección del vecino La selección del vecino para conectar carga se hace de la siguiente forma; se escoge como primera opción adicionar la línea cuyo nodo de envío tiene mayor reserva de voltaje, si esta tiene la prohibición tabú activa, se escoge al siguiente vecino cuyo nodo de envío tenga mayor reserva de voltaje. En caso de que todos los vecinos tengan activo su estatus tabú, entonces se escoge a cualquier vecino que supere el criterio de aspiración.

Para la selección del vecino al momento de deslastrar carga, se escoge a cualquier vecino propuesto, si el movimiento es prohibido, entonces se selecciona al siguiente vecino. Dado que al deslastrar carga se empeora la función objetivo, entonces es inútil aplicar una estrategia de olvido.

Vecindad reducida En este trabajo, se eligieron dos estrategias de vecindad reducida, la primera para conectar carga y la segunda para desconectarla.

- La vecindad reducida para conectar carga, es el conjunto de todas aquellas líneas que conectan nodos energizados con nodos desenergizados [5].
- La vecindad reducida para desconectar carga es el conjunto de todas aquellas líneas que alimentan los nodos terminales de la configuración actual.

Para la configuración que se muestra en la figura 3.11 la vecindad para conectar carga esta conformada por las líneas 10 y 14, mientras que la vecindad para deslastrar carga se conforma de las líneas 5, 16 y 17.

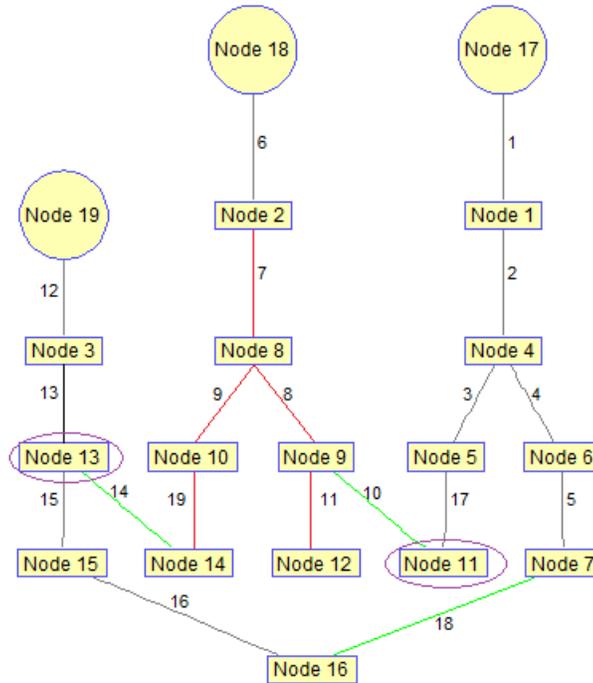


Figura 3.11: Vecindad

La estrategia de vecindad reducida para conexión de carga, tiene la ventaja de que solo propone configuraciones radiales, ya que nunca se propondrá la conexión de un nodo ya energizado, tal característica agiliza notablemente el proceso de selección de configuraciones con topologías factibles [5].

3.4.4. Factor de sensibilidad (Nodo con mayor reserva de voltaje)

A partir de los resultados arrojados por el flujo de carga, se conocen los voltajes en los nodos del sistema, incluidos los nodos que conforman la vecindad. Con base en esos voltajes, se calcula la reserva de voltaje en los nodos de envío de las ramas que conforman la vecindad como se hizo en [11] de la siguiente manera :

$$R_{\text{voltaje}} = V_{\text{nodos vecinos}} - V_{\text{mínimo}} \quad (3.12)$$

Siendo el voltaje mínimo escogido en este trabajo de 0.95pu.

3.4.5. Memoria a largo plazo

La incorporación de una estrategia de largo plazo entrega al algoritmo TS una sofisticación adicional, y un desempeño mejor en la mayoría de aplicaciones, esta implementa una memoria basada en frecuencia, una estrategia de intensificación y una estrategia de diversificación [1].

3.4.6. Memoria basada en frecuencia

Consiste básicamente en almacenar el número de veces que un atributo ha sido seleccionado para participar en la generación de configuraciones durante el proceso TS. Existen dos tipos de memoria basada en frecuencia, las frecuencias de transición, que almacenan el número de veces en que un atributo es retirado o adicionado para formar nuevas configuraciones y la frecuencia de residencia o permanencia que almacena la información del número de veces en que un atributo permanece en las nuevas configuraciones o en todas las configuraciones generadas durante el proceso TS [1]. En este trabajo se implementó la frecuencia de transición, de esta manera se almacena el número de veces que una línea es adicionada o retirada en la formación de las configuraciones a lo largo del proceso TS.

Solución del problema utilizando TS En la solución del problema de restauración usando búsqueda tabú se usó el siguiente procedimiento: la configuración inicial es la topología resultante después de aislar la falla, esta configuración es sometida a un proceso de TS/intensificación, durante este proceso las P mejores configuraciones son almacenadas. En el paso siguiente, se selecciona la configuración almacenada de mejor función objetivo, la cual es sometida a un proceso de diversificación-TS/intensificación. Durante el proceso de TS/intensificación se compara la función objetivo de la configuración actual con la de las configuraciones almacenadas en la lista élite, en caso de que la configuración actual presente mejor función objetivo, esta reemplaza la configuración almacenada en la lista élite que tenga peor función objetivo. De esta manera, la configuración inicial entra en el proceso de intensificación, y eventualmente, en caso de que no se mejore la función objetivo por cierto número de iteraciones, pasa a un proceso de diversificación cuyo resultado retroalimenta nuevamente la intensificación. El vector de variables de decisión seguirá oscilando entre estas dos estrategias hasta que se cumpla un determinado número de diversificaciones. En el siguiente diagrama se muestra a grandes rasgos la secuencia que se siguió en este trabajo para solucionar el problema de restauración usando búsqueda tabú.

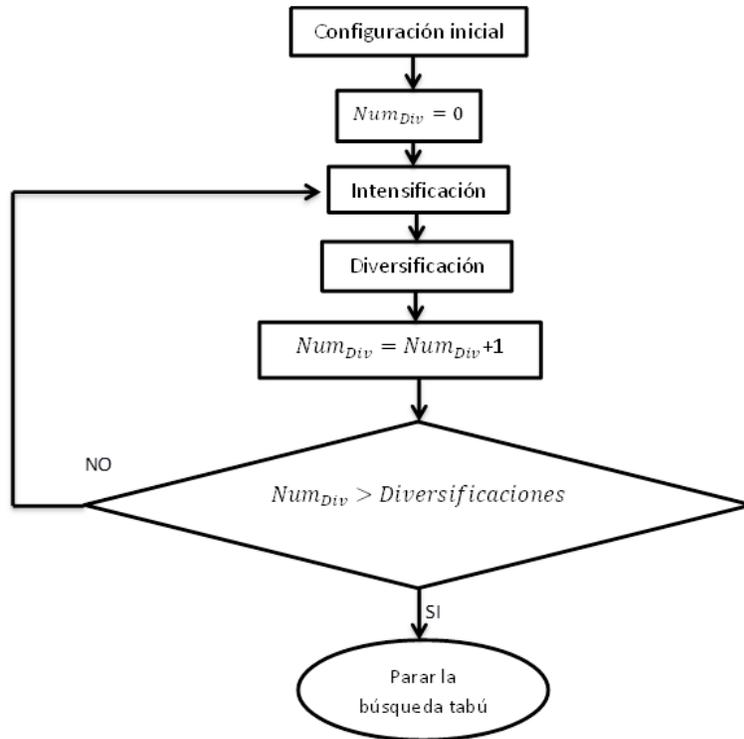


Figura 3.12: Diagrama de flujo de la solución del problema usando búsqueda tabú

La figura 3.4 ilustra como se verían los procesos de intensificación y diversificación en un espacio de soluciones dado.

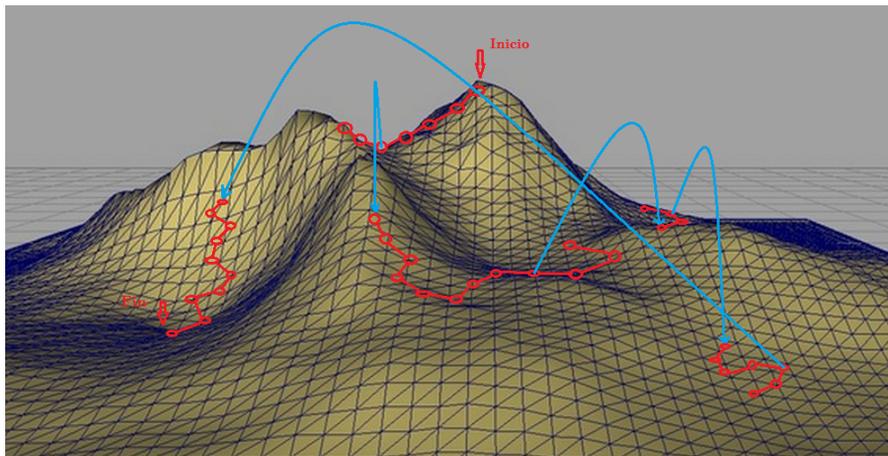


Figura 3.13: proceso de intensificación y diversificación

Estrategia de intensificación Como se define en [1], Consiste en cambiar los criterios de selección de las nuevas configuraciones candidatas para así, incentivar la formación de nuevas configuraciones, aprovechando la información acumulada en el proceso de TS. La intensificación puede ser implementada de varias formas diferentes, tales como:

- Eliminando vecinos o incorporando nuevos vecinos x' en la configuración actual x , típicamente considerando configuraciones de élite o configuraciones que tengan esos atributos como “vecinos ” de x .
- Modificando la caracterización de configuración vecina, es decir; redefiniendo el conjunto de vecindad.
- Regresando a las regiones atractivas para realizar una búsqueda mas intensa en la vecindad de la misma.
- Realizando intensificación por descomposición.

En este trabajo se implementó la tercera forma de intensificación para la explotación de regiones prometedoras.

La estrategia utilizada para intensificar, consiste en conectar carga, hasta llegar al limite de una restricción, solo en ese limite entre factibilidad e in factibilidad se permite deslastrar carga hasta que se obtenga una configuración factible. En ese momento se reinicia el procedimiento de conexión de carga, este ciclo se repite hasta que la incumbente no tenga una mejora después de cierto numero de iteraciones.

El siguiente diagrama de flujo ilustra detalladamente el procedimiento.

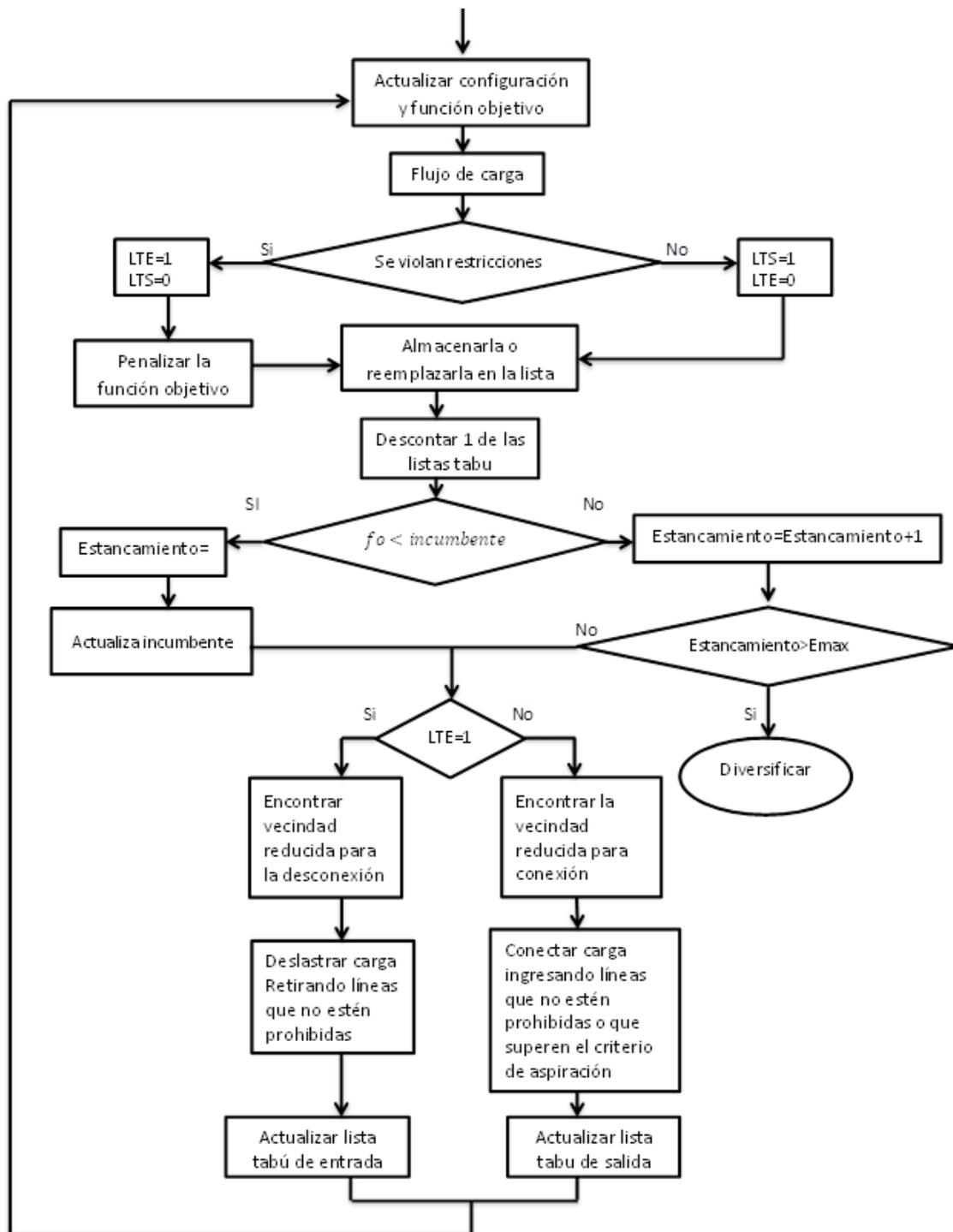


Figura 3.14: Diagrama de flujo del proceso de intensificación implementado

Estrategia de diversificación

Se utiliza para conducir el proceso de búsqueda a nuevas regiones. Esta estrategia es implementada cambiando la definición de vecindad de configuraciones candidatas, incorpo-

rando vecinos constituidos por atributos que han sido poco usados [1]. En este trabajo se uso como estrategia de diversificación aceptar la retirada de una o varias líneas que no alimenten nodos terminales. de esta manera se migra fácilmente a regiones que no han sido exploradas. La figura 3.15 detalla el procedimiento por medio de un diagrama de flujo.

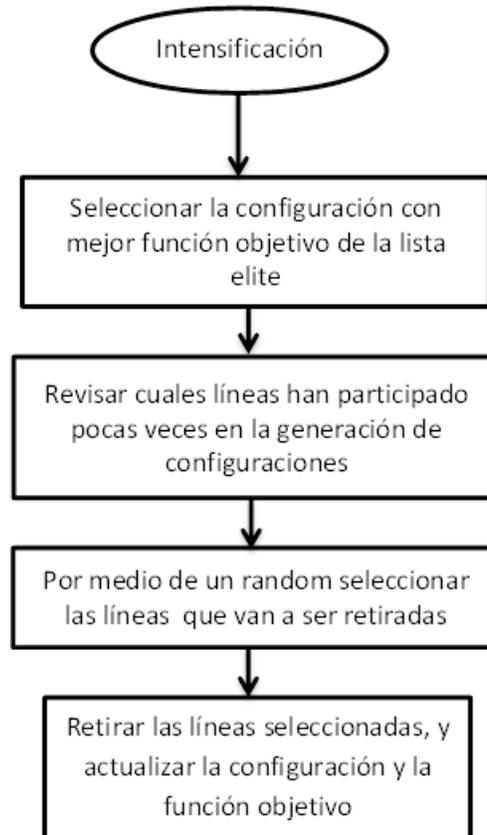


Figura 3.15: Diagrama de flujo de la diversificación implementada

La búsqueda tabú fue programada para que no converja cuando se encuentra una configuración factible que alimente toda la carga desconectada, por lo contrario, en cuanto se halla una configuración cuya función objetivo es cero, el algoritmo en lugar de terminar la búsqueda, diversifica y se continua la búsqueda, hasta que el numero máximo de diversificaciones se cumpla, de esta manera, es posible hallar varias configuraciones optimas para el mismo problema.

3.5. Técnica de solución (Recocido Simulado)

3.5.1. Introducción

Recocido simulado es una técnica de optimización combinatorial, que a demostrado ser un método muy poderoso para la solución de problemas de optimización numérica.

El método se origina de la analogía del recocido de una sólido tal como se describe en la teoría física, los cuales buscan inducir al solido a un estado de mínima energía tal como el

de un cristal. Si el método es aplicado con un rango de enfriamiento lento puede encontrar óptimos globales mediante la simulación del proceso descrito por Kirkpatrick, el creador, el cual presentó un algoritmo para resolver problemas de optimización numéricos arbitrarios obteniendo resultados de excelente calidad en diferentes problemas combinatoriales, como el del viajero y reconfiguración de circuitos [1]. En este caso será implementado con el fin de solucionar el problema de restauración de sistemas de distribución.

3.5.2. Recocido simulado: Teoría

Algoritmo de recocido simulado

La metodología de Recocido simulado se introdujo al inicio de la década de los 80, como una herramienta para ser empleada en la solución de grandes problemas combinatoriales, surgió del campo de la termodinámica y como consecuencia de la comparación de problemas formulados en este campo con los del campo de la investigación operacional, es una metodología simple y de gran potencialidad que puede ser aplicada a una gran variedad de problemas.

Esta metaheurística surge de una idea original la cual se denomina algoritmo de Metrópolis, el que a su vez está basado en el método de MonteCarlo, con el cual se estudian las propiedades de equilibrio en el análisis del comportamiento microscópico de los cuerpos.

El algoritmo de Metrópolis sobre el cual está basado el Método de Recocido Simulado funciona generando una secuencia de estados de un sólido, es decir, dado un sólido en un estado i y con energía E_i , se genera el estado siguiente j mediante la aplicación de un mecanismo, que los conduce al estado siguiente a través de una pequeña perturbación. La energía del próximo estado es E_j . Si la diferencia de energía $E_j - E_i$ es menor o igual a cero, el estado j es aceptado. Si la diferencia de energía es mayor a cero el estado j es aceptado con cierta probabilidad, la cual está dada por [1]:

$$p = e^{\left(\frac{E_i - E_j}{k_b \cdot T}\right)} \quad (3.13)$$

T = temperatura

k_b = Constante de Boltzmann

E_i = Energía de la configuración inicial

E_j = Energía de la configuración propuesta

Analogía y presentación de la metaheurística

Haciendo una analogía entre los parámetros que intervienen en una simulación termodinámica y los que aparecen en métodos de optimización local se tiene:

TERMODINÁMICA	OPTIMIZACIÓN
Configuración	Solución factible
Configuración fundamental	Solución óptima
Energía de la configuración	Costo de la solución
Temperatura	Parámetro de ajuste

Cuadro 3.3: Analogía física y presentación de la Metaheurística

Algoritmo "Simulated Annealing" Para Problemas de minimización

Inicio

Inicializar (T₀, N_k);

K=0;

Configuración inicial S_i

Repetir el procedimiento

De L=1: N_k

Genere (S_j de S_i)

si f(j) ≤ f(i) hacer S_i = S_j;

Caso contrario

if $\left(e^{\left(\frac{f(i)-f(j)}{T_k} \right)} > \text{random}[0,1] \right)$ hacer S_i = S_j;

End do;

k=k+1;

Cálculo de la longitud de (N_k);

Calculo de los parámetros de control (T_k)

Criterio de parada

Terminar;

Figura 3.16: Algoritmo Recocido Simulado

Programa de enfriamiento

Temperatura inicial: Esta característica le otorga la capacidad al método de no ser dependiente de su configuración inicial, también le hace posible salir de óptimos locales y continuar recorriendo el espacio de soluciones.

conociendo la importancia de esta variable, una selección adecuada de la misma es fundamental para el buen funcionamiento de la metodología. Existen varias formas para encontrar una temperatura inicial, a continuación se presenta la expresión de la referencia [2] la cual permite ajustar una valor para la temperatura inicial.

$$T_0 = \frac{\nabla(F+)}{\ln \left(\frac{m2}{m2 \cdot X - m1(1-x)} \right)} \quad (3.14)$$

X=Taza de aceptación

m1=número de transiciones aceptadas en una cadena

m2=número de transiciones no aceptadas en una cadena

∇(F+)=incremento medio en el costo de las m2 transiciones.

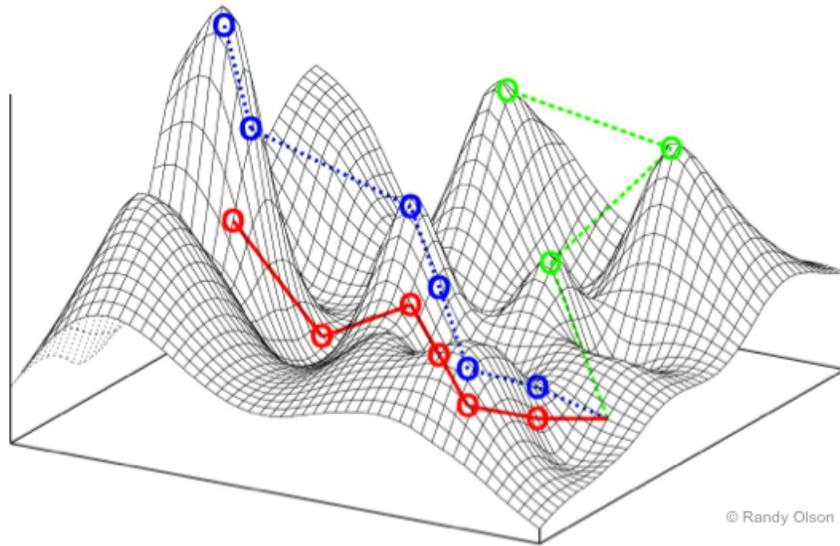


Figura 3.17: Exploración de espacio de soluciones

La anterior es solo una forma de seleccionar la temperatura inicial. Existen diversos algoritmos para ajustar este parámetro de control, para el caso de estudio se usa la metodología de Medina (2001), la cual consiste en correr una cadena de Markov con una temperatura inicial aleatoria, si el porcentaje de configuraciones aceptadas es inferior al 20 % se duplicará la temperatura inicial, de lo contrario se evalúa si el porcentaje de aceptaciones es superior al 40 %, de ser así se divide en 2 la temperatura inicial seleccionada y se repite el algoritmo, en otro caso si la cantidad de aceptaciones es inferior o igual al 40 % se acepta la temperatura como parámetro de ajuste inicio.

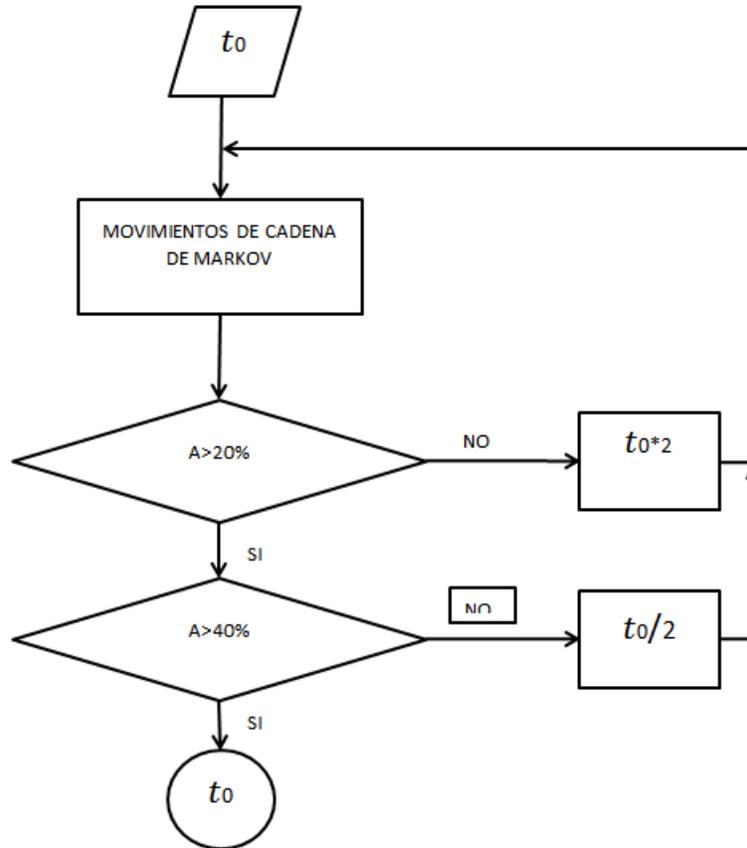


Figura 3.18: Selección de Temperatura inicial

Tasa de enfriamiento: Existen una relación entre la temperatura y la probabilidad de aceptar configuraciones propuestas, entre mas cercana la temperatura del sistema a la temperatura de enfriamiento es mas complicado que el sistema alcance el cuasi equilibrio en una estado determinado, por tanto la tasa de enfriamiento tiene un papel importante ya que entre mas cercana a 1 sea, se realizaran mas iteraciones para alcanzar la temperatura final, lo cual equivale a una mayor probabilidad de alcanzar el equilibrio del sistema.

En la literatura se recomienda usar tasas de enfriamiento en el rango de [0.8- 0.99], lo cual equivale a un enfriamiento lento, para así permitir una mayor exploración del espacio de soluciones.

Para el caso de la restauración de sistemas de distribución se implemento un sistema de enfriamiento con una tasa fija de enfriamiento muy cercana a 1, la cual se selecciona teniendo en cuenta el número de nodos y de ramas enlaces del sistema. A continuación se muestra la expresión para realizar variaciones térmicas:

$$T_{k+1} = T_k \cdot \beta \quad (3.15)$$

Para explicar el comportamiento del método ante diferentes tasas de enfriamiento, se usara el sistema de 19 nodos 3 alimentadores y 3 enlaces que se ilustra en la figura 3.19

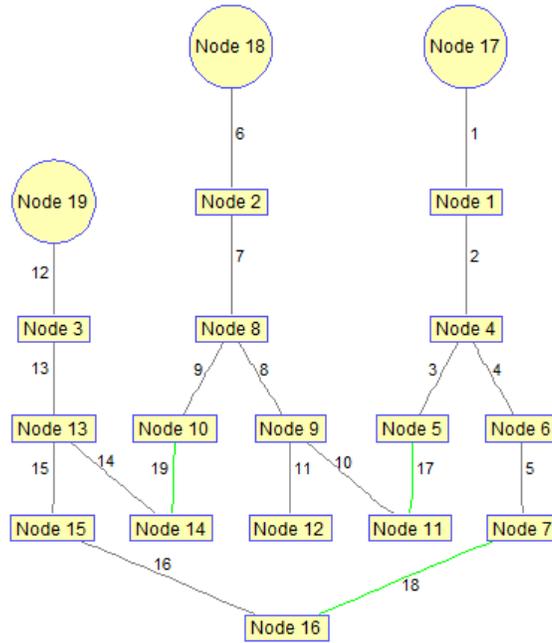


Figura 3.19: Sistema de prueba 19 nodos.

Se realizó la restauración simulando falla en la rama 13, para tasas de enfriamiento de 0.98, 0.9, 0.8 y 0.5. seguidamente se explica el comportamiento de la incumbente cuando son usadas varias tasas de enfriamiento.

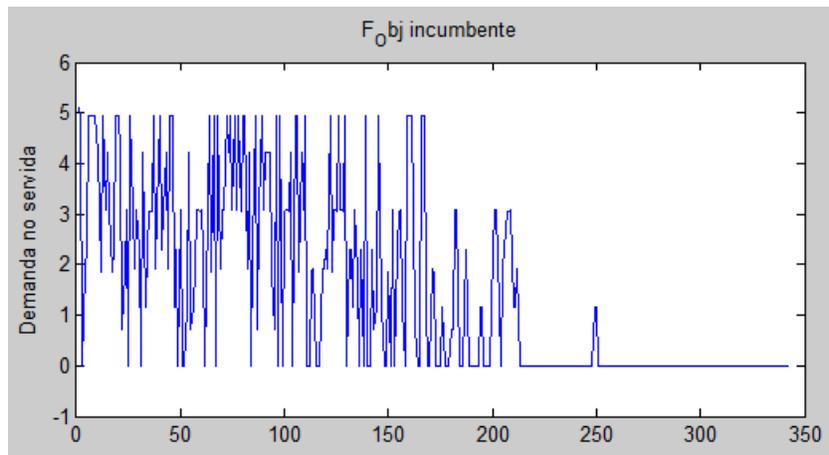


Figura 3.20: Tasa de enfriamiento de 0.98

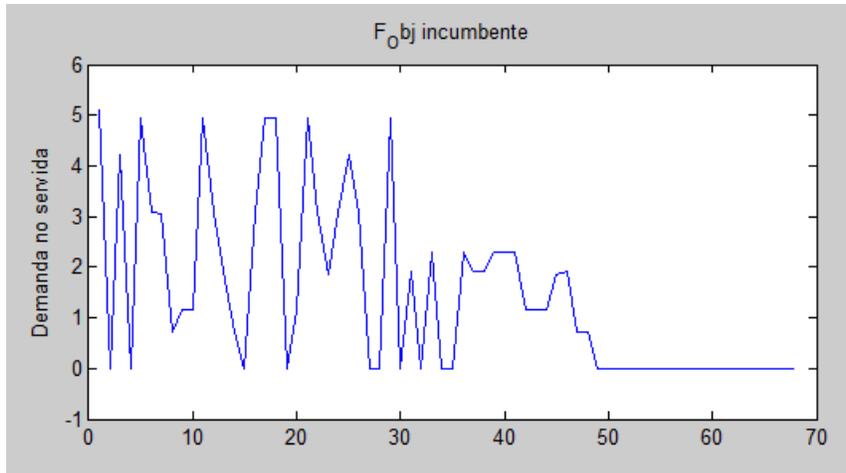


Figura 3.21: Tasas de enfriamiento de 0.9

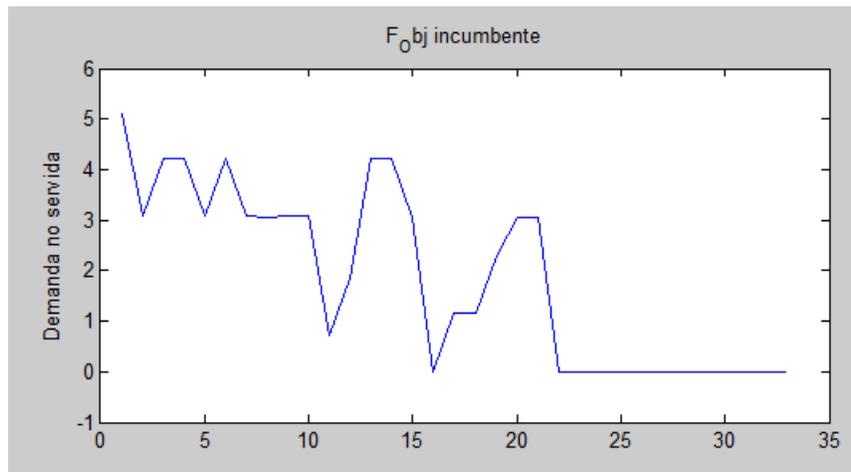


Figura 3.22: Tasas de enfriamiento de 0.8

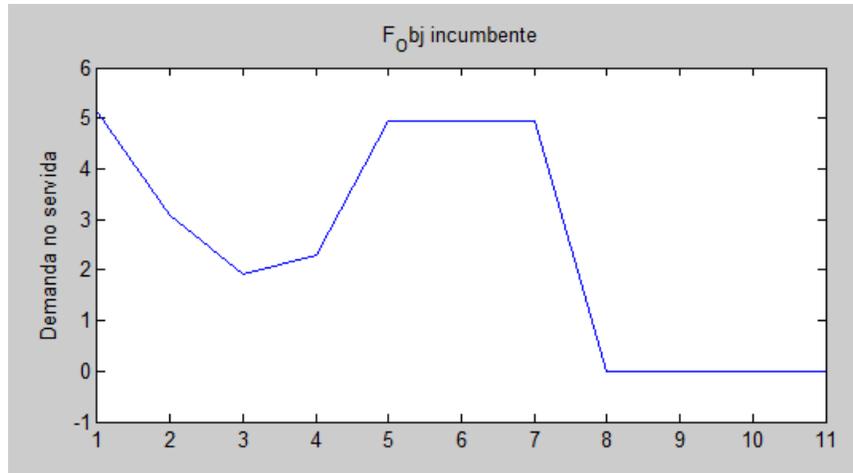


Figura 3.23: Tasas de enfriamiento de 0.5

En las figuras 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23 se ilustra el comportamiento de la incumbente al aplicar el método de recocido simulado para el problema de restauración de la figura 2.2 con falla en la rama 13. Como se puede observar en la figura 3.20 que tiene una tasa de enfriamiento de 2% lo cual equivale a un enfriamiento lento, en este caso la metodología recorre el espacio de soluciones permitiendo aceptar variaciones graduales en el valor de la función objetivo, en las figuras 3.21, 3.22 y 3.23 se observa que la incumbente experimenta una disminución de la aceptación de configuraciones y por tanto el recorrido del espacio de soluciones esto afecta el buen funcionamiento del método.

Temperatura final: La temperatura para la cual el sistema se encuentra en estado frío ($T_f=0$), nos indica que la configuración por la cual el sistema transita es de muy buena calidad o en su defecto es la óptima, sin embargo no es necesario implementar en el algoritmo el criterio de parada $T_f=0$, ya que la probabilidad de empeoramiento cuando la temperatura del sistema se acerca a cero es casi nula, por lo tanto se pueden implementar varios criterios de parada como los siguientes:

- Definir un número máximo de postulaciones sin mejora en el valor de la función objetivo para detener la búsqueda de nuevas configuraciones y definir $T_f=0$ o simplemente detener el algoritmos.
- Hacer seguimiento al valor de la función objetivo de las postulaciones y la ultima configuración aceptada con el fin de identificar la variación y así definir un número máximo de iteraciones para las que el calor de la postulación y la ultima configuración sean iguales.

Longitud de la cadena N_k : El valor de N_k , que representa el número de alternativas de nuevas transiciones, y la regla de cambio del valor de la temperatura de T_k a T_{k+1} se analizan usando el concepto de cuasi-equilibrio y las especificaciones de esos dos criterios están íntimamente relacionados. El valor de N_k debe permitir que el proceso pueda llegar al estado de cuasi-equilibrio para el nivel de temperatura T_k y la disminución de T_k a

T_{k+1} no debe ser grande con el fin de permitir restaurar el nuevo estado de cuasi-equilibrio, para el nuevo valor de temperatura. De esta forma el cuasi-equilibrio del sistema puede ser garantizado usando valores elevados de N_k y grandes disminuciones de T_k o con pequeños valores de N_k y también pequeñas disminuciones en T_k .

Una manera simple de seleccionar la longitud de la cadena es hacerlo de acuerdo con el tamaño del problema. Formas más elaboradas para seleccionar el tamaño son basadas en el concepto de que para cada nivel de temperatura T_k al menos un número mínimo de tentativas sean aceptadas; en este procedimiento se presenta el inconveniente de que cuando T_k tiende a 0, la probabilidad de aceptación decrece, por tanto $N_k \rightarrow \infty$.

Sin embargo, la mayoría de algoritmos seleccionan el valor de N_k en función de la complejidad del problema o del número de variables y ese valor puede ser mantenido constante o puede variar con la disminución de la temperatura. Así por ejemplo, dos criterios determinados para determinar la nueva longitud de la cadena N_{k+1} , ambos en función del número de variables N_0 (número de elementos candidatos), Son los siguientes:

$$N_{k+1} = \eta \cdot N_0 \quad (3.16)$$

Donde N_k fijo: $\eta \geq 1, 0$; y

$$N_{k+1} = \rho \cdot N_k \quad (3.17)$$

donde: N_k variable: $\rho \geq 1, 0$

3.5.3. Convergencia

Teóricamente se demuestra que el algoritmo de "simulated annealing" es convergente y que puede tener una probabilidad de encontrar el óptimo tan cercana a 1 como se quiera. Además, el algoritmo encuentra la solución óptima del problema independientemente del punto de partida, lo cual implica la evaluación de un número muy grande de alternativas, proporcional a la complejidad del problema. En problemas de muy alta complejidad $N_k \rightarrow \infty$. Debe tenerse en cuenta que, la calidad de la solución buscada es inversamente proporcional al tiempo requerido para obtener la convergencia a dicha solución (no se puede olvidar que la exploración exhaustiva también garantiza la solución óptima).

3.5.4. Comportamiento de la probabilidad de aceptación ($E_i > E_j$):

La probabilidad de aceptación como se puede observar en la expresión 3.13 depende de dos variables las cuales son:

- Temperatura T
- diferencia entre la valoración de la función objetivo $E_i - E_j$

A continuación vemos el comportamiento de la probabilidad de aceptación para diferentes valores de temperatura T .

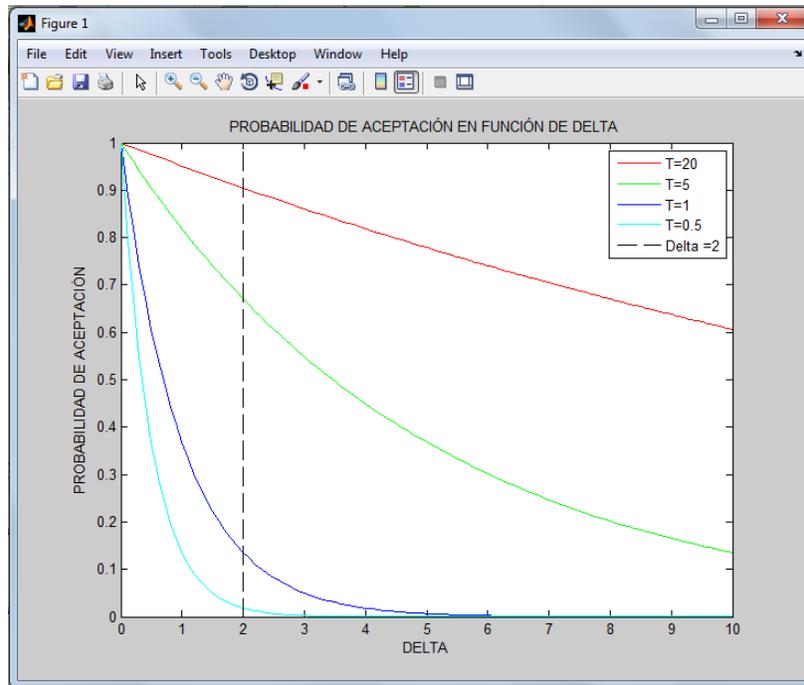


Figura 3.24: Probabilidad de aceptación en función de delta

Capítulo 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para validar los resultados obtenidos con la metodología propuesta en el capítulo 3, se presentan los resultados de las pruebas realizadas sobre el sistema de 16 nodos presentado en [3] y en [11], al cual se le hace un ajuste agregando 3 ramas sin impedancia y 3 nodos sin carga, con el fin de hacer posible la realización de la falla en el mismo nodo que el autor lo hace, para así corroborar los datos obtenidos. También se realizan pruebas sobre un sistema de distribución de 92 nodos creado con base en los datos del sistema de prueba 2 de la referencia [11]. El algoritmo computacional se implementó en MATLAB.

4.1. Caso de prueba con sistema de 19 nodos

Con el fin de verificar la validez de los resultados obtenidos aplicando las metodologías de solución propuestas en este trabajo, se comparan dichos resultados con los obtenidos por Akduman et al en [3], quien aplicó un algoritmo evolutivo y Bolaños en [11] quien solucionó el problema implementando un algoritmo heurístico; el sistema de prueba usado por estos autores consta de 3 alimentadores, 13 nodos y 16 líneas con dispositivos de apertura y/o cierre en todas las ramas; los datos y el diagrama del circuito se presentan en el anexo A.

Se debe aclarar que fue necesario agregar un nodo a cada subsistema para así permitir la ocurrencia de fallas en los nodos 1, 2 y 3 en los algoritmos implementados; al incorporar tres nodos numerados (17, 18 y 19), se incrementa el número de líneas a 19. Para que las 3 líneas adicionales no modifiquen los resultados del flujo de carga se les dio valor de impedancia cero ($Z_{19-3} = 0, Z_{18-2} = 0, Z_{17-1} = 0$) lo que convierte teóricamente en un mismo nodo, los nodos 19 y 3; 18 y 2; 17 y 1.

En la tabla 4.1 se ilustra la comparación de los resultados obtenidos

nodo	Akduman et al		Propuesto		Error(%)
	Voltaje(pu)	Angulo	Voltaje(pu)	Angulo	Magnitud
1	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000
2	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000
3	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000
4	0,991	-0,370	0,991	-0,370	0,000
5	0,988	-0,544	0,988	-0,545	0,000
6	0,986	-0,697	0,986	-0,697	0,000
7	0,985	-0,704	0,985	-0,704	0,000
8	0,978	-0,732	0,979	-0,764	0,102
9	0,971	-1,398	0,971	-1,452	0,000
10	0,976	-0,738	0,977	-0,770	0,102
11	0,970	-1,471	0,971	-1,526	0,103
12	0,968	-1,758	0,969	-1,837	0,103
13	0,994	-0,329	0,994	-0,329	0,000
14	0,995	-0,456	0,995	-0,456	0,000
15	0,992	-0,523	0,992	-0,523	0,000
16	0,991	-0,590	0,991	-0,590	0,000

Cuadro 4.1: Comparación de los resultados del flujo

Se demuestra entonces que los errores calculados al comparar los resultados obtenidos por Akduman et al y los resultados del flujo utilizado en este trabajo, son lo suficientemente pequeños como para afirmar que el flujo implementado es una herramienta confiable.

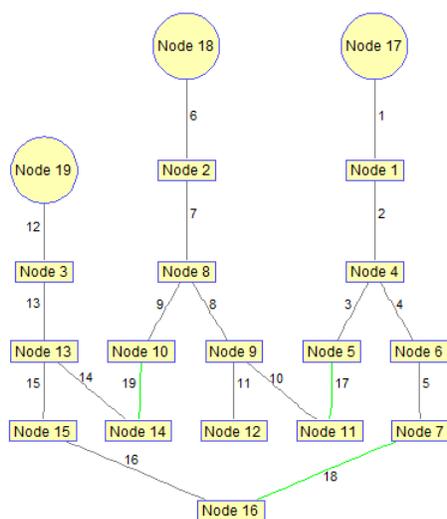


Figura 4.1: Sistema de prueba de 19 nodos

Envío	Recibo	Rama	R(pu)	X(pu)	P(MW)	Q(MVAr)	Yk
17	1	1	0	0	0	0	1
1	4	2	0,075	0,1	2	1,6	1
4	5	3	0,08	0,11	3	0,4	1
4	6	4	0,09	0,18	2	-0,4	1
6	7	5	0,04	0,04	1,5	1,2	1
18	2	6	0	0	0	0	1
2	8	7	0,11	0,11	4	2,7	1
8	9	8	0,08	0,11	5	1,8	1
8	10	9	0,11	0,11	1	0,9	1
9	11	10	0,11	0,11	0,6	-0,5	1
9	12	11	0,08	0,11	4,5	-1,7	1
19	3	12	0	0	0	0	1
3	13	13	0,11	0,11	1	0,9	1
13	14	14	0,09	0,12	1	-1,1	1
13	15	15	0,08	0,11	1	0,9	1
15	16	16	0,04	0,04	2,1	-0,8	1
5	11	17	0,04	0,04	0,6	-0,5	0
7	16	18	0,12	0,12	2,1	-0,8	0
10	14	19	0,04	0,04	1	-1,1	0

Cuadro 4.2: Impedancias de las líneas y carga en los nodos

La figura 4.2 muestra la topología resultante tras simular una falla en la rama 13

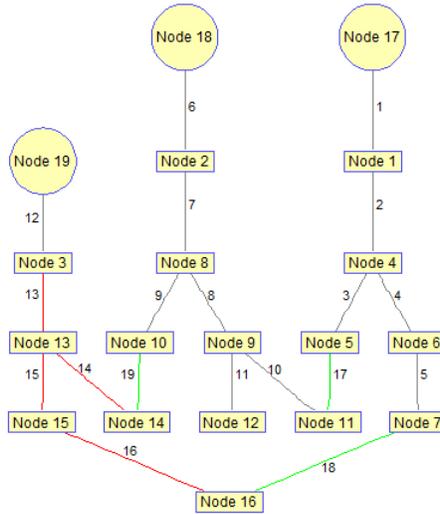


Figura 4.2: Sistema de 19 con falla en la rama 13

Para explicar el funcionamiento de los métodos búsqueda tabú y recocido simulado, se hace un seguimiento al proceso llevado a cabo por cada uno de estos métodos después de simular fallas en los sistemas de prueba.

4.2. Solución del problema de 19 nodos con restricciones no estrictas

Las variables de control definidas para la restauración del sistema se pueden observar la tabla 4.3.

Parámetros Recocido Simulado	
Temperatura inicial	10
Temperatura Final	0.2
Factor de enfriamiento	4 %
Longitud inicial de cadena de Markov	5
Factor de crecimiento de Cadena de Markov	2 %

Cuadro 4.3: Variables de control

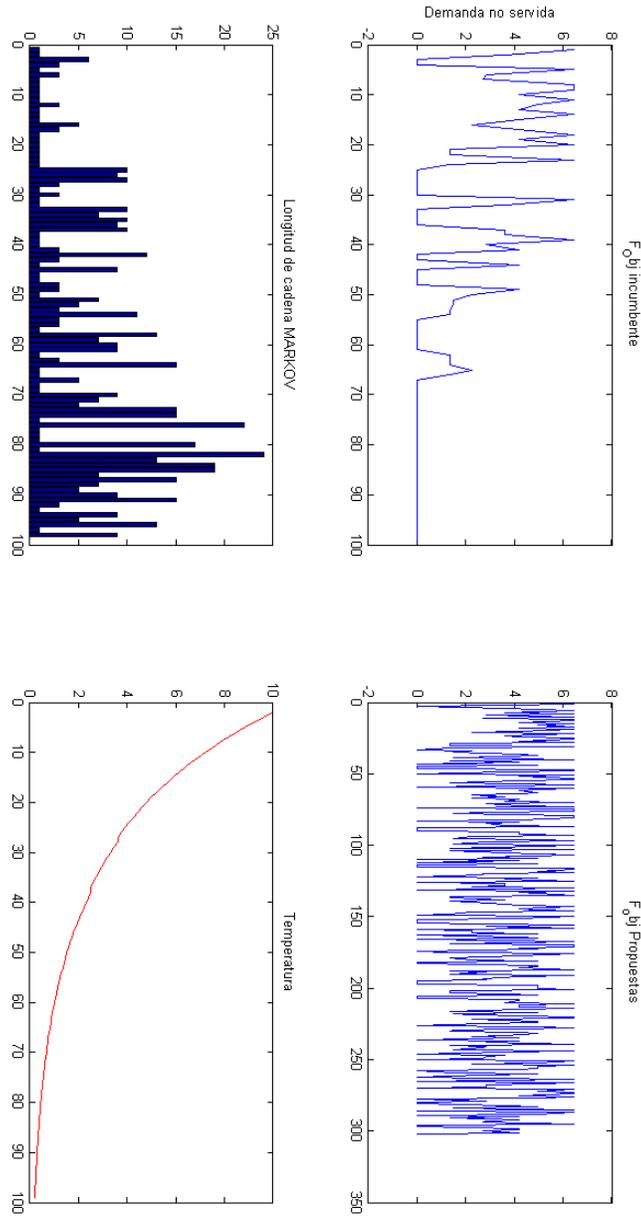


Figura 4.3: Resultados al restaurar usando Recocino simulado

Es posible observar el funcionamiento de la metodología ya que al comparar las config-

uraciones propuestas y las aceptadas al iniciar el proceso se puede observar que las gráficas son iguales lo que quiere decir que el algoritmo inicialmente acepta todas las configuraciones postuladas. Tras la disminución de la temperatura el algoritmo se torna más selectivo para así hacer posible que el método sea convergente (ver figura 4.3).

Otra característica del funcionamiento del método es que a medida que la temperatura desciende el esfuerzo computacional aumenta como se puede observar en la figura 4.4, la cual ilustra la longitud de la cadena de Markov para el sistema, hasta que alcanza el estado de equilibrio en cada nivel de temperatura.

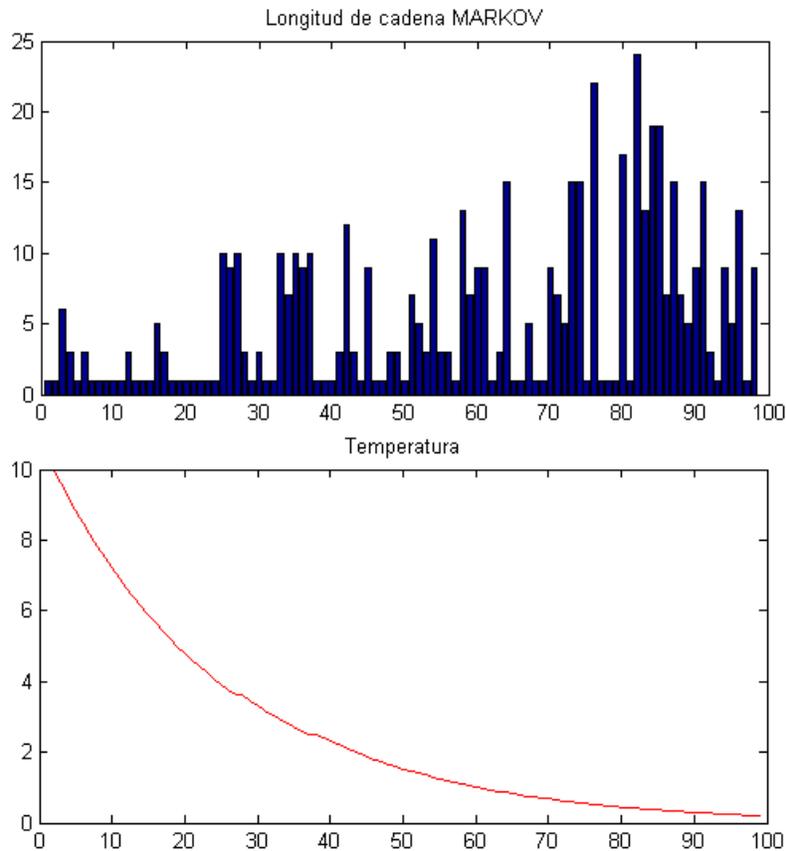


Figura 4.4: Relación Temperatura esfuerzo computacional

El sistema resultante tras la restauración se puede observar en la figura 4.5. Seguidamente se muestran los valores de voltajes de los nodos y las corrientes por las ramas para así verificar el cumplimiento de las restricciones operativas. Finalmente en la tabla 4.6 encontraremos los datos numéricos registrados para cada uno de los casos.

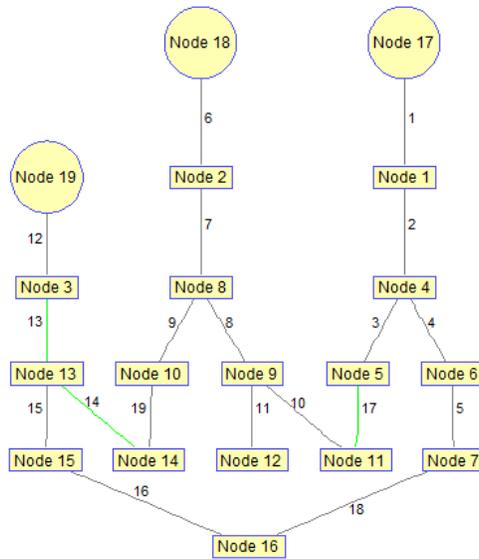


Figura 4.5: Sistema restaurado

Nondo	Voltaje(pu)	Angulo	Nondo	Voltaje(pu)	Angulo
17	1	0	18	1	0
1	1	0	2	1	0
4	0.9863	-0.5653	8	0.9791	-0.8986
5	0.9834	-0.7414	9	0.9711	-15.874
6	0.9757	-12.857	10	0.9771	-10.435
7	0.9725	-13.678	11	0.9710	-16.609
16	0.9661	-15.946	12	0.9693	-19.714
15	0.9646	-15.995	14	0.9771	-10.940
13	0.9627	-16.229			

Cuadro 4.4: Voltajes nodales del sistema de 19 nodos restaurado

Envio	Recibo	Corriente (A)	Envio	Recibo	Corriente (A)
15	13	93,16490	10	14	101,4000
16	15	186,15020	9	12	330,8000
7	16	291,60410	9	11	53,6000
6	7	414,92400	8	10	137,2000
4	6	537,19360	8	9	695,2000
4	5	205,18240	2	8	1114,5
1	4	900,03690	18	2	1114,5
17	1	900,03690			

Cuadro 4.5: Corrientes de rama del sistema de 19 nodos restaurado

Parámetros de control TS	Número de iteraciones
Prohibición Tabú	4
Número máximo de incumbentes sin mejora	10
Número de diversificaciones	10

Cuadro 4.7: Parámetros de control de búsqueda tabú

Resultados Recocido simulado	Ramas con switch abierto	Valor Función objetivo
Estado inicial	17,18,19	0
Estado tras la falla en rama 13	17,18,19,13,14,15,16	6.4
Estado tras la restauración	13,14,17	0

Cuadro 4.6: Resultados Generales del recocido simulado

para resolver este problema, búsqueda tabu hace uso de los parametros de control de la figura 4.7

a partir de estas variables, el metodo busqueda tabu hace una exploración exhaustiva en el espacio de soluciones y encuentra la misma solución obtenida por el recocido simulado, la figura 4.6 muestra la evolución de la incumbente y la historia del proceso a partir de la función objetivo.

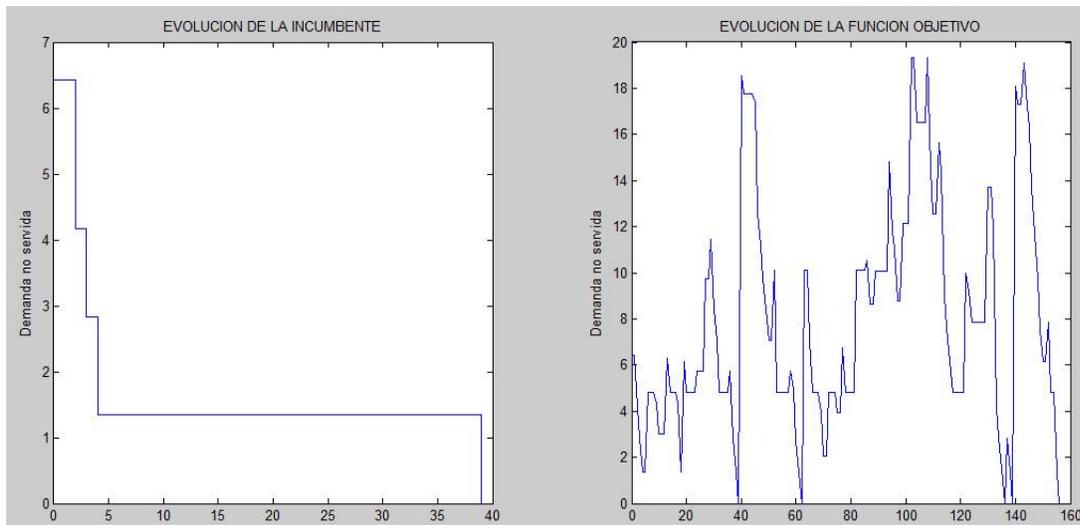


Figura 4.6: Evolución de la incumbente y la función objetivo

en la grafica anterior se muestra la evolución de la incumbente en esta se ve como la busqueda tabu tiene mas progresos al inicio del proceso que al final de este, mientras la grafica de la evolución de la funcion objetivo muestra toda la historia del proceso, en esta se pueden ver los diferentes optimos locales de los que la metodologia logra escapar al permitir el empeoramiento de su función objetivo. Debido a que las restricciones no son estrictas, la carga es restaurada en su totalidad, lo cual se logra en la iteración 40 como se ve en la figura, sin

embargo el metodo se programo para que ejecutara una diversificacion cuando encontrara este tipo de configuraciones, de esta manera se continua la busqueda con el objetivo de encontrar configuraciones diferentes que logren restaurar toda la carga.

En el Anexo C se encuentra el proceso que el metodo busqueda tabu lleva a cabo para resolver el problema de la restauración en el sistema de prueba de 19 nodos

4.3. Solución del problema de 19 nodos con restricciones estrictas

En algunos casos las fallas en sistemas de distribución pueden tener tiempos de duración extensos, en estos casos es menos recomendable operar el sistema sobrecargado, ya que los diferentes elementos que lo componen tienen datos de cargabilidad que pueden ser superados pero no se recomienda hacerlo por periodos prolongados, ya que la vida útil de los mismo está relacionada con la cargabilidad y esto puede afectar en gran parte la eficiencia de la operación y los costos de mantenimiento del sistema.

A continuación analizaremos el sistema con restricciones más estrictas con el objetivo de simular un estado de falla prolongado respetando las restricciones y operando el sistema de la mejor manera posible.

Para solucionar el problema con restricciones tales que permitan operar el sistema obtenido tras la restauración por un tiempo considerable se modificaron las variables de control de los dos métodos aplicados en el documento, a continuación se registran en la tabla 4.8 las variables de control usadas tanto las restricciones:

Parámetros Recocido Simulado	
Temperatura inicial	15
Temperatura Final	0.1
factor de enfriamiento	2%
Longitud inicial de cadena de Markov	5
Factor de crecimiento de Cadena de Markov	2%
Parámetros Búsqueda Tabú	
Tiempo Tabú	4
Número max incumbentes sin mejora	10
Numero de diversificaciones	10

Cuadro 4.8: Variables de control restricciones estrictas

En la tabla 4.8 se pueden observar el color rojo las variables que fue necesario ajustar para obtener soluciones de buena calidad con las restricciones a continuación se presentarán las diferentes respuestas obtenidas al aplicar las dos metodologías.

4.3.1. Restricciones estrictas de corriente

Solución usando Búsqueda Tabú

Al trabajar con restricciones estrictas se limita el espacio de soluciones, lo que lleva a dejar cargas sin alimentación como se muestra en la figura 4.7, en esta se puede ver que

búsqueda tabú, deja dos cargas sin restaurar las cuales suman una demanda 2.009MVA sin ser servida.

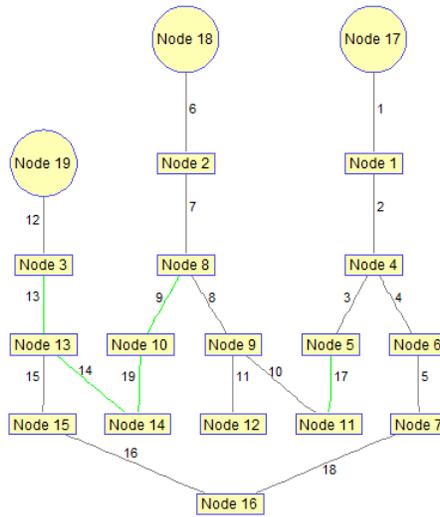


Figura 4.7: Restauración usando Recocido simulado

Restricción de corriente $I_{max}=1000A$, $V_{min}=0,95pu$											
Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	N envío	N recibo	Corriente(A)	N envío	N recibo	Corriente(A)
17	1	0	13	0,9627	-16,229	15	13	93,1649	17	1	900,0369
1	1	0	18	1	0	16	15	186,1502	9	12	330,1098
4	0,9863	-0,5653	2	1	0	7	16	291,6041	9	11	53,5042
5	0,9834	-0,7414	8	0,9812	-0,7554	6	7	414,924	8	9	693,6812
6	0,9757	-12,857	9	0,9733	-1,4411	4	6	537,1936	2	8	979,4417
7	0,9725	-13,678	11	0,9732	-1,5143	4	5	205,1824	18	2	979,4417
16	0,9661	-15,946	12	0,9715	-1,8235	1	4	900,0369			
15	0,9646	-15,995									

Cuadro 4.9: Estado operativo sistema 19 restaurado con BT

La figura 4.8, muestra la evolución de la incumbente y de la función objetivo, en estas se puede ver que a pesar de que el método logra escapar de varios óptimos locales, la restricción de corriente máxima no permiten que encuentre una configuración de mejor calidad.

En la figura 4.10 se muestra el estado de los switches y el valor de la función objetivo para cada estado.

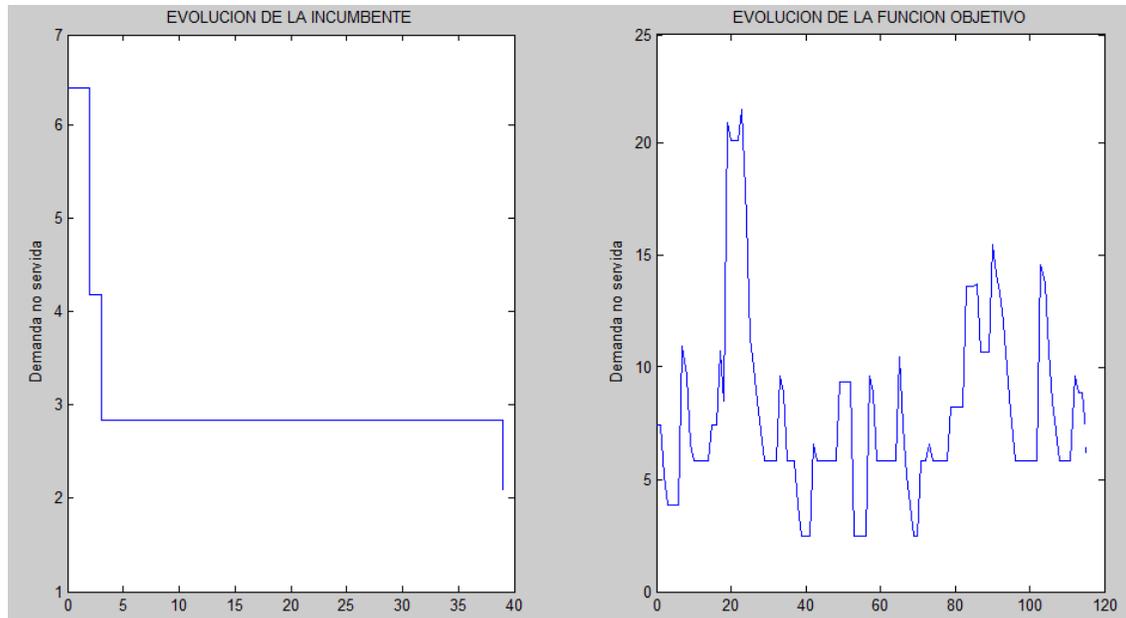


Figura 4.8: Evolución de la metodología BT

Resultados Búsqueda Tabú	Ramas con switch abierto	Valor Función objetivo
Estado inicial	17,18,19	0
Estado tras la falla en rama 13	17,18,19,13,14,15,16	6.4
Estado tras la restauración	9,11,13,14,19	2.009

Cuadro 4.10: Resultados Generales BT

Solución usando Recocido Simulado

En la figura 4.9, se observa la topología resultante tras aplicar la metodología de recocido simulado con restricción de corriente de 1000A para el problema de 19 nodos, en la cual podemos observar que se obtuvo demanda no atendida, para el caso el nodo 10.

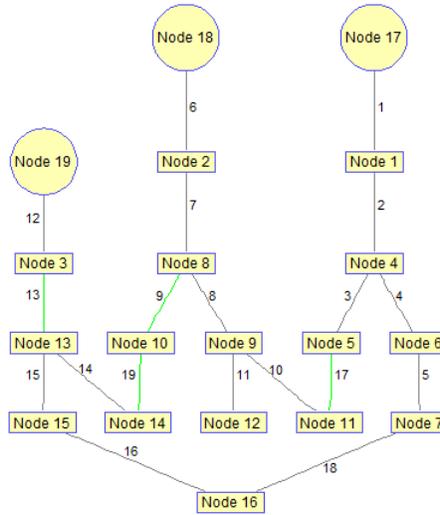


Figura 4.9: Sistema restaurado con restricciones de corriente RS

A partir de la solución obtenida se ilustran en la tabla 4.11, los datos de corrientes por las líneas y voltajes en los nodos con el fin de verificar que no se viola ninguna restricción.

Restricción de corriente $I_{max}=1000A$, $V_{min}=0,95pu$											
Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	N envío	N recibo	Corriente(A)	N envío	N recibo	Corriente(A)
17	1	0	13	0,9646	-22.702	13	14	102,6983	1	4	949,2862
1	1	0	14	0,965	-24.050	15	13	139,0435	17	1	949,2862
4	0,9865	-0,671	18	1	0	16	15	213,0899	9	12	330,1098
5	0,9836	-0,847	2	1	0	7	16	352,1148	9	11	53,5042
6	0,977	-15.570	8	0,9812	-0,7554	6	7	461,4908	8	9	693,6812
7	0,9738	-16.894	9	0,9733	-14.411	4	6	593,3658	2	8	979,4417
16	0,9676	-20.687	11	0,9732	-15.143	4	5	205,1264	18	2	979,4417
15	0,966	-21.251	12	0,9715	-18.235						

Cuadro 4.11: Estado operativo del sistema de 19 nodos obtenido con RS

En la figura 4.10, se muestra el comportamiento de las variables temperatura, longitud de la cadena de Markov y el comportamiento del valor de la función objetivo de las posturas generales y las aceptadas, en las cuales se puede observar un aumento en el esfuerzo computacional y una clara tendencia a la convergencia pero sin llegar a una solución con cero demanda no atendida.

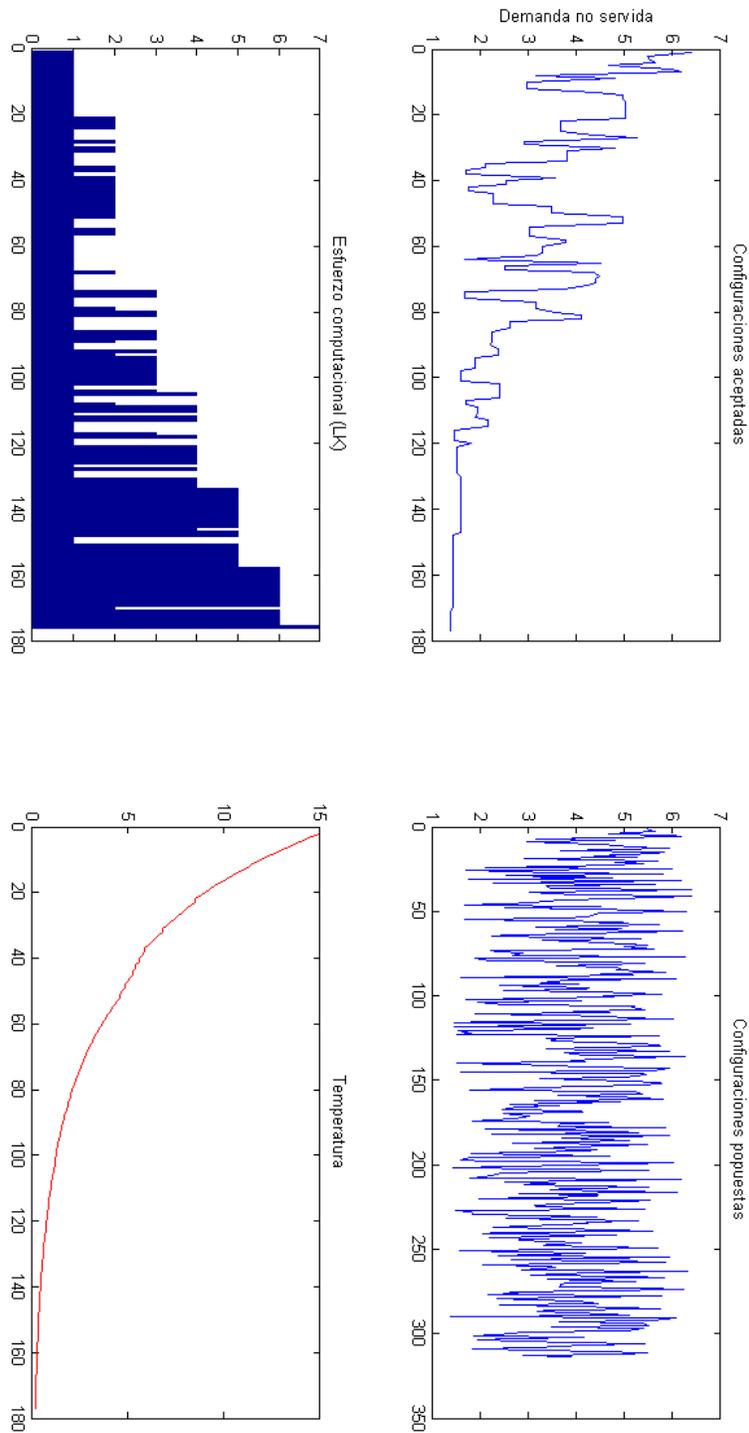


Figura 4.10: Comportamiento de las metodología RS

Finalmente se muestra en la tabla 4.12, el resumen del estado de las líneas y el valor de la función objetivo en las tres escenarios de problema estado inicial, bajo falla y restaurado.

Resultados Recocido Simulado	Ramas con switche abierto	Valor Función objetivo
Estado inicial	17,18,19	0
Estado tras la falla en rama 13	17,18,19,13,14,15,16	6.4
Estado tras la restauración	9,13,17,19	1.3454

Cuadro 4.12: Resultados Generales RS

4.3.2. Restricciones estrictas de Voltaje

Solución usando Búsqueda Tabú

Para este caso, la búsqueda tabú deja sin alimentar un solo nodo, pero su carga es mayor que la totalidad de la demanda no servida para el caso de la restricción estricta de corriente.

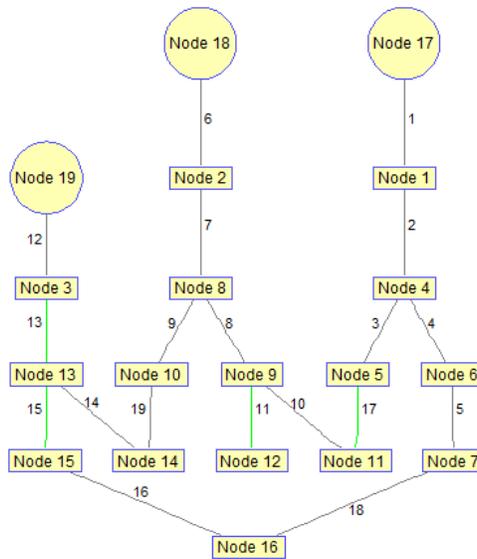


Figura 4.11: Sistema restaurado restricción fuerte en voltaje

Restricción de voltaje $V_{min}=0.9715pu$, $I_{max}=1500A$											
Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	N envío	N recibo	Corriente(A)	N envío	N recibo	Corriente(A)
17	1	0	15	0.9731	-1,5562	16	15	92,1722	17	1	845,5243
1	1	0	18	1	0	7	16	212,3783	14	13	92,1204
4	0.9881	-0,6022	2	1	0	6	7	326,9988	10	14	137,4425
5	0.9853	-0,8400	8	0,9806	-0,4365	5	11	52,8497	8	10	210,6255
6	0.9802	-1,2583	9	0,9744	-0,6799	4	6	454,7551	8	9	363,5703
11	0.9852	-0,8659	10	0,9764	-0,5878	4	5	243,7021	2	8	892,8223
7	0.9778	-1,3372	14	0,9757	-0,6407	1	4	845,5243	18	2	892,8223
16	0.9739	-1,5538	13	0,9736	-0,6643						

Cuadro 4.13: Estado operativo restricción de voltaje RS

La figura 4.12, muestra la evolución de la función objetivo y como la metodología intenta varias veces obtener una configuración de mejor calidad, pero se encuentra con un límite estricto de voltaje que no le permite alimentar la carga en su totalidad.

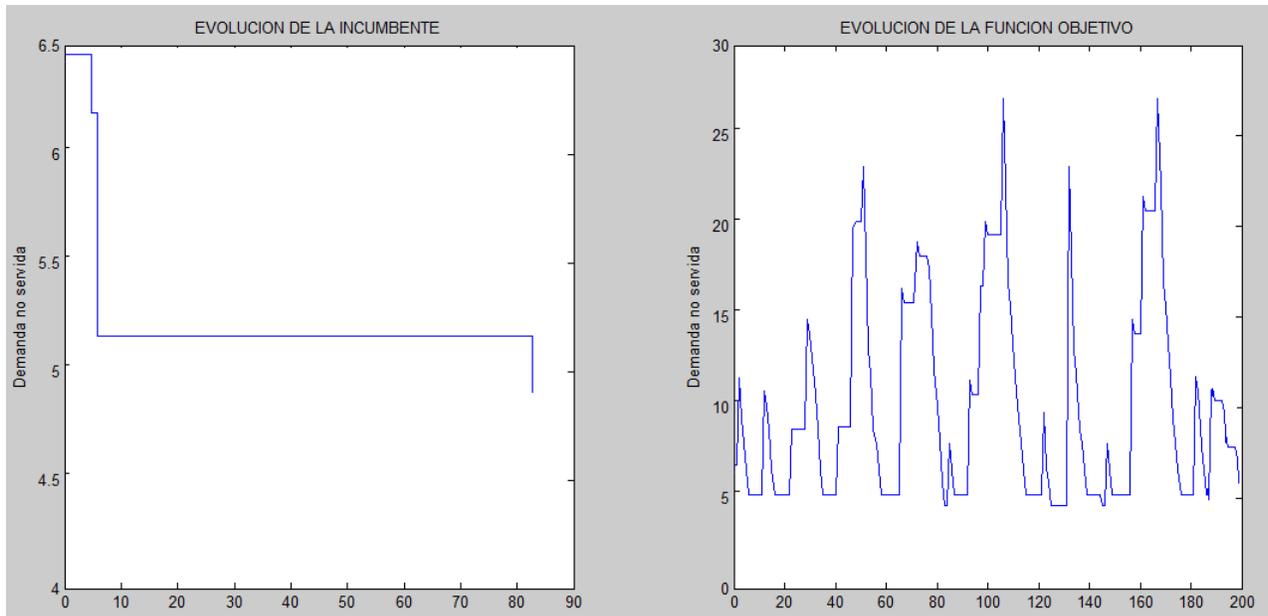


Figura 4.12: Evolución de la metodología BT

Resultados Búsqueda Tabú	Ramas con $Y_k=0$	Valor Función objetivo
Estado inicial	17,18,19	0
Estado tras la falla en rama 13	17,18,19,13,14,15,16	6.4
Estado tras la restauración	13,11,15,17	4.8104

Cuadro 4.14: Resultados Generales BT

Solución usando Recocido Simulado

En la solución del problema de 19 nodos usando la metodología de recocido simulado se encontraron una configuración similar a la obtenida aplicando la metodología de búsqueda tabú con restricciones de voltaje, como se puede observar en las figuras 4.11 y 4.13, en las cuales se puede ver que las dos metodologías dejaron la demanda del nodo 12 desatendida y las diferencia es la alimentación de la demanda del nodo 11 la cual es realizada por la rama 10 para recocido simulado y por 17 en búsqueda tabú.

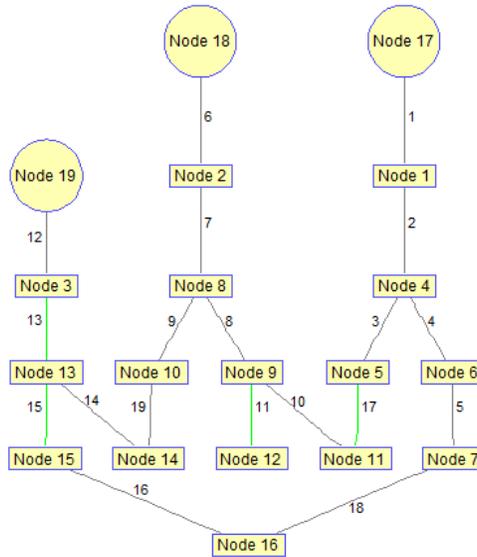


Figura 4.13: Sistema restaurado restricción fuerte en voltaje

Con el fin de corroborar que no se hallan violado ninguna restricción en la tabla 4.15, se registran los datos de corriente por la líneas y voltajes en los nodos.

Restricción de voltaje $V_{min}=0.9715pu$, $I_{max}=1500$											
Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	N envío	N recibo	Corriente(A)	N envío	N recibo	Corriente(A)
17	1	0	18	1	0	16	15	92,1754	14	13	92,1335
1	1	0	2	1	0	7	16	212,3858	10	14	137,4620
4	0,9880	-0,5457	8	0,9804	-0,5071	6	7	327,0104	9	11	53,4446
5	0,9852	-0,7211	9	0,9744	-0,8142	4	6	454,7711	8	10	210,6554
6	0,9802	-1,2018	10	0,9763	-0,6585	4	5	204,8105	8	9	393,4035
7	0,9778	-1,2807	11	0,9742	-0,8873	1	4	813,4297	2	8	918,4434
16	0,9738	-1,4973	14	0,9755	-0,7115	17	1	813,4297	18	2	918,4434
15	0,9730	-1,4997	13	0,9735	-0,7350						

Cuadro 4.15: Resultados con restricciones de voltaje

El comportamiento de las variables temperatura, longitud de la cadena de Markov y los valores de la función objetivo postuladas generales y aceptadas se puede observar en la figura 4.14, en la cual se puede observar una clara tendencia a la convergencia o pero de nuevo una solución con con demanda no atendida o valor de función objetivo diferente de cero.

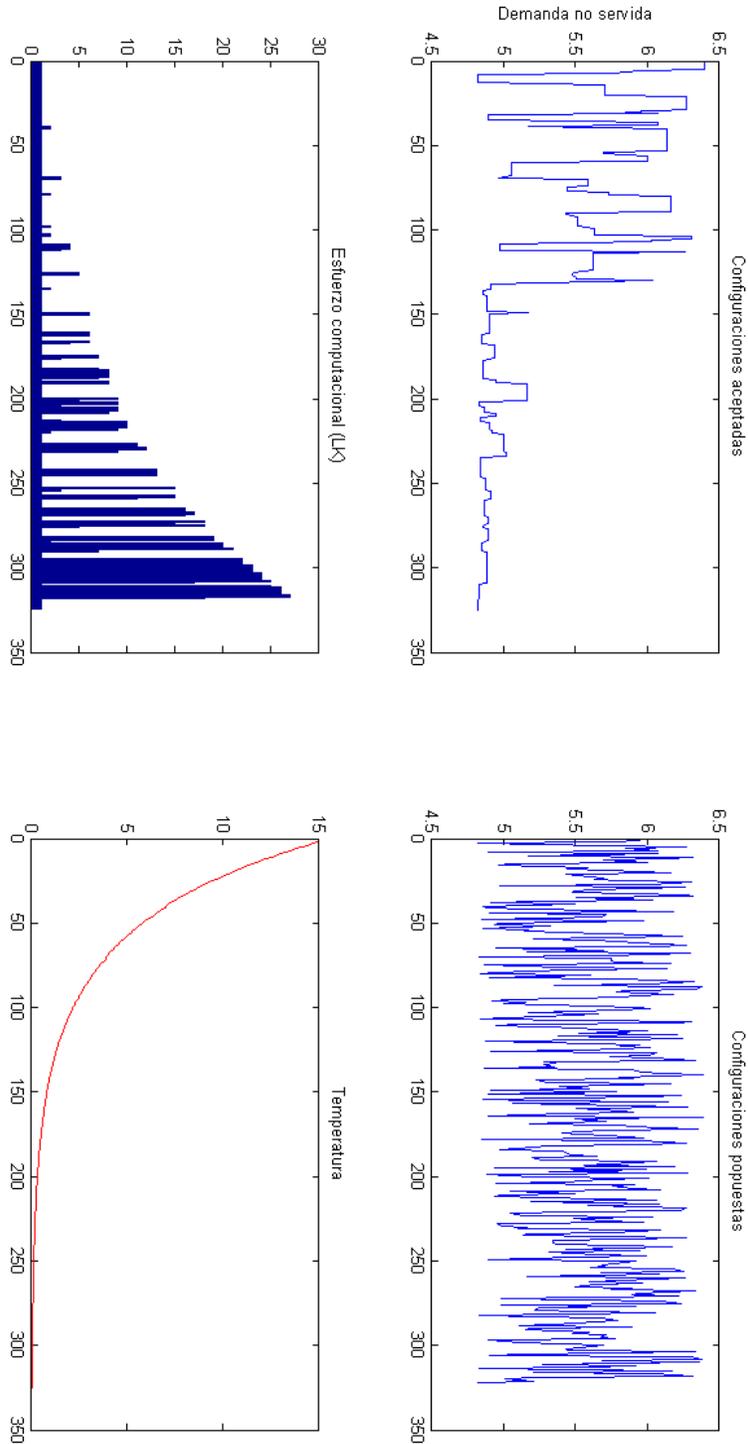


Figura 4.14: Restauración del sistema de 19 nodos con restricciones de voltaje RS

Finalmente se muestra en la tabla 4.16, el resumen del estado de las líneas y el valor de la función objetivo en las tres escenarios de problema estado inicial, bajo falla y restaurado.

Resultados Recocido Simulado	Ramas con $Y_k=0$	Valor Función objetivo
Estado inicial	17,18,19	0
Estado tras la falla en rama 13	17,18,19,13,14,15,16	6.4
Estado tras la restauración	10,11,13,15	4.8104

Cuadro 4.16: Resultados generales RS

4.4. Caso de prueba con sistema de 92 nodos

El segundo sistema de prueba esta formado por 92 nodos, 2 alimentadores y 19 enlaces, este sistema de prueba esta basado en los datos de la referencia [11]. En la figura 4.15 se ilustra la topología del sistema en su estado normal de operación.

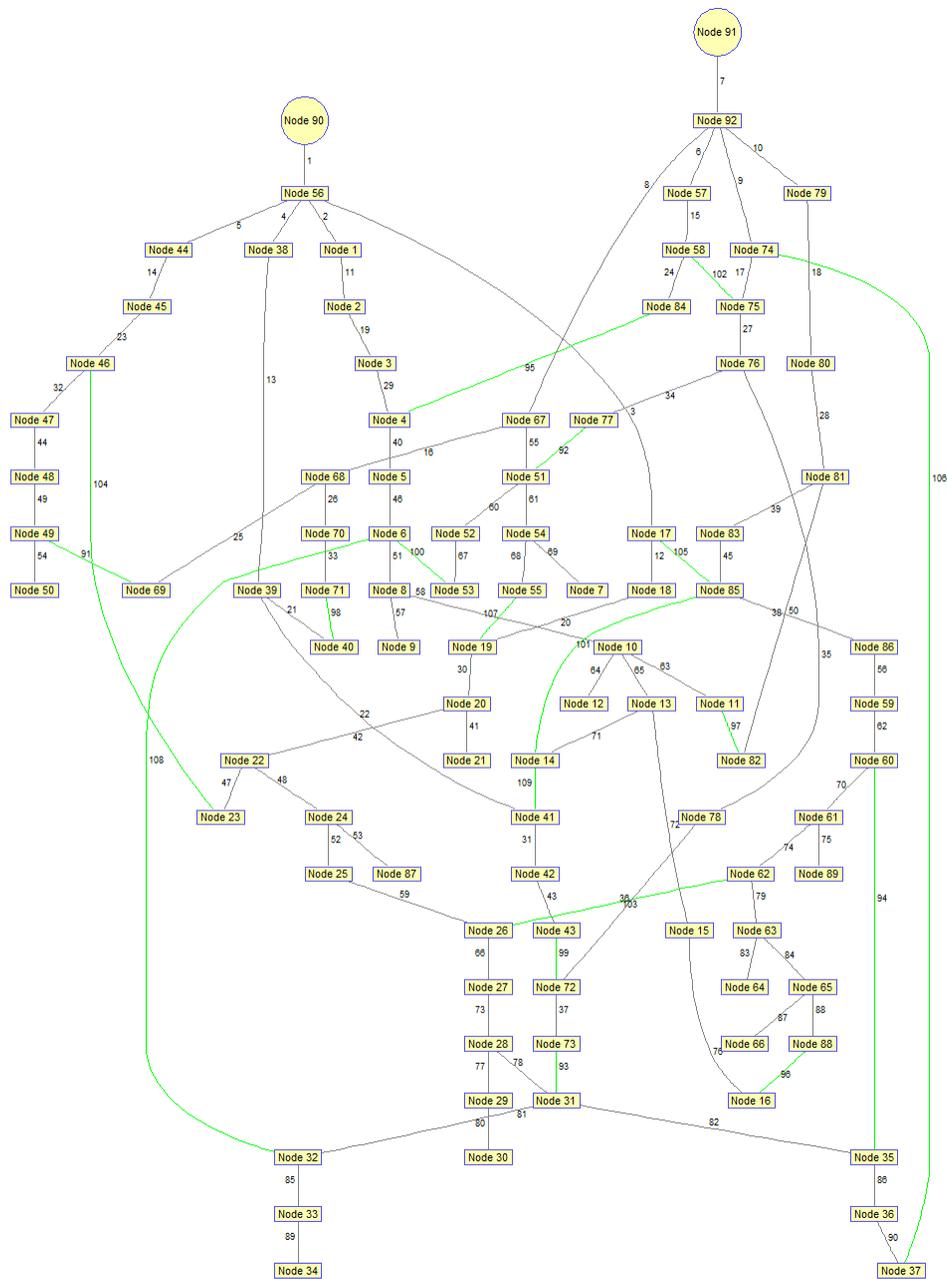


Figura 4.15: Sistema de prueba 2

En este caso se aplicó la metodología de restauración tras simular una falla en la rama 11, en la figura 4.16 se puede observar el sistema bajo falla.

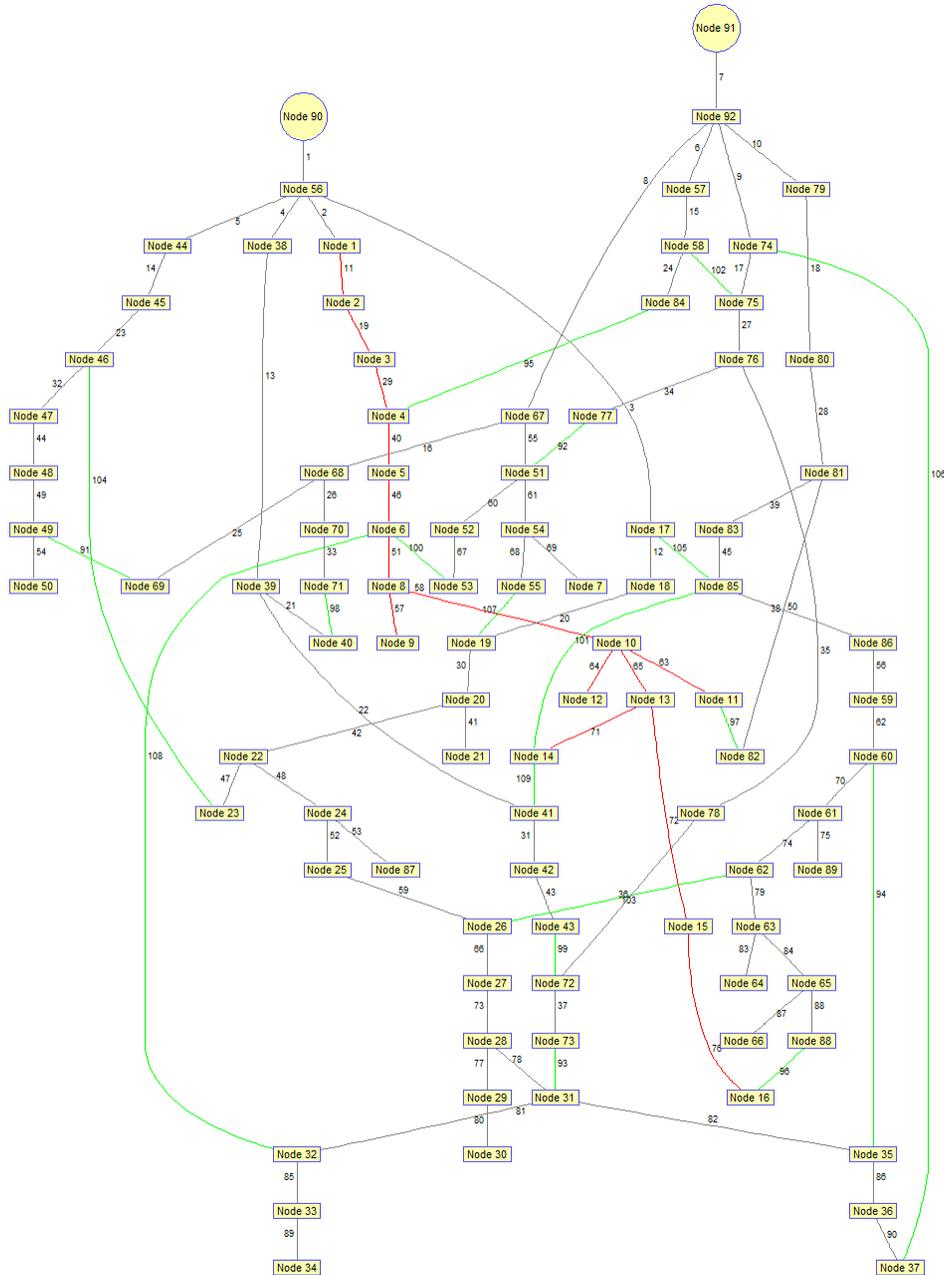


Figura 4.16: Sistema de prueba 2 bajo falla

4.5. Solución del problemas de 92 nodos con restricciones no estrictas

La figura 4.17, ilustra el comportamiento de las variables temperatura, longitud de cadena de Markov y se observa el comportamiento del valor de la función objetivo y las configuraciones propuestas, las configuraciones aceptadas y las postuladas.

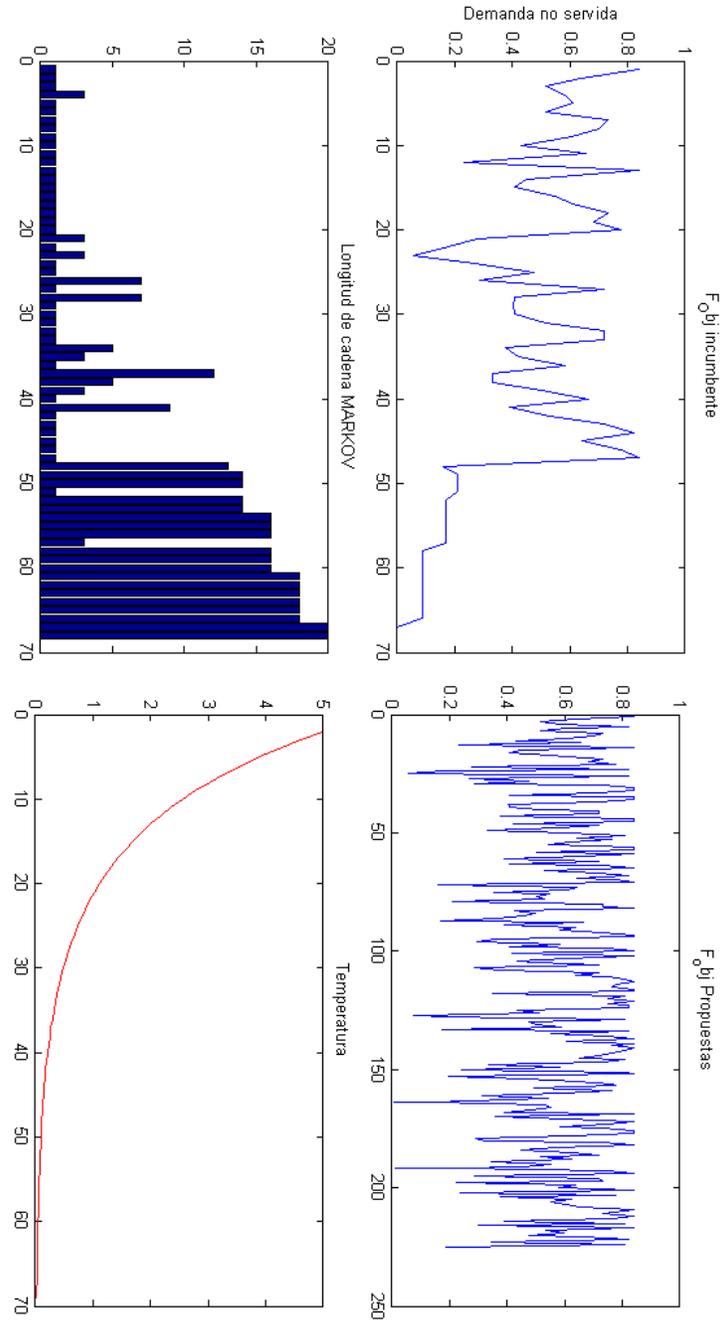


Figura 4.17: Resultados de aplicación de la metodología de Recocido Simulado

La figura 4.18 muestra la evolución de la incumbente y de la función objetivo al restaurar el sistema usando búsqueda tabú.

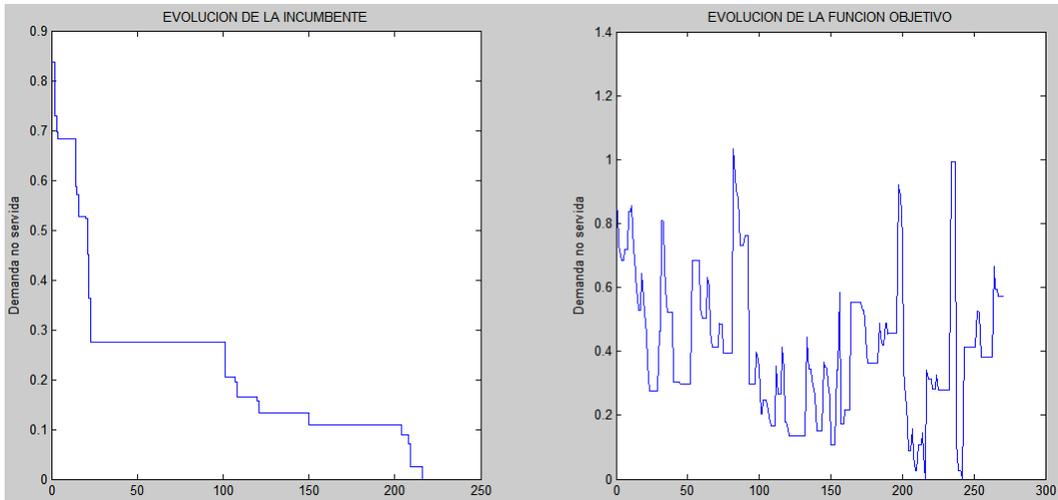


Figura 4.18: Resultados de la aplicación de búsqueda tabú

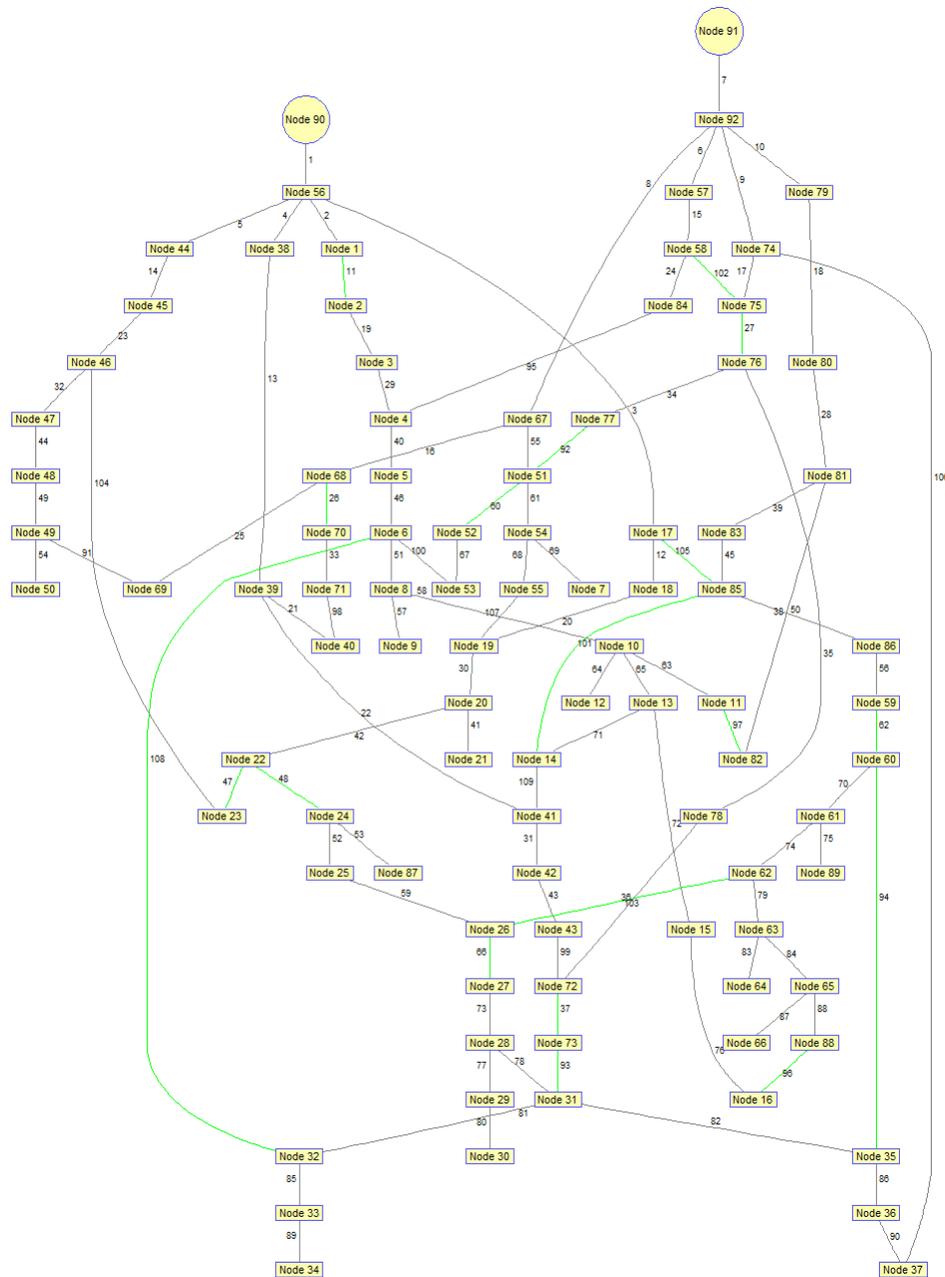


Figura 4.19: Sistema de prueba 2 restaurado

Para verificar el correcto funcionamiento de la metodología ilustraremos el estado operativo tras la restauración en la tablas 4.17 veremos el valor los voltajes nodales y en la tabla 4.19 encontraremos las corrientes de rama.

Nodos	Voltaje	Angulo	Nodos	Voltaje	Angulo
90	1	0	51	0,999	-0,0094
56	0,9999	-0,0066	75	0,9999	-0,0074
1	0,9999	-0,0066	37	0,9997	-0,0133
17	0,9988	-0,0652	80	0,9949	-0,2685
38	0,9978	-0,1206	84	0,9983	-0,0855
44	0,9998	-0,0093	52	0,9979	-0,0161
18	0,9988	-0,0656	76	0,9998	-0,0088
39	0,9971	-0,1612	36	0,9991	-0,0144
45	0,9980	-0,1071	81	0,9946	-0,2861
19	0,9980	-0,1051	4	0,9981	-0,0869
40	0,9928	-0,1438	53	0,9963	-0,0255
41	0,9971	-0,1616	77	0,9998	-0,0086
46	0,9957	-0,2279	78	0,9998	-0,0089
20	0,9978	-0,1146	35	0,9984	-0,0156
55	0,9979	-0,1056	82	0,9945	-0,2853
71	0,9926	-0,1445	83	0,9945	-0,2936
42	0,9970	-0,1645	3	0,9981	-0,0883
14	0,9960	-0,2247	5	0,9979	-0,0948
47	0,9941	-0,3161	6	0,9958	-0,0563
23	0,9956	-0,2281	31	0,9982	-0,0192
21	0,9975	-0,1151	85	0,9938	-0,328
22	0,9976	-0,1231	2	0,998	-0,0901
54	0,9976	-0,1048	8	0,9957	-0,0583
70	0,9926	-0,1442	28	0,9981	-0,0207
43	0,9968	-0,1656	32	0,9981	-0,0193
13	0,9953	-0,2286	86	0,9931	-0,3693
48	0,9925	-0,3996	9	0,9956	-0,059
24	0,9976	-0,124	10	0,9956	-0,0611
7	0,9976	-0,1063	27	0,9981	-0,0211
72	0,9967	-0,1706	29	0,998	-0,0208
15	0,9953	-0,2298	33	0,9978	-0,0199
49	0,9918	-0,4402	59	0,9928	-0,3871
25	0,9976	-0,124	11	0,9955	-0,0616
87	0,9976	-0,1241	12	0,9952	-0,06
73	0,9967	-0,1749	26	0,9981	-0,0214
16	0,9952	-0,2304	30	0,998	-0,0209
50	0,9918	-0,4423	34	0,9977	-0,02
69	0,9910	-0,4815	60	0,9916	-0,4529
91	1	0	61	0,9913	-0,467
92	1	-0,0018	62	0,9897	-0,5053
57	0,9999	-0,003	89	0,9912	-0,4733
67	0,9999	-0,0037	63	0,9889	-0,524
74	0,9999	-0,0041	64	0,9888	-0,5244
79	0,9999	-0,0063	65	0,9887	-0,528
58	0,9985	-0,0844	66	0,9884	-0,5292
68	0,9998	-0,0097	88	0,9886	-0,5297

Cuadro 4.17: Voltajes nodales

Resultados Recocido simulado	Ramas con switche abierto	Valor Fobj
Estado inicial	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109	0
Estado tras la falla en rama 13	11,19,26,27,29,37,40,46,47,48,51,57,58,60,62,63,64 64,65,66,71,72,76, 92,93,94,96,97,101,102,103,105,108	0.8392
Estado tras la restauración	12, 26, 27, 37, 47, 48, 60, 62, 66, 92, 93 94, 96, 97, 101, 102, 103, 105, 108	0

Cuadro 4.18: Resultados Generales RS en el Sistema de prueba 2

N envio	N recibo	Corriente(A)	N envio	N recibo	Corriente(A)
49	69	27,6985	59	60	47,3474
49	50	5,2527	33	34	9,8349
15	16	4,7718	29	30	1,4131
72	73	1,9244	27	26	1,413
24	87	2,9888	10	12	5,9896
24	25	0	10	11	2,8042
48	49	35,9666	86	59	50,811
13	15	9,9486	32	33	9,8349
43	72	1,9754	28	29	4,4991
54	7	1,7399	28	27	10,4526
22	24	5,9775	8	10	12,1599
47	48	38,4674	8	9	2,9905
14	13	16,9497	85	86	52,6699
42	43	3,4946	31	32	11,9529
71	70	11,1475	31	28	14,9517
55	54	3,4797	6	8	16,6499
20	22	7,4718	3	2	1,1424
20	21	5,7269	83	85	53,2002
46	23	5,7378	35	31	26,9045
46	47	40,4652	53	6	20,2229
41	14	24,2409	4	5	7,463
41	42	6,3498	4	3	2,162
40	71	20,5129	81	83	55,1467
19	55	13,2069	81	82	3,067
19	20	13,9427	36	35	26,9045
45	46	48,1923	76	78	0,0508
39	41	30,5895	76	77	0,2180
39	40	20,6664	52	53	20,3459
18	19	27,1300	84	4	11,7088
44	45	55,2338	80	81	59,4476
38	39	51,2841	37	36	31,3898
17	18	27,1300	75	76	1,7178
56	44	55,2338	51	52	20,9067
56	38	51,2841	58	84	14,1318
56	17	27,1300	79	80	61,795
56	1	0,0000	74	37	37,3813
90	56	133,6403	74	75	2,9575
65	88	5,9557	67	51	22,8957
65	66	6,0507	67	68	2,1722
63	65	17,9615	57	58	16,5546
63	64	2,1301	92	79	61,795
62	63	26,9223	92	74	40,3352
61	89	7,3206	92	67	25,0674
61	62	30,3693	92	57	16,5546
60	61	45,0096	91	92	143,7048

Cuadro 4.19: Corrientes por las ramas del sistema de prueba 2

4.6. Solución del problema de 92 nodos con restricciones estrictas

En algunos casos las fallas en sistemas de distribución pueden tener tiempos de duración extensos, en estos casos es menos recomendable operar el sistema sobrecargado, ya que los diferentes elementos que lo componen tienen datos de cargabilidad que pueden ser superados pero no se recomienda hacerlo por periodos prolongados, ya que la vida útil de los mismos está relacionada con la cargabilidad y esto puede afectar en gran parte la eficiencia de la operación y los costos de mantenimiento del sistema.

A continuación analizaremos el sistema con restricciones más estrictas con el objetivo de simular un estado de falla prolongado respetando las restricciones y operando el sistema de la mejor manera posible.

4.6.1. Restricciones de corriente

Solución usando Búsqueda Tabú:

Tras simular falla en la rama 11, la metodología inicia su proceso de restauración, implementando inicialmente la intensificación la cual ingresa carga hasta encontrarse con la restricción impuesta, esto se puede ver en la evolución de la incumbente (4.21), ya que tiene un progreso vertiginoso al inicio del proceso, pero a medida que recorre el espacio de soluciones las mejoras en la incumbente se hacen menos frecuentes, por lo que la intensificación deslastra carga para salir de óptimos locales e inclusive se diversifica con mayor frecuencia, sin embargo el método no encuentra una configuración que logre alimentar la carga en su totalidad, debido a que la restricción de corriente no lo permite. finalmente propone como mejor solución a una configuración que deja 6 nodos sin conexión que en total suman una demanda de 0,2954MVA sin ser servida como se puede observar en la figura 4.20.

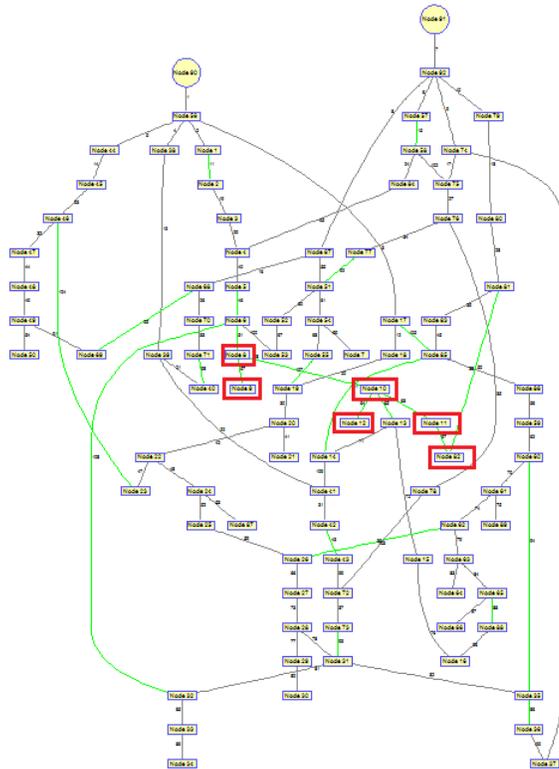


Figura 4.20: Sistema de 92 nodos restaurado usando BT

Adicionalmente en las tablas 4.20 y 4.21, se presentan los datos de voltajes en los nodos y corrientes pos las ramas para así garantizar que se cumplen todas las restricciones.

Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	Nodos	Voltaje(pu)	Angulo
90	1	0	51	0,998	-0,0153
56	0,9999	-0,0063	80	0,997	-0,1611
1	0,9999	-0,0063	84	0,9968	-0,1647
17	0,9986	-0,069	75	0,9968	-0,1639
38	0,9977	-0,1273	70	0,9986	-0,075
44	0,9998	-0,0085	52	0,9964	-0,0221
18	0,9986	-0,0693	54	0,9979	-0,0214
39	0,9969	-0,1705	77	0,998	-0,0153
45	0,9984	-0,087	81	0,9968	-0,1713
19	0,9977	-0,1115	4	0,9965	-0,1661
40	0,9949	-0,1625	74	0,9966	-0,175
41	0,9969	-0,171	76	0,9968	-0,1679
46	0,9966	-0,1803	53	0,9941	-0,0317
20	0,9973	-0,1321	55	0,997	-0,0188
71	0,9949	-0,1628	7	0,9978	-0,0229
42	0,9969	-0,1724	82	0,9965	-0,1702
14	0,995	-0,2797	83	0,9967	-0,1751
47	0,9952	-0,2566	3	0,9965	-0,1676
21	0,997	-0,1327	5	0,9964	-0,174
22	0,9968	-0,1592	37	0,9965	-0,1776
13	0,9937	-0,2868	78	0,9966	-0,1786
48	0,9939	-0,3282	6	0,9933	-0,0752
23	0,9966	-0,1595	11	0,9965	-0,171
24	0,9967	-0,1618	85	0,9964	-0,1916
15	0,9935	-0,2901	2	0,9965	-0,1693
49	0,9932	-0,3625	36	0,9965	-0,1778
25	0,9966	-0,1656	72	0,9965	-0,1804
16	0,993	-0,2926	8	0,9932	-0,0768
69	0,9925	-0,4037	32	0,9927	-0,1041
26	0,9966	-0,1672	86	0,996	-0,2113
88	0,9925	-0,3193	35	0,9965	-0,1778
27	0,9965	-0,1697	73	0,9964	-0,1846
65	0,9924	-0,3227	43	0,9965	-0,1842
28	0,9965	-0,1698	9	0,9931	-0,0776
66	0,9921	-0,324	10	0,9932	-0,079
29	0,9964	-0,1699	33	0,9924	-0,1046
91	1	0	59	0,9959	-0,2194
92	1	-0,0016	12	0,9928	-0,078
57	0,9999	-0,004	34	0,9923	-0,1047
67	0,9999	-0,006	60	0,9954	-0,2469
79	0,9999	-0,0043	61	0,9953	-0,2524
58	0,9969	-0,1636	62	0,9947	-0,2653
68	0,9992	-0,0427	63	0,9945	-0,27

Cuadro 4.20: Datos de voltajes BT

N envío	N recibo	Corriente(A)	N envío	N recibo	Corriente(A)
28	29	3,091	32	33	9,8881
65	66	6,0281	8	10	9,3786
27	28	3,091	8	9	2,9979
88	65	11,9611	72	43	1,5198
26	27	12,1451	72	73	1,9248
16	88	17,8932	36	35	0
25	26	13,5602	85	86	25,1467
49	69	27,6584	6	32	12,0175
15	16	22,6744	6	8	13,8796
24	25	13,5602	78	72	3,4956
48	49	30,6725	37	36	4,4972
13	15	27,8598	3	2	1,1442
22	24	16,5517	83	85	25,6756
22	23	5,732	82	11	2,8013
47	48	33,1696	53	6	29,458
14	13	34,8723	76	78	3,5465
20	22	23,7793	74	37	10,5079
20	21	5,7298	4	5	7,4746
46	47	35,1649	4	3	2,1654
41	14	42,1705	81	83	27,6179
41	42	2,8556	81	82	5,8579
40	71	9,3445	54	7	1,7394
19	20	30,2535	54	55	9,7365
45	46	37,1573	52	53	29,5812
39	41	45,026	75	76	5
39	40	9,4976	75	74	10,5079
18	19	30,2535	84	4	11,7271
44	45	44,1968	80	81	34,71
38	39	54,5531	51	77	0,2184
17	18	30,2535	51	54	13,2152
56	44	44,1968	51	52	30,1425
56	38	54,5531	68	70	11,0801
56	17	30,2535	58	75	16,7459
56	1	0	58	84	14,1539
90	56	128,966	79	80	37,0528
62	63	6,7917	67	51	45,562
61	62	10,2212	67	68	13,2536
60	61	17,5117	57	58	33,3159
59	60	19,8405	92	79	37,0528
33	34	9,8881	92	67	58,8156
10	12	6,0043	92	57	33,3159
86	59	23,2933	91	92	129,1798

Cuadro 4.21: Datos de Corriente BT

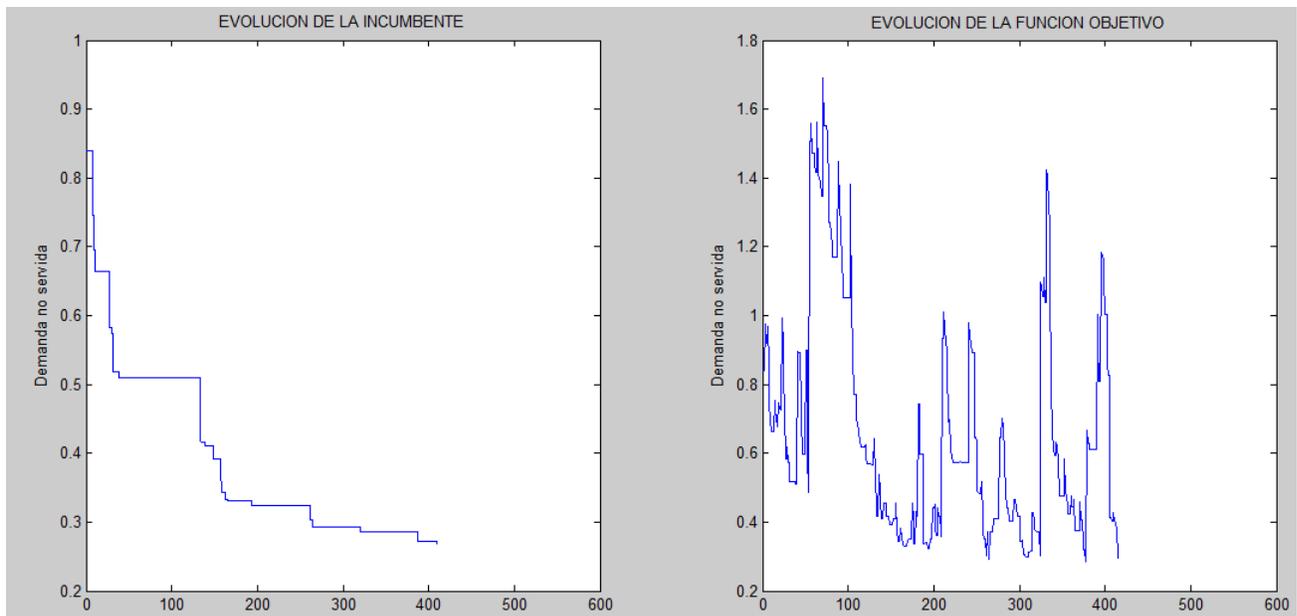


Figura 4.21: Evolución del algoritmos BT

Resultados Búsqueda Tabú	Ramas con switche abierto	Valor Fobj
Estado inicial	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109	0
Estado tras la falla en rama 13	11,19,26,27,29,37,40,46,47,48,51,57,58,60,62,63,64 64,65,66,71,72,76, 92,93,94,96,97,101,102,103,105,108	0.8392
Estado tras la restauración	11, 15, 25, 38, 43, 46, 51, 57, 58, 63, 64, 65, 86, 88, 92, 93, 94, 97, 98, 101, 103, 104, 105, 107, 108	0.2944

Cuadro 4.22: Resultados generales búsqueda tabú

Solución usando Recocido Simulado:

En las figura 4.22, se ilustra la topología del sistema restaurado aplicando la metodología de recocido simulado, para mayor claridad en el análisis se encerraron el cuadros rojos los nodos desenergizados.

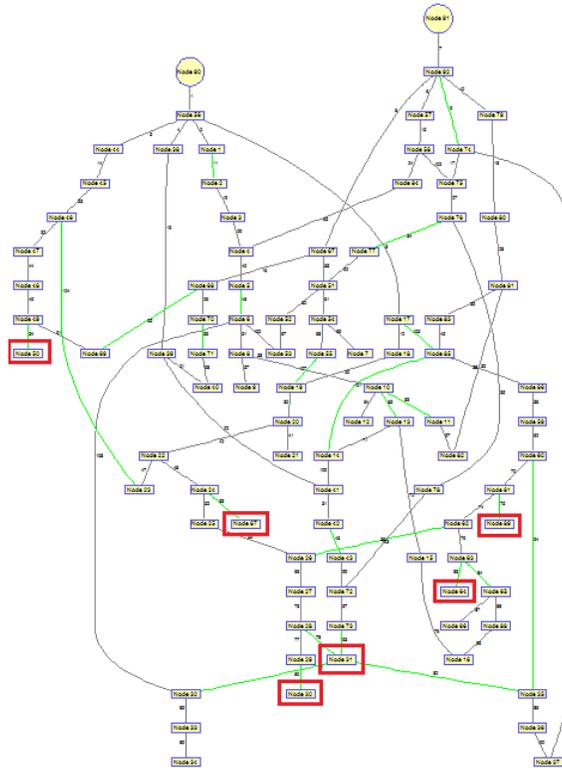


Figura 4.22: Sistema restaurado usando RS

Con el fin de corroborar el cumplimiento de las restricciones en la tabla 4.23, se registran los voltajes en los nodos los cuales están en por unidad (PU) y en la tabla 4.24, los valores de las corrientes por las líneas en amperios.

Nodos	Voltaje(pu)	Angulo	Nodos	Voltaje(pu)	Angulo
90	1	0	57	1	-0,0016
56	0,9999	-0,0063	67	0,9999	-0,0047
1	0,9999	-0,0063	74	0,9999	-0,0036
17	0,9979	-0,1029	79	0,9999	-0,0055
38	0,9986	-0,0804	68	0,9988	-0,0673
44	0,9998	-0,0087	51	0,9991	-0,0097
18	0,9979	-0,1035	75	0,9995	-0,0297
39	0,9981	-0,1068	37	0,9999	-0,0062
45	0,9982	-0,0969	80	0,9957	-0,2295
19	0,9966	-0,1686	70	0,9977	-0,1268
40	0,9981	-0,1067	52	0,9989	-0,0111
41	0,9981	-0,1072	54	0,999	-0,0158
46	0,9962	-0,2038	76	0,9994	-0,0337
20	0,9959	-0,2005	58	0,9993	-0,0303
42	0,9981	-0,1085	36	0,9998	-0,0064
14	0,9967	-0,1852	81	0,9954	-0,2445
47	0,9946	-0,2919	71	0,9976	-0,1266
21	0,9956	-0,201	53	0,9986	-0,0128
22	0,995	-0,2464	55	0,9981	-0,0133
13	0,9958	-0,1902	7	0,999	-0,0173
48	0,993	-0,3753	77	0,9994	-0,0336
23	0,9948	-0,2466	78	0,9992	-0,0444
24	0,9949	-0,2514	84	0,9992	-0,0314
15	0,9958	-0,192	83	0,9953	-0,2512
49	0,9923	-0,4159	6	0,9985	-0,0182
25	0,9947	-0,2591	72	0,9992	-0,0462
87	0,9948	-0,2515	4	0,9989	-0,0328
16	0,9955	-0,1933	85	0,9947	-0,2817
50	0,9922	-0,418	73	0,9991	-0,0504
69	0,9915	-0,4572	43	0,9991	-0,05
26	0,9946	-0,2622	3	0,9989	-0,0343
88	0,9954	-0,2021	5	0,9988	-0,0407
27	0,9944	-0,2676	86	0,9941	-0,3182
28	0,9943	-0,2682	2	0,9989	-0,036
29	0,9943	-0,2683	59	0,9938	-0,3339
31	0,9943	-0,2694	60	0,9927	-0,3912
30	0,9942	-0,2684	61	0,9925	-0,4034
32	0,9942	-0,2696	62	0,9912	-0,4342
35	0,9943	-0,2694	89	0,9924	-0,4098
33	0,9939	-0,2701	63	0,9906	-0,4487
34	0,9938	-0,2702	64	0,9905	-0,4492
91	1	0	65	0,9904	-0,4514
92	1	-0,0016	66	0,9902	-0,4526

Cuadro 4.23: Datos de voltaje usando RS

N envio	N recibo	Corriente(A)	N envio	N recibo	Corriente(A)
33	34	9,8734	63	64	2,1264
32	33	9,8734	62	63	20,9298
31	35	0	61	89	7,3117
31	32	11,9997	61	62	24,3715
29	30	1,4184	60	61	38,994
28	31	11,9997	59	60	41,329
28	29	4,5161	86	59	44,7891
27	28	16,5158	3	2	1,1415
26	27	25,5889	85	86	46,6462
16	88	5,9152	4	5	7,4566
25	26	27,0068	4	3	2,1602
49	69	27,6847	72	43	1,5158
49	50	5,2501	72	73	1,9197
15	16	10,6847	83	85	47,176
24	87	2,9971	84	4	11,6988
24	25	27,0068	78	72	3,4863
48	49	35,9487	53	6	3,5633
13	15	15,8588	81	83	49,1209
22	24	33,0009	58	84	14,1198
22	23	5,7423	76	78	3,5371
47	48	38,4484	76	77	0,2181
14	13	22,8562	54	7	1,7374
20	22	40,2415	54	55	9,7255
20	21	5,7379	52	53	3,686
46	47	40,4451	70	71	9,3187
41	14	30,1421	80	81	50,3567
41	42	2,8523	37	36	4,4822
19	20	46,7248	75	58	16,5405
45	46	42,4386	75	76	5,2049
39	41	32,994	51	54	13,2004
39	40	0,1526	51	52	4,2462
18	19	46,7248	68	70	20,4093
44	45	49,4799	79	80	52,7021
38	39	33,1763	74	37	10,4728
17	18	46,7248	74	75	22,9649
56	44	49,4799	67	51	19,4353
56	38	33,1763	67	68	22,5838
56	17	46,7248	92	79	52,7021
56	1	0	92	74	33,4428
90	56	129,3255	92	67	42,016
65	66	6,0399	92	57	0
63	65	11,9845	91	92	128,1536

Cuadro 4.24: Datos de corrientes usando RS

El comportamiento de las variables temperatura, longitud de cadena de Markov y el valor de las funciones de general de las postulaciones y las aceptadas se ilustra en la figura 4.23,

en el cual se observa un claro aumento en el esfuerzo computacional y una tendencia la convergencia pero si hacer posible la conexión de la totalidad de la carga.

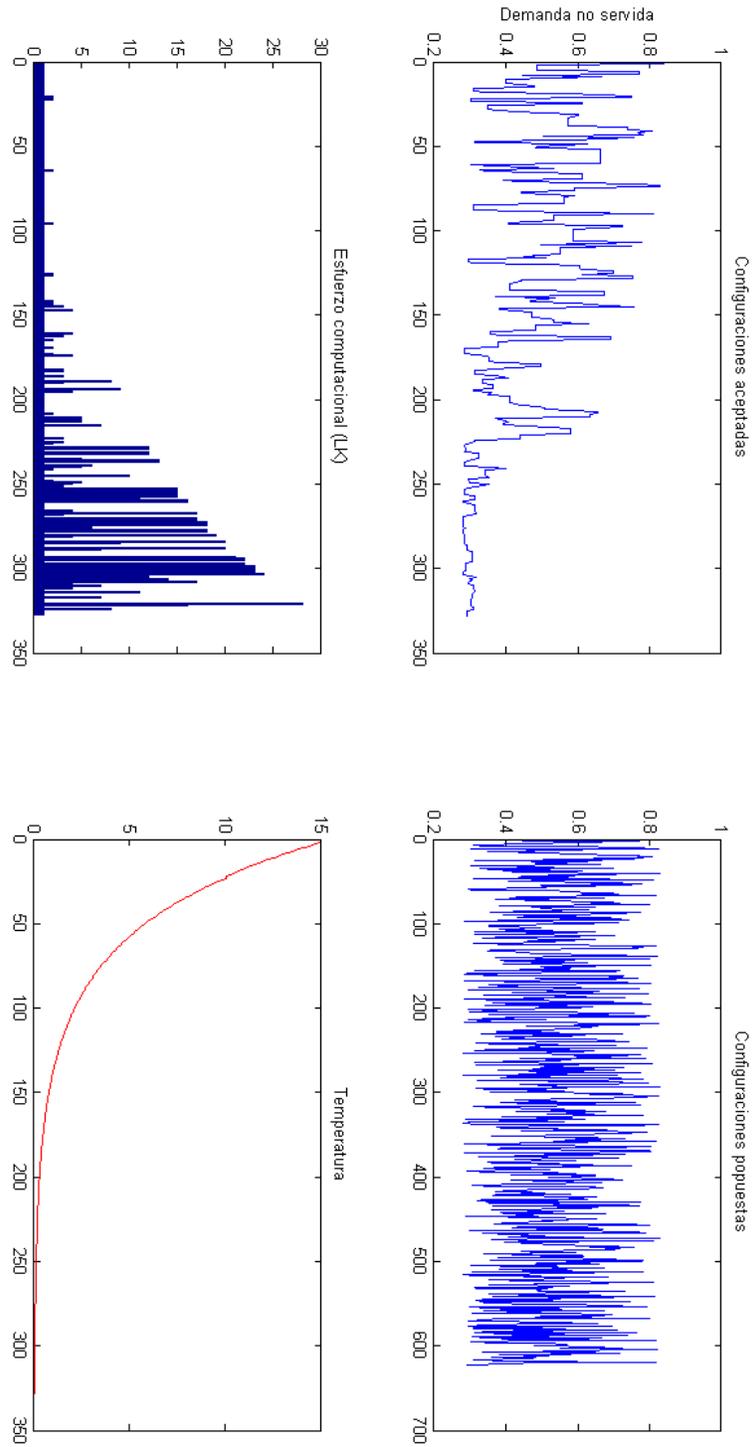


Figura 4.23: Restauración del sistema de 92 nodos RS

Resultados Recocido Simulado	Ramas con switche abierto	Valor Fobj
Estado inicial	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109	0
Estado tras la falla en rama 11	11,19,26,27,29,37,40,46,47,48,51,57,58,60,62,63,64 64,65,66,71,72,76, 92,93,94,96,97,101,102,103,105,108	0.8392
Estado tras la restauración	9, 11, 25, 33, 34, 43, 46, 53, 54, 63, 65, 75, 78, 80 81, 82, 83, 84, 93, 94, 101, 103, 104, 105, 107	0.2845

Cuadro 4.25: Resultados generales Recocido simulado

4.7. Comparación de resultados entre los métodos Recocido simulado y Búsqueda Tabú.

A partir de los resultados anteriormente analizados se puede hacer una comparación entre los dos métodos para así evaluar la eficiencia y calidad de las soluciones de los métodos. El análisis conjunto de los resultados se lleva a cabo comparando los parámetros de control, el número de iteraciones, el tiempo de computo y las configuraciones finales obtenidas.

4.7.1. Sistema de 19 nodos

Restricciones no estrictas

Las siguientes soluciones fueron obtenidas solucionando el problemas de restauración para el sistema de 19 nodos, usando las siguientes restricciones: $V_{min}=0.95$ pu y $I_{max}=1200$ A.

En la tabla 4.26, se registran resultados de la aplicación de las dos metodologías recocido simulado y búsqueda tabú con el fin de llegar a conclusiones que aporten al conocimiento del problemas y sirvan como base para futuros trabajos.

Para este el caso de la solución del problemas sin restricciones se obtuvieron resultados muy homogéneos en todo los aspectos, como se puede observar el tiempo computacional y el número de iteraciones presentan diferencia muy pequeñas pero se podría afirmar en primera instancia que la metodología de recocido simulado presento un mejor desempeño en tiempo y número de iteraciones ya que los dos metodos conectaron toda las carga.

Característica	RS	BT
Tiempo	2.94 seg	3.08 seg
Iteraciones	157	160
Fobj	0	0
Ramas con switche abierto	17,18,19	17,18,19
Ramas con switche abierto tras falla	13,14,15,16,17,18,19	13,14,15,16,17,18,19
Ramas con switche abierto restauración	13,14,17	13,14,17
I_{max} sistema restaurado (A)	900.0369	900.0369
V_{min} sistema restaurado (pu)	0.9627	0.9627

Cuadro 4.26: Comparación de resultados para la restauración del sistema de 19 nodos

Restricciones estrictas

En el caso de la solución con restricciones de voltaje y corriente se observan diferencias significativas, para el primer escenario con restricción de corriente de 1000 A, la metodología de recocido simulado tuvo un tiempo de cómputo mayor y realizó un mayor número de iteraciones a comparación del método búsqueda tabú pero obtuvo una configuración con menor valor en la función objetivo por tanto cumple de mayor forma con el objetivo de minimizar la energía no servida.

Restauración sistema de 19 nodos, Restricciones $V_{min}=0.95$, $I_{max}=1000A$.		
Característica	RS	BT
Tiempo	3 min 36seg	2 min 12 seg
Iteraciones	320	180
Fobj	1.3454	2.8320
Ramas $Y_k=0$ inicial	17,18,19	17,18,19
Ramas $Y_k=0$ tras falla	17,18,19,13,14,15,16	17,18,19,13,14,15,16
Ramas $Y_k=0$ Tras Restauración	9,13,17,19	9,11,13,14,19
I_{max} sistema restaurado (A)	979.4417	979.4417
V_{min} sistema restaurado (pu)	0.964	0.9627
Restauración sistema de 19 nodos, Restricciones $V_{min}=0.9715pu$, $I_{max}=1500$		
Característica	RS	BT
Tiempo	8 min 13 seg	4 min 2 seg
Iteraciones	348	214
Fobj	4.8104	4.8104
Ramas $Y_k=0$ inicial	17,18,19	17,18,19
Ramas $Y_k=0$ tras falla	17,18,19,13,14,15,16	17,18,19,13,14,15,16
Ramas $Y_k=0$ Tras Restauración	13,11,15,17	10,11,13,16
I_{max} sistema restaurado (A)	918,4434	892.8223
V_{min} sistema restaurado (pu)	0.973	0.9731

Cuadro 4.27: Comparación de resultados RS y BT

4.7.2. Sistema de 92 nodos

Restricciones estrictas de corriente

En la tabla 4.28, se muestran los resultados que se obtuvieron restaurando el sistema de 92 nodos con falla en la rama 11 aplicando las dos metodologías, como se puede observar en los datos la metodología recocido simulado obtuvo una mejor respuesta en el valor de la función objetivo para el caso con restricciones de corriente y un valor igual sin restricciones, pero continúa con la tendencia de tardar más tiempo y hacer un mayor número de iteraciones,

Sería entonces una decisión de acuerdo a la necesidad de la respuesta, si se requiere una respuesta de buena calidad en poco tiempo se sugeriría usar la metodología búsqueda tabú o si se requiere de una respuesta de excelente calidad pero en un tiempo muy prolongado se sugiere usar la metodología de recocido simulado.

Restauración sistema 92 nodos, restricciones I _{max} =145A y V _{min} =0.95			
Característica	RS	BT	
Tiempo	7 min 56seg	5 min 30 seg	
Iteraciones	238	222	
Fobj	0	0	
Ramas switch abierto inicial	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109	
Ramas switch abierto tras falla	11,19,26,27,29,37,40,46,47,48,51,57,58,60,62,63,64 64,65,66,71,72,76, 92,93,94,96,97,101,102,103,105,108	11,19,26,27,29,37,40,46,47,48,51,57,58,60,62,63,64 64,65,66,71,72,76, 92,93,94,96,97,101,102,103,105,108	
Ramas con switch abierto Tras Restauración	12, 26, 27, 37, 47, 48, 60, 62, 66, 92, 93 94, 96, 97, 101, 102, 103, 105, 108	9, 11, 26, 34, 36, 38, 40, 47, 65, 68, 88, 90, 91, 93, 94, 101, 103, 105, 108	
I _{max} sistema restaurado (A)	154.9751	139.8934	
V _{min} sistema restaurado (pu)	0.9875	0.9902	
Restauración sistema 92 nodos, restricciones I _{max} =130A y V _{min} =0.9			
Característica	RS	BT	
Tiempo	17 min 12 seg	14 min 56 seg	
Iteraciones	613	422	
Fobj	0.2845	0.2954	
Ramas switch abierto inicial	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109	
Ramas switch abierto tras falla	11,19,26,27,29,37,40,46,47,48,51,57,58,60,62,63,64 64,65,66,71,72,76, 92,93,94,96,97,101,102,103,105,108	11,19,26,27,29,37,40,46,47,48,51,57,58,60,62,63,64 64,65,66,71,72,76, 92,93,94,96,97,101,102,103,105,108	
Ramas con switch abierto Tras Restauración	9, 11, 25, 33, 34, 43, 46, 53, 54, 63, 65, 75, 78, 80 81, 82, 83, 84, 93, 94, 101, 103, 104, 105, 107	11 15 25 38 43 46 51 57 58 63 64 65 86 88 92 93 94 97 98 101 103 104 105 107 108	
I _{max} sistema restaurado (A)	129.1798	129.3255	
V _{min} sistema restaurado (pu)	0.9921	0.9902	

Cuadro 4.28: Comparación de resultados RS y BT

Capítulo 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. A partir de la comparación entre los resultados, es evidente la superioridad que tiene la metodología recocido simulado sobre búsqueda tabú cuando se trabaja con restricciones no estrictas, pero cuando se trabaja con restricciones estrictas búsqueda tabú obtiene resultados de buena calidad en menos tiempo y menor número de iteraciones.
2. Al trabajar con restricciones estrictas, los métodos además de aumentar su tiempo de cómputo, disminuyen la carga total energizada, por lo tanto, las restricciones influyen directamente en el número de usuarios no atendidos.
3. Es de gran importancia la correcta selección de los parámetros de control de las metodologías ya que la calidad de las soluciones es directamente dependientes del ajuste de los mismos.
4. En comparación con el límite de cargabilidad máxima, el límite de regulación de voltaje, tiene mayor probabilidad de deslastrar carga, esto debido a que las tensiones son similares en diferentes lugares de los sistemas de distribución por tanto cuando un nodo toca el límite de voltaje mínimo hay varios nodos próximos a llegar al mismo valor de tensión.
5. Las gráficas de la función objetivo muestra como el método logra escapar de óptimos locales al aceptar empeoramientos en la función objetivo, lo cual nos indica que la solución de problema usando técnicas metaheurísticas no es dependiente del punto de partida dentro del espacio de soluciones.

5.2. Recomendaciones

1. La memoria a corto plazo implementada en el búsqueda tabú podría integrar un estatus tabú adaptativo en función de la memoria de frecuencia, y el tamaño de la vecindad.
2. Se recomienda diseñar un mecanismo en el cual se aplique el criterio de aspiración al candidato que menos participe en la formación de configuraciones según la memoria basada en frecuencia
3. Podría implementarse un criterio de aspiración que dependa de la comparación de una variable aleatoria con una probabilidad de aceptación como se hace en el recocido simulado
4. Se recomienda implementar diferentes criterios de parada para el método de recocido simulado y así hacer más eficiente el método ya que en ocasiones el método no encuentra configuraciones mejores y sigue buscando hasta cumplir el número máximo de postulaciones en la cadena de Markov, lo que hace el tiempo de cómputo mayor.

5. Es recomendable el uso de las metodologías por operadores de red según sea su requerimiento, soluciones de buenas calidad en corto tiempo o soluciones de mejor calidad en mayor tiempo, para el primer caso se recomienda usar búsqueda tabú para el segundo caso recorrido simulado.

Referencias

- [1] R. A. Gallego, A. H. Escobar, E. M. Toro, "Técnicas metaheurísticas de optimización". Universidad tecnológica de Pereira, Febrero 2009. 8, 14, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34
- [2] A. L. Morelato, A. Monticelli, "Heuristic search to distribution system restoration". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.4, October 1989. 8
- [3] B. Akduman, B. Türkay, A. Şima Uyar, "Service restoration in distribution systems using an evolutionary algorithm". 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion 7-10 November 2010. 8, 12, 43
- [4] E. M. Carreno, R. Romero, A. Padilha-Feltrin, "An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem" . IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 4, November 2008. 8
- [5] L. Pérez Hernandez, J. F. Franco, O. Gomez Carmona, "Planeamiento de sistemas de distribución bajo un modelamiento multietapa". Scientia et Technica Año XIII, No 37, Diciembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701. 9, 27, 28
- [6] S.Curcic, C. S. Ozvere, "Computer-based strategy for the restoration problem in electric power distribution systems" . IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No. 5, September 1997. 9
- [7] O. Duque, D. Moríñigo, "Load restoration in electric distribution networks using a meta-heuristic technique". IEEE MELECON 2006, May 16-19, Benalmádena (Málaga), Spain 9
- [8] V. Jacques Garcia, D. Pinheiro Bernardon, A. Scheffer Quintela, P. Morelato Franca, "On the efficiency of an alternative codification for multiobjective service restoration in electric distribution networks". 978-0-947649-44-9/09,©2009IEEE. 9
- [9] K. Rajneesh, Y. Kumar, G. Agnihotri, "Multiobjective Service Restoration Considering Primary Customers using Hybrid GA-ACO Algorithm". International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 64– No.3, February 2013. 9
- [10] S. Moins, "Implementation of a simulated annealing algorithm for Matlab". Training performed in Electronics systems Linköping Institute of Technology, Linköping August 23, 2002. 9
- [11] R. I. Bolaños, "Solución al problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución usando técnicas heurísticas". Proyecto de grado universidad tecnológica de pereira, 2012. 28, 43, 59
- [12] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semelyen, G. X. Luo, "A Compensation Based Power Flow Networks". IEEE Transactions on Power Systems. Vol.3, No 2, May, 1988. 15

- [13] R. Cespedes, "New method for the analysis of distribution networks". Trans. on Power Delivery. Vol.5 N^o1. January 1990, pp. 391-396. 15
- [14] S. Toune et al, "Comparative Study of Modern Heuristic Algorithms to Service Restoration in Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No. 1 ,agosto 2002.

6. Anexo

6.1. Anexo A

Circuito de prueba 1

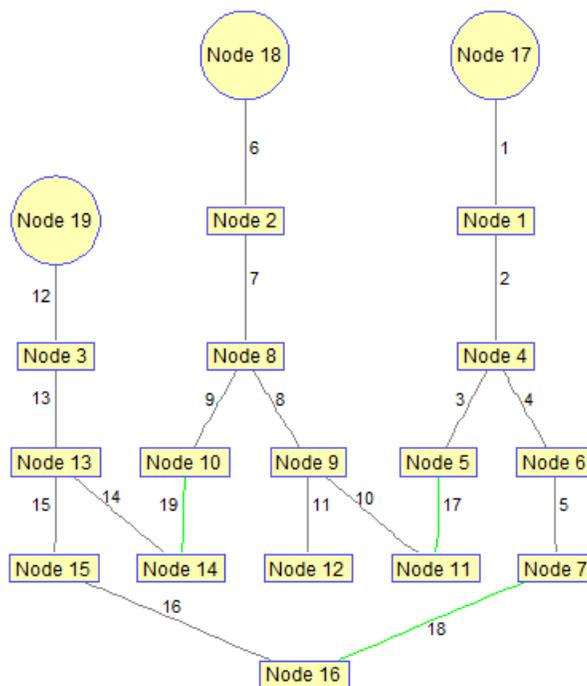


Figura 6.1: Sistema de prueba 1

En esta sección se presentan los datos de operación del sistema de distribución de prueba número 1. En la tabla 6.1 se presentan los datos de las líneas del sistema, y en la tabla 6.2 los voltajes y ángulos nodales.

Nodos	Voltajes	Angulos	Nodos	Voltajes	Angulos
18	1	0	19	1	0
2	1	0	3	1	0
8	0,9791	-0,7635	13	0,9944	-0,329
9	0,9711	-1,4523	14	0,9948	-0,4562
10	0,9769	-0,7701	15	0,9918	-0,5228
11	0,971	-1,5259	16	0,9913	-0,5904
12	0,9693	-1,8365			

Cuadro 6.2: Voltajes y angulos nodales

Envio	Recibo	Rama	R(pu)	X(pu)	P(MW)	Q(MVAR)	Yk
17	1	1	0	0	0	0	1
1	4	2	0,075	0,1	2	1,6	1
4	5	3	0,08	0,11	3	0,4	1
4	6	4	0,09	0,18	2	-0,4	1
6	7	5	0,04	0,04	1,5	1,2	1
18	2	6	0	0	0	0	1
2	8	7	0,11	0,11	4	2,7	1
8	9	8	0,08	0,11	5	1,8	1
8	10	9	0,11	0,11	1	0,9	1
9	11	10	0,11	0,11	0,6	-0,5	1
9	12	11	0,08	0,11	4,5	-1,7	1
19	3	12	0	0	0	0	1
3	13	13	0,11	0,11	1	0,9	1
13	14	14	0,09	0,12	1	-1,1	1
13	15	15	0,08	0,11	1	0,9	1
15	16	16	0,04	0,04	2,1	-0,8	1
5	11	17	0,04	0,04	0,6	-0,5	0
7	16	18	0,12	0,12	2,1	-0,8	0
10	14	19	0,04	0,04	1	-1,1	0

Cuadro 6.1: Datos líneas y carga sistema de prueba 1

6.2. Anexo B

Circuito de prueba 2

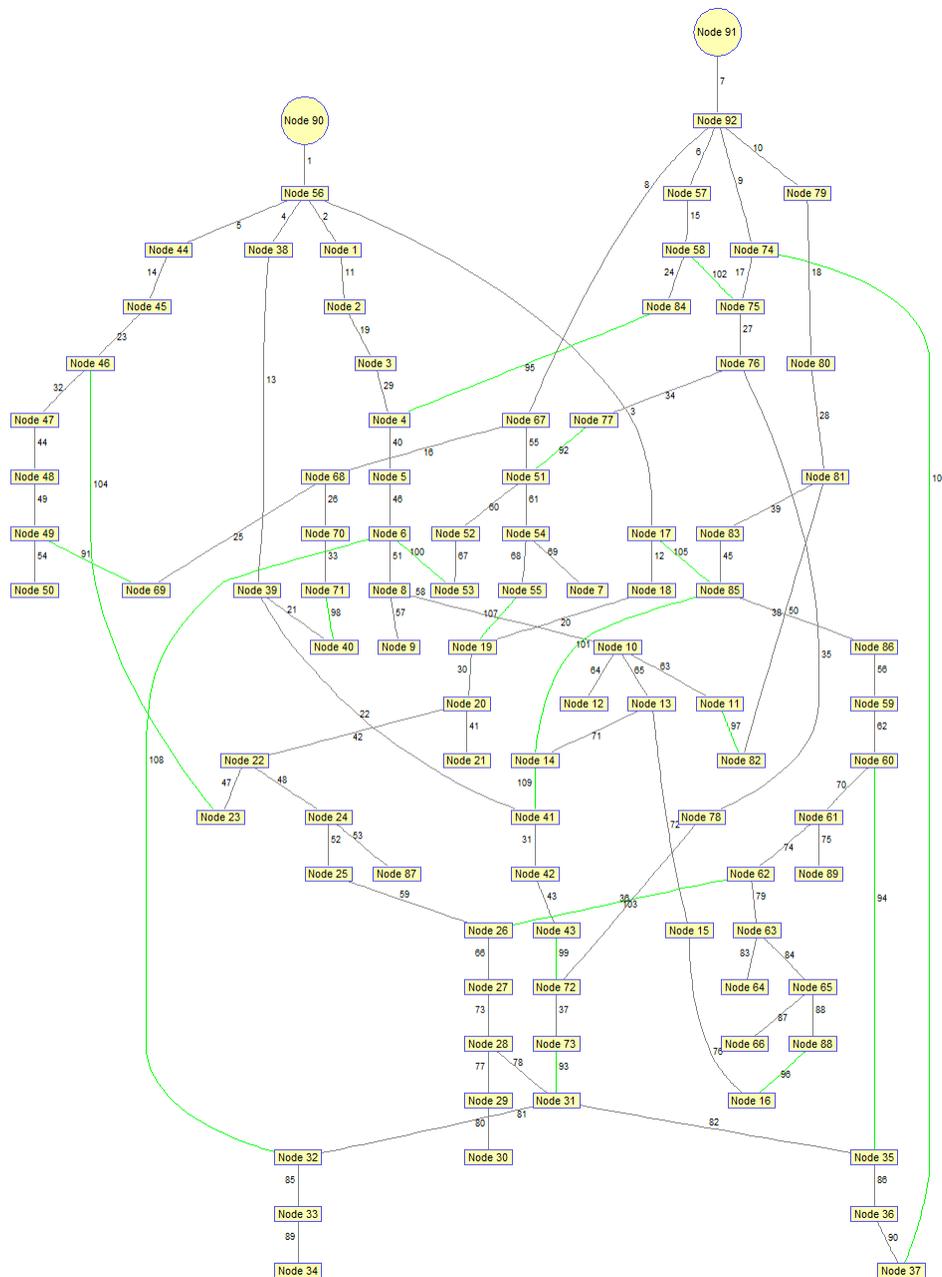


Figura 6.2: Sistema de prueba 2

En esta sección se presentan los datos de operación del sistema de distribución de prueba número 2. En la tabla 6.3 se presentan los datos de las líneas del sistema, y en la tabla 6.5 los voltajes y ángulos nodales.

Envío	Recibo	Ramas	R(Ω)	X(Ω)	P(MW)	Q(MVA)	Yk
90	56	1	0	0	0	0	1
56	1	2	0,33205	0,76653	0	0	1
56	17	3	0,33205	0,76653	0	0	1
56	38	4	0,33205	0,76653	0	0	1
56	44	5	0,0075	0,01732	0	0	1
92	57	6	0,01126	0,02598	0	0	1
91	92	7	0	0	0	0	1
92	67	8	0,01126	0,02598	0	0	1
92	74	9	0,00938	0,02165	0	0	1
92	79	10	0,01126	0,02598	0	0	1
1	2	11	0,00188	0,00433	0,0159	0,0063	1
17	18	12	0,00188	0,00433	0	0	1
38	39	13	0,11819	0,27283	0,0004	0,0002	1
44	45	14	0,27014	0,62362	0,098	0,039	1
57	58	15	0,72976	1,68464	0,0334	0,0142	1
67	68	16	0,41835	0,96575	0,03	0,0127	1
74	75	17	0,16884	0,38976	0,0171	0,0073	1
79	80	18	0,6491	1,49842	0,0315	0,0154	1
2	3	19	0,22324	0,51535	0,0142	0,0056	1
18	19	20	0,22324	0,51535	0	0	1
39	40	21	2,96288	1,01628	0,0021	0,0009	1
39	41	22	0,00188	0,00433	0	0	1
45	46	23	0,3827	0,88346	0,0277	0,011	1
58	84	24	0,17059	0,08973	0,0334	0,0142	1
68	69	25	0,10499	0,13641	0,3791	0,1607	1
68	70	26	0,43898	1,01338	0,1528	0,0648	1
75	76	27	0,11819	0,27283	0,02	0,0085	1
80	81	28	0,04502	0,10394	0,0166	0,0081	1
3	4	29	0,09943	0,22953	0,029	0,0115	1
19	20	30	0,10881	0,25118	0,01	0,0049	1
41	42	31	0,06941	0,16024	0,0393	0,0167	1
46	47	32	0,33018	0,7622	0,0277	0,011	1
70	71	33	0,0752	0,02579	0,1284	0,0544	1
76	77	34	2,28608	0,78414	0,003	0,0013	1
76	78	35	0,45587	1,05236	0,0007	0,0003	1
78	72	36	0,07692	0,17756	0,0007	0,0003	1
72	73	37	0,33205	0,76653	0,0265	0,0112	1
81	82	38	0,5264	0,18056	0,0411	0,0201	1
81	83	39	0,02064	0,04764	0,0261	0,0128	1
4	5	40	0,15571	0,35945	0,1038	0,0413	1
20	21	41	0,71078	0,37388	0,077	0,0376	1
20	22	42	0,18197	0,42008	0,0201	0,0098	1
42	43	43	0,81502	0,42872	0,0209	0,0089	1
47	48	44	0,3283	0,75787	0,0346	0,0138	1
83	85	45	0,09755	0,2252	0,0071	0,0035	1
5	6	46	0,16321	0,37677	0,0496	0,0197	1
22	23	47	0,30326	0,15952	0,077	0,0376	1
22	24	48	0,02439	0,0563	0,0402	0,0196	1
48	49	49	0,17072	0,39409	0,0588	0,0234	1
85	86	50	0,11819	0,27283	0,0249	0,0122	1

Cuadro 6.3: Datos líneas y cargas del sistema de prueba 2

Cuadro 6.4: Continuación datos sisteams de prueba 2

6	8	51	0,05675	0,05666	0,0208	0,0083	1
24	25	52	0,04502	0,10394	0	0	1
24	87	53	0,26536	0,13958	0,0402	0,0196	1
49	50	54	0,05816	0,13425	0,0726	0,0289	1
49	51	55	0,55914	0,29412	0,0277	0,011	1
86	59	56	0,05253	0,12126	0,0475	0,0201	1
8	9	57	0,52124	0,27418	0,0415	0,0165	1
8	10	58	0,10877	0,1086	0,0467	0,0186	1
25	26	59	0,01876	0,04331	0,019	0,0093	1
51	52	60	0,7013	0,3689	0,0078	0,0031	1
51	54	61	0,06754	0,15591	0,0242	0,0096	1
59	60	62	0,20824	0,48071	0,032	0,0136	1
10	11	63	0,39803	0,20937	0,0389	0,0155	1
10	12	64	0,91744	0,31469	0,0831	0,033	1
10	13	65	0,11823	0,11805	0,0971	0,0387	1
26	27	66	0,11823	0,11805	0,1216	0,0594	1
52	53	67	1,02352	0,53839	0,0017	0,0007	1
54	55	68	1,32352	0,45397	0,1353	0,0538	1
54	7	69	0,13132	0,30315	0,0242	0,0096	1
60	61	70	0,0469	0,10827	0,1002	0,0425	1
13	14	71	0,50228	0,26421	0,1012	0,0403	1
13	15	72	0,05675	0,05666	0,0718	0,0286	1
27	28	73	0,02365	0,02361	0	0	1
61	62	74	0,6195	0,61857	0,0471	0,02	1
61	89	75	0,12944	0,29882	0,1002	0,0425	1
15	16	76	0,29379	0,15454	0,0662	0,0263	1
28	29	77	0,18954	0,0997	0,0415	0,0203	1
28	31	78	0,05675	0,05666	0	0	1
62	63	79	0,34049	0,33998	0,0933	0,0395	1
29	30	80	0,39803	0,20937	0,019	0,0093	1
31	32	81	0,09477	0,04985	0,0285	0,0139	1
31	35	82	0,07566	0,07555	0	0	1
63	64	83	0,56862	0,29911	0,0291	0,0123	1
63	65	84	0,10877	0,1086	0,0813	0,0345	1
32	33	85	0,41699	0,21934	0	0	1
35	36	86	0,3696	0,19442	0,0604	0,0295	1
65	66	87	0,56862	0,29911	0,0826	0,035	1
65	88	88	0,14187	0,14166	0,0813	0,0345	1
33	34	89	0,11372	0,05982	0,1322	0,0647	1
36	37	90	0,26536	0,13958	0,0807	0,0395	1
49	69	91	0,22324	0,51535	0	0	0
77	51	92	0,0394	0,09094	0	0	0
73	31	93	0,09477	0,04985	0	0	0
60	35	94	0,3827	0,88346	0	0	0
84	4	95	0,26536	0,13958	0	0	0
88	16	96	0,22324	0,51535	0	0	0
11	82	97	0,0394	0,09094	0	0	0
71	40	98	0,09477	0,04985	0	0	0
43	72	99	0,3827	0,88346	0	0	0

Nodos	Voltaje	Angulo	Nodos	Voltaje	Angulo
90	1	0	30	0,9928	-0,3336
56	0,9999	-0,0068	32	0,9927	-0,3358
1	0,9976	-0,1332	35	0,9927	-0,3371
17	0,9974	-0,1253	33	0,9924	-0,3363
38	0,9997	-0,0168	36	0,9925	-0,3376
44	0,9999	-0,0079	34	0,9923	-0,3365
2	0,9976	-0,1339	91	1	0
18	0,9974	-0,1259	92	1	-0,0017
39	0,9996	-0,0204	57	1	-0,0021
45	0,9991	-0,0467	67	0,9999	-0,0066
3	0,9962	-0,2174	74	1	-0,002
19	0,9958	-0,2059	79	0,9999	-0,0062
40	0,9996	-0,0202	58	0,9995	-0,0254
41	0,9996	-0,0204	68	0,9973	-0,1456
46	0,9984	-0,0836	51	0,9992	-0,0107
4	0,9955	-0,254	75	0,9999	-0,0075
20	0,995	-0,2450	80	0,9949	-0,2684
42	0,9996	-0,0224	84	0,9995	-0,0256
47	0,9979	-0,1109	69	0,9971	-0,1545
5	0,9946	-0,3092	70	0,9962	-0,2053
21	0,9947	-0,2455	52	0,9992	-0,0109
22	0,9938	-0,303	54	0,9991	-0,0167
43	0,9995	-0,0229	76	0,9998	-0,0104
48	0,9975	-0,1336	81	0,9946	-0,286
6	0,9937	-0,3587	71	0,9962	-0,2051
23	0,9937	-0,3033	53	0,9992	-0,0109
24	0,9937	-0,3097	55	0,9982	-0,0142
49	0,9973	-0,1426	7	0,9991	-0,0183
8	0,9935	-0,3637	77	0,9998	-0,0102
25	0,9935	-0,3203	78	0,9997	-0,0165
87	0,9936	-0,3098	82	0,9945	-0,2852
50	0,9973	-0,1447	83	0,9945	-0,2936
9	0,9934	-0,3644	72	0,9997	-0,0175
10	0,9931	-0,3722	85	0,9938	-0,328
26	0,9934	-0,3248	73	0,9996	-0,0217
11	0,9931	-0,3728	86	0,9931	-0,3693
12	0,9928	-0,3712	59	0,9928	-0,3871
13	0,9929	-0,3784	60	0,9916	-0,4528
27	0,993	-0,3323	61	0,9913	-0,4669
14	0,9926	-0,3801	62	0,9897	-0,5052
15	0,9928	-0,3796	89	0,9912	-0,4732
28	0,9929	-0,3334	63	0,9889	-0,5239
16	0,9927	-0,3803	64	0,9888	-0,5244
29	0,9929	-0,3335	65	0,9887	-0,5279
31	0,9928	-0,3357	66	0,9884	-0,5292
			88	0,9886	-0,5297

Cuadro 6.5: Voltajes nodales del sistema de prueba 2