



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**AUMENTO DE LA SEGURIDAD EN SISTEMAS
DE POTENCIA EN CONDICIONES NO
CONVENCIONALES DE OPERACIÓN
MEDIANTE MODIFICACIONES TOPOLÓGICAS
DE LA RED**

Autor(es)

Carlos Manuel Quintero Castrillón

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento Eléctrica

Medellín, Colombia

2019



Aumento De La Seguridad En Sistemas De Potencia En Condiciones No Convencionales
De Operación Mediante Modificaciones Topológicas De La Red

Carlos Manuel Quintero Castrillón

Tesis como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería.

Director

Jesús María López Lezama, PhD en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento Eléctrica.
Medellín, Colombia
2019.

Resumen

En este trabajo se presenta una herramienta de identificación de escenarios topológicos de la red de transmisión, que permite disminuir el número de restricciones violadas en un sistema eléctrico de potencia (SEP). Esto con el objetivo de definir nuevas estrategias para aumentar el nivel de seguridad del SEP ante condiciones de red degradada, por indisponibilidad de recursos de generación, transmisión o de los sistemas de protección.

La herramienta propuesta utiliza la flexibilidad que ofrecen los diferentes tipos de configuración de subestaciones para modificar la topología de un SEP. Se plantea encontrar combinaciones de posiciones de los interruptores (abiertos o cerrados), buscando que la nueva topología de la red eléctrica brinde mayores beneficios en términos de seguridad que la red considerada inicialmente.

Los escenarios identificados a través de esta herramienta se valoran en términos de aumento de seguridad y nivel de complejidad de implementación de las soluciones encontradas. La seguridad se mide como el número de contingencias N-1 que pueda soportar el SEP.

Se realizó un pre procesamiento de la información asociada a las subestaciones, interruptores, seccionadores y los elementos tipo rama del SEP, con el objetivo de almacenarla en forma estructurada. Con esto se creó una plataforma desde la cual se implementaron tres métodos de búsqueda: un Aleatorio Puro, Recocido Simulado y Búsqueda Local Iterada.

La aplicación de los algoritmos de búsqueda sobre el sistema de pruebas confirmó que se puede soportar un número mayor de contingencias cuando se realizan cambios topológicos; lo que significa un aumento en la seguridad del SEP respecto al caso base sin reconfiguraciones. Las simulaciones determinaron soluciones similares respecto a las acciones que se debían tomar independientemente del método de búsqueda utilizado.

La forma en que se desarrollaron los métodos de búsqueda permitió realizar una exploración sobre subestaciones tipo anillo y considerar configuraciones sobre los diámetros de las subestaciones tipo interruptor y medio donde los elementos que comparten diámetro se pueden aislar de la subestación. Otro elemento diferenciador del método propuesto es la manera en la que se hace la evaluación de contingencias; pues este trabajo considera la aclaración de fallas con los interruptores adyacentes a la misma, diferente a como se considera en otros trabajos donde las contingencias se representan retirando la correspondiente rama del SEP evaluado.

Palabras clave: Sistemas de potencia, seguridad, subestaciones de potencia, flexibilidad.

Abstract

This work presents a tool for identifying the topological scenarios of the transmission network, which allows the reduction of violated constraints in an electrical power system (EPS). This with the aim of defining new strategies to increase the security level of an EPS when dealing with network degraded conditions, due to the unavailability of generation, transmission or protection systems resources.

The proposed tool takes advantage of the flexibility offered by different types of substation configurations to modify the topology of a SEP. It is proposed to find combinations of switches positions (open or closed), looking for the resulting topology of the electrical network to provide greater benefits in terms of safety than the initially considered network.

The scenarios identified through this tool are evaluated in terms of increased security, and level of complexity of implementation of the solutions found. The security is measured as the number of contingencies N-1 that the SEP can support.

A pre-processing of the information associated with substations, switches, disconnectors and branch type elements of the SEP was carried out with the aim of storing them in a structured way. With this, a platform was created from which three search methods were implemented: Pure Random Search, Simulated Annealing and Iterated Local Search.

The implementation of the search algorithms on the test system confirmed that a greater number of contingencies can be supported when making topological changes; which means an increase in the security of the EPS with respect to the base case without reconfigurations. Simulations determined similar solutions regarding the actions that should be taken regardless of the search method used.

Way in which the search methods were developed allowed to perform an exploration on ring-type substations and to consider configurations on the diameters of the switch-type and medium-type substations where the elements that share a diameter can be isolated from the substation. Another differentiating element of the proposed method is the way in which the contingency assessment is made; since it considers clarification of faults with adjacent switches, different from how it is considered in other works where contingencies are represented by removing the corresponding SEP branch evaluated.

Keywords: Power systems, security, power substations, flexibility.

Tabla de contenido

Resumen	2
Abstract	3
Lista de figuras.....	6
Introducción	9
1. Reconfiguraciones topológicas en sistemas de potencia.....	10
2. Descripción del sistema de pruebas	16
2.1. Selección del sistema de pruebas.....	16
2.2. Adecuación del sistema de pruebas	17
2.3. Software de análisis de sistemas de potencia	21
2.4. Estructura de base de datos, definición de elemento, bahía y diámetro	23
2.4.1. Definición de Elemento	24
2.4.2. Definición de Bahía	24
2.4.3. Definición de Diámetro.....	25
3. Pre proceso	27
3.1. Identificación de tipo de subestaciones del SEP.....	27
3.2. Exploración de subestación tipo interruptor y medio	29
3.3. Exploración de subestación tipo doble barra	29
3.4. Exploración de subestación tipo anillo.....	30
3.5. Almacenamiento de las subestaciones tipo interruptor y medio	30
3.6. Almacenamiento de las subestaciones tipo doble barra	31
3.7. Almacenamiento de las subestaciones tipo anillo.....	31
3.8. Caracterización de la solución en la búsqueda topológica.....	33
3.8.1. Representación vectorial	34
3.8.2. Representación matricial	35
3.8.3. Tabla resumen de las características de una solución	36
3.9. Caracterización de estados asociados a diámetros y bahías	37
3.9.1. Caracterización de estados de diámetros en subestaciones tipo interruptor y medio	37
3.9.2. Caracterización de estado de las bahías en subestaciones tipo doble barra.	38
3.9.3. Caracterización de estado de las bahías en subestaciones tipo anillo.....	39

3.10.	Función objetivo	40
3.11.	Restricciones	41
4.	Métodos de búsqueda	43
4.1.	Búsqueda aleatoria	43
4.2.	Búsqueda por Recocido Simulado	45
4.3.	Búsqueda local iterada.....	49
4.4.	Comparación de técnicas aplicadas a la búsqueda topológica.....	54
5.	Pruebas computacionales	55
5.1.	Solución utilizando búsqueda aleatoria	55
5.2.	Solución utilizando búsqueda por Recocido Simulado	57
5.3.	Solución utilizando búsqueda local iterada.....	58
5.4.	Definición de parámetros.....	59
6.	Resultados de las simulaciones sobre el modelo de pruebas	60
6.1.	Simulaciones con diferentes tipos de subestación de manera no simultánea	60
6.2.	Simulaciones con acotamiento de red y diferentes tipos de subestación de manera simultánea	62
7.	Conclusiones	67
8.	Bibliografía	69
Anexo1.	Datos del sistema de pruebas	72
Anexo2.	Detalle gráfico de las subestaciones que fueron exploradas durante las pruebas.	81
Anexo3.	Detalle de las topologías encontradas con cada método de búsqueda para el caso de pruebas.....	101

Listado de figuras

Figura 1. Sistema de pruebas con clasificación de zonas.....	17
Figura 2. Modelo bahía – interruptor para conexión a subestaciones de diferentes tipos.	18
Figura 3. Comando para transformación de una subestación de tipo barra sencilla a interruptor y medio, doble barra o anillo	19
Figura 4. Transformación de una subestación barra sencilla a interruptor y medio	20
Figura 5. Transformación de una subestación barra sencilla a doble barra	20
Figura 6. Transformación de una subestación barra sencilla a anillo	21
Figura 7 Método de trabajo del módulo de contingencias en PF de una fase.....	22
Figura 8. Estructura de almacenamiento de los objetos del SEP en el PF	24
Figura 9 Identificación de bahía en subestación tipo doble barra y anillo	25
Figura 10. Identificación de un diámetro en una subestación tipo interruptor y medio	26
Figura 11. Identificación subestaciones tipo interruptor y medio, doble barra.....	28
Figura 12. Identificación subestación tipo anillo	29
Figura 13 Almacenamiento de los elementos de las subestaciones tipo interruptor y medio.	31
Figura 14 Almacenamiento de los elementos de las subestaciones tipo doble barra	31
Figura 15 Almacenamiento de los elementos de las subestaciones tipo anillo.....	32
Figura 16. Pre proceso de la información asociada a las subestaciones	33
Figura 17. Solución en representación vectorial	35
Figura 18 Solución en representación matricial	36
Figura 19. Búsqueda aleatoria aplicada a búsqueda topológica	45
Figura 20. Recocido simulado aplicado a búsqueda topológica	49
Figura 21. Representación de espacio de solución en un problema de optimización	50
Figura 22. Búsqueda local iterada aplicada a búsqueda topológica	53
Figura 23. Resultados agrupados, por tipo de subestación, de las condiciones de seguridad alcanzadas con los diferentes métodos de búsqueda	61
Figura 24. Incremento porcentual de las condiciones de seguridad alcanzado con los diferentes métodos de búsqueda aplicados, agrupados por tipo de subestación	61
Figura 25. Número de maniobras necesarias para reconfigurar el SEP de pruebas y aumentar las condiciones de seguridad, agrupado por tipo de subestación	62
Figura 26. Resultados agrupados por tipo de subestación de las condiciones de seguridad alcanzadas con los diferentes métodos de búsqueda aplicados	65
Figura 27. Resultados agrupados (por tipo de subestación) de las condiciones de seguridad alcanzadas con los diferentes métodos de búsqueda aplicados	65
Figura 28. Resultados agrupados por tipo de subestación de las condiciones de seguridad alcanzadas con los diferentes métodos de búsqueda aplicados	66
Figura 29. Subestaciones tipo interruptor y medio 23, 32 y 43	82
Figura 30. Subestaciones tipo interruptor y medio 45, 47 y 48	82
Figura 31. Subestaciones tipo interruptor y medio 49, y 50.....	82

Figura 32. Subestaciones tipo interruptor y medio 51, 54 y 62	83
Figura 33. Subestaciones tipo interruptor y medio 66 y 69.....	83
Figura 34. Subestaciones tipo doble barra 23 y 32	84
Figura 35. Subestaciones tipo doble barra 47 y 48	84
Figura 36. Subestación tipo doble barra 49.....	84
Figura 37. Subestaciones tipo doble barra 50 y 51	85
Figura 38. Subestación tipo doble barra 54.....	85
Figura 39. Subestación tipo doble barra 62.....	85
Figura 40. Subestación tipo doble barra 66.....	86
Figura 41. Subestación tipo doble barra 69.....	86
Figura 42. Subestación tipo anillo 23	87
Figura 43. Subestación tipo anillo 32	87
Figura 44. Subestación tipo anillo 42	88
Figura 45. Subestación tipo anillo 45	88
Figura 46. Subestaciones tipo anillo 47 y 48	89
Figura 47. Subestaciones tipo anillo 50 y 51	89
Figura 48. Subestaciones tipo anillo 54.....	90
Figura 49. Subestaciones tipo anillo 62.....	90
Figura 50. Subestaciones tipo anillo 66.....	91
Figura 51. Subestaciones tipo anillo 69.....	91
Figura 52. Subestaciones tipo interruptor y medio 12 y 17 pertenecientes a la Zona 1	92
Figura 53. Subestaciones tipo interruptor y medio 15 y 70 pertenecientes a la Zona 1	92
Figura 54. Subestación tipo doble barra 5 perteneciente a la Zona 1.....	93
Figura 55. Subestación tipo doble barra 19 perteneciente a la Zona 1.....	93
Figura 56. Subestación tipo doble barra 27 perteneciente a la Zona 1.....	94
Figura 57. Subestación tipo doble barra 32 perteneciente a la Zona 1.....	94
Figura 58. Subestaciones tipo anillo 23 y 31 pertenecientes a la Zona 1	94
Figura 59. Subestaciones tipo anillo 11 y 24 pertenecientes a la Zona 1	95
Figura 60. Subestaciones tipo interruptor y medio 49 y 100 pertenecientes a la Zona 2...95	
Figura 61. Subestaciones tipo interruptor y medio 80 y 77 pertenecientes a la Zona 2	96
Figura 62. Subestación tipo doble barra 54 perteneciente a la Zona 2.....	96
Figura 63. Subestación tipo doble barra 56 perteneciente a la Zona 2.....	97
Figura 64. Subestación tipo doble barra 59 perteneciente a la Zona 2.....	97
Figura 65. Subestación tipo doble barra 105 perteneciente a la Zona 2.....	97
Figura 66. Subestaciones tipo anillo 37 y 66 pertenecientes a la Zona 2.....	98
Figura 67. Subestaciones tipo anillo 69 y 34 pertenecientes a la Zona 2.....	98
Figura 68. Subestaciones tipo interruptor y medio 92 y 85 pertenecientes a la Zona 3	99
Figura 69. Subestaciones tipo interruptor y medio 89 y 110 pertenecientes a la Zona 3...99	
Figura 70. Subestaciones tipo doble barra 101 y 90 pertenecientes a la Zona 3	100
Figura 71. Subestaciones tipo doble barra 103 y 83 pertenecientes a la Zona 3	100
Figura 72. Subestaciones tipo doble barra 93 y 102 pertenecientes a la Zona 3	100

Figura 73. Subestaciones tipo doble barra 86 y 81 pertenecientes a la Zona3 101

Introducción

La operación de un SEP tiene como objetivo garantizar el suministro de energía eléctrica, minimizando los costos operativos y cumpliendo con ciertos niveles de calidad, confiabilidad y seguridad. En este contexto, la optimización de los recursos es una prioridad para los operadores de red. La operación de un SEP es impactada por una serie de factores como las exigencias regulatorias, fenómenos climáticos (altas temporadas de calor – fenómeno del Niño, altas temporadas de lluvia – fenómeno de la Niña), eventos sociopolíticos (condiciones anormales de orden público) y fallas geológicas que pueden llevar el sistema a un nivel de estrés mucho mayor.

Por otro lado, el retraso en las obras de expansión y el continuo crecimiento de la demanda provocan la agudización de las restricciones, aumentando la probabilidad de entrar en escenarios de operación donde no es posible cumplir con los criterios de confiabilidad y seguridad. La llegada tardía de las obras de expansión en el sistema implica en ocasiones pasar de una violación de un criterio de seguridad a una restricción de generación y en otros casos más severos simplemente disminuir el nivel de una restricción o cambiar una restricción por otra.

Las condiciones de orden público, así como eventos sociales y políticos de gran magnitud pueden llegar a tener impacto sobre la operación del SEP. Una práctica común es modificar los criterios de confiabilidad buscando cubrir un mayor número de escenarios ante los cuales se pueda presentar una desatención de la demanda. Lo anterior tiene una implicación en el número de restricciones que se activan y el costo para el cubrimiento de las mismas.

Entendiendo la necesidad de herramientas que viabilicen la operación del SEP de manera segura, confiable y económica, se desarrolló una herramienta de búsqueda de topologías que ayuda a optimizar los recursos disponibles en la red eléctrica, utilizando los interruptores de las subestaciones para encontrar topologías diferentes a las propuestas por los equipos de planeación de la operación que consideran una red completa para sus análisis y de esa manera brindar mejorar las condiciones de seguridad en condiciones en red degradada.

Se implementaron tres métodos de búsqueda: un Aleatorio Puro, Recocido Simulado y una Búsqueda Local Iterada. Estos métodos permiten hacer una exploración de topologías en un SEP a través de la modificación de los estados de los interruptores pertenecientes a las subestaciones con configuraciones tipo interruptor y medio, doble barra y anillo.

Los métodos están soportados por un pre procesamiento de la información que les permite acceder a los componentes necesarios del sistema en forma sistemática para realizar las modificaciones de manera eficiente, del mismo modo facilita la interpretación de los resultados.

1. Reconfiguraciones topológicas en sistemas de potencia

En la literatura técnica se presentan diferentes estudios basados en la modificación de la topología del SEP. Con la modificación en la topología se busca comúnmente el alivio de sobrecargas, mejoramiento de los perfiles de tensión, aumento de confiabilidad y disminución de los costos de operación. El planteamiento de las soluciones ha sido enfocado principalmente en la apertura de líneas de transmisión y división de subestaciones. La primera solución hace referencia a encontrar un enlace para ser sujeto al cambio de estado y la segunda busca hallar la mejor distribución posible en cada barra de las bahías de línea o de transformación en una subestación. Ambas soluciones tienen como objetivo mejorar las condiciones para la red eléctrica en términos de seguridad y economía, respecto las que se tenían previo la implementación de las modificaciones.

En [1] se propone un algoritmo para aliviar las sobrecargas originadas por una contingencia considerando la apertura de circuitos. Los circuitos candidatos para ser abiertos se seleccionan a través de diversos métodos como el cálculo de factores de sensibilidad, el uso de los elementos dispersos de la matriz de impedancia y el valor de la reactancia de las ramas. En [2] y [3] se consideran además de las sobrecargas, las violaciones de tensión que podrían originarse producto de las reconfiguraciones topológicas y el nivel de carga del sistema. En [2] se desarrolló un algoritmo capaz de encontrar la mejor línea e interruptores en una subestación a ser cambiados de estado, para mejorar las condiciones de sobrecargas y violaciones por tensión. En su implementación se considera el flujo de potencia desacoplado rápido con limitador de iteraciones y un índice de rendimiento de margen de seguridad. Por otro lado, en [3] los cambios topológicos que mejoran las condiciones de cargabilidad y tensiones del SEP se realizan basados en sensibilidades. Estas son halladas con el método de Newton-Rapshon, una técnica inversa dispersa y un modelo de compensación de potencia para líneas y subestaciones. La metodología permite simular acciones simultáneas en los interruptores de las subestaciones y líneas de transmisión con el objetivo de aliviar sobrecargas y violaciones de tensión ocasionadas por las contingencias.

En [4], [5], [6], [7] y [8] se han dirigido los esfuerzos en disminuir los costos de operación del SEP, integrando en un mismo problema la programación de los recursos de generación y las aperturas óptimas de líneas de transmisión. Los autores utilizan modelos con flujos de carga DC para lograr la linealización del problema. En [5] y [7] se realizan validaciones de la respuesta del modelo DC con flujo de carga AC para verificar la factibilidad de las respuestas.

En [4], [5] y [8] se proponen modelos de programación entera mixta (PEM) para disminuir el costo de la operación con la apertura de líneas de transmisión. En [4] se utilizan variables binarias para representar el estado de los elementos de transmisión, una técnica heurística para identificar los mejores candidatos a ser modificados y la división del problema a través de conjuntos para lograr una mayor eficiencia computacional. En [5] se plantea un algoritmo cíclico que realiza la búsqueda de candidatos de reconfiguración topológica por

medio de un flujo óptimo de potencia DC (DCOPF por sus siglas en inglés), y se evalúa su desempeño a través de un flujo óptimo de potencia AC (ACOPF por sus siglas en inglés) hasta que el sistema no presente ninguna violación por sobrecarga. En [8] se desarrolla el concepto de *Auxiliary Induce Function* (AIF), que funciona como un acelerador en la búsqueda de la topología óptima. El AIF es introducido en la función objetivo, de tal forma que los coeficientes de las variables de integración son estratégicamente modificados para relajar el problema.

En [6] y [7] se plantea la apertura de líneas de transmisión para disminuir el costo de operación encontrando topologías que disminuyan las restricciones. Para encontrar las soluciones se utilizan técnicas heurísticas y de programación no lineal entera mixta (PNLEM). En [6] se propone una búsqueda basada en un parámetro de clasificación de línea a través del cual se exploran diferentes topologías. Estas son alcanzadas con la ayuda de dos heurísticas que resuelven una secuencia de modelos basados en programación lineal (PL) y otros planteados como PEM relajados, buscando rendimiento computacional. En [7] se afrontó la búsqueda de aperturas de líneas de transmisión y despacho de unidades de generación, para minimizar el costo del programa de generación usando descomposición de Benders. La metodología propuesta se basa en un sistema Maestro-Esclavo. La primera etapa de la descomposición está conformada por un Maestro y se basa en PEM. En esta fase se determina la configuración topológica del sistema, la generación de cada unidad y el flujo de potencia por los circuitos. En la segunda etapa (esclavo) se plantea un PNLEM para validar la factibilidad de las soluciones en términos de tensión y distribución de potencia reactiva.

En [9] se plantea el problema de reconfiguración óptima del SEP para el control de sobrecargas. El problema se resuelve a través de una técnica determinística y una heurística. Para la primera se propone un modelo de PEM y en la segunda un algoritmo genético. Los resultados mostrados en [9] concluyen que la solución determinística es más rápida que la heurística; sin embargo, los resultados arrojados por la heurística muestran que pueden existir varias soluciones equivalentes, lo que se convierte en un aspecto relevante debido a que permite elegir al operador la solución que considere adecuada. En [10] se proponen políticas de control de la topología de transmisión, las cuales emplean información de sensibilidad de un caso con un despacho económico y red completa definidos, para seleccionar las líneas candidatas a cambiar de estado. En [11] se propone una técnica basada en sensibilidad de las subestaciones y un método de cerramiento de las zonas con congestiones de potencia, disminuyendo así el número de variables binarias del problema y el esfuerzo computacional.

Los trabajos [12], [13], [14] y [15] muestran planteamientos más recientes respecto a las modificaciones topológicas en los sistemas eléctricos, coincidiendo en que las topologías planteadas deben ser probadas con flujos de potencia AC. Lo anterior considerando que las soluciones halladas con modelos DC pueden ocultar problemas de voltaje que

eventualmente llevarían el sistema a un punto de operación no deseado en términos de estabilidad de tensión. Por otro lado, no considerar los flujos de potencia reactiva puede implicar un menor nivel de cargabilidad en los circuitos respecto a los que se presentarían en los sistemas reales, ocultando así problemas de sobrecargas.

En [12] se busca descongestionar el sistema de transmisión y disminuir el costo de operación a través de reconfiguraciones en las subestaciones. Para ello aplican descomposición de Benders. Como problema maestro plantean un flujo óptimo DC con el propósito de modelar las reconfiguraciones en las subestaciones y con la ayuda de un método sistemático de búsqueda intentan considerar todos los posibles escenarios. En un sub problema las restricciones AC asociadas a los límites de los voltajes y líneas son validadas de manera iterativa y se van encontrando soluciones hasta que el problema llegue a un punto de convergencia. En [13] se realiza un análisis comparativo para encontrar la topología óptima de transmisión considerando flujos de potencia DC y AC. Los autores, a través de PEM y algoritmos genéticos para acelerar la búsqueda, encuentran la solución DC y verifican la factibilidad en un problema AC. Los resultados muestran que los costos de las soluciones en DC son menores que los de las soluciones AC. En [14] se intenta reducir el costo de generación a través de la apertura de líneas de transmisión. Para ello se utiliza un modelo DC, solucionado con PEM y una técnica heurística basada en un parámetro de ranking de línea, cuyo propósito es reducir el tiempo de cómputo. Se extiende la idea de un parámetro de ranking de línea para un sistema de flujo DC corregido o considerado como una aproximación al flujo AC, con el objetivo de realizar las validaciones con flujo de potencia AC. En [15] utilizan una técnica de optimización de dos niveles buscando reducir los costos de operación, en el nivel superior un modelo de programación cónica entera mixta de segundo orden provee los candidatos, mientras la factibilidad del problema es verificada en el nivel inferior.

En [16], [17], [18] y [19] se muestran aplicaciones de las reconfiguraciones óptimas para evitar recirculación de flujos paralelos de potencia, consideraciones probabilísticas de confiabilidad y métodos para el cambio de topología para la operación en tiempo real. En [16] se destaca la importancia de las reconfiguraciones topológicas para evitar flujos indeseados de potencia en corredores de interconexión. Los autores diseñaron un algoritmo que tiene como función principal reducir el factor de distribución de transferencia de potencia, asignado a un intercambio con referencia a un conjunto de líneas. En [17] y [18] se combinan conceptos de confiabilidad probabilística y modificaciones topológicas con el propósito de disminuir los costos de operación, por medio del desplazamiento del criterio tradicional de confiabilidad N-1 por otro que considere tasas de falla de los elementos, tiempo de restauración y una valoración económica de la demanda no atendida. En [19] se plantea el problema de topología óptima con dos horizontes de tiempo. El primero hace referencia a la operación en tiempo real donde existen limitaciones de tiempo para la toma de acciones, el segundo horizonte hace referencia a la planeación de la operación. Para resolver ambos horizontes con los requerimientos de tiempos establecidos,

se realiza una serie de simplificaciones al problema de tiempo real, mediante el acotamiento de límites y reducción de variables, a diferencia del enfoque de planeamiento que tiene un problema con mayores restricciones.

En [20] se realizó una co-optimización del despacho horario de energía y la topología de transmisión en un lapso de 24h, considerando la red del sistema de transmisión europeo, dividiéndola por regiones o zonas y cada región asume la optimización de la topología. Los modelos son solucionados con PEM de manera interactiva, compuesta básicamente por dos etapas. En primera instancia para una topología fijada se soluciona el problema de generación de potencia para las 24h, considerando las características técnicas de las unidades, en una segunda se soluciona el problema de transmisión y se genera un nuevo programa de despacho, repitiéndose los ciclos hasta evaluar todos los candidatos. Los resultados mostraron que se pueden obtener ahorros en la operación del sistema dejando en evidencia la utilidad de las modificaciones topológicas.

En la Tabla 1 se presenta un comparativo de las referencias bibliográficas consultadas en el desarrollo de este trabajo. Se indica el tipo de problema, la estrategia de solución y los métodos utilizados para resolverlo.

Tabla 1. Resumen comparativo de las referencias bibliográficas.

Referencia	Problema a solucionar	Estrategia de solución	Métodos
[1]	Sobrecargas	Apertura de líneas, división de subestaciones	Modelo DC, factores de sensibilidad lineales
[2]	Sobrecargas, tensiones	Apertura de líneas, división de subestaciones	Técnica inversa dispersa y flujos de carga desacoplados rápido
[3]	Sobrecargas, tensiones	Apertura de líneas, división de subestaciones	Técnica inversa dispersa y flujos de carga NR, Sensibilidades, PEM
[4], [8], [10], [20]	Sobrecargas, despacho económico	Apertura de líneas	Modelo DC, PEM
[5]	Sobrecargas, despacho económico, tensiones	Apertura de líneas	Modelo DC con verificación AC, PEM
[6]	Sobrecargas, despacho económico	Apertura de líneas	Modelo DC, heurísticas, PEM
[7]	Sobrecargas, despacho económico, tensiones	Apertura de líneas	Modelo AC PNLEM, (Descomposición de Benders)

Referencia	Problema a solucionar	Estrategia de solución	Métodos
[9]	Sobrecargas, despacho económico	Apertura de líneas, división de subestaciones	Modelo DC, PEM y algoritmos genéticos
[11]	Sobrecargas, despacho económico	Apertura o cierre de interruptores en subestaciones	Modelo DC , PEM
[12]	Sobrecargas, despacho económico	Apertura o cierre de interruptores en subestaciones	Modelo AC y DC (Descomposición de Benders)
[13]	Despacho económico, sobrecargas, tensiones, pérdidas	Apertura de líneas	Modelo AC PNLEM
[14]	Sobrecargas, despacho económico, tensiones	Apertura de líneas	Modelo DC con validación AC, PEM
[15]	Sobrecargas, despacho económico, tensiones	Apertura de líneas	Modelo DC con validación AC, PEM
[16]	Circulación de flujos de potencia indeseados	Apertura o cierre de interruptores en subestaciones	Algoritmos genéticos
[17]	Despacho económico, confiabilidad probabilística	Apertura de líneas	Modelo DC, PEM, Monte Carlo para selección de fallas
[18]	Despacho económico, sobrecargas, tensiones, valoración de DNA	Apertura de líneas	Modelo AC, PEM, PNLEM
[19]	Sobrecargas, tensiones, estabilidad	Apertura o cierre de interruptores en subestaciones	Modelo AC, PEM, PNLEM

Los trabajos consultados a la fecha han dirigido sus esfuerzos en disminuir los costos de operación, cumpliendo con unos aspectos de confiabilidad mínima que en la mayoría de los casos ha sido el criterio tradicional N-1. Sin embargo, las condiciones operativas de los sistemas de potencia hacen necesario extender los criterios a N-2 o N-K, que pueden tener

como origen trabajos por mantenimiento o renovación de los sistemas de protección, fallas geológicas o condiciones anormales de orden público. Adicionalmente, las variaciones topológicas se han limitado a la apertura de una o más líneas de transmisión, o apertura de interruptores en subestaciones bajo el concepto de una decisión binaria respecto a la barra de conexión de una bahía. Lo anterior asume que todas las subestaciones tienen configuración tipo doble barra, lo que deja fuera del análisis las topologías que se pueden derivar de otro tipo de configuración de subestaciones como interruptor y medio o anillo

La contribución principal de este proyecto, con respecto a otros trabajos reportados en la literatura especializada, radica en la exploración de topologías adicionales a las que se pueden hallar en subestaciones tipo doble barra, y en explorar las características que brindan las subestaciones tipo anillo e interruptor y medio, para mejorar las condiciones de seguridad en un SEP con red degradada. Adicionalmente, la evaluación de las condiciones de seguridad se hacen considerando un modelo AC de la red y se considera modelo bahía – interruptor para la evaluación de contingencias.

En este trabajo, a diferencia de otros reportados en la literatura técnica se considera el modelo bahía – interruptor que permite hacer una evaluación de las condiciones reales de liberación de fallas en el sistema de potencia, ya que el análisis de contingencia utiliza los interruptores adyacentes al punto de falla para su despeje. Al considerar los cambios topológicos esta evaluación es vital para no entrar de manera involuntaria en condiciones más desfavorables que las que se tienen en la red inicial.

Este trabajo puede ser usado como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la operación de SEP, sirviendo de guía para abordar problemas de seguridad como sobrecargas en circuitos o bajas tensiones en barras, producto del agotamiento de los recursos de generación o transmisión. De esta manera, las reconfiguraciones topológicas no se harían basadas únicamente en la experiencia del operador del sistema, sino que se tendría una forma automática de hallar reconfiguraciones, y se podría cuantificar la calidad de las mismas.

2. Descripción del sistema de pruebas

2.1. Selección del sistema de pruebas

Para validar aplicabilidad de la metodología propuesta se utilizó el sistema de prueba IEEE de 118 barras. Este sistema cuenta con 184 ramas, 91 cargas y 19 generadores. Este sistema ha sido utilizado en diferentes líneas de investigación como estabilidad de tensión [21], flujo óptimo de potencia [22], apertura de líneas de transmisión y reconfiguración de subestaciones para disminución de costos de generación [11], entre otros.

La idoneidad del sistema de pruebas se mide de acuerdo a características como: número de barras, número de conexiones entre barras, número de cargas, número de generadores y número de líneas asociados a las barras. Los atributos están directamente relacionados al tamaño del sistema. Este debe ser lo suficientemente grande para que una búsqueda exhaustiva no sea la manera viable de solucionar el problema, además de presentar una variedad mayor de soluciones, pues en un sistema pequeño las alternativas topológicas para mejorar las condiciones de seguridad son limitadas.

El sistema de pruebas fue modificado con el propósito de que fuera funcional para evaluar las condiciones de seguridad después de aplicar los cambios topológicos. Para ello se incluyeron fuentes no convencionales de energía y se modificó la capacidad de algunos circuitos y transformadores. Las fuentes renovables cumplen el papel de generadores dentro del SEP de pruebas, por lo tanto, su generación debe mantenerse constante durante los análisis de acuerdo al planteamiento de este trabajo. En el capítulo de anexos se muestra el detalle de la red modificada.

En la Figura 1 se muestra el diagrama unifilar del SEP de pruebas considerado para este trabajo. Se muestra el acotamiento por zonas del SEP dado que se realizaron pruebas para mostrar la capacidad de los algoritmos de búsqueda de trabajar en porciones una red eléctrica. La distribución de los elementos en cada zona se realizó en forma determinística, considerando que en cada zona exista un número de subestaciones suficientes para que realizar una búsqueda topológica por enumeración exhaustiva sea descartada por el tamaño.

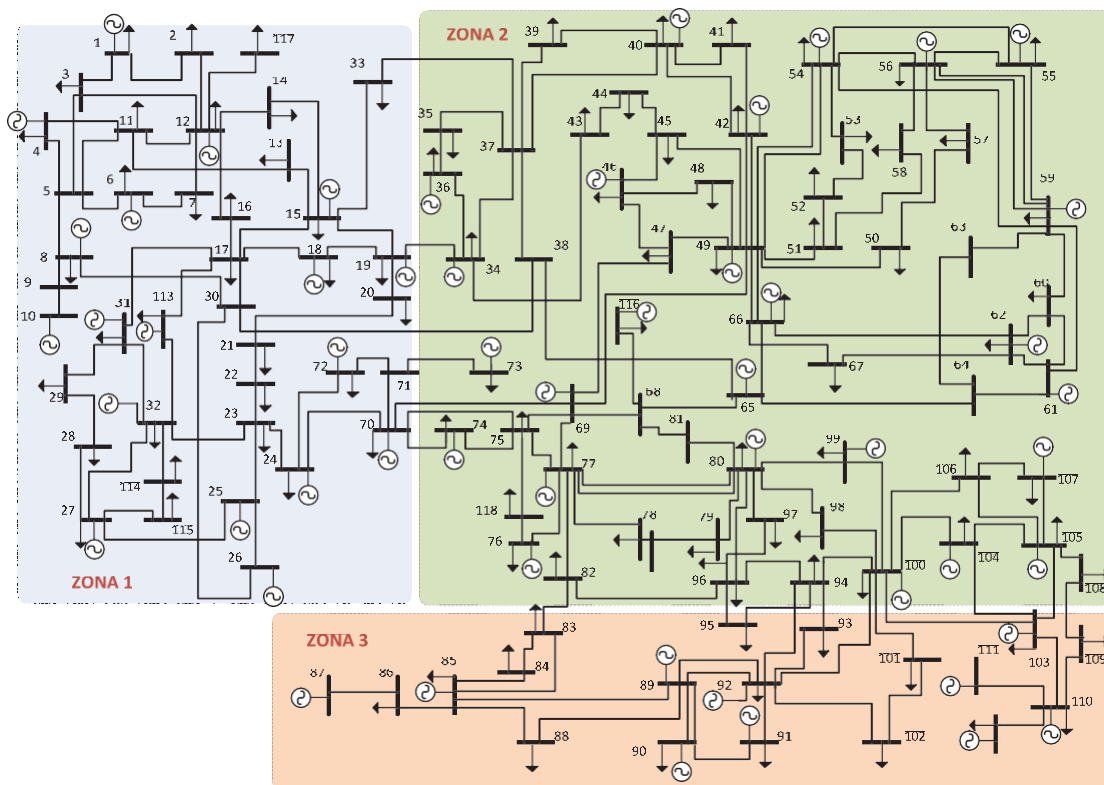


Figura 1. Sistema de pruebas con clasificación de zonas.

2.2. Adecuación del sistema de pruebas.

Para realizar los estudios asociados al SEP, como flujos de carga y análisis de contingencias, es necesario realizar un modelado del sistema considerando las características de bahía – interruptor de los componentes del SEP que se conectan a cada subestación. Esto implica que cada subestación debe estar modelada con todos los seccionadores e interruptores que componen cada una de las bahías de conexión de los diferentes elementos del SEP. En la Figura 2 se muestra la forma en que se conectan los elementos del SEP a los diferentes tipos de configuración de subestaciones consideradas en este trabajo.

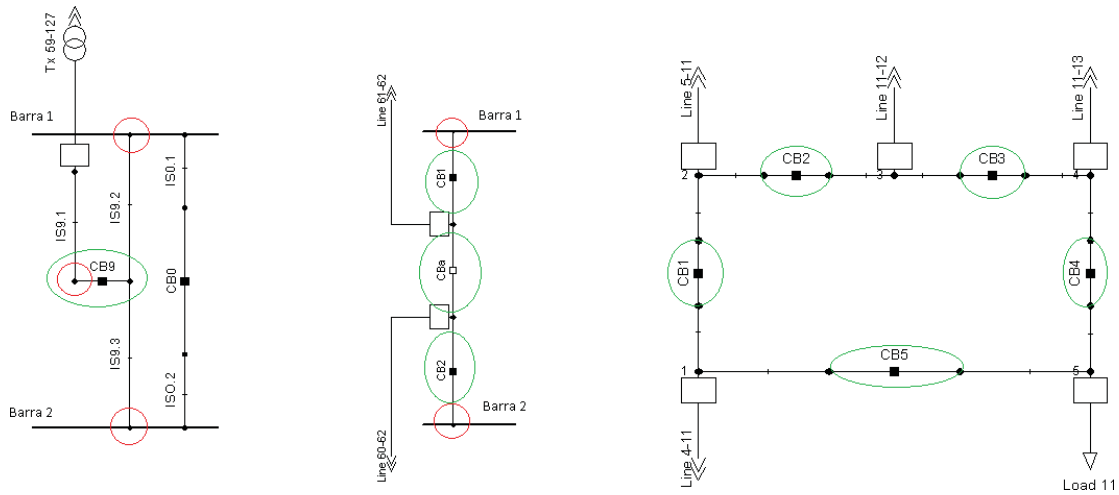


Figura 2. Modelo bahía – interruptor para conexión a subestaciones de diferentes tipos.

Todas las subestaciones del sistema IEEE de 118 barras original son del tipo barra sencilla [23]. Esto implica que la conexión de cada elemento del SEP a las subestaciones es a través de un solo interruptor. Para la ejecución de la investigación fue necesario realizar una serie de transformaciones para agregar flexibilidad a las subestaciones. Esto hace que sea necesario cambiar su tipo de configuración. Para ello se desarrolló un algoritmo de transformación de tipo de configuración de subestación con capacidad de transformar una subestación tipo barra sencilla a interruptor y medio, doble barra o anillo.

La transformación implicó la creación de nuevas barras, interruptores y seccionadores. También establecer la conexión de los objetos nuevos y redefinir la conexión de los existentes, además de la creación de todos los objetos gráficos asociados a las nuevas subestaciones. Se procedió a implementar una serie de algoritmos que permitieran ejecutar esas tareas en forma eficiente, garantizando orden para la identificación de los componentes y evitando redundancia en la creación, conexión o desconexión de elementos.

El algoritmo desarrollado en el lenguaje de programación de DIgSILENT PowerFactory tiene la capacidad de identificar qué tipo de subestaciones existen en el SEP y hacer la transformación en una sola dirección de las mismas, garantizando el número de elementos y conectividad necesarios para que el SEP no tenga alteraciones que modifiquen su constitución original. La prueba de calidad de la transformación se hizo en dos sentidos. En el primero se estable que resultado del flujo de carga antes y después de la transformación sea igual. El segundo consiste en una inspección visual de los diagramas unifilares generados para las subestaciones transformadas. La Figura 3 presenta un ejemplo de un reporte. En este se muestra el tipo de subestaciones contenidas en el SEP IEEE de 118 barras modificado para los propósitos de este trabajo.

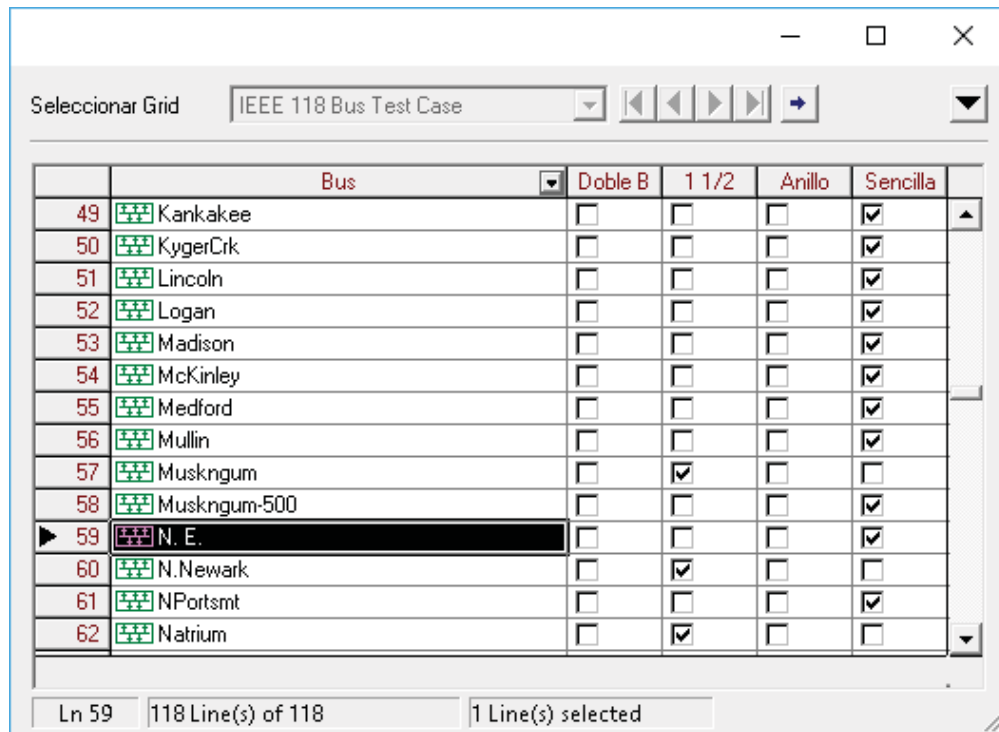


Figura 3. Comando para transformación de una subestación de tipo barra sencilla a interruptor y medio, doble barra o anillo.

De acuerdo al tipo de subestación al que se quiera migrar dentro del sistema eléctrico es necesario realizar una serie de modificaciones sobre el sistema original. En la Figura 4 se muestra el resultado de la transformación de una subestación tipo barra sencilla a una interruptor y medio. Para esto se agregó un nuevo barraje; por cada dos bahías de conexión a la subestación original se agregó un corte central que son los seccionadores e interruptor que se ven abiertos y se hacen todas conexiones correspondientes. Para esta transformación se considera que la desconexión, conexión y disposición de los elementos dentro de la subestación se realiza en orden alfanumérico.

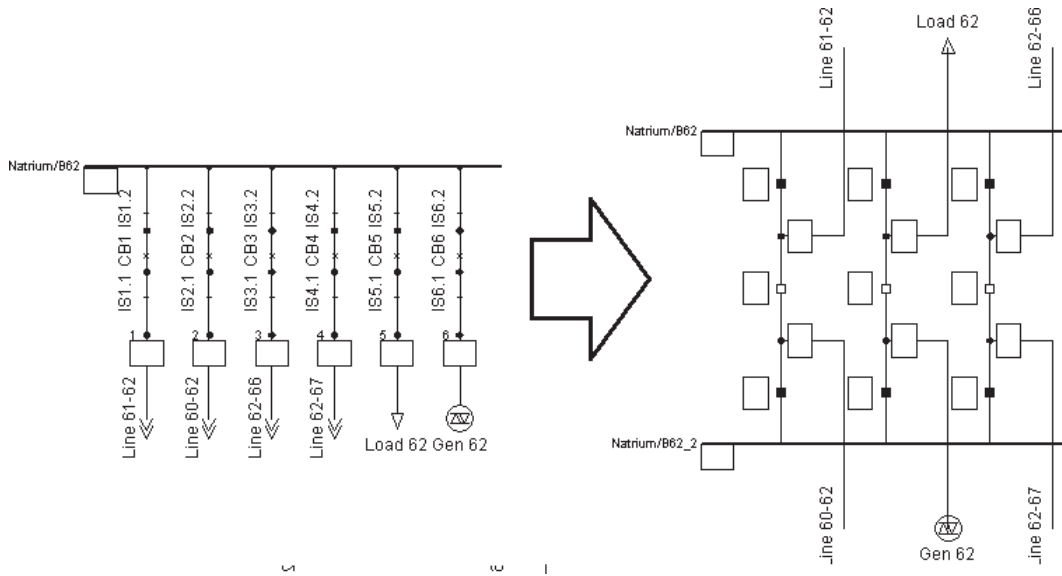


Figura 4. Transformación de una subestación barra sencilla a interruptor y medio.

En la Figura 5 se muestra el resultado de la transformación de una subestación tipo barra sencilla a doble barra. Para ello se agregó una nueva barra y un interruptor de acople de barras con sus seccionadores correspondientes. Por cada bahía de conexión en la subestación de agregó un seccionador y se modificó la conexión de las líneas, cargas y generación para que cada uno de ellos tenga la posibilidad de conectarse a las barras a través de sus seccionadores. Las conexiones se hacen con ordenamiento alfanumérico ascendiente y se conservan las convenciones de nomenclatura.

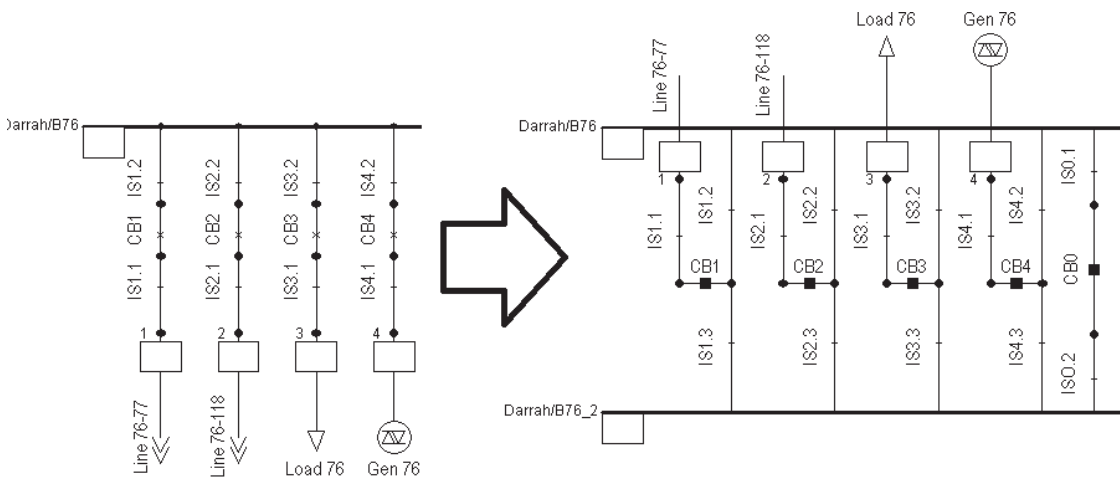


Figura 5. Transformación de una subestación barra sencilla a doble barra.

En la Figura 6 se ilustra el resultado de la transformación de una subestación tipo barra sencilla en anillo. Estas subestaciones no poseen un barraje principal; las conexiones entre las líneas, cargas y generadores se realizan a través de nodos de unión y los interruptores y

seccionadores se conectan entre sí de tal forma que generan un cerramiento. La conexión y desconexión entre los elementos pertenecientes a la subestación se hace considerando orden alfanumérico ascendente.

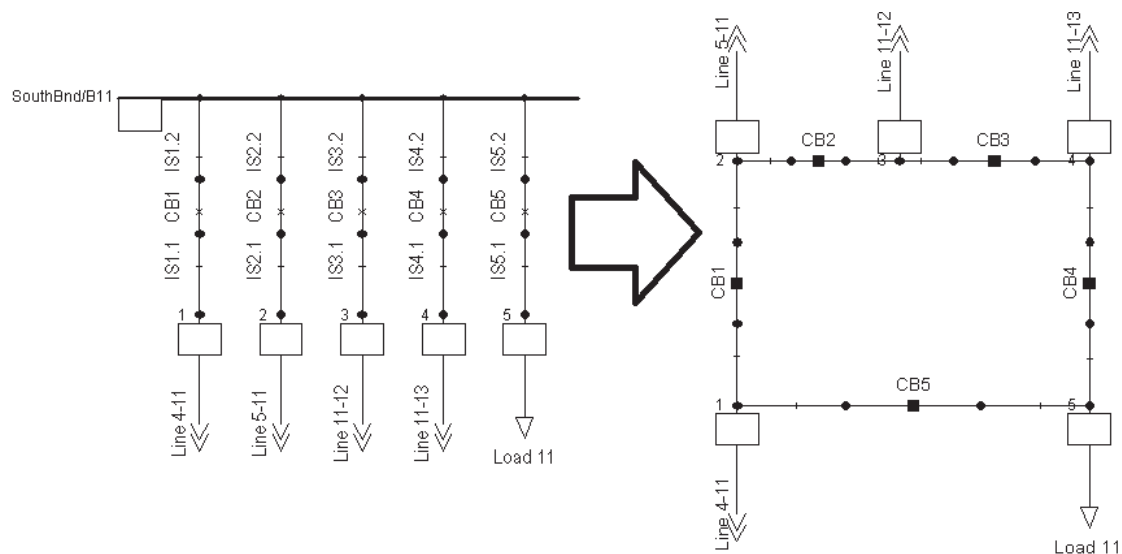


Figura 6. Transformación de una subestación barra sencilla a anillo.

2.3. Software de análisis de sistemas de potencia

Para el desarrollo de este trabajo se ha modelado el SEP en DlgSILENT PowerFactory (PF) por sus características de velocidad de cálculo, algoritmos de solución robustos, multi-procesamiento, acceso a objetos y resultados, flexibilidad de implementación y su experiencia como software de análisis de sistemas de potencia para diferentes operadores del mundo.

DlgSILENT PF posee un módulo de contingencias que tiene capacidad de realizar contingencias con gran velocidad. Para el sistema de 118 barras de la IEEE es capaz de procesar 184 contingencias en aproximadamente 3 a 4 segundos. En su ejecución considera el modelado tipo bahía – interruptor, lo que implica que identifica las topologías derivadas de la apertura de un elemento por despeje de una falla. Esto lo puede hacer porque sus algoritmos no actúan colocando fuera de servicio el elemento fallado, sino que aclaran la falla abriendo los interruptores que alimentan la misma.

El módulo de contingencias permite acceder a las variables del SEP convencionales como potencia activa, potencia reactiva, voltaje, corriente, cargabilidad, ángulos y otras especiales como desviación de tensión y desviación de cargabilidad.

La Figura 7 muestra en forma general el comportamiento del módulo de contingencias cuando es ejecutado [24].

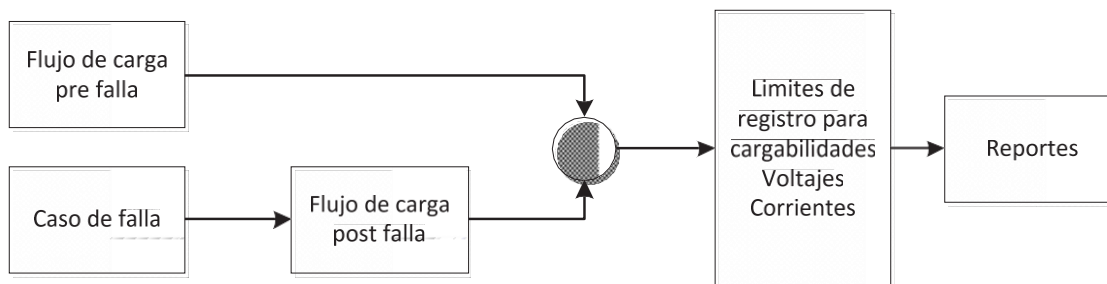


Figura 7 Método de trabajo del módulo de contingencias en PF de una fase.

PowerFactory tiene un módulo de programación DigSILENT Programming Language (DPL) que ofrece una interface para la automatización, permitiendo realizar tareas de cálculo, procesamiento de resultados, acceso a los elementos del SEP para configuración de parámetros, creación de elementos, elaboración de interfaces para intercambio de información; todo de manera iterativa o repetitiva. La programación se realiza orientada a objetos y está basada en C y C++.

Los códigos desarrollados en DPL permiten el almacenamiento de información en forma vectorial, matricial y relaciones uno a uno entre diferentes tipos de datos. Estas características permiten almacenar la información del SEP y los métodos de búsqueda en forma estructurada.

El DPL otorga la posibilidad de desarrollo de interfaces gráficas para la administración de información como datos de entrada o de salida. También se puede administrar los parámetros de entrada de los algoritmos, tener información acerca de los elementos del sistema como el tipo de subestación a la que pertenece una barra, presentar resultados de los análisis y ejecución de comandos. Considerando que el software utilizado para el desarrollo de este trabajo fue el PowerFactory los DPL fueron una herramienta indispensable para la implementación de los métodos de búsqueda topológica debido a las características previamente expuestas.

El PowerFactory posee una interfaz gráfica que permite tener varias representaciones del SEP. Se pueden tener diagramas de visión de conjunto donde se aprecia cuantas divisiones eléctricas existen en una subestación con apertura de algunos de sus interruptores; diagramas unifilares clasificados por áreas o zonas, representación de subestaciones en detalle considerando en sus bahías los interruptores y seccionadores asociados, presentación de resultados personalizables respecto las variables a mostrar, número de cifras decimales y presentación de unidades. Además, los tamaños de los elementos y resultados son ajustables para obtener la representación deseada por el usuario.

La representación gráfica del SEP cobra gran importancia en el marco de este trabajo para el análisis de los resultados de las búsquedas, debido a la complejidad que tiene la interpretación de una respuesta asociada a una modificación topológica sin visualizarla gráficamente.

En PowerFactory se encontró un software de análisis de sistemas eléctricos de potencia que contiene todas las características necesarias para el desarrollo de este trabajo. Lo que se convierte en una gran ventaja porque no es necesario utilizar software adicional para realizar cálculos, procesar datos o almacenar información. Este software es utilizado por operadores de SEP en lugares de la América Latina como Bolivia, Ecuador, Colombia y Chile; en Centroamérica República Dominicana; y en Europa, Alemania.

2.4. Estructura de base de datos, Definición de elementos, barras y cubículos.

El PowerFactory es concebido como una base de datos que puede almacenar proyectos. Cada proyecto representa un SEP. Como base de datos, esta tiene un lugar reservado para alojar los objetos de acuerdo a su clase y funcionalidad. Existen objetos de almacenamiento, parametrización, ejecución, agrupación, definición de eventos, modelos de control, automatización, ajustes, entre otros.

La información de los objetos que hacen referencia al SEP se encuentra bajo la estructura que se presenta en la Figura 8. Se resalta que todos los componentes del SEP se encuentran en el mismo nivel jerárquico excepto las barras que se encuentran debajo de las subestaciones. Esto no es obligatorio, pero es una buena práctica desde la óptica de los creadores del software; por lo tanto, para este trabajo se considera que las barras se encuentran almacenadas dentro de las subestaciones.

Las conexiones entre elementos del SEP a bajo nivel se realizan a través de cubículos que se puede entender como una bahía dentro de una subestación. Los cubículos contienen la información de conexión entre los elementos y además albergan los sistemas de medición y de protección. Otra funcionalidad de los cubículos es delimitar áreas eléctricas y así formar fronteras logrando identificar intercambios de potencia entre áreas operativas.

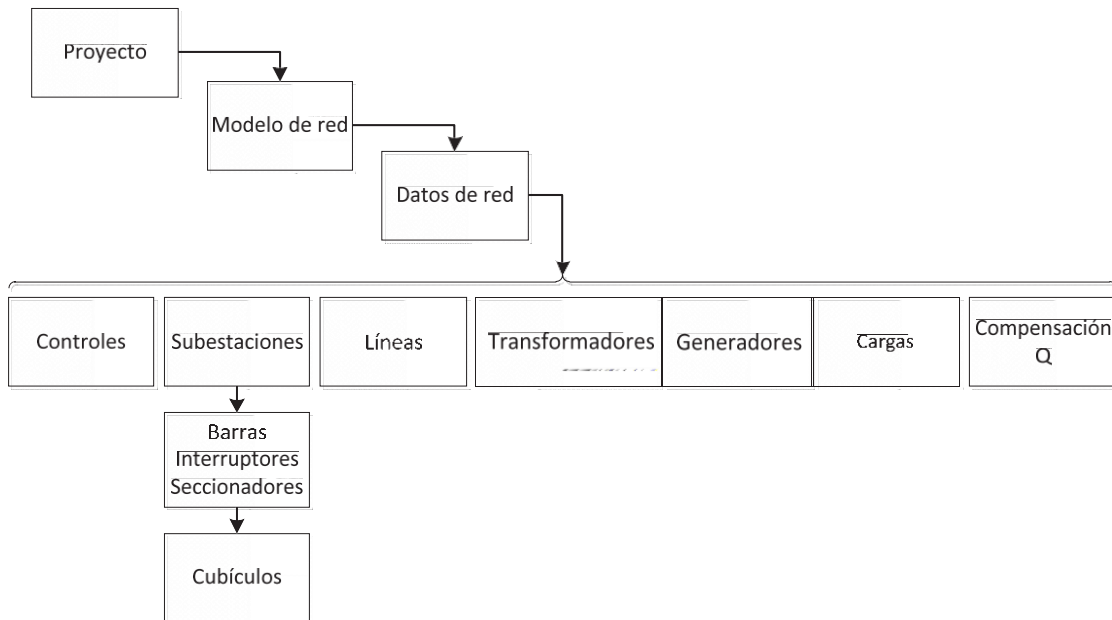


Figura 8. Estructura de almacenamiento de los objetos del SEP en el PF.

2.4.1. Definición de Elemento

En la Figura 8 en la tercera línea jerárquica se encuentran los principales objetos del sistema de potencia, controles, subestaciones, líneas, transformadores, generadores, cargas y compensación. PowerFactory determinó que ellos serían llamados elementos dentro del programa. Sin embargo, para la comprensión del tema que se va a desarrollar en adelante se llamará **elementos** a aquellos objetos del SEP que se conectan a una subestación a través de una barra y su vez de un cubículo.

Los elementos quedan limitados entonces a líneas de transmisión, transformadores, generadores, cargas y compensaciones reactivas. En la Figura 6, tomando como referencia la definición presentada, los elementos que están en la subestación 11 son: Line 4-11, Line 5-11, Line 11-12, Line 11-13 y Load 11.

Esta definición y las que se presentan a continuación son necesarias para comprender la forma en que se implementaron los métodos de búsqueda de topologías que mejoren la seguridad en sistemas eléctricos de potencia.

2.4.2. Definición de Bahía

Una bahía está definida como el conjunto de seccionadores e interruptores que permiten la conexión de los elementos a las subestaciones tipo doble barra y anillo.

En las subestaciones tipo doble barra las bahías asociadas a los elementos están compuestas por tres seccionadores y un interruptor. Los seccionadores son los encargados de realizar la conexión de los elementos a barra 1 o barra 2 y asilar el interruptor en caso de mantenimientos. Para este tipo de subestación existe una bahía de acople de barras compuesta por dos seccionadores y un interruptor encargados de aislar eléctricamente los elementos asociados a cada una de las barras.

En las subestaciones tipo anillo, las bahías asociadas a los elementos están compuestas por dos grupos de dos seccionadores y un interruptor conectados en serie con los demás objetos de corte de la subestación. Este tipo de subestaciones tiene como particularidad que uno de los grupos de seccionadores e interruptores son compartidos con el elemento adyacente.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de los objetos que componen la bahía asociada al elemento Line 76 - 77 y la bahía asociada al acople de barras para una subestación tipo doble barra. Para la subestación tipo anillo se resaltan los interruptores y seccionadores que componen la bahía y se encuentran asociados al elemento Line 11 - 12.

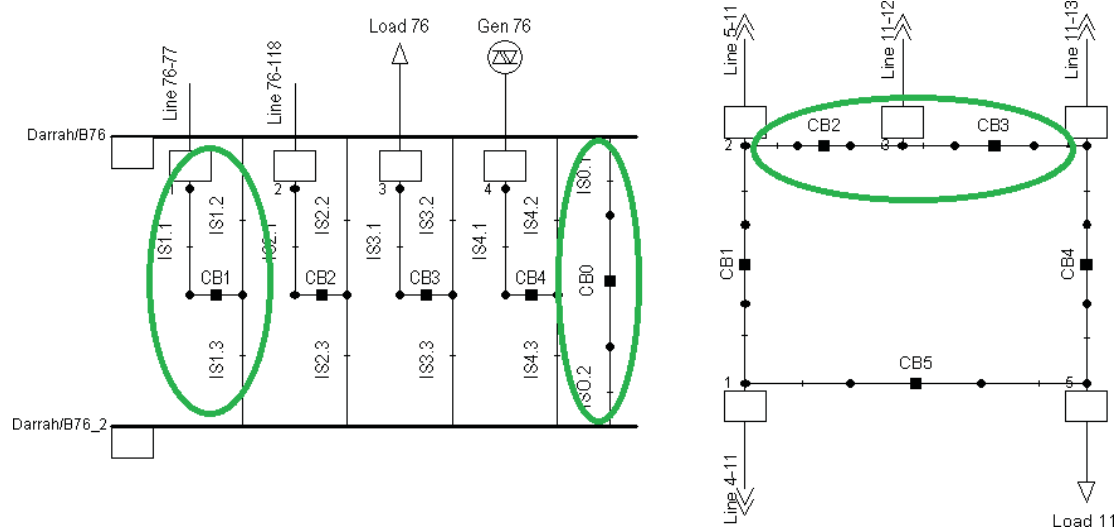


Figura 9 Identificación de bahía en subestación tipo doble barra y anillo.

2.4.3. Definición de Diámetro

Se conoce como diámetro al arreglo de seccionadores e interruptores que permiten la conexión de dos elementos adyacentes a una subestación tipo interruptor y medio. Un diámetro está compuesto por tres interruptores que se encargan de conectar a los

elementos a barra 1, barra 2 y entre ellos mismos, entre cada interruptor y las barras existen seccionadores encargados de asilar los interruptores en caso de mantenimiento.

En adelante llamaremos interruptor del elemento 1, a aquel que se encarga de conectar elementos a barra 1, interruptor del elemento 2, al que conecta los elementos a barra 2 y corte central al encargado de realizar la conexión entre los elementos 1 y 2.

En la Figura 10 se muestra una subestación interruptor y medio con tres diámetros. A cada diámetro pueden llegar diferentes tipos de elementos del SEP, se resalta el diámetro al que llegan las líneas 61-62 y 60-62.

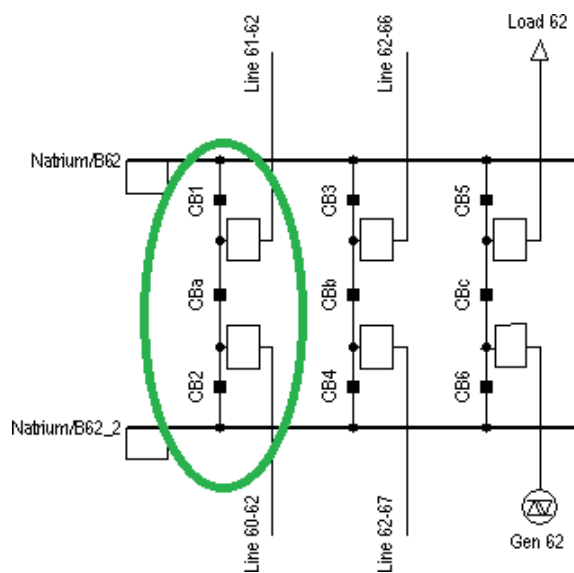


Figura 10. Identificación de un diámetro en una subestación tipo interruptor y medio.

3. Preproceso

La ejecución del pre proceso tiene como objetivo almacenar la información topológica de la parte del sistema de interés y almacenarla en forma estructurada, lo que ayuda en tres aspectos principales. Primero, disminuye la exploración de condiciones topológicas eléctricamente equivalentes; segundo, permite la identificación y acceso a los elementos con sus bahías o diámetros asociados y tercero, da flexibilidad para la implementación de diferentes métodos metaheurísticos.

En los SEP existen topologías eléctricamente equivalentes debido a la combinación de estados de los interruptores y secciones dentro de las subestaciones que son redundantes. Un ejemplo de esta situación se presenta en una subestación tipo doble barra donde el acople se encuentra cerrado. En este caso la asociación de un elemento a barra 1 o barra 2 a través de los seccionadores carece de sentido desde la perspectiva del flujo de carga y cubrimiento de contingencias sencillas porque cualquier conexión tiene como resultado el mismo punto eléctrico.

El almacenamiento estructurado de la información permite que la identificación y localización de los elementos en el SEP sea efectiva. Esto se convierte en un catalizador en el funcionamiento de los métodos de búsqueda porque se reduce el esfuerzo computacional para encontrar y acceder los componentes del SEP que se van a modificar para alcanzar las topologías deseadas.

El pre proceso es una plataforma desde la cual se caracteriza una solución que brinda la flexibilidad necesaria para implementar diferentes tipos de métodos de búsqueda. A partir de este se encuentra la manera más conveniente de alcanzar la topología deseada.

3.1. Identificación de tipo de subestación en el SEP

El objeto de entrada en el pre proceso es una subestación. Esta es explorada para identificar el tipo de configuración que la compone y para ello se emplearon una serie de algoritmos basados en conteo e identificación de barras principales y número de conexiones de los interruptores a las mismas. La clasificación se realiza con base en los aspectos que se presentan a continuación.

En subestaciones tipo interruptor y medio se cuenta el número de barras. Estas deben ser dos (Barra 1 – Barra2) contenidas en el objeto subestación y se garantiza que cada uno de los interruptores tenga conexión eléctrica a por lo menos una de las barras y máximo a las dos como se muestra en la parte izquierda de la Figura 11. En los óvalos verdes se encuentran delimitados los interruptores y en los círculos rojos los puntos donde se da la conexión eléctrica con las barras. Los nodos internos de la subestación son despreciados en los casos donde comparten conexión con elementos que se encuentran ubicados en la estructura de la base de datos del PowerFactory por fuera del objeto subestación.

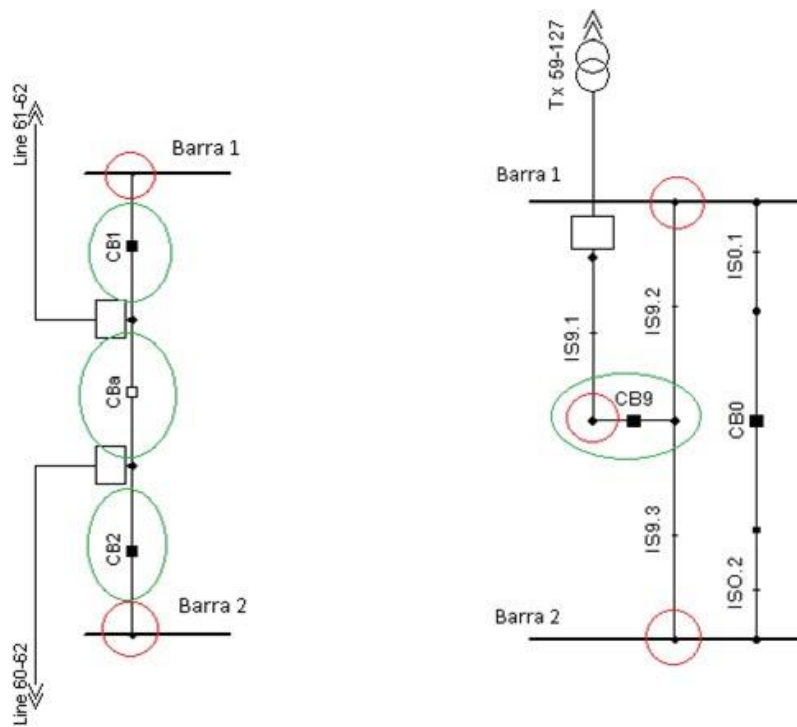


Figura 11. Identificación subestaciones tipo interruptor y medio, doble barra.

En las subestaciones tipo doble barra se tienen las mismas consideraciones que para las subestaciones tipo interruptor y medio, excepto en el número máximo de conexiones de los interruptores a las barras. Para estas se consideran hasta tres conexiones a barras o nodos internos que no conectan elementos que se encuentran por fuera del objeto subestación en la estructura de la base de datos de PF. En la parte derecha de la Figura 11 se muestra el detalle de una subestación tipo doble barra. La bahía del elemento asociado solo contiene un interruptor y se encuentra señalado por un ovalo color verde. Este tiene tres conexiones eléctricas señaladas con círculos rojos.

La identificación de las subestaciones tipo anillo es realizada contando el número de barras principales dentro de la subestación. Si el resultado del conteo es igual a cero implica que es una subestación tipo anillo. En la Figura 12 se muestra que para este tipo de subestación no hay un barraje definido; por lo tanto, considerar esto para su identificación es adecuado.

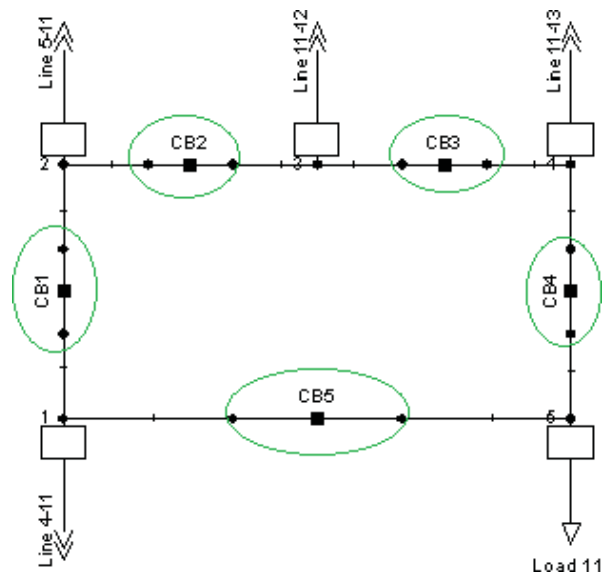


Figura 12. Identificación subestación tipo anillo.

3.2. Exploración de subestación tipo interruptor y medio

Después de identificada una subestación tipo interruptor y medio es necesario conocer que objetos tiene asociados dicha subestación para proceder a su almacenamiento. Para ello, esta debe ser explorada y se aprovechó la característica de su configuración que establece por cada dos elementos conectados tres interruptores, dicho arreglo se conoce como diámetro.

La exploración se basó en el recorrido de la subestación diámetro por diámetro. En primera instancia se identifica la barra 1 y la barra 2, después se parte desde la barra 1 hacia la barra 2, identificando cada uno de los componentes que las une (diámetro). El resultado de este recorrido debe identificar para cada diámetro el elemento 1 y el correspondiente interruptor que lo conecta a la barra 1, el elemento 2 y el correspondiente interruptor que lo conecta a la barra 2; por último, el interruptor de corte central que es el encargado de unir o aislar los elementos 1 y 2 eléctricamente.

3.3. Exploración de subestación tipo doble barra

En las subestaciones doble barra se deben identificar todas las bahías asociadas a los elementos y adicionalmente la bahía de acople de barras, con el objetivo de realizar el almacenamiento de los componentes de la subestación en forma estructurada. Además, se

consideran las particularidades de las bahías de conexión de este tipo de subestaciones para realizar su exploración.

La exploración está basada en el recorrido de la subestación bahía por bahía. En primer lugar, se identifica la barra 1 y la barra 2, para realizar la exploración desde la barra 1 hacia la barra 2, identificando cada uno de los componentes de la bahía. El resultado de esta exploración debe arrojar para cada bahía el elemento que conecta a la subestación, el interruptor asociado, el seccionador que conecta al elemento a barra 1 y el seccionador que conecta el elemento a barra 2. El acople de barras se identifica filtrando los interruptores que en sus extremos conecten de manera exclusiva la barra 1 y la barra 2.

3.4. Exploración de subestación tipo anillo

La particularidad de esta subestación ocasiona que la exploración se realice de afuera hacia adentro de la subestación. Es necesario identificar cada uno de los elementos como líneas de transmisión, transformadores, cargas o generadores que se conectan a la subestación para continuar el proceso con los objetos (seccionadores e interruptores) que se encuentran dentro de la subestación.

Esta subestación tiene como característica la ausencia de un barraje principal; por lo tanto, la exploración comienza en los elementos externos que se conectan a ella y finaliza en los interruptores con menor distancia eléctrica asociados al elemento explorado. El resultado de este procedimiento arroja los interruptores adyacentes asociados a el elemento desde el cual se comienza la exploración.

3.5. Almacenamiento de las subestaciones tipo interruptor y medio

El almacenamiento es realizado de forma estructurada. Los elementos inicialmente almacenados son la subestación, barra 1 y la barra 2. Luego se continúa con cada uno de los elementos que conforman cada diámetro: elemento 1, elemento 2, interruptor que conecta al elemento 1 a barra 1, interruptor que conecta al elemento 2 a la barra 2 e interruptor del corte central. La Figura 13 muestra cómo cada subestación con sus elementos conforma un bloque y el almacenamiento definitivo. Este está dado por el conjunto de todos los bloques (subestaciones) bajo análisis.

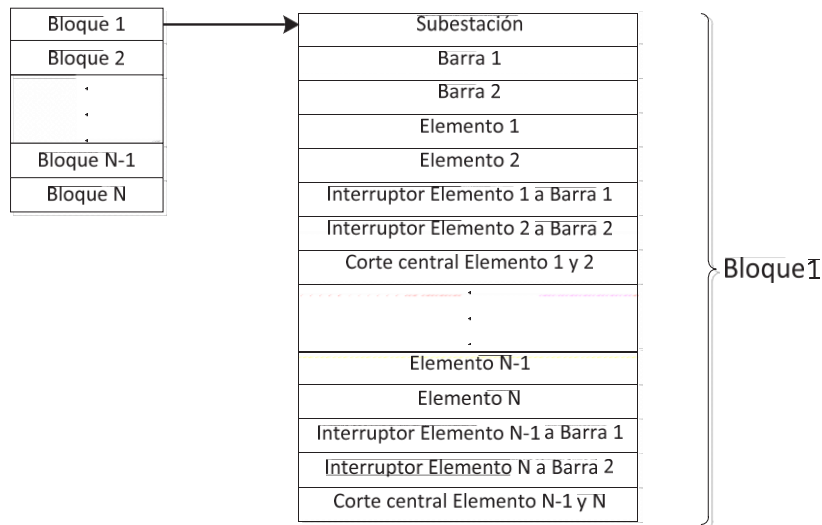


Figura 13 Almacenamiento de los elementos de las subestaciones tipo interruptor y medio.

3.6. Almacenamiento de las subestaciones tipo doble barra

El almacenamiento es realizado de forma estructurada. Los elementos almacenados son la subestación, barra 1, barra 2, acople de barras y cada uno de los elementos y seccionadores asociados a las bahías comenzando por el elemento 1, seccionador que conecta el elemento 1 a la barra 1, seccionador que conecta el elemento 1 a barra 2 y consecutivamente para los demás elementos que conforman la subestación bajo análisis. La Figura 14 muestra cómo cada subestación con sus elementos conforma un bloque y que el almacenamiento definitivo estaría dado por el conjunto de todos los bloques (subestaciones) bajo análisis.

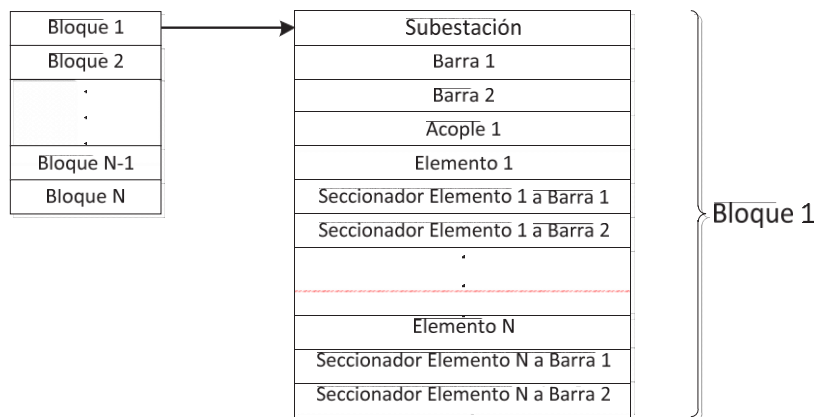


Figura 14 Almacenamiento de los elementos de las subestaciones tipo doble barra.

3.7. Almacenamiento de las subestaciones tipo anillo

El almacenamiento es realizado de forma estructurada. Se toma como referencia la subestación y los elementos conectados a ella. Los interruptores de la subestación son

asociados a cada elemento, así se comenzaría con el elemento 1 y los interruptores 1 y 2 que tiene asociados. Para este tipo de subestación se repite en un mismo bloque el almacenamiento de varios interruptores con el fin de simplificar los procedimientos en el momento de tener que consultar los datos durante los procesos de búsqueda. En la Figura 15 se muestra como cada subestación con sus elementos conforma un bloque y que el almacenamiento definitivo estaría dado por el conjunto de todos los bloques (subestaciones) bajo análisis.

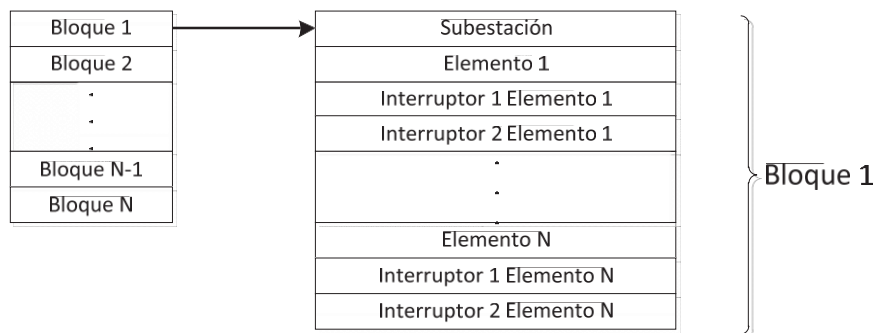


Figura 15 Almacenamiento de los elementos de las subestaciones tipo anillo.

En la Figura 16 describe los procedimientos que se ejecutan para la caracterización de la topología de acuerdo al tipo de subestación que sea candidata para la exploración topológica.

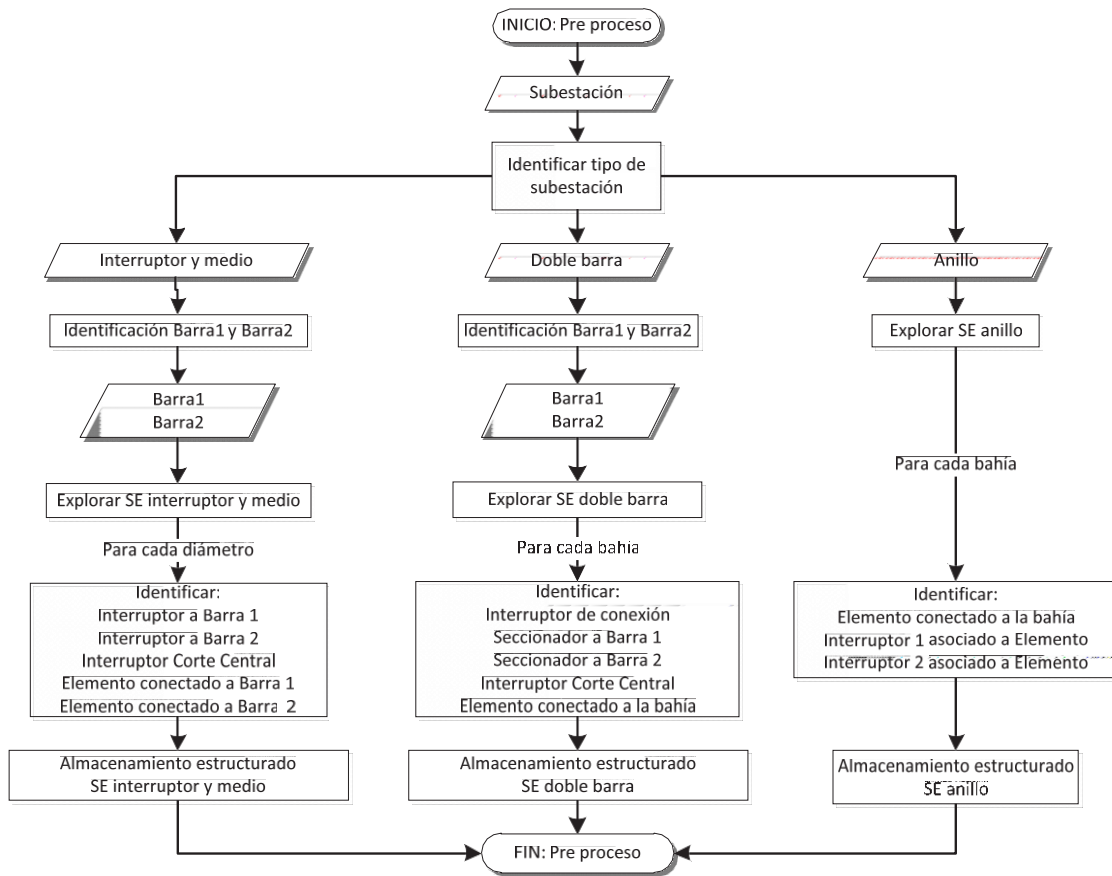


Figura 16. Pre proceso de la información asociada a las subestaciones.

3.8. Caracterización de la solución de búsqueda topológica

Cuando se aplican métodos metaheurísticos la codificación de la solución es fundamental porque de ello depende la eficiencia del método. Esta determina el espacio de búsqueda y los cambios que son soportados por la misma.

La solución que se planteó en este trabajo contiene la información relevante del SEP para la implementación de los métodos de búsqueda, subestación, barras principales, elementos asociados y estados, así como un resumen de características que son utilizadas durante los algoritmos de búsqueda.

La codificación procura por una representación adecuada de la solución y que las modificaciones que los diferentes algoritmos de búsqueda realicen sobre ella tengan sentido respecto la solución del problema.

Se plantearon dos representaciones para mostrar la topología actual. La primera representación topológica es vectorial y está conformada por dos vectores. Uno contiene

los objetos subestaciones, y elementos asociados a un diámetro o bahía y el otro tiene igual indexación y contiene la información del estado de cada diámetro o bahía. Para el segundo vector en la posición correspondiente a las subestaciones se inserta el número noventa y nueve (99) como comodín. La segunda representación es matricial donde el número de filas de la matriz es igual al número de subestaciones bajo análisis y el número de columnas corresponde al máximo número de diámetros o bahías entre las subestaciones analizadas, los números dentro de la matriz corresponde al estado de los diámetros y bahías.

Se realizan dos representaciones considerando que para hacer las operaciones de búsqueda es más conveniente tener una representación vectorial; sin embargo, para visualizar e interpretar los datos es más engorroso, por lo tanto, se planteó la representación matricial que permite condensar los resultados facilitando su interpretación.

3.8.1. Representación vectorial

La estructura general de la representación topología vectorial es mostrada en la Figura 17. El orden en el que se realiza la caracterización de estados es de acuerdo al tipo de subestación, comenzado por las tipo interruptor y medio para continuar con las doble barra y anillo, respectivamente. Como no es práctico asignar todos los elementos del diámetro en una posición, se toma como referencia el elemento conectado a barra 1. En caso de que este elemento no exista para el diámetro se tomará el elemento 2 perteneciente al mismo diámetro. En las subestaciones tipo doble barra y anillo la asignación correspondiente a la posición de las bahías se realiza a través del elemento asociado a la misma.

Con esta representación y una serie de algoritmos construidos para acceder a los elementos del sistema durante la ejecución de los métodos de búsqueda se propicia la velocidad de ejecución.

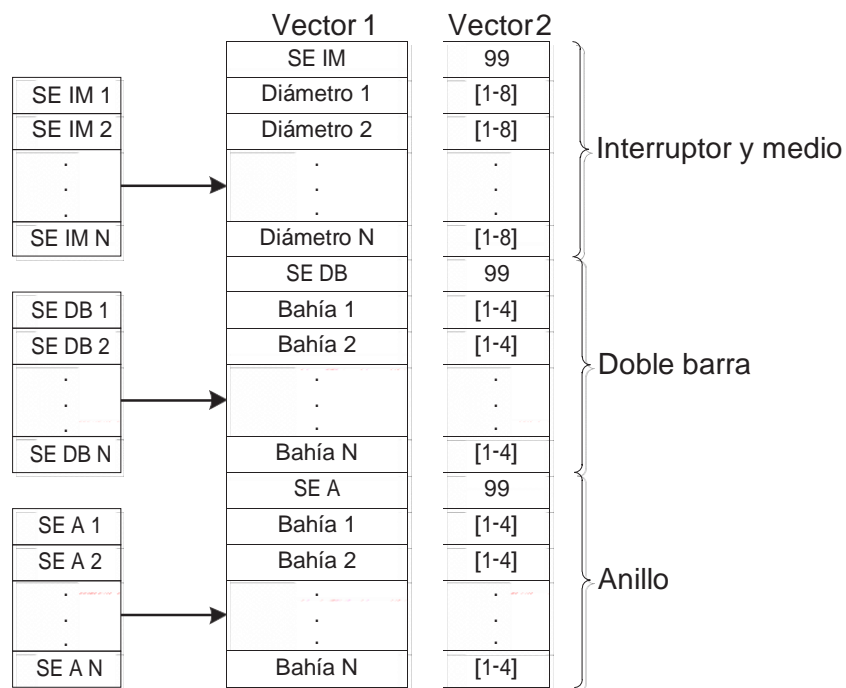


Figura 17. Solución en representación vectorial.

3.8.2. Representación matricial

La estructura de la representación de la solución en forma matricial es mostrada en la Figura 18. El orden en el que se realiza la caracterización de estados es de acuerdo al tipo de subestación. En primer lugar, se ubican las tipo interruptor y medio, siguiendo con las doble barras y se termina con las subestaciones tipo anillo, donde cada fila hace referencia a una subestación.

Como cada subestación tiene diferente número de diámetros o bahías, el número cero representa en la Figura 18 que no existe un diámetro o bahía asociado. Este tipo de representación permite ver los estados de los elementos asociados a cada diámetro o bahía de forma compacta, lo que facilita la visualización de las soluciones.

		Díámetro o Bahía 1	Díámetro o Bahía 2	...	Díámetro o Bahía N
Interruptor y Medio	SE IM 1	[1-8]	[1-8]	...	[1-8]
	SE IM 2	[1-8]	[1-8]	...	[1-8]

	SE IM N	[1-8]	[1-8]	...	[1-8]
Doble barra	SE DB 1	[1-4]	[1-4]	...	[1-4]
	SE DB 2	[1-4]	[1-4]	...	0

	SE DB N	[1-4]	[1-4]	...	[1-4]
Anillo	SE A 1	[1-4]	[1-4]	...	0
	SE A 2	[1-4]	[1-4]	...	[1-4]

	SE A N	[1-4]	[1-4]	...	0

Figura 18 Solución en representación matricial.

3.8.3. Tabla resumen de las características de una solución

Este procedimiento resume las características de la solución en términos del almacenamiento realizado en el vector de estados topológicos. Muestra en forma matricial el número con el que está indexada la subestación en la solución, el número de diámetros o bahías que posee, la posición de la subestación en el vector de topología, la posición del primer diámetro o bahía perteneciente a la subestación dentro del vector, al igual que la posición del último diámetro o bahía perteneciente a la subestación dentro del vector. Por último, establece el tipo de subestación que se está almacenando.

La Tabla 2 describe los componentes de una solución conformada por una subestación, cuyo identificador dentro de la solución es uno. El número de bahías que posee es siete, la posición de la subestación en el vector es cero, la primera bahía está en la posición uno, la última bahía está en la posición ocho y es una subestación tipo dos o sea doble barra. El vector al cual se hace referencia es el vector solución uno presentado en 3.8.1

Tabla 2. Ejemplo de descripción de atributos de una solución compuesta por una subestación.

# SE	# Bahías	Posición en el vector de SE	Posición en el vector solución de la primer bahía o diámetro de la SE	Posición en el vector solución de la última bahía o diámetro de la SE	Tipo SE
1	7	0	1	8	2

3.9. Caracterización de estados asociados a diámetros y bahías

Los seccionadores e interruptores que hacen parte de un SEP pueden tomar un estado operativo a la vez, abierto o cerrado, y con estos se determina la configuración de los circuitos eléctricos que quedan activos en la red.

En el pre proceso 3 se determinó que los estados estarían asociados a las bahías y diámetros para reducir equivalencias eléctricas y aumentar eficiencia computacional durante la búsqueda topológica; por lo tanto, cuando se asocia un estado a una bahía o un diámetro, realmente se hace referencia a los estados del conjunto de seccionadores e interruptores que los componen.

Las bahías y diámetros fueron caracterizados de acuerdo al estado operativo de los seccionadores e interruptores que los componen y al tipo de subestación a la que pertenecen.

3.9.1. Caracterización de estados de diámetros en subestaciones tipo interruptor y medio

La Tabla 3 contiene la información asociada a los estados que pueden tomar los interruptores que componen un diámetro desde el punto de vista de la conexión de los elementos asociados al mismo. Los ocho estados resultan de la combinación del estado operativo abierto o cerrado de los tres interruptores que componen un diámetro de acuerdo 2.4.3, donde uno representa interruptor del elemento 1, dos el interruptor del elemento 2 y central hace referencia al corte central.

Los datos de la Tabla 3 pertenecientes a las columnas de los interruptores representan su estado uno abiertos y cero cerrados. Para las columnas asociadas al elemento 1, elemento 2 y sus respectivas barras los datos corresponden a la conexión entre de los elementos y las barras, donde uno representa que el elemento está conectado a una barra y cero que el elemento no está conectado a una barra.

Tabla 3 Conjunto de estados para un diámetro en una subestación tipo interruptor y medio.

Estado	Interruptores			Elemento 1		Elemento 2	
	Uno	Dos	Central	Barra 1	Barra 2	Barra 1	Barra 2
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	0	0	1
3	1	0	1	1	0	1	0
4	0	1	1	0	1	0	1
5	1	0	0	1	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	1
7	0	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0

A continuación, se describe lo que representa cada uno de los estados para los diámetros.

Estado 1: Conexión de ambos elementos del diámetro a barra 1 y barra 2.

Estado 2: Conexión del elemento 1 a barra 1 y elemento 2 barra 2.

Estado 3: Conexión de ambos elementos del diámetro a barra 1.

Estado 4: Conexión de ambos elementos del diámetro a barra 2.

Estado 5: Conexión del elemento 1 a barra 1 y elemento 2 sin conexión.

Estado 6: Conexión del elemento 2 a barra 2 y elemento 1 sin conexión.

Estado 7: Sin conexión de ambos elementos del diámetro a barra 1 y barra 2 pero energizados por el corte central.

Estado 8: Sin conexión de ambos elementos del diámetro a barra 1 y barra.

3.9.2. Caracterización de estado de las bahías en subestaciones tipo doble barra

La Tabla 4 contiene la información asociada a los estados que pueden tomar los seccionadores que componen una bahía en una subestación tipo doble barra desde el punto de vista de la conexión de del elemento asociado a la misma. Los cuatro estados resultan de la combinación del estado operativo abierto o cerrado de los dos seccionadores que conforman una bahía como se describió en 2.4.2, donde uno representa el seccionador que conecta el elemento a barra 1 y dos el seccionador que lo conecta a barra 2.

Los datos de la Tabla 4 pertenecientes a las columnas de los seccionadores representan su estado: uno abierto y cero cerrado. Para las columnas asociadas al elemento y barras los datos corresponden a la conexión entre ellos, donde uno representa que el elemento está conectado a una barra y cero que el elemento no está conectado a una barra.

Tabla 4. Conjunto de estados para una bahía en una subestación tipo doble barra.

Estado	Seccionador		Elemento	
	Uno	Dos	Barra 1	Barra 2
1	1	0	1	0
2	0	1	0	1
3	0	0	0	0
4	1	1	1	1

A continuación, se describe lo que representa cada uno de los estados para las bahías en una subestación tipo doble barra.

Estado 1: Conexión del elemento a barra 1.

Estado 2: Conexión del elemento a barra 2.

Estado 3: Sin conexión del elemento.

Estado 4: Conexión del elemento a barra 1 y barra 2. Esta conexión es indeseada debido a que los seccionadores jugarían el papel de acople de barras implicando que todos los elementos en la subestación tengan conexión en ambas barras.

3.9.3. Caracterización de los estados de las bahías en subestaciones tipo anillo

La Tabla 5 contiene la información asociada a los estados que pueden tomar los interruptores que componen una bahía en una subestación tipo anillo desde el punto de vista de la conexión del elemento asociado a la misma. Los cuatro estados resultan de la combinación del estado operativo abierto o cerrado de los dos interruptores que conforman una bahía como se describió en la sección 2.4.2.

Los datos de la Tabla 5 pertenecientes a las columnas de los interruptores representan su estado: uno abierto y cero cerrado.

Tabla 5. Conjunto de estados para una bahía en una subestación anillo.

Estado	Interruptor Uno	Interruptor Dos
1	1	1
2	1	0
3	0	1
4	0	0

A continuación, se describe lo que representa cada uno de los estados para las bahías en una subestación tipo anillo.

Estado 1: Interruptor 1 y 2 asociados al elemento cerrados.

Estado 2: Interruptor 1 asociado al elemento cerrado e interruptor 2 abierto.

Estado 3: Interruptor 2 asociado al elemento cerrado e interruptor 1 abierto.

Estado 4: Interruptor 1 y 2 asociados al elemento abiertos.

3.10. Función Objetivo

La seguridad en un SEP se define como la habilidad de soportar la pérdida de elementos sin incurrir en la violación de la capacidad de los que se mantienen operativos o generar colapsos que ocasionen pérdida incontrolada de parte del SEP. Esta habilidad se evaluó para estado estacionario, o sea que todos los análisis se realizan con flujo de carga.

La función objetivo califica una topología de acuerdo a la cantidad de contingencias que sea capaz de soportar sin ocasionar violaciones de seguridad, considerando que la demanda y generación deben permanecer constantes. La función objetivo utilizada en este trabajo se presenta en (1). El primer término representa el número de sobrecargas ante una contingencia. En este caso $OL_{i,s}$ es una variable binaria que toma el valor de uno si la contingencia i produce una sobrecarga en el elemento l y cero en caso contrario. El segundo término representa el número de violaciones de tensión de las barras ante una contingencia. En este término la variable binaria $OV_{i,n}$ toma el valor de uno si la contingencia i produce una tensión por fuera de los límites en la barra n . El tercer término es una variable binaria que activa una penalización a la función objetivo ante la no convergencia del flujo de carga por una contingencia. La variable binaria CV_r toma el valor de uno cuando la contingencia r no converge, esta es multiplicada por el factor de penalización k_1 . El cuarto término representa el número de generadores o cargas que fueron desconectadas como producto de la reconfiguración topológica, la variable binaria DX_c toma el valor de uno cuando se considera una carga o generador s es desconectado y cero en caso contrario. Esta variable está penalizada por el factor k_2 . Los valores de los factores k_1 y k_2 se asignan de acuerdo al SEP de pruebas y al valor de la función objetivo para el caso sin reconfiguraciones (en este caso se utilizaron valores de k_1 y k_2 iguales a 1000 y 100, respectivamente).

$$\text{Min } fo = \sum_{i \in C} \sum_{s \in Br} OL_{i,s} + \sum_{i \in C} \sum_{n \in CN} OV_{i,n} + k_1 \times \sum_{r \in C} CV_r + k_2 \times \sum_{c \in C} DX_c \quad (1)$$

Los índices y conjuntos presentes en (1) se indican a continuación:

i	índice de contingencias de línea de transmisión o transformador.
l	Índice de ramas (líneas y transformadores).
n	índice de barras.
r	índice de contingencias sin convergencia
s	índice de desconexión de carga o generación
Ce	Conjunto conformado por el caso base y contingencias de las líneas de transmisión y transformadores del SEP.
Br	Conjunto de líneas de transmisión y transformadores del SEP.

- N Conjunto de barras del SEP.
 N_{Ce} Conjunto de contingencias para las cuales no se encuentra una solución con el flujo de carga.
 D_{cg} Conjunto de cargas y generadores del SEP.

3.11. Restricciones

En todas las variaciones topológicas del sistema se debe garantizar que se cumplan las restricciones de balance de potencia activa y reactiva. Por otro lado, se debe mantener la generación constante. Esto está dado por las ecuaciones (2) a (10). Ambos tipos de restricciones son consideradas de forma implícita mediante el software de análisis de SEP. La restricción (2) indica que la demanda no atendida debido a la desconexión de cargas debe ser menor a la demanda del nodo, Las restricciones (3) y (4) indican las expresiones matemáticas de las potencias activa y reactiva netas inyectadas en los nodos. La ecuación (5) indica los componentes de potencia activa y reactiva presentes en la potencia aparente de las ramas del sistema. Las ecuaciones (6) y (7) son las expresiones matemáticas de la potencia activa y reactiva en las ramas del sistema, respectivamente. Las ecuaciones (8) y (9) indican las restricciones de balance de potencia activa y reactiva por nodo, respectivamente. Finalmente, la restricción (10) indica la referencia angular.

$$0 \leq (P_{DS_n}) \leq P_{D_n}, \quad 6n \text{ C N} \quad (2)$$

$$P_n = V_n \sum_n V_m [g_{mn} \cos(\delta_{mn}) + b_{mn} \sin(\delta_{mn})], \quad 6l \text{ C Br}, \quad 6n \text{ C N} \quad (3)$$

$$Q_n = V_n \sum_n V_m [g_{mn} \sin(\delta_{mn}) + b_{mn} \cos(\delta_{mn})], \quad 6l \text{ C Br}, \quad 6n \text{ C N} \quad (4)$$

$$(S_S^{Br})^2 = (P_S^{Br})^2 + (Q_S^{Br})^2, \quad 6l \text{ C Br} \quad (5)$$

$$P_S^{Br} = g_{mn} V_n^2 + g_{mn} V_n V_m \cos(\delta_{mn}) - b_{mn} V_n V_m \sin(\delta_{mn}), \quad 6l \text{ C Br} \quad (6)$$

$$Q_S^{Br} = -b_{mn} V_n^2 + g_{mn} V_n V_m \cos(\delta_{mn}) - b_{mn} V_n V_m \sin(\delta_{mn}), \quad 6l \text{ C Br} \quad (7)$$

$$P_g^{Gen} - P_{D_n} + P_{DS_n} = P_n, \quad 6n \text{ C N} \quad (8)$$

$$Q_g^{Gen} - Q_{D_n} + Q_{DS_n} = Q_n, \quad 6n \text{ C N} \quad (9)$$

$$\delta_{ref} = 0 \quad (10)$$

A continuación, se ilustra la notación utilizada en las restricciones:

- *Índices y conjuntos*

m, n	Índices de barras.
l	Índice de ramas (líneas y transformadores).
g	Índice de generadores.
Br	Conjunto de líneas de transmisión y transformadores del SEP.
N	Conjunto de barras del SEP.
Gen	Conjunto de generadores del SEP.

- *Variables*

P_n^{Dn}, Q_n^{Dn}	Racionamiento de potencia activa y reactiva en la barra n , respectivamente.
P_l^S, Q_l^S	Flujo de potencia activa y reactiva por la línea l , respectivamente.
P_g^{Gen}, Q_g^{Gen}	Generación de potencia activa y reactiva del generador g , respectivamente.
P_n, Q_n	Inyecciones de potencia activa y reactiva en la barra n , respectivamente.
δ_n, V_n	Ángulo de fase y magnitud de tensión en la barra n , respectivamente.

- *Parámetros*

$P_n^{Dn,mas}, Q_n^{Dn,min}$	Demanda de potencia activa y reactiva en la barra n , respectivamente.
P_g^{mas}, Q_g^{min}	Límite máximo y mínimo de generación de potencia activa en la barra n , respectivamente.
Q_n^{mas}, Q_n^{min}	Límite máximo y mínimo de generación de potencia reactiva en la barra n , respectivamente.
P_l^{mas}, P_l^{min}	Límite máximo y mínimo de potencia activa por la línea l , respectivamente.
Q_l^{mas}, Q_l^{min}	Límite máximo y mínimo de potencia reactiva por la línea l , respectivamente.
S_l^{mas}, S_l^{min}	Límite máximo y mínimo de potencia aparente por la línea l , respectivamente.
$\delta_n^{mas}, \delta_n^{min}$	Límite máximo y mínimo de ángulo de fase en la barra n , respectivamente.
δ_n, V_n	Ángulo de fase y magnitud de tensión en la barra n , respectivamente.
g_{mn}	Conductancia de la línea l , en conecta las barras m y n .
V_{mn}	Susceptancia de la línea l , en conecta las barras m y n .
δ_{mn}	Diferencia angular de las barras m y n .

Los cambios de potencia activa y reactiva resultantes de las pérdidas del sistema ante las reconfiguraciones topológicas son asumidos de manera exclusiva por el nodo slack. Se permite que partes del SEP queden aisladas con algunas cargas siempre y cuando esto favorezca la seguridad y no se violen los parámetros de capacidad de generadores que cierran el balance de potencia.

4. Métodos de búsqueda

Los métodos de búsqueda utilizados en el desarrollo de este trabajo fueron: recocido simulado, búsqueda local iterada y aleatorio puro. Estos métodos son basados en una solución; lo que significa que toda la exploración se realiza buscando mejorar un candidato de solución y no un conjunto de soluciones. La razón para utilizar estas metodologías se fundamenta en reducir el esfuerzo computacional y poder lograr su aplicación no solo en el ámbito académico sino empresarial, logrando que la herramienta se pueda mantener vigente el mayor tiempo posible.

Estos métodos están compuestos normalmente por dos etapas. En la primera se construye la solución inicial y en la segunda se mejora la solución construida. La solución inicial para el problema abordado está dada por el estado actual del sistema; es decir, con los estados los interruptores y seccionadores que se opera en condiciones normales (recomendados por los equipos de planeación operativa). Sin embargo, en caso de cambiar la solución inicial los métodos de búsqueda implementados realizan su trabajo de manera adecuada. Esta característica permite inicializar los métodos de búsqueda desde puntos de operación que se tienen identificados como capaces de mejorar las condiciones de seguridad, o sea, que se consideran soluciones conocidas dentro de la búsqueda; de esta manera se estaría considerando la experiencia operativa sobre un SEP.

La segunda etapa consiste en modificar la solución inicial para mejorar la función objetivo dada en (1). Para esto, se deben considerar tres conceptos que fundamentan este tipo de técnicas: vecindario, movimiento y distancia. El vecindario es el nombre asignado a un espacio de búsqueda cercano o reducido que puede alcanzar una solución. La definición del vecindario lo determina el movimiento utilizado para ir de una solución a otra y el movimiento lo caracteriza la distancia que consiste en el número de cambios que se hacen para ir de una solución a otra. Los tres conceptos están relacionados entre sí.

Los métodos seleccionados son basados en una solución por el costo de cálculo de la función objetivo. Una técnica basada en múltiples soluciones se descartó considerando la disponibilidad de tiempo que se posee en los horizontes de planeación de corto plazo y muy corto plazo. Por otra parte, la simplicidad de los métodos es beneficioso para mantener la herramienta operativa a través del tiempo.

4.1. Búsqueda aleatoria

Este método fue implementado como un primer acercamiento en la búsqueda de topologías que mejoren la seguridad y comparar la efectividad del mismo respecto una búsqueda semi-exhaustiva realizada como preámbulo del desarrollo de este trabajo.

Este método está compuesto por una solución S y un parámetro de número de iteraciones. A partir de S se comienza la exploración y el parámetro indica cuando se termina la ejecución. Las decisiones que se toman durante la exploración son cuántas y cuáles

subestaciones, bahía o diámetros van a ser modificados y el nuevo estado que adquieren los interruptores asociados. Para estos, una serie de números aleatorios son generados considerando la estructura de datos utilizada para la caracterización de las soluciones.

La solución S inicial del sistema está y es caracterizada de acuerdo a lo mostrado en 3.8. Se toma como referencia el punto de operación actual del SEP donde en condiciones normales el estado de los interruptores es cerrado incluyendo los acoples de barra; sin embargo, en caso de que se requiera comenzar en un punto de operación diferente se puede realizar cambiando el estado de los interruptores o seccionadores deseado.

Las subestaciones pertenecientes a la solución S serán las candidatas a ser modificadas. Para establecer la cantidad de subestaciones se genera un número aleatorio « a » entre 1 y n que es el número de subestaciones que componen a S . El resultado de este determina cuantas subestaciones serán seleccionadas. Considerando lo descrito en 3.8.3, el número de filas de la Tabla 2 correspondería al parámetro n .

Para seleccionar cuales subestaciones serán exploradas, se genera una cantidad de números aleatorios dada por el parámetro « a » entre uno y n . Cada número resultado del aleatorio, referido como « b » indicará una subestación perteneciente a S . La indexación de la subestación se encuentra referenciada con el número de fila de la Tabla 2.

Para cada subestación seleccionada se genera un número aleatorio entre uno y el número de bahías o diámetros que posea la subestación seleccionada. Este número es indicado como « c ». El resultado de este determinará cuantas bahías o diámetros serán intervenidos « d ». El valor de « c » se determina utilizando los datos alojados en la Tabla 2. Este corresponde a la diferencia de las posiciones en el vector solución de la primera bahía o diámetro con la última para la subestación « b » bajo análisis.

Para seleccionar cuales bahías o diámetros serán considerados para las modificaciones se generan « d » cantidad de números aleatorios entre uno y « c », cada número resultado del aleatorio « e » indicará una bahía o diámetro perteneciente a la subestación seleccionada « b ». Con el valor « e » y la referencia de la primera bahía de la subestación « b » se recupera del vector solución los interruptores correspondientes a la bahía o diámetro, considerando lo descrito en 3.8.1.

A los interruptores y seccionadores seleccionados de manera aleatoria se le deben asignar nuevos estados de abierto o cerrado considerando el tipo de subestación al que pertenezcan. La asignación de estados se hace en forma aleatoria generando un número entre uno y ocho de acuerdo a lo descrito en 3.9.1. para diámetros. Para bahías pertenecientes a subestaciones doble barra el número se genera entre uno y cuatro de acuerdo a 3.9.2. Para bahías pertenecientes a subestaciones tipo anillo el número se genera entre uno y cuatro de acuerdo a 3.9.3. Para todos los casos el resultado del número aleatorio hace referencia al número de fila que describe los estados.

En la Figura 19 se muestra el diagrama de flujo que representa el funcionamiento de la búsqueda aleatoria. Este algoritmo solo acepta soluciones que sean mejores que la solución incumbente; para ello se diseñó un sistema de memoria que permite almacenar las mejores soluciones visitadas durante el proceso de búsqueda.

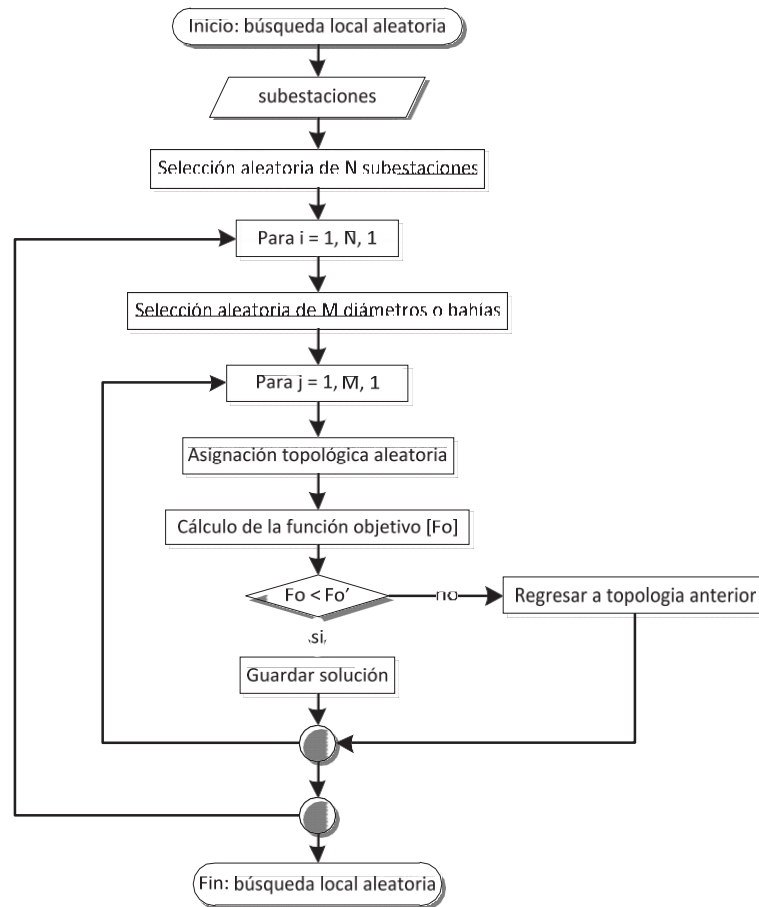


Figura 19. Búsqueda aleatoria aplicada a búsqueda topológica

4.2. Búsqueda por Recocido Simulado

El método de Recocido Simulado (*Simulated Annealing* – SA), está basado un algoritmo diseñado en los años 50 para simular el enfriamiento de material (un proceso denominado "recocido"). Fue propuesto en [25] y de forma independiente en [26]. Esta metaheurística ha demostrado ser una herramienta muy exitosa para resolver una amplia gama de problemas de optimización, que incluyen la planeación de la expansión de la red de transmisión [27], programación de mantenimiento de unidades de generación [28],

reconfiguraciones de la red de distribución para disminución de pérdidas [29] e identificación de parámetros de celdas fotovoltaicas [30]. El Recocido Simulado es una variante de la búsqueda local que permite movimientos ascendentes para evitar quedar atrapado prematuramente en un óptimo local.

Los algoritmos de búsqueda local parten de una solución inicial que es alterada progresivamente para llegar a otras que a su vez son mejoradas al introducirles pequeños cambios como modificar el valor de una o más variables. Si este cambio de lugar a una solución "mejor" que la actual se sustituye ésta por la nueva, continuando el proceso hasta que no sea posible encontrar ninguna nueva mejora, lo que implica que la búsqueda finaliza en un óptimo local, que no necesariamente sea el óptimo global.

Un modo de evitar el estancamiento de la búsqueda en óptimos locales es permitir que algunos movimientos sean hacia soluciones peores. En caso de que la búsqueda este dirigida hacia una buena solución, estos movimientos deben realizarse de forma controlada. En el caso del SA, esto se realiza controlando la frecuencia de los movimientos de escape mediante una función que hará disminuir la probabilidad de esos movimientos hacia soluciones peores conforme avanza la búsqueda.

La fundamentación de este control se basa en [31] en el campo de la termodinámica estadística. Básicamente, modelaron el proceso de recocido mencionado anteriormente simulando los cambios energéticos en un sistema de partículas conforme decrece la temperatura, hasta que converge a un estado estable (congelado). Las leyes de la termodinámica dicen que a una temperatura t la probabilidad de un incremento energético de magnitud δE se puede aproximar por

$$P[\delta E] = e^{-\delta E/kt} \quad (11)$$

siendo k una constante física denominada de Boltzmann. En el algoritmo propuesto en [31] se genera una perturbación aleatoria en el sistema y se calculan los cambios de energía resultantes: si hay una caída energética, el cambio se acepta automáticamente; por el contrario, si se produce un incremento energético, el cambio será aceptado con una probabilidad dada por (11). El proceso se repite durante un número predefinido de iteraciones en series decrecientes de temperaturas, hasta que el sistema esté "frío".

En la referencia [25] sobre diseño de circuitos y [26] para el problema del agente viajero, mostraron cómo el SA podría ser aplicado a problemas de optimización, asociando conceptos clave del proceso original de simulación (termodinámico), con elementos de optimización combinatoria según se indica en la Tabla 6. En esta se presenta las formas equivalentes en que se pueden ver las diferentes componentes del SA aplicado a un sistema termodinámico, un problema de optimización combinatoria y la búsqueda topológica.

Tabla 6. Analogía entre simulación termodinámica y optimización combinatoria.

Simulación termodinámica	Optimización combinatoria	Búsqueda Topológica
Estados del sistema	Soluciones factibles	Topologías factibles
Energía	Valor de función objetivo	Número de violaciones de seguridad
Cambio de estado	Solución en el entorno	Cambio de topología
Temperatura	Parámetro de control	Número de iteraciones
Estado congelado	Solución heurística	Mejor topología visitada

El SA aplicado a la búsqueda de topologías que mejoren la seguridad de un SEP se realizó en tres etapas: inicialización, enfriamiento y finalización.

La inicialización consta de la selección de la solución inicial, la asignación de valor a los parámetros y selección de función de reducción de temperatura. S_0 es la solución inicial del sistema está caracterizada de acuerdo a lo indicado en 3.8, normalmente es tomando el punto de operación actual del SEP donde el estado de los interruptores es cerrado incluyendo los acoples de barra; sin embargo, en caso de que se requiera comenzar en un punto de operación diferente se puede realizar cambiando el estado de los interruptores o seccionadores deseado.

Los parámetros que deben ser ajustados para iniciar el SA son la temperatura inicial T_0 que es el valor inicial de la variable de control temperatura T , número de iteraciones n_{rep} que determina el número de veces que se hace exploración topología a una determinada temperatura T , y T_{fin} que estable la temperatura a la cual debe parar el método.

La función de reducción de temperatura es la encargada de determinar el enfriamiento del sistema, para el caso de aplicación será un comportamiento lineal, con una constante de reducción dt .

El SA en su etapa de enfriamiento realiza exploraciones topológicas de acuerdo al movimiento seleccionado; este será variable y dependerá del número de subestaciones que conformen la solución y el número de bahías o diámetros que tenga la subestación que fue seleccionada para realizar cambios a los estados de sus interruptores o seccionadores.

El movimiento determina cuantas y cuales subestaciones, que bahías o diámetros y los cambios de estado que se harán a interruptores y seccionadores durante la ejecución del mismo. Para la selección de las subestaciones se genera un número aleatorio « a » entre uno y n que es el número de subestaciones que componen la solución S , el resultado de este determinara cuantas subestaciones serán seleccionadas « a ». Para seleccionar cuales subestaciones se generarán « a » cantidad de números aleatorios entre uno y n número de

subestaciones que componen S , cada número resultado del aleatorio « b » indicara una subestación perteneciente a S .

Para cada subestación seleccionada se genera un número aleatorio « c » entre uno y m que es el número de bahías o diámetros que posea la subestación, el resultado de este determinará cuantas bahías o diámetros serán intervenidas. Para seleccionar cuales bahías o diámetros se generarán « c » cantidad de números aleatorios entre uno y m , cada número resultado del aleatorio « d » indicara una bahía o diámetro perteneciente a la subestación analizada.

A los interruptores y seccionadores seleccionados de manera aleatoria se le deben asignar nuevos estados de abierto o cerrado considerando el tipo de subestación al que pertenezcan. La asignación de estados se hace en forma aleatoria y considerando lo descrito en 3.9.1 para diámetros, 3.9.2 para bahías pertenecientes a subestaciones doble barra y 3.9.3 para bahías pertenecientes a subestaciones tipo anillo. El mecanismo de selección aleatoria es generar un número entre uno y el número de estados soportados por la bahía o diámetro, el resultado determina el estado que será aplicado.

La función objetivo es calculada después de la aplicación de cada movimiento y su valor es comparado con la mejor solución encontrada hasta el momento (incumbente). Si el valor de la solución actual es menor, esta reemplaza la incumbente actual. Cuando el valor de la solución actual es mayor al de la incumbente se genera un aleatorio « u » entre 0 y 1 para ser comparado con el resultado de aplicar (11), considerando que $6E$ es igual al valor de la diferencia de funciones objetivo y kT es la temperatura del sistema en la cual se encontró la topología. Si « u » es menor, se acepta la solución y se continua con el proceso de exploración en caso contrario se rechaza la nueva solución y se continua.

El control que se hace sobre la aceptación o rechazo de las soluciones depende de la temperatura. Cuando se encuentra más elevada, la probabilidad de aceptación de soluciones peores se incrementa, brindándole diversidad a la búsqueda; en cambio, cuando la temperatura disminuye, la aceptación de soluciones malas disminuye lo que significa que se intensificara la búsqueda alrededor de la mejor solución encontrada.

El criterio de parada se establece como un valor de temperatura final. Es necesario asegurar que sea de tal forma que garantice un nivel de intensificación adecuado sin incurrir en gastos computacionales innecesarios. La Figura 20 muestra una visión de conjunto de la implementación del SA para la búsqueda de topologías que mejoren la seguridad de un SEP.

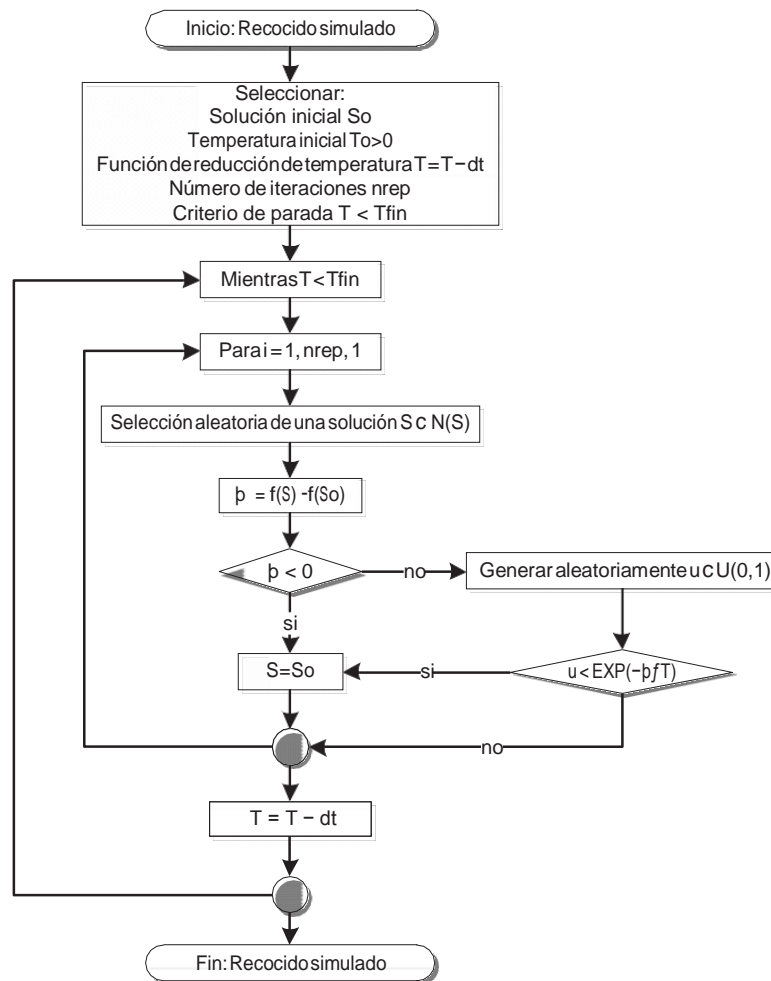


Figura 20. Recocido simulado aplicado a búsqueda topológica.

4.3. Búsqueda local iterada

La búsqueda local iterada (*Iterated Local Search* - ILS) fue propuesta en [32]. Esta se basa en aplicar de forma repetida un procedimiento de búsqueda local a soluciones iniciales aleatorias. En la ILS se genera la solución para la siguiente iteración modificando el óptimo local encontrado para la iteración actual. Las modificaciones alrededor de la solución son fundamentales para el éxito de la ILS, una modificación suave para la búsqueda local y una fuerte para la reinicialización. En la Figura 21 se observa el efecto de la reinicialización donde lleva la mejor solución actual s^* a un nuevo espacio donde después de hacer una nueva búsqueda local se debería obtener s^{**} que se convertirá en un nuevo óptimo local.

La ILS ha sido usada en múltiples aplicaciones por su sencilla construcción y su eficacia para resolver problemas combinatoriales de locación y ruteo [33], capacidad de embalaje [34],

programación de procesos productivos [35] y ubicación óptima de unidades de medición fasorial [36], entre otras.

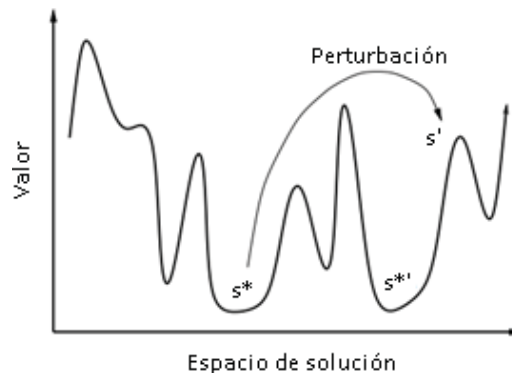


Figura 21. Representación del espacio de solución en un problema de optimización.

El criterio de aceptación, combinado con el mecanismo de modificación, permiten controlar el equilibrio entre intensidad y diversidad. El balance de estos es necesario para evitar criterios extremos donde una intensificación total solo aceptaría soluciones que mejoren la incumbente o diversificación total que aceptaría todas las soluciones.

La ILS aplicada a la búsqueda de topologías en SEP es inicializada con una solución S y los parámetros número de iteraciones, distancia del movimiento en la búsqueda local, número de ciclos para encontrar una solución en la reinicialización de S y un control de factibilidad de las soluciones.

Para la inicialización de S se toma como referencia la caracterización de una solución como se indica en 3.8. Normalmente es tomando el punto de operación actual del SEP donde el estado de los interruptores es cerrado incluyendo los acoples de barra donde cada subestación representada un nodo eléctrico. Sin embargo, en caso de que se requiera comenzar en un punto de operación diferente se puede realizar cambiando el estado de los interruptores o seccionadores deseado.

Los parámetros utilizados cumplen las siguientes tareas dentro del algoritmo de búsqueda aplicado. El número de iteraciones determina la cantidad de veces que se ejecutara el procedimiento búsqueda local más reinicialización. La distancia del movimiento k establece el número de bahías o diámetros que serán intervenidos en cada subestación perteneciente a la solución. El número de ciclos establece el número de intentos que se tienen para encontrar una solución diferente a la actual y que cumpla con el criterio de factibilidad que establece una máxima distancia entre la incumbente y la nueva solución.

El movimiento aplicado en la búsqueda local está definido por la constante de distancia K , que es el factor que determina cuántas bahías o diámetros de una subestación son sujetas al cambio de estado de sus interruptores asociados; tanto la selección de las bahías o

diámetros como los cambios de estado serán asignados de manera aleatoria, para estos últimos se debe considerar lo descrito en 3.9. La selección de las bahías o diámetros a modificar se realiza aleatoriamente. En este caso se genera k veces un número aleatorio « a » entre uno y m que es el número de bahías o diámetros de la subestación que se encuentre bajo análisis, « a » indicará cual bahía se modificara.

La búsqueda local establece que para todas las subestaciones consideradas en la solución es aplicado el movimiento y posteriormente se calcula el valor de la función objetivo con la nueva topología. Este es comparado con el valor de la función objetivo de la incumbente. En caso de que la última solución sea mejor que la solución incumbente esta será almacenada y reemplazara la solución incumbente. Después de aplicar un movimiento a una subestación y calcular la función objetivo se regresa a la solución inicial.

El segundo bloque del algoritmo es la reinicialización de S . El objetivo de esta es encontrar otro punto de inicio para la búsqueda local y hacer una exploración diferente del espacio de solución. Esto aplica diversificación de soluciones y es una técnica para escapar de óptimos locales.

La reinicialización implementada está formada por un ciclo que tiene como variable un número de ciclos y un parámetro de distancia entre la solución encontrada en la reinicialización y la incumbente, esto para tener un control de factibilidad sobre la nueva S .

La forma en que se estableció el control de factibilidad fue estableciendo una distancia máxima entre la solución encontrada en la reinicialización y la solución incumbente, solo se acepta una nueva solución si la diferencia entre las funciones objetivo es menor a 100 violaciones adicionales de seguridad respecto la incumbente. De esta forma, si después de aplicar los movimientos establecidos en la reinicialización no se encuentra una solución que cumpla con la distancia requerida se repite el ciclo el número de veces establecido por el parámetro de control. Si después de agotar todos los ciclos las soluciones halladas no cumplen con el criterio de distancia respecto la solución incumbente se selecciona esta última para continuar con la búsqueda local.

La reinicialización está determinada por la selección aleatoria de subestaciones, selección aleatoria de bahías o diámetros y asignación aleatoria de estados a los interruptores asociados de las bahías o diámetros seleccionados.

Para la selección de las subestaciones se genera un número a aleatorio « a » entre uno y n que es el número de subestaciones que componen la solución S , el resultado de este determinara cuantas subestaciones serán seleccionadas. Para seleccionar cuales subestaciones se generarán « a » cantidad de números aleatorios entre uno y n , cada número resultado del aleatorio « b » indicara una subestación perteneciente a S .

Para cada subestación seleccionada se generará un número aleatorio « c » entre uno y m que es el número de bahías o diámetros que posea la subestación seleccionada, « c »

determinara cuantas bahías o diámetros serán seleccionadas. Para seleccionar cuales bahías o diámetros se generarán « c » cantidad de números aleatorios entre uno y el número m , cada número resultado del aleatorio « d » indicara una bahía o diámetro perteneciente a la subestación seleccionada.

A los interruptores y seccionadores seleccionados de manera aleatoria se le deben asignar nuevos estados de abierto o cerrado, considerando el tipo de subestación al que pertenezcan. La asignación de estados se hace en forma aleatoria y considerando lo descrito en 3.9.1 para diámetros, 3.9.2 para bahías pertenecientes a subestaciones doble barra y 3.9.3 para bahías pertenecientes a subestaciones tipo anillo. El mecanismo de selección aleatoria es genera un número aleatorio « e » entre uno y p que es el número de estados soportados por la bahía o diámetro, el resultado de « e » determina el estado que será aplicado.

La solución lograda después de aplicar proceso de reinicialización pasa a ser explorada por la búsqueda local planteada en el primer bloque. Este proceso se repite durante el número de iteraciones que permita una exploración lo suficientemente amplia de tal forma que arroje soluciones de calidad. La Figura 20 muestra una visión de conjunto de la implementación del ILS para la búsqueda de topologías que mejoren la seguridad de un SEP.

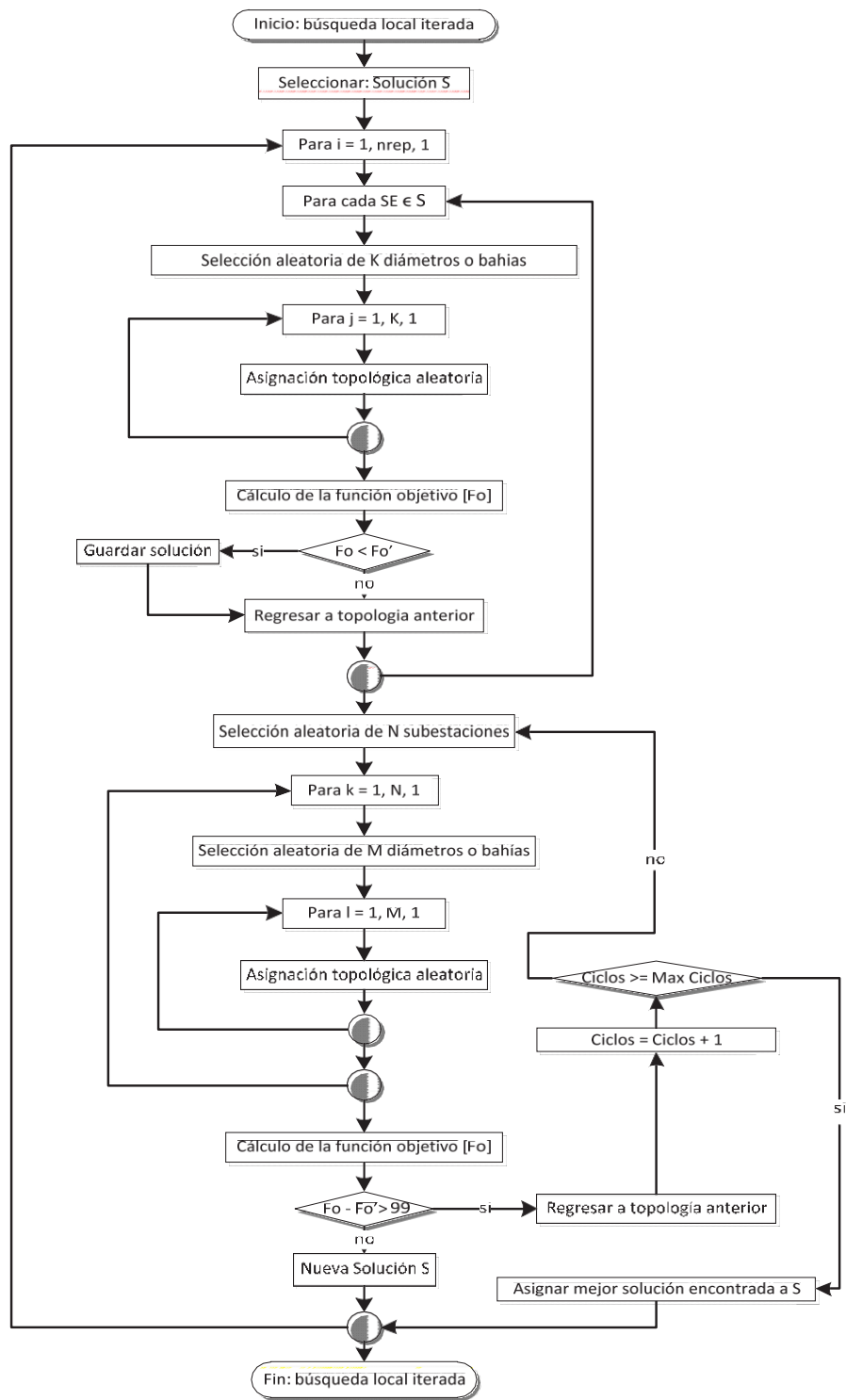


Figura 22. Búsqueda local iterada aplicada a búsqueda topológica.

4.4. Comparación de técnicas aplicadas a la búsqueda topológica

La comparación de las técnicas aplicadas es relevante al momento de tomar decisiones para la aplicación en un problema específico. La efectividad de la búsqueda es directamente afectada por los parámetros que se utilicen en la configuración del método. En ocasiones resulta mejor utilizar técnicas donde el ajuste de parámetros es irrelevante. Esto se compensa con el tiempo de ejecución. Por otro lado, cuando se logra encontrar una combinación de parámetros adecuados para técnicas más elaboradas, los tiempos de ejecución disminuyen respecto a las primeras obteniendo resultados que mejoran la seguridad del sistema.

En la Tabla 7 se puede observar que el método aleatorio es muy simple de configurar, tan solo depende de un parámetro que determina la duración de la exploración del método o criterio de parada. Por su parte, la ILS se puede modificar para que establezca su vecindario a través de un parámetro de distancia, que define cuantas modificaciones por subestación realizara durante la búsqueda local. Esto, junto con la reinicialización con control de factibilidad marcan diferencia con los demás métodos. Por último, el SA tiene parámetros asociados una cantidad mayor de parámetros para ajustar, pero encuentra soluciones más rápido de los anteriores métodos considerando la relación tiempo de ejecución y calidad de la solución durante la ejecución de la búsqueda.

En la Tabla 7 se representa un resumen comparativo de los parámetros utilizados para cada método. Esto con el objetivo de tener una visión de la cantidad de parámetros a ser ajustados en el momento de la ejecución de la búsqueda. Se resalta que el método aleatorio es el menos elaborado como algoritmo; sin embargo, es el más fácil de parametrizar.

Tabla 7. Comparación de las principales características de los métodos aplicados.

	Aleatoria	ILS	SA
Solución inicial	Determinística	Determinística	Determinística
Vecindario	Aleatorio	Distancia	Aleatorio
Operador		Reinicialización aleatoria con control de factibilidad	
Parámetros	Número de iteraciones	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia • Número de ciclos • Número de iteraciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura inicial • Temperatura final • Enfriamiento • Número de repeticiones por temperatura

5. Pruebas Computacionales

Las pruebas se realizaron con el sistema IEEE de 118 barras de acuerdo a las consideraciones mostradas en el capítulo 2. En la Tabla 8 se presenta el arreglo de subestaciones que fueron exploradas para encontrar topologías que mejoran la seguridad del SEP de pruebas. Las trece subestaciones consideradas en este primer grupo de simulaciones son tipo interruptor y medio. El objetivo de este primer grupo de simulaciones es la determinación de los parámetros de ajuste de los métodos de búsqueda topológica implementados. Con el resultado de estas simulaciones, se realizará otra serie de pruebas con el objetivo de mostrar las bondades del trabajo desarrollado.

Tabla 8. Subestaciones a explorar en el primer grupo de simulaciones.

Subestaciones candidatas												
23	47	32	42	66	45	62	51	49	69	54	50	48

Las contingencias consideradas en el análisis de seguridad fueron de tipo N-1 de todas las líneas de transmisión y los transformadores de potencia que conforman el SEP de pruebas, excepto aquellos que sean de uso exclusivo de conexión de generadores, considerando que las consideraciones de este trabajo exigen que tanto la generación como la demanda se mantengan constantes durante los análisis. Se resalta el hecho de que el análisis de contingencia se realiza despejando las fallas con los interruptores adyacentes al elemento fallado.

Para el caso base del sistema de pruebas se considera que todas las subestaciones tienen sus interruptores cerrados, que es equivalente a tener por cada subestación un solo nodo eléctrico. Este no posee violaciones por tensión, el flujo de carga converge para todas las contingencias y todos los elementos de generación y demanda se encuentran conectados. Por lo tanto, el valor de la función objetivo evaluada en el caso base obedecerá al resultado del término asociado a las sobrecargas.

Al evaluar la función objetivo en el caso base del SEP de pruebas se obtuvo un valor de sesenta y cinco. Esto significa que hay sesenta y cinco violaciones a los límites de cargabilidad o tensión en el caso base, además que el flujo de carga para todas las contingencias evaluadas tiene solución y no se tiene desconexión de ningún generador o carga.

5.1. Solución Utilizando Búsqueda Aleatoria

Para la búsqueda aleatoria sobre el caso de estudio con trece subestaciones candidatas se realizaron seis simulaciones con diferentes valores para el parámetro de número de iteraciones. En la Tabla 9 se presenta para cada valor de parámetro de número de

iteraciones, el mejor valor de función objetivo y el tiempo de simulación empleado para ejecutar la simulación.

Tabla 9. Resumen de resultados para la búsqueda aleatoria.

Número de iteraciones	Valor de la función objetivo	Tiempo de ejecución hh:mm:ss
150	61	1:45:42
100	60	1:06:24
80	60	0:29:45
60	60	0:46:03
40	60	0:23:04
20	60	0:15:17

El tiempo de simulación depende del número de bahías que modificará por subestación. Este es determinado aleatoriamente; por lo tanto, si se sesga a números cercanos al máximo número de bahías el tiempo de simulación es más alto, al igual que el valor de diversificación en la solución. Al no tener un control sobre dicha aleatoriedad que es el espíritu del mismo método, las soluciones encontradas no son fáciles de reproducir en una próxima simulación y para poder determinar que se tiene una buena solución se deben realizar muchas simulaciones para tratar de establecer las cotas del espacio de búsqueda.

De acuerdo a los resultados obtenidos el número de condiciones de seguridad adicionales que puede soportar el sistema con las modificaciones topológicas encontradas por la búsqueda aleatoria es de 5.

Las reconfiguraciones encontradas por el método aleatorio fueron apertura de las líneas: 31 – 32, 54 – 56, 56 – 59 y la atención de la carga 66 en forma radial a través del transformador 65 – 66.

El método encontró varias soluciones con igual función objetivo lo que se convierte en una ventaja para la aplicación de las mismas en el SEP, porque se podría implementar la aquella que sea más conveniente para la operación, de acuerdo a la prioridad de atención que se le quiera brindar a la demanda ubicada en determinada área del SEP operado.

Los resultados obtenidos muestran que aumentar el número de iteraciones no garantiza que se encuentre la mejor solución, esto se debe a la naturaleza aleatoria del método. Esto se evidencia en las pruebas realizadas, cuando se ejecutó el método considerando ciento cincuenta iteraciones, la función objetivo estuvo por encima en una unidad respecto las simulaciones realizadas con menor número de iteraciones.

5.2. Solución Utilizando Búsqueda por Recocido Simulado

El SA aplicado a la búsqueda de topológicas que mejoren la seguridad del caso de estudio con 13 subestaciones candidatas se probó a través de 10 simulaciones con la combinación de dos parámetros: la velocidad de enfriamiento y el número de repeticiones a realizar en cada temperatura evaluada en el procedimiento. Los otros dos parámetros del método se consideraron constantes, la temperatura inicial en cien y final de uno. La Tabla 10 se muestra para la combinación de parámetros mencionados, cual es el valor de función objetivo y el tiempo de ejecución del método en cada simulación.

Tabla 10. Resumen de resultados para el Recocido Simulado.

Velocidad de enfriamiento	Número de repeticiones	Valor de la función objetivo	Tiempo de ejecución hh:mm:ss
1	2	62	0:07:59
1	5	57	0:21:03
2	2	62	0:04:22
2	5	62	0:10:42
3	2	62	0:03:05
3	5	62	0:07:55
4	2	65	0:02:25
4	5	62	0:05:46
5	2	64	0:01:55
5	5	61	0:04:41

Se resalta que a través de este método se encuentra la topología que ofrece un mayor aumento de seguridad y que los tiempos de ejecución son muy bajos respecto a la cantidad de simulaciones que emplean los demás métodos aplicados.

Las reconfiguraciones encontradas por el método SA fueron la apertura de las líneas: 31 – 32, 44 – 45, 45 – 49, 46 – 47, 54 – 59 y la atención de la carga 54 de manera radial desde el transformador 54 – 126.

El método encontró soluciones con valor de función objetivo entre 57 y 65, lo que implica que hubo búsquedas que no arrojaron topologías que mejoran la seguridad, aunque también se encontró la solución con mejor valor de función objetivo para el SEP probado. La variación de los valores radica en los parámetros utilizados para ejecutar la búsqueda. De acuerdo a los resultados para la mayor parte de los casos probados mientras el enfriamiento sea más lento y se realicen más repeticiones, el valor de función objetivo es menor. Sin embargo, lo anterior no es absoluto debido al componente aleatorio que posee el método.

5.3. Solución utilizando búsqueda local iterada

Las pruebas del método ILS sobre el caso de estudio con las trece subestaciones candidatas se realizó a través de veinte simulaciones, combinando los parámetros de distancia, ciclos y número de iteraciones asociados a diversificación, control de factibilidad y parada de la simulación, respectivamente. En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para las combinaciones de parámetros del método, el número de violaciones de seguridad y el tiempo de ejecución de la simulación.

Tabla 11. Resumen de resultados para la búsqueda local iterada.

Número de iteraciones	Distancia	Número de ciclos	Valor de la función objetivo	Tiempo de ejecución hh:mm:ss
50	1	2	60	0:44:07
50	1	5	60	0:52:54
50	2	2	60	0:38:31
50	2	5	61	0:42:05
40	1	2	58	0:31:18
40	1	5	61	0:35:50
40	2	2	60	0:30:14
40	2	5	62	0:34:55
30	1	2	61	0:20:58
30	1	5	62	0:23:36
30	2	2	61	0:22:14
30	2	5	60	0:23:30
20	1	2	61	0:14:09
20	1	5	62	0:15:32
20	2	2	63	0:15:02
20	2	5	60	0:16:15
10	1	2	65	0:07:36
10	1	5	65	0:08:37
10	2	2	60	0:07:31
10	2	5	62	0:08:37

Los resultados muestran que el parámetro de número de ciclos empleado para el control de factibilidad durante la reinicialización de la solución no genera ventajas cuando el número de iteraciones es lo suficientemente alto. Cuando el número de iteraciones es menor la componente de diversificación que brinda el parámetro de distancia favorece la búsqueda de topologías con mejores condiciones de seguridad.

Las mejores soluciones se encuentran con mayor tiempo de simulación que a su vez implica tener unos parámetros más altos para el número de iteraciones, distancia y ciclos; sin embargo, se debe tener presente que existe un punto de saturación donde el tiempo de cómputo ya no es relevante para mejorar las soluciones.

Las reconfiguraciones encontradas por el método aleatorio fueron apertura de las líneas: 31 – 32, 60 – 62, reconfigurar los circuitos 51 – 49 y 51 – 52 en el circuito 49 – 52 utilizando la configuración de la subestación 52; por último, se configuró la atención radial de la carga 66 a través del transformador 65 – 66.

Los tiempos de ejecución de la ILS para encontrar topologías que mejoran por lo menos tres puntos la función objetivo respecto a del caso base, están entre ocho y cincuenta minutos. Esto implica que una amplia combinación de parámetros el método logra encontrar topologías con aumento de seguridad.

5.4. Definición de parámetros

Los parámetros para ajustar los métodos de búsqueda son completamente dependientes del tamaño de la solución seleccionada o sea del número de subestaciones sujetas a la exploración topológica, de allí la importancia de lograr una identificación de los problemas de seguridad que se quieren mejorar y lograr hacer un acotamiento de la porción de red que a su vez es la selección de las subestaciones pertenecientes a la solución que tengan influencia directa o indirectamente sobre los problemas de seguridad.

Después de las pruebas computacionales realizadas al sistema de pruebas con una solución conformada por 13 subestaciones, se demuestra que la cota inferior para el problema planteado se encuentra alrededor de 60 problemas de seguridad. Identificada la cota se pueden establecer los parámetros para los diferentes tipos de búsqueda implementados considerando el tamaño tanto del SEP de pruebas como de la solución seleccionada. En la Tabla 13 se presentan los parámetros definidos para los métodos de búsqueda implementados. Estos se utilizaron en las pruebas que se describen en el capítulo 6 donde se valida la operación del método utilizando diferentes tipos de subestaciones y acotando la búsqueda en áreas determinadas del SEP de pruebas.

Tabla 12. Parámetros definidos para los diferentes métodos de búsqueda en el SEP de pruebas.

Parámetro \ Método	Aleatorio	SA	ILS
Número de iteraciones	40	--	40
Distancia	--	--	1
Número de ciclos	--	--	2
Temperatura inicial	--	100	--
Temperatura final	--	1	--

Parámetro \ Método	Aleatorio	SA	ILS
Velocidad de enfriamiento	--	1	--
Número de repeticiones	--	2	--

6. Resultados de las simulaciones sobre el modelo de pruebas

6.1. Simulaciones con diferentes tipos de subestación de manera simultánea

Para mostrar las bondades de los algoritmos implementados se realizaron un conjunto de simulaciones sobre el SEP de pruebas. Considerando las subestaciones mostradas en la Tabla 8, se realizó la transformación de las mismas a tipo interruptor y medio; luego se ejecutó la búsqueda topológica utilizando los métodos implementados. Posteriormente, las mismas subestaciones fueron convertidas a tipo doble barra y anillo para ejecutar el proceso de búsqueda con los algoritmos desarrollados.

En las simulaciones anteriores no se consideran diferentes tipos de subestaciones de manera simultánea en el SEP de pruebas, lo que demuestra la capacidad de los algoritmos de trabajar con un solo tipo de subestación.

De la Figura 23 a la Figura 25 se presentan los resultados de las simulaciones realizadas. Estas gráficas agrupan los resultados por método de búsqueda empleado y tipo de subestación consideradas en el SEP de pruebas. Las siglas utilizadas para hacer referencia a los tipos de configuración de subestación son: IM para interruptor y medio, DB para doble barra y AN para anillo.

En la Figura 23 las barras de tonos claros muestran el número de violaciones ante contingencias N-1 que se evidenciaron después de aplicar sobre el SEP de pruebas el resultado de la búsqueda topológica. El número ubicado en la parte superior de las barras indica la disminución de violaciones respecto el caso sin reconfiguraciones al realizar el análisis N-1.

Los resultados muestran que el SEP de pruebas con subestaciones tipo interruptor y medio, al tener más alternativas de reconfiguración que las doble barra y anillo, obtiene mayores niveles de seguridad al ser reconfigurada. Por otra parte, cuando se utilizaron subestaciones tipo anillo se obtuvo el menor incremento de seguridad. Se observa que el mayor incremento de condiciones de seguridad fue de ocho con el método SA en el SEP con las subsecciones tipo interruptor y medio.

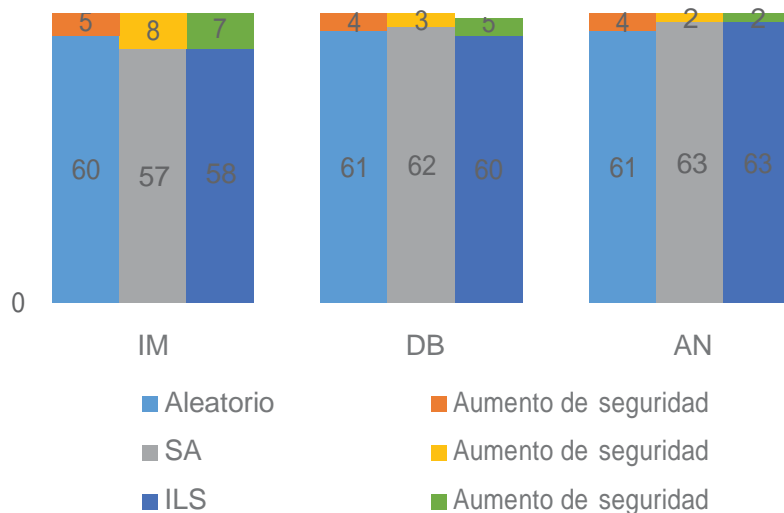


Figura 23. Resultados agrupados, por tipo de subestación, de las condiciones de seguridad alcanzadas con los diferentes métodos de búsqueda.

En la Figura 24 se muestra el incremento porcentual de las condiciones de seguridad del SEP de pruebas al aplicar los diferentes métodos. Se observa que el método aleatorio superó el SA y el IL cuando se consideraron que todas las subestaciones tipo anillo. Esto demuestra que los parámetros utilizados para ajustar el SA y el ILS podrían ser modificados para obtener mejores resultados. Adicionalmente, el gráfico reafirma que los tipos de subestaciones que presentan una mayor flexibilidad para ser reconfiguradas en búsqueda de mejoramiento de seguridad son las tipo interruptor y medio, seguidas por las de configuración doble barra y en último lugar las anillo.

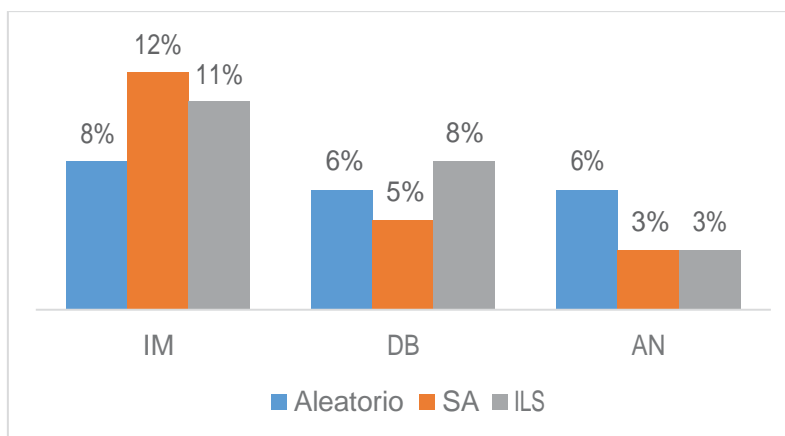


Figura 24. Incremento porcentual de las condiciones de seguridad alcanzado con los diferentes métodos de búsqueda aplicados, agrupados por tipo de subestación.

En la Figura 25 se muestra el número de maniobras que se tienen que aplicar sobre el SEP de pruebas para alcanzar el nivel de seguridad mostrado en la Figura 23 y Figura 24. Se puede observar que el número de maniobras es mayor para el caso que obtuvo los mejores niveles de seguridad. Para el caso de las subestaciones tipo Anillo, para los métodos de SA e ILS, se alcanzó el mismo nivel de seguridad, pero con número de maniobras diferentes.

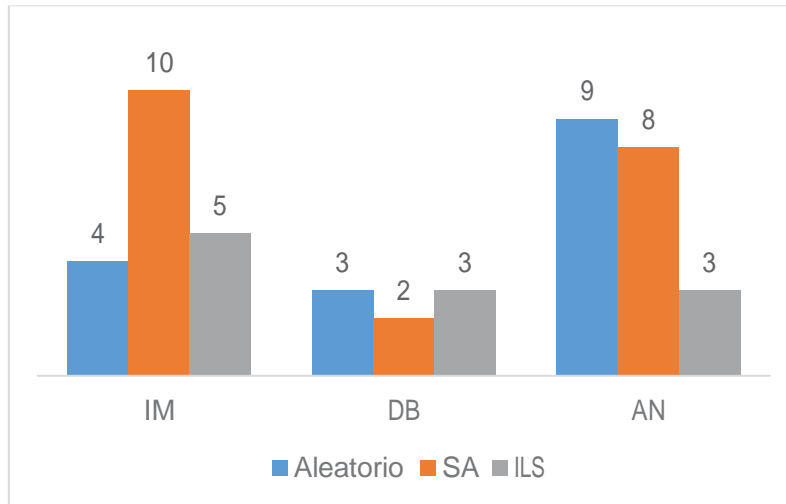


Figura 25. Número de maniobras necesarias para reconfigurar el SEP de pruebas y aumentar las condiciones de seguridad, agrupado por tipo de subestación.

6.2. Simulaciones con acotamiento O de red y diferentes tipos de subestación de manera simultánea

Con el objetivo de mostrar la capacidad del método de encontrar soluciones compuestas por diferentes tipos de subestaciones y su aplicación en porciones de un SEP (buscando el acotamiento del problema de acuerdo al interés del usuario), se realizó una división del SEP de pruebas por zonas de acuerdo a Figura 1. Las barras que componen las zonas 1, 2 y 3 del SEP de pruebas se indican en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 respectivamente.

Tabla 13. Barras que conforman la Zona 1 del SEP de pruebas.

Zona 1				
B1	B10	B19	B28	B73
B2	B11	B20	B29	B113
B3	B12	B21	B30	B114
B4	B13	B22	B31	B115
B5	B14	B23	B32	B117
B6	B15	B24	B33	
B7	B16	B25	B70	

Zona 1				
B8	B17	B26	B71	
B9	B18	B27	B72	

Tabla 14. Barras que conforman la Zona 2 del SEP de pruebas.

Zona 2				
B34	B46	B58	B74	B97
B35	B47	B59	B75	B98
B36	B48	B60	B76	B99
B37	B49	B61	B77	B100
B38	B50	B62	B78	B104
B39	B51	B63	B79	B105
B40	B52	B64	B80	B106
B41	B53	B65	B81	B107
B42	B54	B66	B82	B116
B43	B55	B67	B94	B118
B44	B56	B68	B95	
B45	B57	B69	B96	

Tabla 15. Barras que conforman la Zona 3 del SEP de pruebas.

Zona 3				
B83	B87	B91	B102	B110
B84	B88	B92	B103	B111
B85	B89	B93	B108	B112
B86	B90	B101	B109	

Las subestaciones que harán parte de la solución inicial fueron seleccionadas de acuerdo al número de bahías que las conforman. En cada zona se seleccionaron las doce subestaciones con el mayor número de bahías. Para combinar la solución con subestaciones de diferentes tipos se planteó que las cuatro subestaciones más grandes fueran tipo interruptor y medio, debido a que otorgan mayor flexibilidad. Considerando el criterio del mayor número de bahías se asignaron las subestaciones tipo doble barra y anillo, respectivamente. En la Tabla 16 se presenta las barras que componen cada una de las soluciones iniciales y el tipo de subestaciones que se utilizó en la búsqueda.

La metodología acotada por zonas consiste en solo realizar el análisis N-1 de los elementos que componen la misma y realizar cambios topológicos solo en el área acotada. Sin embargo, el monitoreo de las violaciones por sobrecarga y tensiones se realiza en todo el sistema. Esto con el fin de poder cuantificar el impacto de los cambios topológicos de una

zona en las demás. Con lo anterior se busca focalizar la búsqueda topológica en solucionar problemas de sobrecarga en partes específicas de la red.

Tabla 16. Subestaciones candidatas para la búsqueda topológica clasificadas por configuración y zona.

Zona	Interruptor y medio				Doble barra				Anillo			
1	B23	B31	B11	B24	B32	B19	B27	B5	B15	B70	B17	B12
2	B37	B66	B34	B69	B105	B56	B59	B54	B80	B100	B49	B77
3	B86	B91	B102	B93	B103	B90	B83	B101	B85	B89	B110	B92

Las simulaciones realizadas en el SEP de pruebas se realizaron con todos los métodos de búsqueda implementados y sobre todas las zonas descritas anteriormente. Los resultados de las simulaciones son presentados en la Figura 26, donde cada grupo de tres columnas representa una zona, y las barras azules y gris muestran los resultados en términos del número de violaciones encontradas después de realizar las modificaciones topológicas encontradas por cada uno de los algoritmos de búsqueda.

En la Figura 26 la suma de los números que componen cada barra muestran el número de violaciones de seguridad antes de aplicar las modificaciones topológicas. Los números sobre los colores naranja, amarillo y verde presentan la disminución de violaciones causadas por las reconfiguraciones.

Se puede observar que en la Zona 1 se disminuyeron hasta 11 condiciones de inseguridad realizando cambios de topología. Por su parte, en la Zona 2 fueron ocho, mientras que en la Zona 3, solo una. La razón principal que permite encontrar el mejor valor de función objetivo en la Zona 1 es su tamaño y las características de las subestaciones que componen la zona, pues estas tienen una mayor conectividad que las subestaciones de las demás zonas.

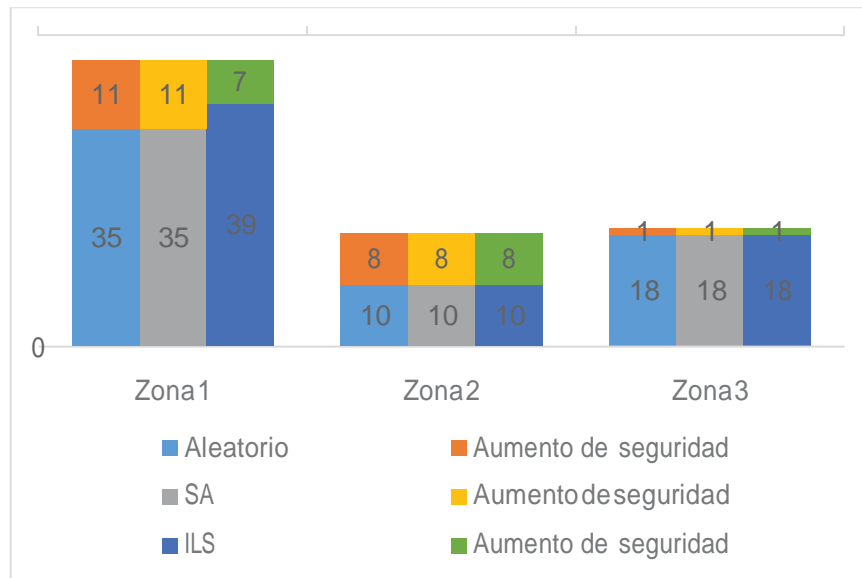


Figura 26. Resultados agrupados por tipo de subestación de las condiciones de seguridad alcanzadas con los diferentes métodos de búsqueda aplicados.

En la Figura 27 se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones en valores porcentuales de disminución de violaciones de seguridad respecto el caso sin modificaciones topológicas.

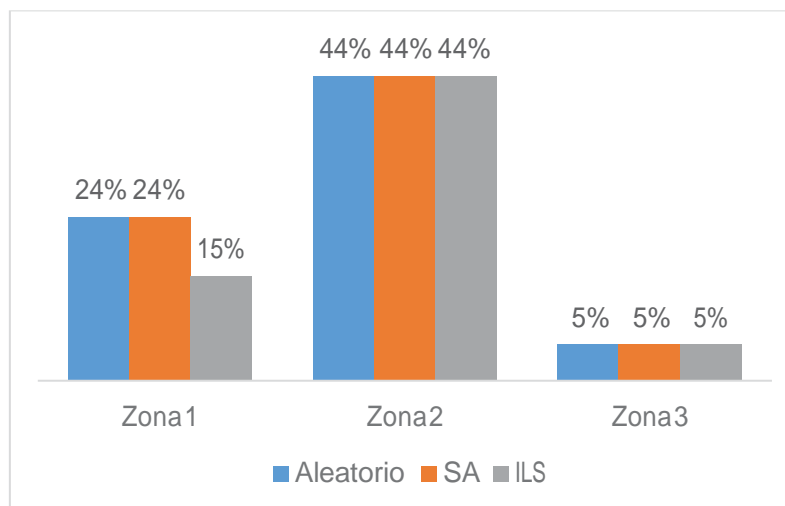


Figura 27. Resultados agrupados (por tipo de subestación) de las condiciones de seguridad alcanzadas con los diferentes métodos de búsqueda aplicados.

En la Figura 28 se presentan el número de maniobras necesarias para alcanzar los niveles de seguridad mostrados en la Figura 26. Los valores se presentan clasificados por tipo de

método y zona. Se resalta que las soluciones con calidad similar guardan proporcionalidad con el número de maniobras utilizadas para reconfigurar el SEP de pruebas.

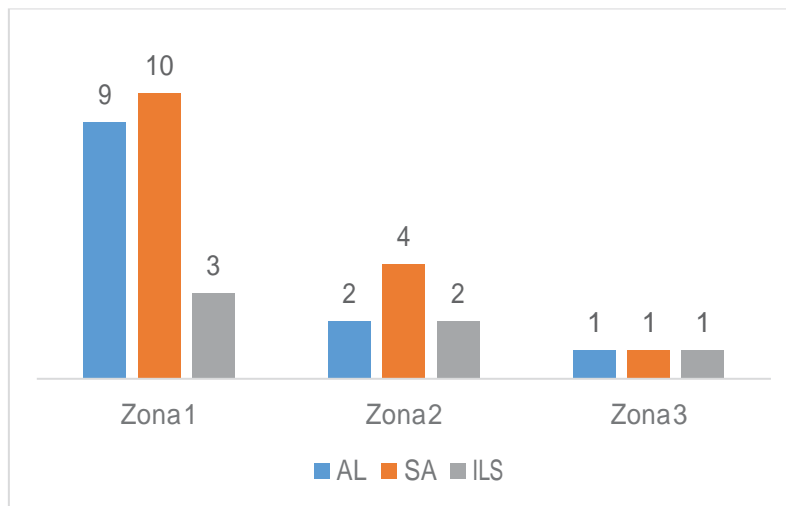


Figura 28. Resultados agrupados por tipo de subestación de las condiciones de seguridad alcanzadas con los diferentes métodos de búsqueda aplicados.

7. Conclusiones

Los métodos de búsqueda desarrollados en este trabajo realizan exploraciones topológicas a través del cambio de estado de los interruptores de las subestaciones. Estos encuentran reconfiguraciones del SEP que garantizan un nivel de seguridad mayor ante contingencias N-1 que el obtenido en el caso sin cambios en la topología. Las simulaciones realizadas sobre el SEP de pruebas muestran la capacidad de los algoritmos de búsqueda para reconfigurar subestaciones tipo interruptor y medio, doble barra y anillo. Estos métodos pueden trabajar en un SEP completo o en una región acotada del mismo, donde el número de subestaciones candidatas a ser consideradas dentro de la búsqueda puede ser igual al número total de subestaciones del sistema.

Para el SEP eléctrico de pruebas IEEE de 118 barras se verificó el correcto funcionamiento de los métodos de búsqueda y se demostró que en un SEP con un nivel de estrés elevado y condiciones de generación que no permiten desviaciones respecto al programa inicial, las reconfiguraciones topológicas pueden aumentar el nivel de seguridad.

Se presentó una metodología que considera el modelo bahía - interruptor para la evaluación de las contingencias en las diferentes topologías exploradas. Esta tiene la capacidad de evaluar los impactos provenientes de la degradación adicional que se presenta en el SEP cuando a causa de una contingencia N-1, dos elementos del SEP son abiertos. La situación anterior se podría presentar cuando se reconfiguran subestaciones tipo anillo e interruptor y medio. La consideración del modelo bahía - interruptor es un factor diferenciador sobre las metodologías planteadas por otros autores, pues las soluciones entregadas por sus modelos deben ser validadas en una etapa posterior al proceso de búsqueda para verificar los reales impactos que tienen las modificaciones topológicas sobre el SEP.

Los métodos ILS y SA implementados para la búsqueda de topologías, poseen un conjunto de parámetros desde los cuales se controla el nivel de intensificación y diversificación. Estos parámetros pueden ser sujeto de modificación de acuerdo a la cantidad de subestaciones candidatas a la exploración topológica. El rendimiento de estos métodos está ligado a los parámetros utilizados durante las simulaciones. Por lo tanto, se debe tener un balance entre intensificación y diversificación con el objetivo de llegar a resultados de calidad en menor tiempo. Lo anterior se consigue realizando una serie de pruebas computacionales sobre el SEP bajo análisis como las planteadas en el Capítulo 5. Por otro lado, el método aleatorio no posee un control de intensificación, está basado en diversificación con control de factibilidad en cada iteración a través de la aceptación de soluciones mejores que la incumbente. Este método tiene como característica que solo se ajusta el parámetro que determina la duración de la exploración topológica. Por lo anterior este método es conveniente cuando no se conoce el SEP sobre el que se ejecutara la búsqueda topológica y se cuenta con tiempo para realizar las simulaciones.

El pre proceso de la información desarrollado facilitó la implementación de los métodos de búsqueda. La estructura dada a la información permitió realizar operaciones sobre los diferentes objetos del SEP y acceder a los mismo de forma eficiente. Se evitaron búsquedas a través de toda la base de datos del modelo eléctrico utilizando una serie de apuntadores de memoria donde se recuperaban los objetos para ser ajustados de manera directa.

El resultado de este trabajo podrá ser utilizado en SEP como el colombiano. Por eso desde su concepción se optó por técnicas de búsqueda sencillas, intentando que su uso pueda perdurar en el tiempo y no quede obsoleto rápidamente por la falta de mantenimiento. En este sentido, el hecho utilizar técnicas “sencillas” para solucionar el problema de topologías que mejoran la seguridad de un SEP, se convierte en un punto destacado de este trabajo.

Los métodos de búsqueda implementados pueden ser utilizados en SEP de cualquier tamaño. Su capacidad de trabajar en regiones acotadas de un SEP le brinda el potencial necesario para intervenir las áreas operativas que el usuario de la herramienta determine. El acotamiento de la red es importante para evitar exploraciones de topologías que no tienen influencia sobre problemas de red detectados.

Un trabajo futuro podría incluir dentro de la búsqueda de topologías esquemas de acciones remediales ante contingencias, establecidos en el sistema de potencia bajo análisis. Este nuevo trabajo daría señales de mejor calidad a los operadores del sistema de potencia porque aproxima con más detalle la respuesta del modelo con la del SEP real. Adicionalmente, otro trabajo futuro consiste en la implementación de un algoritmo de *Path Relinking* entre la solución con mejor valor objetivo y la solución inicial. El objetivo de este sería encontrar si alguna de las maniobras utilizadas para obtener el valor de la solución incumbente podría ser evitada, o si la combinación del conjunto de las N mejores soluciones podría arrojar una solución con mejor valor objetivo.

8. Bibliografia

- [1] A. A. Mazi, B. F. Wollenberg, and M. H. Hesse, "Corrective Control of Power System Flows By Line and Bus-Bar Switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 3, pp. 258–264, 1986.
- [2] W. Shao and V. Vittal, "Corrective switching algorithm for relieving overloads and voltage violations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1877–1885, 2005.
- [3] W. Shao and V. Vittal, "BIP-based OPF for line and bus-bar switching to relieve overloads and voltage violations," in *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006 – Proceedings, 2006*, pp. 2090–2095.
- [4] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, "Optimal transmission switching with contingency analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1577–1586, 2009.
- [5] M. Khanabadi and H. Ghasemi, "Transmission congestion management through optimal transmission switching," *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–5, 2011.
- [6] J. D. Fuller, R. Ramasra, and A. Cha, "Fast Heuristics for Transmission-Line Switching," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1377–1386, 2012.
- [7] M. Khanabadi, H. Ghasemi, and M. Doostizadeh, "Optimal transmission switching considering voltage security and N-1 contingency analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 542–550, 2013.
- [8] Z. Yang, H. Zhong, and Q. Xia, "Optimal transmission switching based on auxiliary induce function," *2014 IEEE PES General Meeting/Conference & Exposition*, pp. 1–5, 2014.
- [9] G. Granelli, M. Montagna, F. Zanellini, P. Bresesti, R. Vailati, and M. Innorta, "Optimal network reconfiguration for congestion management by deterministic and genetic algorithms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 6–7, pp. 549–556, Apr. 2006.
- [10] P. A. Ruiz, J. M. Foster, A. Rudkevich, and M. C. Caramanis, "Tractable Transmission Topology Control Using Sensitivity Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1550–1559, 2012.
- [11] M. Heidarifar and H. Ghasemi, "A Network Topology Optimization Model Based on Substation and Node-Breaker Modeling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 247–255, 2016.
- [12] E. Nasrolahpour, H. Ghasemi, and M. Khanabadi, "Optimal transmission congestion management by means of substation reconfiguration," *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*, pp. 416–421, 2012.

- [13] T. Potluri and K. W. Hedman, "Impacts of topology control on the ACOPF," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012.
- [14] M. Soroush and J. D. Fuller, "Accuracies of Optimal Transmission Switching Heuristics Based on DCOPF and ACOPF," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 924–932, 2014.
- [15] Y. Bai, H. Zhong, Q. Xia, and C. Kang, "A Two-Level Approach to AC Optimal Transmission Switching with an Accelerating Technique," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–1, 2016.
- [16] G. P. Granelli, M. Montagna, F. Zanellini, P. Bresesti, and R. Vailati, "A genetic algorithm-based procedure to optimize system topology against parallel flows," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 333–340, Feb. 2006.
- [17] C. Zhang and J. Wang, "Optimal Transmission Switching Considering Probabilistic Reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 974–975, 2014.
- [18] P. Henneaux and D. S. Kirschen, "Probabilistic security analysis of optimal transmission switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 508–517, 2016.
- [19] A. S. Korad and K. W. Hedman, "Robust Corrective Topology Control for System Reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4042–4051, 2013.
- [20] J. Han and A. Papavasiliou, "The Impacts of Transmission Topology Control on the European Electricity Network," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 496–507, 2016.
- [21] B. Leonardi and V. Ajjarapu, "An approach for real time voltage stability margin control via reactive power reserve sensitivities," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 615–625, 2013.
- [22] F. Capitanescu and L. Wehenkel, "An ACOPF-based heuristic algorithm for optimal transmission switching," in *Proceedings - 2014 Power Systems Computation Conference, PSCC 2014*, 2014.
- [23] P. Demetriou, "IEEE 118-bus modified test system," 2015. [Online]. Available: <http://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/index.php/dynamic-ieee-test-systems/ieee-118-bus-modified-test-system>.
- [24] DlgSILENT PowerFactory, "Contingency Analysis," in *User Manual*, 2014, pp. 653–686.
- [25] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science (80-.)*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [26] V. Šerný, "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm," *J. Optim. Theory Appl.*, vol. 45, no. 1, pp. 41–51, 1985.
- [27] R. A. Gallego, A. B. Alves, A. Monticelli, and R. Romero, "Parallel simulated annealing

- applied to long term transmission network expansion planning,” *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. 12, no. 1, pp. 181–188, 1997.
- [28] J. T. Saraiva, M. L. Pereira, V. T. Mendes, and J. C. Sousa, “A Simulated Annealing based approach to solve the generator maintenance scheduling problem,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 7, pp. 1283–1291, 2011.
- [29] H.-C. Chang and C.-C. Kuo, “Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 227–238, 1994.
- [30] K. M. El-Naggar, M. R. AlRashidi, M. F. AlHajri, and A. K. Al-Othman, “Simulated Annealing algorithm for photovoltaic parameters identification,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 266–274, 2012.
- [31] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller, “Equation state calculations by fast computing machines,” *J. Chem. Phys.*, vol. 21, no. 6, pp. 1087–1092, 1953.
- [32] T. Stutzle, *Local Search Algorithms for Combinatorial Problems – Analysis, Improvements, and New Applications*. 1998.
- [33] H. Derbel, B. Jarboui, S. Hanafi, and H. Chabchoub, “Genetic algorithm with iterated local search for solving a location-routing problem,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 2865–2871, 2012.
- [34] R. Masson, T. Vidal, J. Michallet, P. H. V. Penna, V. Petrucci, A. Subramanian, and H. Dubedout, “An iterated local search heuristic for multi-capacity bin packing and machine reassignment problems,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 13, pp. 5266–5275, 2013.
- [35] M. E. Marmion, C. Dhaenens, L. Jourdan, A. Liefoghe, and S. Verel, “NILS: A neutrality-based iterated local search and its application to flowshop scheduling,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2011, vol. 6622 LNCS, pp. 191–202.
- [36] M. Hurtgen and J.-C. Maun, “Optimal PMU placement using Iterated Local Search,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 8, pp. 857–860, 2010.

Anexo Q1. Datos del sistema de pruebas

Se presenta el detalle del modelo eléctrico utilizado para las pruebas. Este está basado en el caso IEEE de 118 barras y fue tomado de [23]. Tiene modificaciones que están asociadas a la conexión de los generadores e incluye algunas fuentes renovables que actúan como generación, carga, reactores o capacitores. Existen barras adicionales a las que tiene el sistema típicamente. Esto se debe a la conexión independiente de cada generador al SEP.

La Tabla 17 presenta los parámetros de los elementos tipo rama utilizados en el sistema de pruebas, la x hace referencia a la reactancia, r a la resistencia y b a la susceptancia de las ramas que unen dos barras. Los valores se encuentran en p.u. con una base de 100 MVA. La capacidad está dada en MVA.

En la Tabla 18 se muestran los datos de las barras del SEP utilizado. Los datos P_g , Q_g , P_d , Q_d , corresponden a potencia activa y reactiva de generadores y demandas respectivamente, sus valores están dados en MW y MVAR. Los tipos de barra son PV voltaje constante, PQ potencia y demanda constante y SL para el nodo de balance de potencia.

Tabla 17. Detalle de los elementos rama del SEP de pruebas

Barra inicial	Barra final	x (Sbase) [p.u.]	r (Sbase) [p.u.]	b (Sbase) [p.u.]	Capacidad [MVA]
B1	B2	0.100	0.030	0.025	100
B1	B3	0.042	0.013	0.011	100
B100	B101	0.126	0.028	0.033	100
B100	B103	0.053	0.016	0.054	300
B100	B104	0.204	0.045	0.054	100
B100	B106	0.229	0.061	0.062	100
B101	B102	0.112	0.025	0.029	100
B103	B104	0.158	0.047	0.041	100
B103	B105	0.163	0.054	0.041	100
B103	B110	0.181	0.039	0.046	100
B104	B105	0.038	0.010	0.010	100
B105	B106	0.055	0.014	0.014	100
B105	B107	0.183	0.053	0.047	100
B105	B108	0.070	0.026	0.018	100
B106	B107	0.183	0.053	0.047	100
B108	B109	0.029	0.011	0.008	100
B109	B110	0.076	0.028	0.020	100
B11	B12	0.020	0.006	0.005	100
B11	B13	0.073	0.022	0.019	100

Barra inicial	Barra final	x (Sbase) [p.u.]	r (Sbase) [p.u.]	b (Sbase) [p.u.]	Capacidad [MVA]
B110	B111	0.076	0.022	0.020	100
B110	B112	0.064	0.025	0.062	100
B114	B115	0.010	0.002	0.003	100
B12	B117	0.140	0.033	0.036	100
B12	B14	0.071	0.022	0.018	100
B12	B16	0.083	0.021	0.021	100
B13	B15	0.244	0.074	0.063	100
B14	B15	0.195	0.060	0.050	100
B15	B17	0.044	0.013	0.044	300
B15	B19	0.039	0.012	0.010	100
B15	B33	0.124	0.038	0.032	100
B16	B17	0.180	0.045	0.047	100
B17	B113	0.030	0.009	0.008	100
B17	B18	0.051	0.012	0.013	100
B17	B31	0.156	0.047	0.040	100
B18	B19	0.049	0.011	0.011	100
B19	B20	0.117	0.025	0.030	100
B19	B34	0.247	0.075	0.063	100
B2	B12	0.062	0.019	0.016	100
B20	B21	0.085	0.018	0.022	100
B21	B22	0.097	0.021	0.025	100
B22	B23	0.159	0.034	0.040	100
B23	B24	0.049	0.014	0.050	100
B23	B25	0.080	0.016	0.086	300
B23	B32	0.115	0.032	0.117	100
B24	B70	0.412	0.002	0.102	100
B24	B72	0.196	0.049	0.049	100
B25	B27	0.163	0.032	0.176	300
B26	B30	0.086	0.008	0.908	300
B27	B115	0.074	0.016	0.020	100
B27	B28	0.086	0.019	0.022	100
B27	B32	0.076	0.023	0.019	100
B28	B29	0.094	0.024	0.024	100
B29	B31	0.033	0.011	0.008	100
B3	B12	0.160	0.048	0.041	100
B3	B5	0.108	0.024	0.028	100
B30	B38	0.054	0.005	0.422	100
B31	B32	0.099	0.030	0.025	100
B32	B113	0.203	0.062	0.052	300

Barra inicial	Barra final	x (Sbase) [p.u.]	r (Sbase) [p.u.]	b (Sbase) [p.u.]	Capacidad [MVA]
B32	B114	0.061	0.014	0.016	100
B33	B37	0.142	0.042	0.037	100
B34	B36	0.027	0.009	0.006	100
B34	B37	0.009	0.003	0.010	300
B34	B43	0.168	0.041	0.042	100
B35	B36	0.010	0.002	0.003	100
B35	B37	0.050	0.011	0.013	100
B37	B39	0.106	0.032	0.027	100
B37	B40	0.168	0.059	0.042	100
B38	B65	0.099	0.009	1.046	300
B39	B40	0.061	0.018	0.016	100
B4	B11	0.069	0.021	0.017	100
B4	B5	0.008	0.002	0.002	300
B40	B41	0.049	0.015	0.012	100
B40	B42	0.183	0.056	0.047	100
B41	B42	0.135	0.041	0.034	100
B42	B49	0.323	0.072	0.086	100
B42	B49	0.323	0.072	0.086	100
B43	B44	0.245	0.061	0.061	100
B44	B45	0.090	0.022	0.022	100
B45	B46	0.136	0.040	0.033	100
B45	B49	0.186	0.068	0.044	100
B46	B47	0.127	0.038	0.032	100
B46	B48	0.189	0.060	0.047	100
B47	B49	0.063	0.019	0.016	100
B47	B69	0.278	0.084	0.071	100
B48	B49	0.051	0.018	0.013	100
B49	B50	0.075	0.027	0.019	100
B49	B51	0.137	0.049	0.034	100
B49	B54	0.289	0.073	0.074	100
B49	B54	0.291	0.087	0.073	100
B49	B66	0.092	0.018	0.025	300
B49	B66	0.092	0.018	0.025	300
B49	B69	0.324	0.099	0.083	100
B5	B11	0.068	0.020	0.017	100
B5	B6	0.054	0.012	0.014	100
B50	B57	0.134	0.047	0.033	100
B51	B52	0.059	0.020	0.014	100
B51	B58	0.072	0.026	0.018	100

Barra inicial	Barra final	x (Sbase) [p.u.]	r (Sbase) [p.u.]	b (Sbase) [p.u.]	Capacidad [MVA]
B52	B53	0.164	0.041	0.041	100
B53	B54	0.122	0.026	0.031	100
B54	B55	0.071	0.017	0.020	100
B54	B56	0.010	0.003	0.007	100
B54	B59	0.229	0.050	0.060	100
B55	B56	0.015	0.005	0.004	100
B55	B59	0.216	0.047	0.056	100
B56	B57	0.097	0.034	0.024	100
B56	B58	0.097	0.034	0.024	100
B56	B59	0.251	0.083	0.057	100
B56	B59	0.239	0.080	0.054	100
B59	B60	0.145	0.032	0.038	100
B59	B61	0.150	0.033	0.039	100
B6	B7	0.021	0.005	0.006	100
B60	B61	0.014	0.003	0.015	300
B60	B62	0.056	0.012	0.015	100
B61	B62	0.038	0.008	0.010	100
B62	B66	0.218	0.048	0.058	100
B62	B67	0.117	0.026	0.031	100
B63	B64	0.020	0.002	0.216	300
B64	B65	0.030	0.003	0.380	300
B65	B68	0.016	0.001	0.638	300
B66	B67	0.102	0.022	0.027	100
B68	B116	0.004	0.000	0.164	300
B68	B81	0.020	0.002	0.808	300
B69	B70	0.127	0.030	0.122	300
B69	B75	0.122	0.041	0.124	300
B69	B77	0.101	0.031	0.104	100
B7	B12	0.034	0.009	0.009	100
B70	B71	0.036	0.009	0.009	100
B70	B74	0.132	0.040	0.034	100
B70	B75	0.141	0.043	0.036	100
B71	B72	0.180	0.045	0.044	100
B71	B73	0.045	0.009	0.012	100
B74	B75	0.041	0.012	0.010	100
B75	B118	0.048	0.015	0.012	100
B75	B77	0.200	0.060	0.050	100
B76	B118	0.054	0.016	0.014	100
B76	B77	0.148	0.044	0.037	100

Barra inicial	Barra final	x (Sbase) [p.u.]	r (Sbase) [p.u.]	b (Sbase) [p.u.]	Capacidad [MVA]
B77	B78	0.012	0.004	0.013	100
B77	B80	0.049	0.017	0.047	300
B77	B80	0.105	0.029	0.023	300
B77	B82	0.085	0.030	0.082	100
B78	B79	0.024	0.005	0.006	100
B79	B80	0.070	0.016	0.019	100
B8	B30	0.050	0.004	0.514	200
B8	B9	0.031	0.002	1.162	500
B80	B96	0.182	0.036	0.049	100
B80	B97	0.093	0.018	0.025	100
B80	B98	0.108	0.024	0.029	100
B80	B99	0.206	0.045	0.055	100
B82	B83	0.037	0.011	0.038	100
B82	B96	0.053	0.016	0.054	100
B83	B84	0.132	0.063	0.026	100
B83	B85	0.148	0.043	0.035	100
B84	B85	0.064	0.030	0.012	100
B85	B86	0.123	0.035	0.028	300
B85	B88	0.102	0.020	0.028	100
B85	B89	0.173	0.024	0.047	100
B86	B87	0.207	0.028	0.045	300
B88	B89	0.071	0.014	0.019	300
B89	B90	0.188	0.052	0.053	300
B89	B90	0.100	0.024	0.106	300
B89	B92	0.051	0.010	0.055	300
B89	B92	0.158	0.039	0.041	300
B9	B10	0.032	0.003	1.230	500
B90	B91	0.084	0.025	0.021	100
B91	B92	0.127	0.039	0.033	100
B92	B100	0.295	0.065	0.047	100
B92	B102	0.056	0.012	0.015	100
B92	B93	0.085	0.026	0.022	100
B92	B94	0.158	0.048	0.041	100
B93	B94	0.073	0.022	0.019	100
B94	B100	0.058	0.018	0.060	100
B94	B95	0.043	0.013	0.011	100
B94	B96	0.087	0.027	0.023	100
B95	B96	0.055	0.017	0.015	100
B96	B97	0.089	0.017	0.024	100

Barra inicial	Barra final	x (Sbase) [p.u.]	r (Sbase) [p.u.]	b (Sbase) [p.u.]	Capacidad [MVA]
B98	B100	0.179	0.040	0.048	100
B99	B100	0.081	0.018	0.022	100
B10	B119	0	0	0	590
B100	B135	0	0	0	330
B103	B136	0	0	0	100
B111	B137	0	0	0	100
B12	B120	0	0	0	300
B25	B121	0	0	0	330
B26	B25	0	0.038	0	300
B26	B122	0	0	0	410
B30	B17	0	0.039	0	300
B31	B123	0	0	0	75
B38	B37	0	0.038	0	300
B46	B124	0	0	0	75
B49	B125	0	0	0	270
B54	B126	0	0	0	100
B59	B127	0	0	0	233
B61	B128	0	0	0	233
B63	B59	0	0.039	0	300
B64	B61	0	0.027	0	300
B65	B66	0	0.037	0	300
B65	B129	0	0	0	512
B66	B130	0	0	0	512
B68	B69	0	0.037	0	300
B69	B131	0	0	0	590
B8	B5	0	0.027	0	500
B80	B132	0	0	0	590
B81	B80	0	0.037	0	300
B87	B133	0	0	0	75
B89	B134	0	0	0	835

Tabla 18. Detalle de las barras del SEP de pruebas

Barra	Pg [MW]	Qg [MVAR]	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAR]	Qc [MVAR]
B1	0	-5	PV	51	27	0
B2	0	0	PQ	20	9	0
B3	0	0	PQ	39	10	0

Barra	Pg [MW]	Qg [MVAR]	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAR]	Qc [MVAR]
B4	-9	-66	PV	30	12	0
B5	0	-40	PV	0	0	-40
B6	0	8	PV	52	22	0
B7	0	0	PQ	19	2	0
B8	-28	40	PV	0	0	0
B9	0	0	PQ	0	0	0
B10	0	0	PQ	0	0	0
B11	0	0	PQ	70	23	0
B12	0	0	PQ	47	10	0
B13	0	0	PQ	34	16	0
B14	0	0	PQ	14	1	0
B15	0	4	PV	90	30	0
B16	0	0	PQ	25	10	0
B17	0	0	PQ	11	3	0
B18	0	26	PV	60	34	0
B19	50	-28	PV	45	25	0
B20	0	0	PQ	18	3	0
B21	0	0	PQ	14	8	0
B22	0	0	PQ	10	5	0
B23	0	0	PQ	7	3	0
B24	-13	-9	PV	0	0	0
B25	0	0	PQ	0	0	0
B26	0	0	PQ	0	0	0
B27	-9	3	PV	62	13	0
B28	0	0	PQ	17	7	0
B29	0	0	PQ	24	4	0
B30	0	0	PQ	0	0	0
B31	0	0	PQ	43	27	0
B32	0	-18	PV	59	23	0
B33	0	0	PQ	23	9	0
B34	100	-41	PV	59	26	14
B35	0	0	PQ	33	9	0
B36	100	-25	PV	31	17	0
B37	0	-25	PV	0	0	-25
B38	0	0	PQ	0	0	0
B39	0	0	PQ	27	11	0
B40	-46	31	PV	20	23	0
B41	0	0	PQ	37	10	0

Barra	Pg [MW]	Qg [MVAR]	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAR]	Qc [MVAR]
B42	-59	36	PV	37	23	0
B43	0	0	PQ	18	7	0
B44	0	9	PV	16	8	9
B45	0	9	PV	53	22	9
B46	0	10	PV	28	10	10
B47	0	0	PQ	34	0	0
B48	0	15	PV	20	11	15
B49	0	0	PQ	87	30	0
B50	0	0	PQ	17	4	0
B51	0	0	PQ	17	8	0
B52	0	0	PQ	18	5	0
B53	0	0	PQ	23	11	0
B54	0	0	PQ	113	32	0
B55	0	5	PV	63	22	0
B56	0	-2	PV	84	18	0
B57	0	0	PQ	12	3	0
B58	0	0	PQ	12	3	0
B59	0	0	PQ	277	113	0
B60	0	0	PQ	78	3	0
B61	0	0	PQ	0	0	0
B62	0	1	PV	77	14	0
B63	0	0	PQ	0	0	0
B64	0	0	PQ	0	0	0
B65	0	0	PQ	0	0	0
B66	0	0	PQ	39	18	0
B67	0	0	PQ	28	7	0
B68	0	0	PQ	0	0	0
B69	0	0	PQ	0	0	0
B70	41	-12	PV	66	20	0
B71	0	0	PQ	0	0	0
B72	-12	-11	PV	0	0	0
B73	-6	10	PV	0	0	0
B74	40	1	PQ	68	27	11
B75	0	0	PQ	47	11	0
B76	0	4	PV	68	36	0
B77	0	57	PV	61	28	0
B78	0	0	PQ	71	26	0
B79	0	20	PV	39	32	20

Barra	Pg [MW]	Qg [MVAR]	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAR]	Qc [MVAR]
B80	0	0	PQ	130	26	0
B81	0	0	PQ	0	0	0
B82	0	19	PV	54	27	19
B83	0	9	PV	20	10	9
B84	0	0	PQ	11	7	0
B85	0	14	PV	24	15	0
B86	0	0	PQ	21	10	0
B87	0	0	PQ	0	0	0
B88	0	0	PQ	48	10	0
B89	0	0	PQ	0	0	0
B90	-85	59	PV	78	42	0
B91	-10	-13	PV	0	0	0
B92	0	-10	PV	65	10	0
B93	0	0	PQ	12	7	0
B94	0	0	PQ	30	16	0
B95	0	0	PQ	42	31	0
B96	0	0	PQ	38	15	0
B97	0	0	PQ	15	9	0
B98	34	8	PV	0	0	0
B99	-42	-18	PV	0	0	0
B100	0	0	PQ	37	18	0
B101	0	0	PQ	22	15	0
B102	0	0	PQ	5	3	0
B103	0	0	PQ	23	16	0
B104	0	2	PV	38	25	0
B105	0	19	PV	31	26	19
B106	0	0	PQ	43	16	0
B107	-22	17	PV	28	12	5
B108	0	0	PQ	2	1	0
B109	0	0	PQ	8	3	0
B110	0	12	PV	39	30	6
B111	0	0	PQ	0	0	0
B112	-43	41	PV	25	13	0
B113	-6	5	PV	0	0	0
B114	0	0	PQ	8	3	0
B115	0	0	PQ	22	7	0
B116	-184	60	PV	0	0	0
B117	0	0	PQ	20	8	0

Barra	Pg [MW]	Qg [MVAR]	Tipo	Pd [MW]	Qd [MVAR]	Qc [MVAR]
B118	0	0	PQ	33	15	0
B119	450	-51	PV	0	0	0
B120	80	88	PV	0	0	0
B121	220	49	PV	0	0	0
B122	314	6	PV	0	0	0
B123	7	32	PV	0	0	0
B124	19	35	PV	0	0	0
B125	204	135	PV	0	0	0
B126	48	4	PV	0	0	0
B127	155	77	PV	0	0	0
B128	160	-40	PV	0	0	0
B129	391	60	PV	0	0	0
B130	392	-1	PQ	0	0	0
B131	172	-47	SL	0	0	0
B132	477	126	PV	0	0	0
B133	4	11	PV	0	0	0
B134	607	-6	PV	0	0	0
B135	252	102	PV	0	0	0
B136	40	75	PV	0	0	0
B137	36	-2	PV	0	0	0

Anexo 2. Detalle gráfico de las subestaciones que fueron exploradas durante las pruebas.

Las siguientes figuras representan el detalle de conexión de las subestaciones que formaron las soluciones para el caso de 13 subestaciones tipo interruptor y medio.

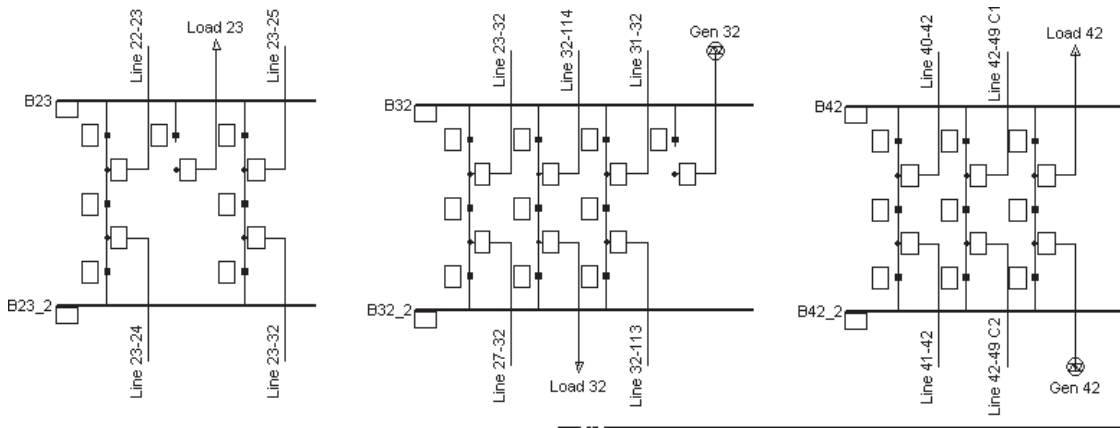


Figura 29. Subestaciones tipo interruptor y medio 23, 32 y 43.

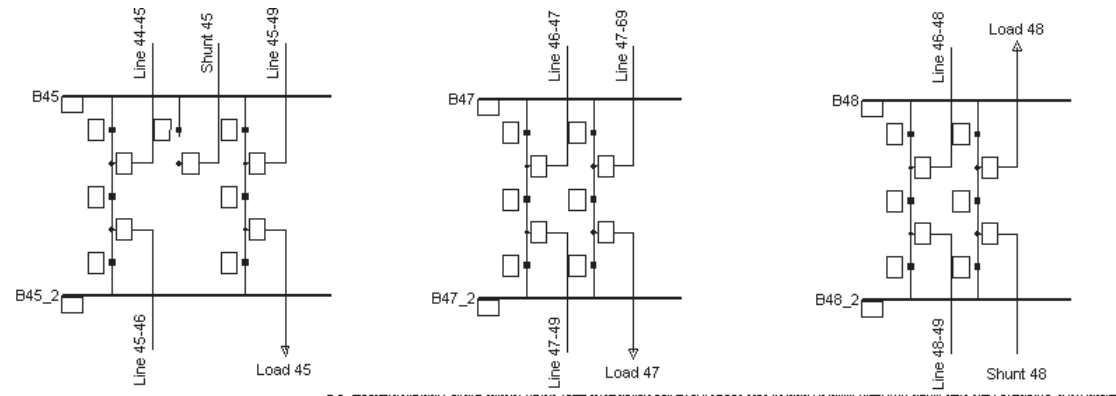


Figura 30. Subestaciones tipo interruptor y medio 45, 47 y 48.

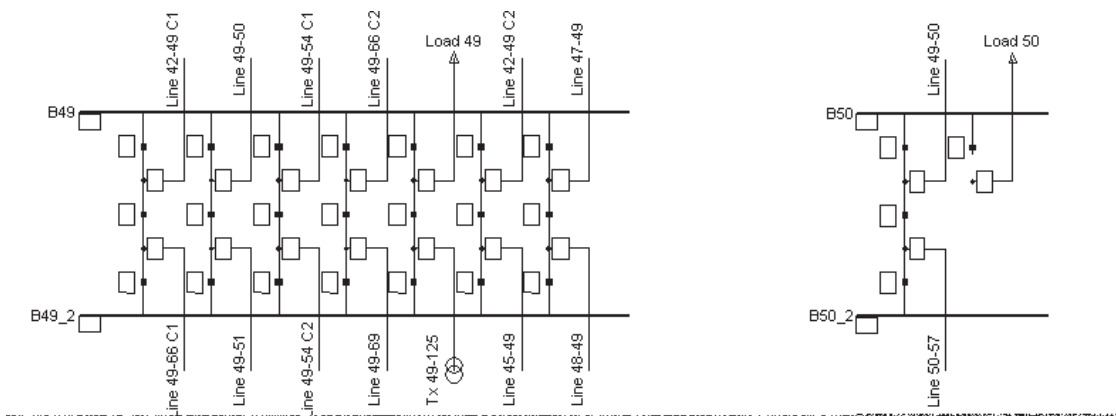


Figura 31. Subestaciones tipo interruptor y medio 49, y 50.

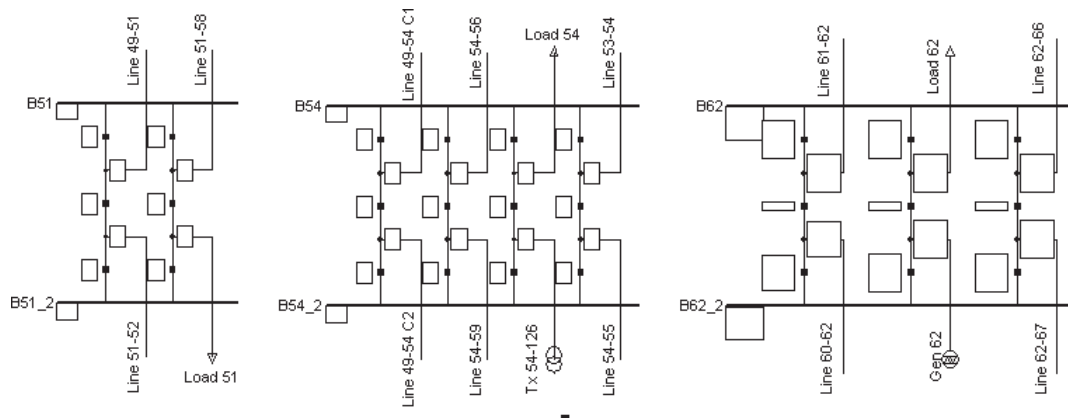


Figura 32. Subestaciones tipo interruptor y medio 51, 54 y 62.

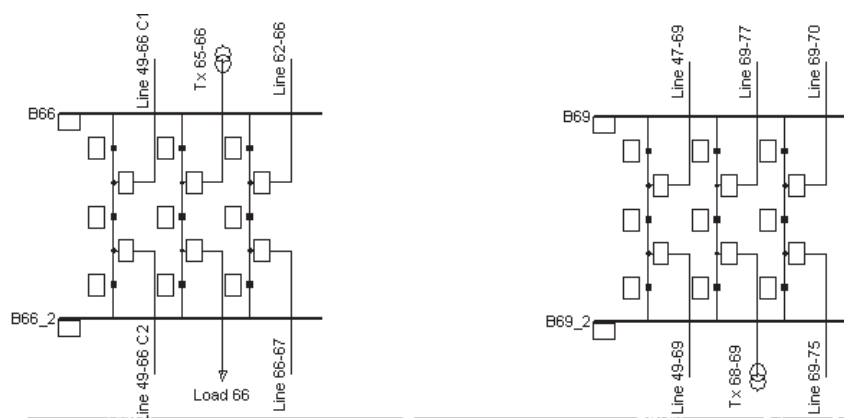


Figura 33. Subestaciones tipo interruptor y medio 66 y 69.

Las siguientes figuras representan el detalle de conexión de las subestaciones que formaron la solución para el caso de 13 subestaciones tipo doble barra.

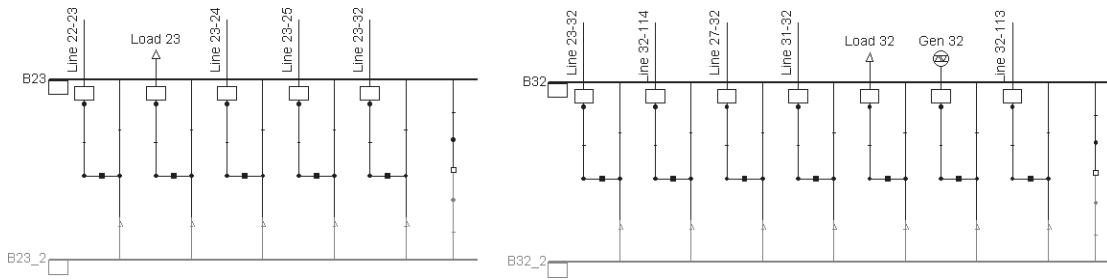


Figura 34. Subestacion tipo doble barra 23 y 32.

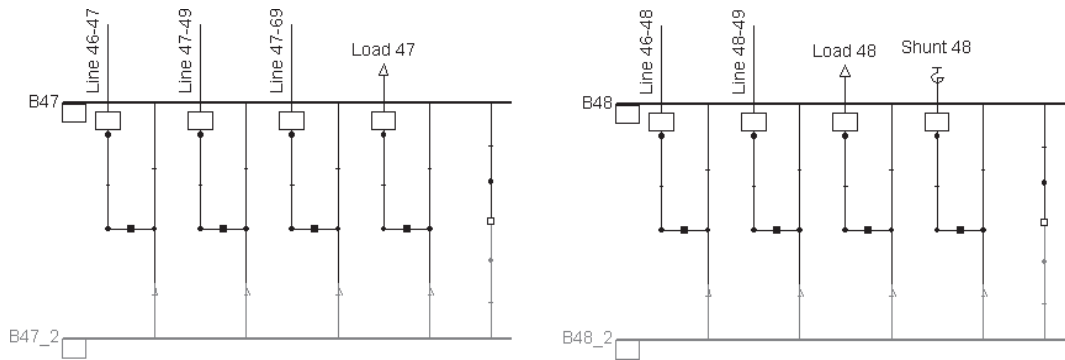


Figura 35. Subestacion tipo doble barra 47 y 48.

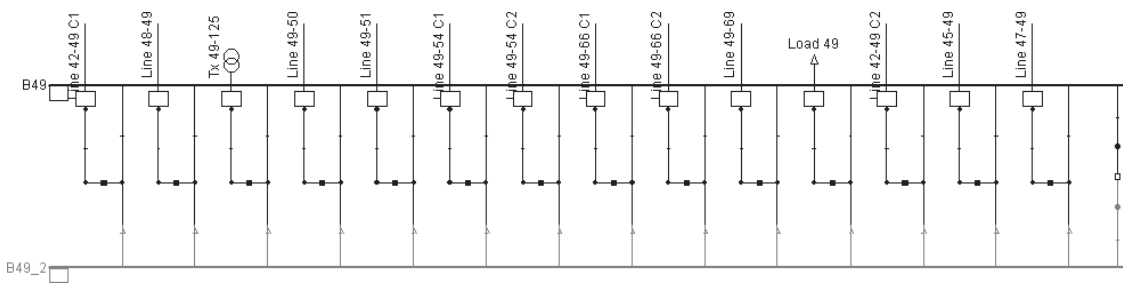


Figura 36. Subestación tipo doble barra 49.

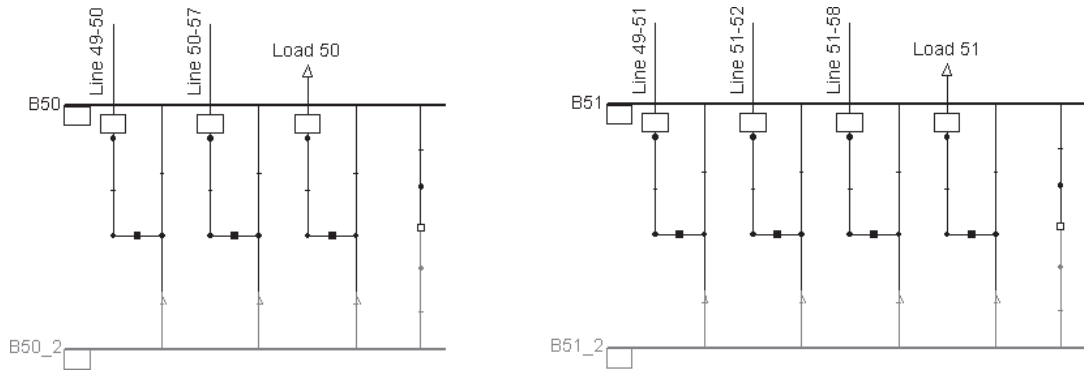


Figura 37. Subestaciones tipo doble barra 50 y 51.

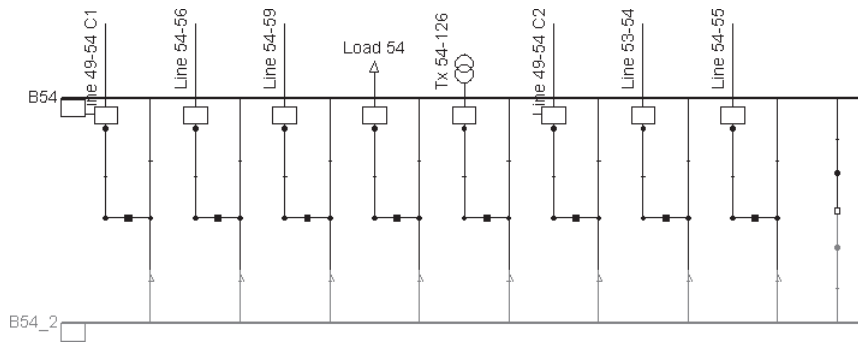


Figura 38. Subestación tipo doble barra 54.

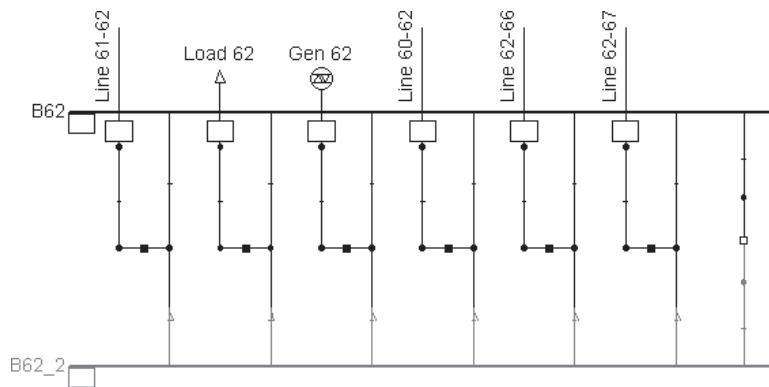


Figura 39. Subestación tipo doble barra 62.

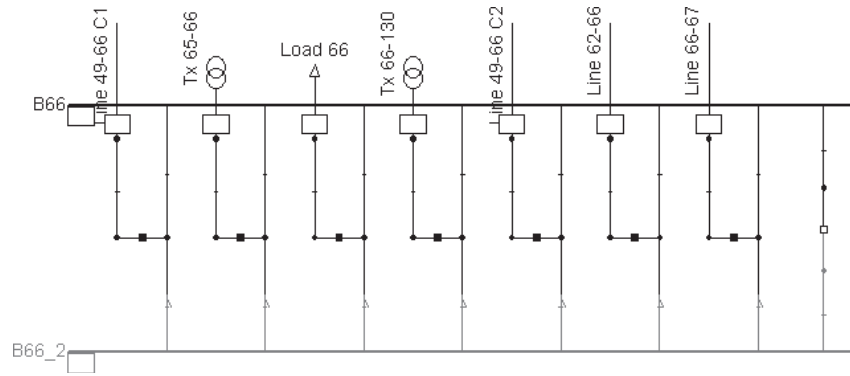


Figura 40. Subestación tipo doble barra 66.

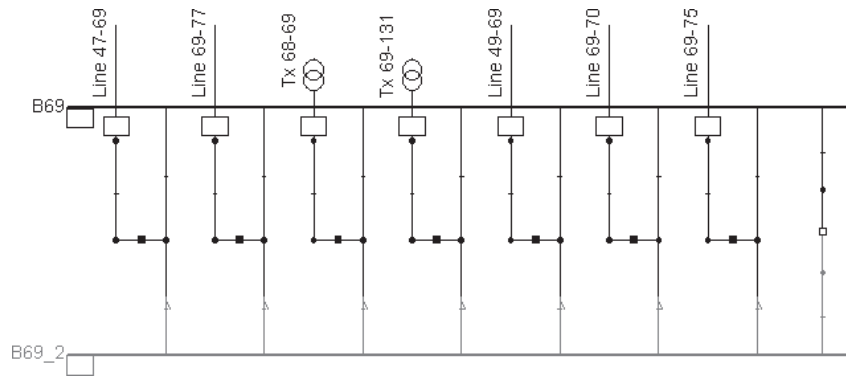


Figura 41. Subestación tipo doble barra 69.

Las siguientes figuras representan el detalle de conexión de las subestaciones que formaron las soluciones para el caso de 13 subestaciones tipo anillo.

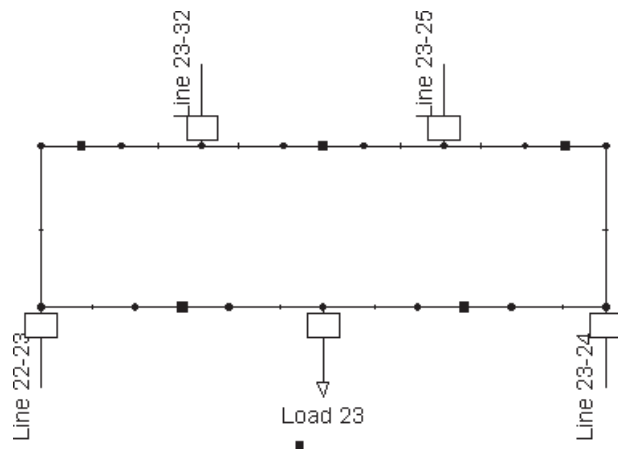


Figura 42. Subestación tipo anillo 23.

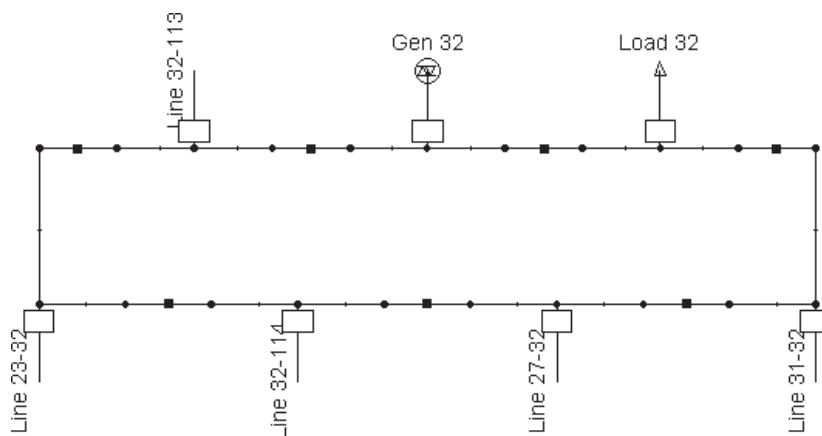


Figura 43. Subestación tipo anillo 32.

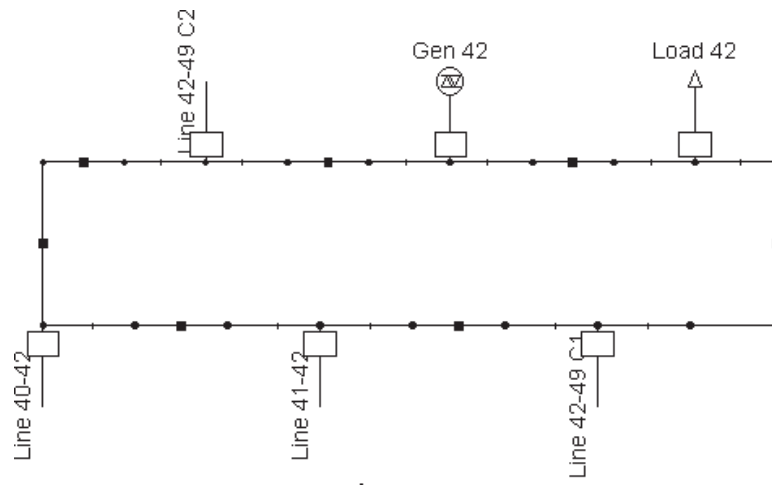


Figura 44. Subestación tipo anillo 42.

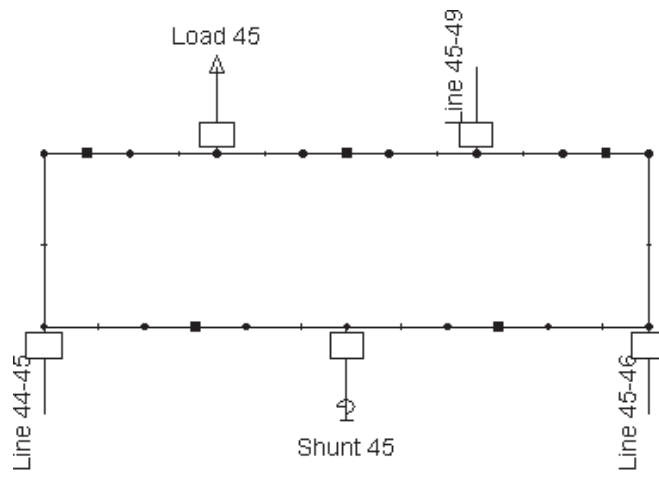


Figura 45. Subestación tipo anillo 45.

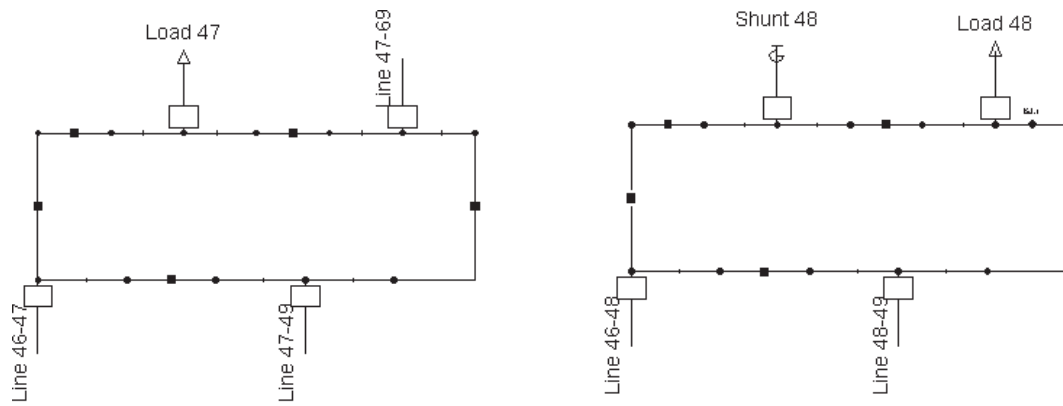
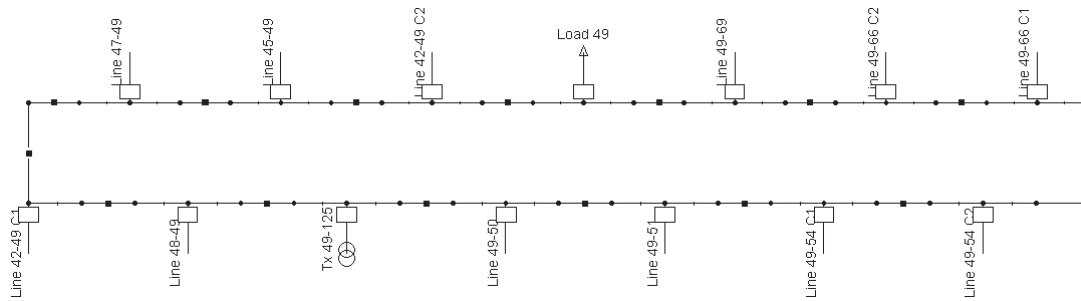


Figura46. Subestaciones tipo anillo 47 y 48.



C

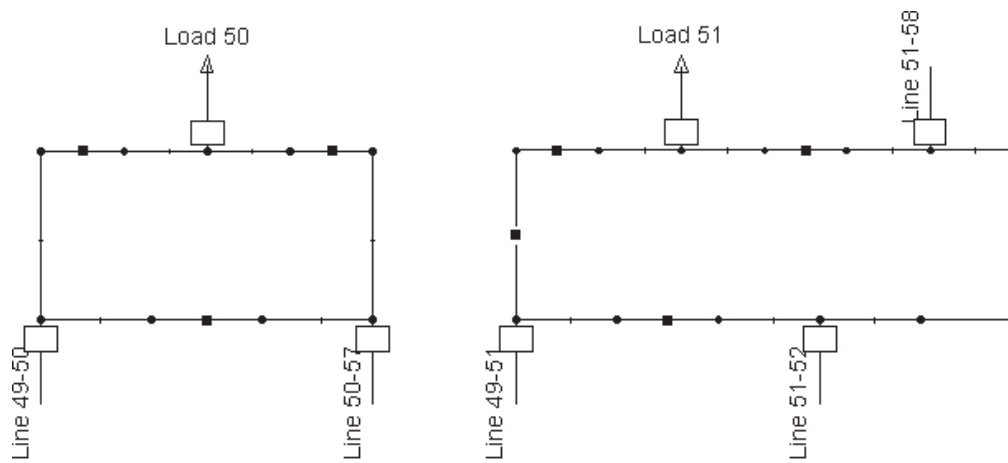


Figura47. Subestaciones tipo anillo 50 y 51.

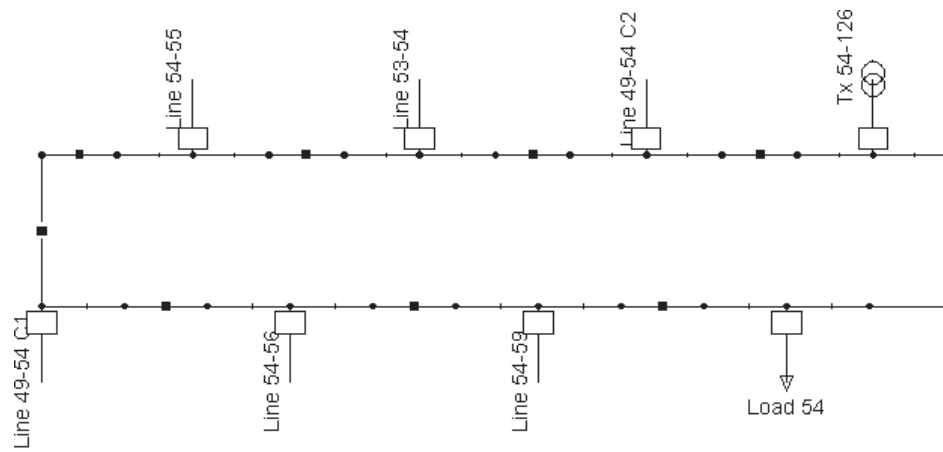


Figura 48. Subestaciones tipo anillo 54.

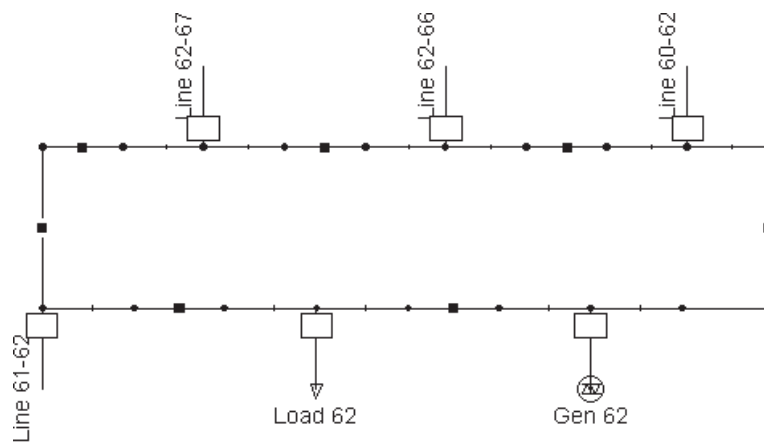


Figura 49. Subestaciones tipo anillo 62.

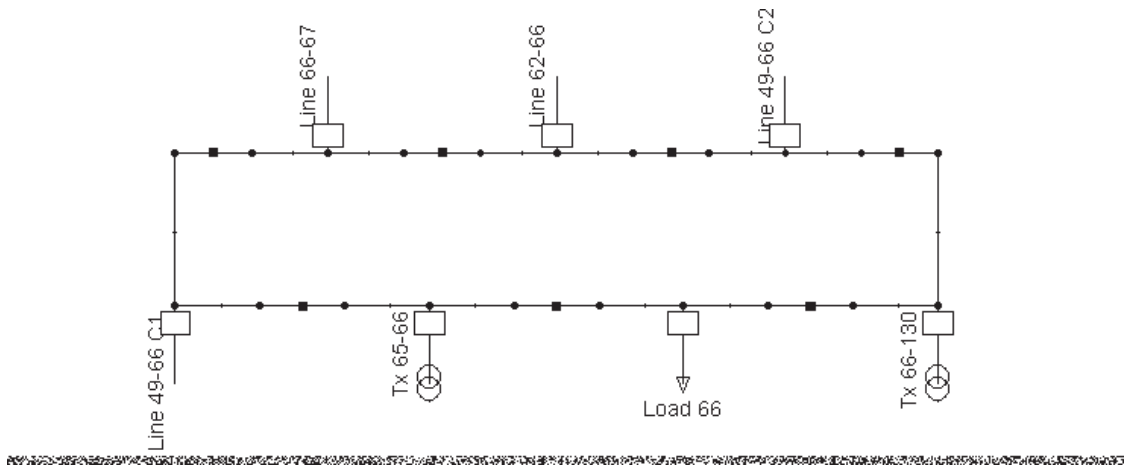


Figura 50. Subestaciones tipo anillo 66.

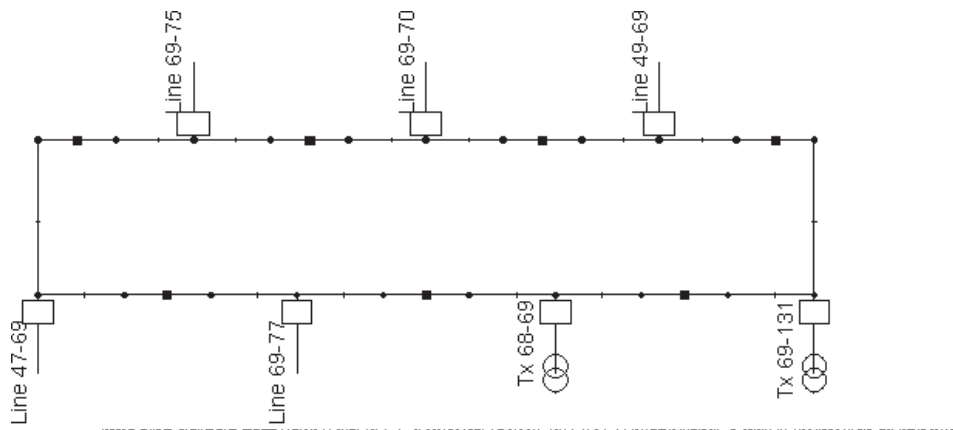


Figura 51. Subestaciones tipo anillo 69.

Las siguientes figuras representan el detalle de conexión de las subestaciones que formaron las soluciones para el caso de acotamiento de áreas. Las siguientes subestaciones conformaron la Zona 1.

Subestaciones 12 y 17.

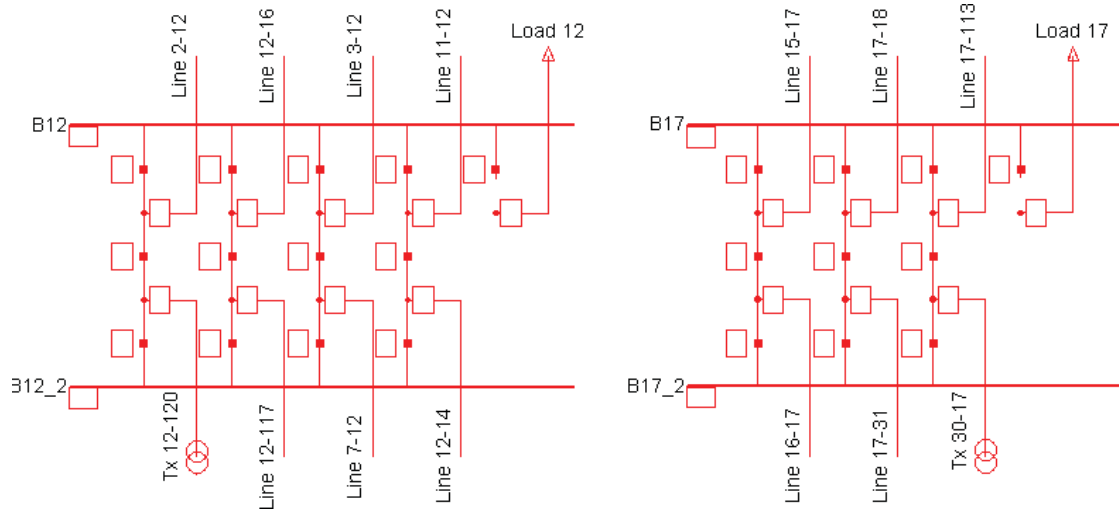


Figura 52. Subestaciones tipo interruptory medio 12 y 17 pertenecientes a la Zona 1.

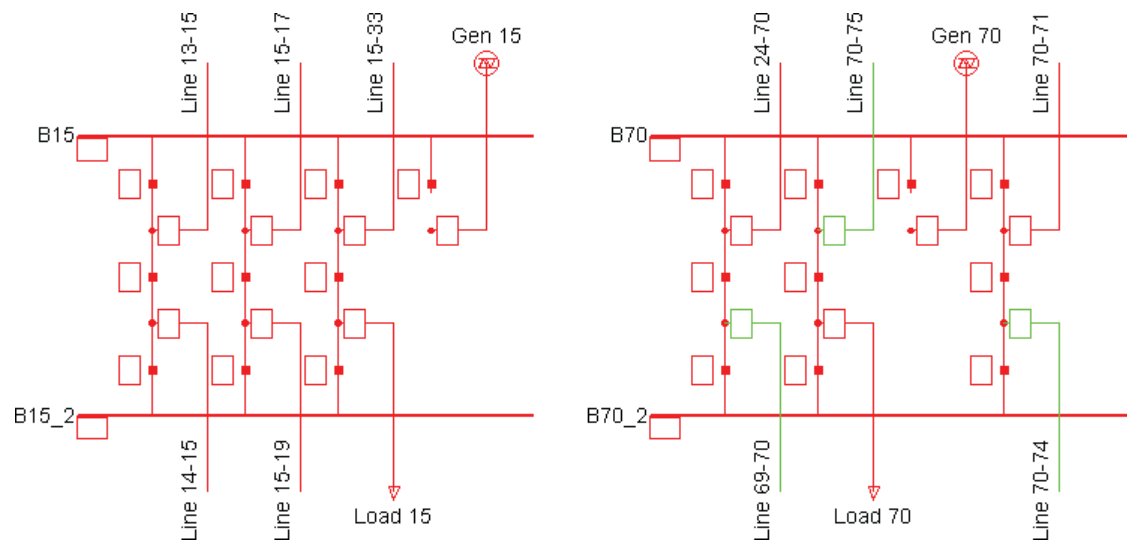


Figura 53. Subestaciones tipo interruptory medio 15 y 70 pertenecientes a la Zona 1.

Subestación 5.

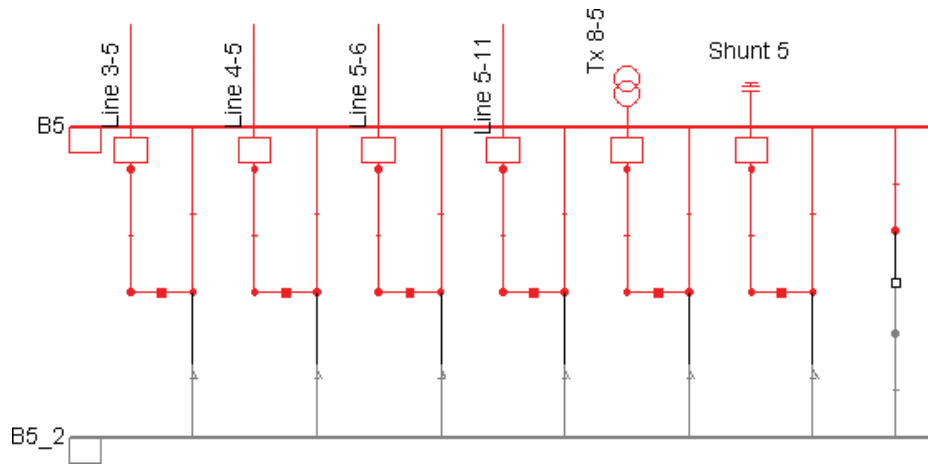


Figura 54. Subestación tipo doble barra 5 perteneciente a la Zona 1.

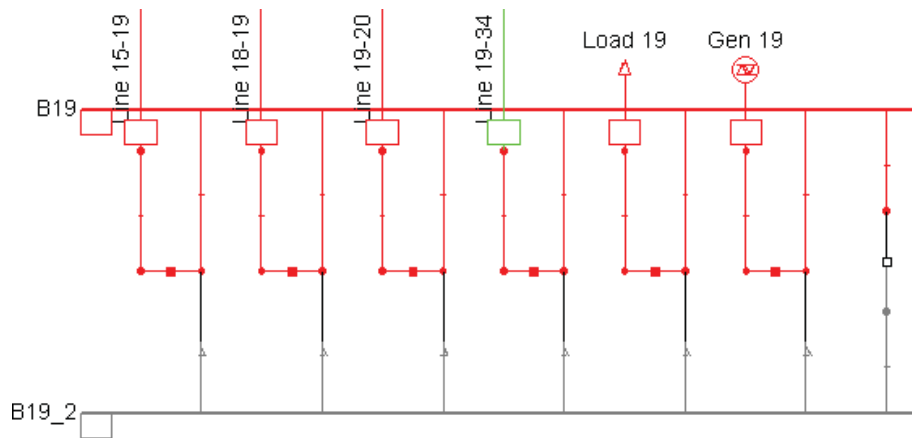


Figura 55. Subestación tipo doble barra 19 perteneciente a la Zona 1.

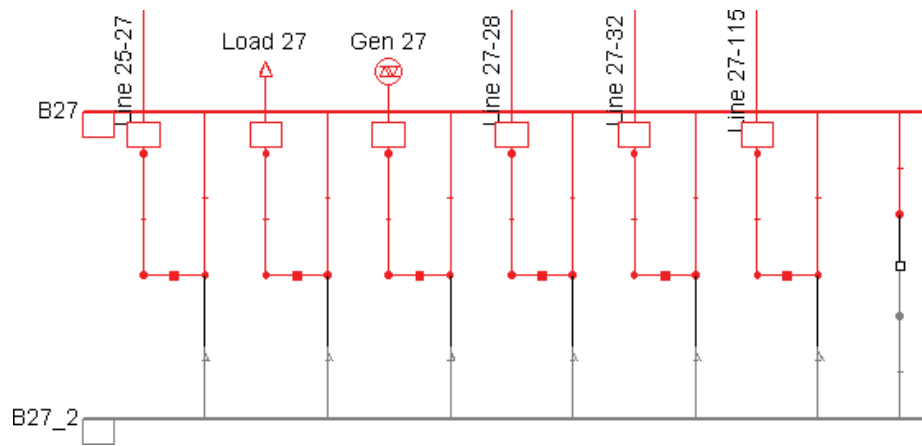


Figura 56. Subestación tipo doble barra 27 perteneciente a la Zona 1.

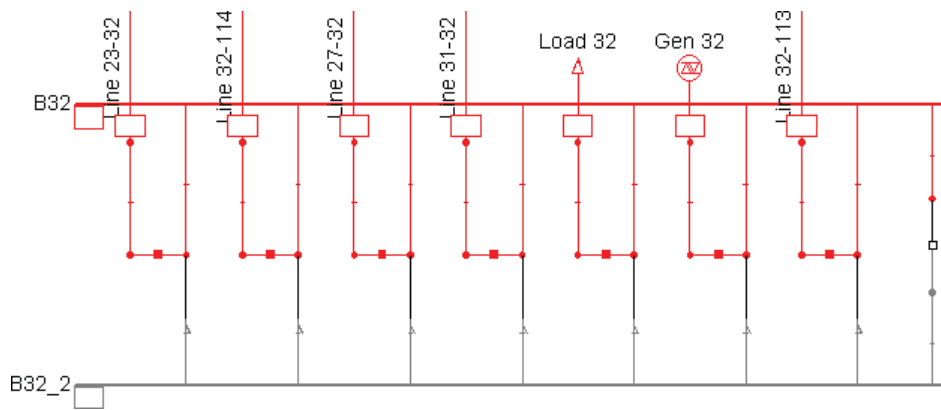


Figura 57. Subestación tipo doble barra 32 perteneciente a la Zona 1.

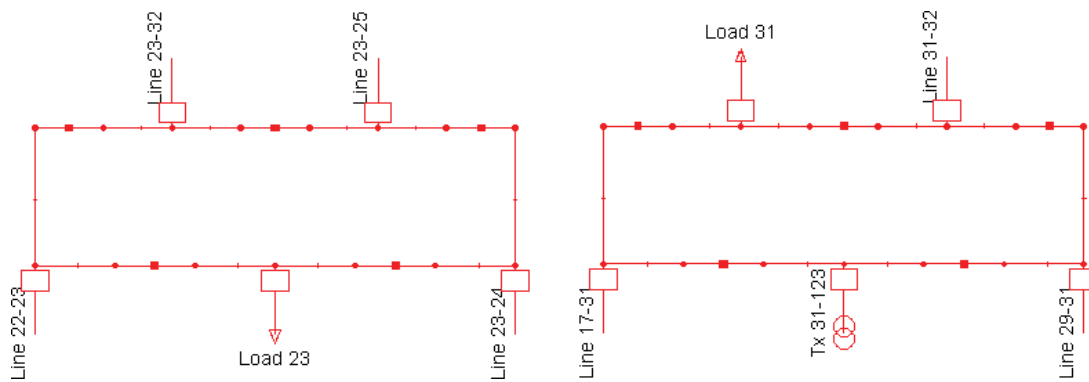


Figura 58. Subestaciones tipo anillo 23 y 31 pertenecientes a la Zona 1.

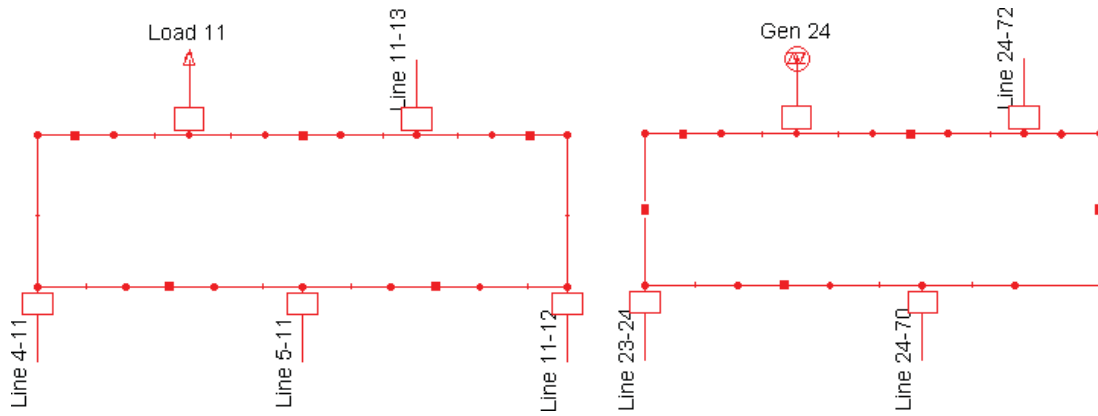


Figura 59. Subestaciones tipo anillo 11 y 24 pertenecientes a la Zona 1.

Las siguientes figuras representan el detalle de conexión de las subestaciones que formaron la solución para el caso de acotamiento de áreas. Las siguientes subestaciones conformaron la Zona 2.

Subestaciones 49 y 100.

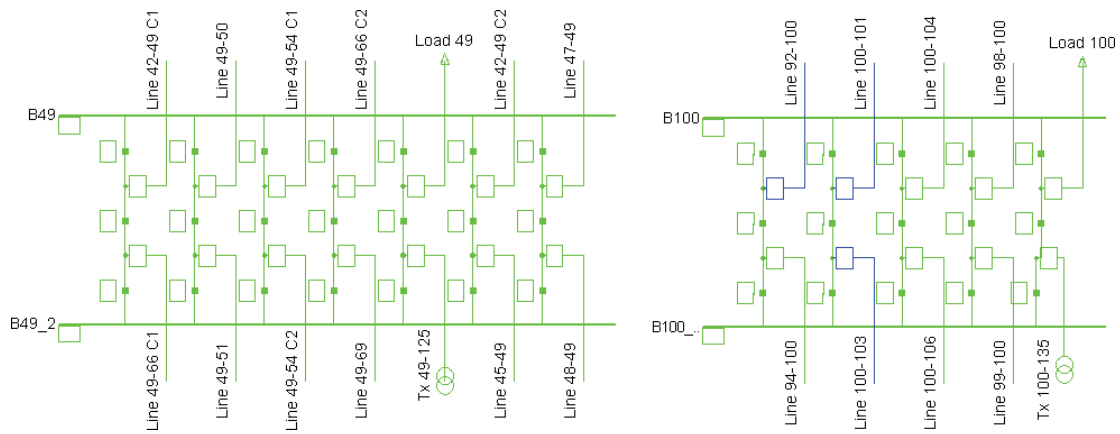


Figura 60. Subestaciones tipo interruptor y medio 49 y 100 pertenecientes a la Zona 2.

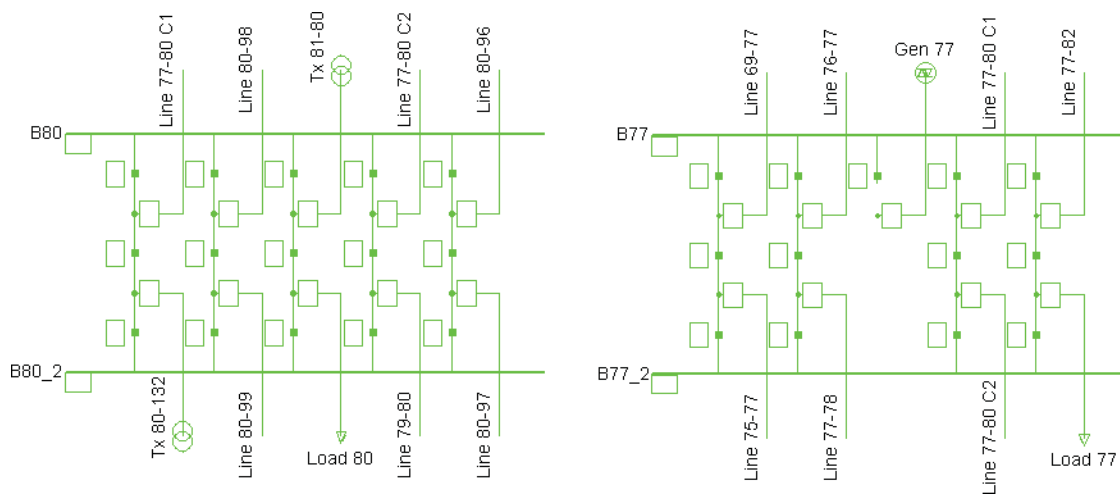


Figura 61. Subestaciones tipo interruptor y medio 80 y 77 pertenecientes a la Zona 2.

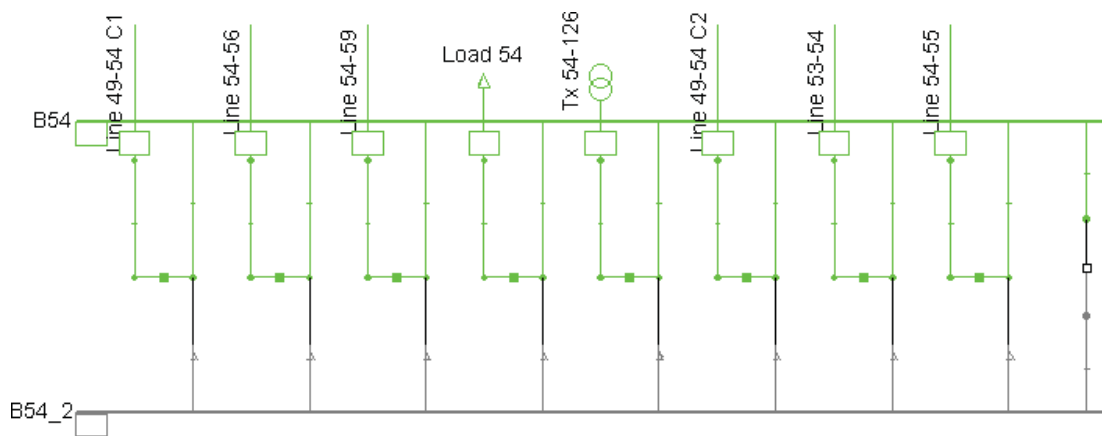


Figura 62. Subestación tipo doble barra 54 perteneciente a la Zona 2.

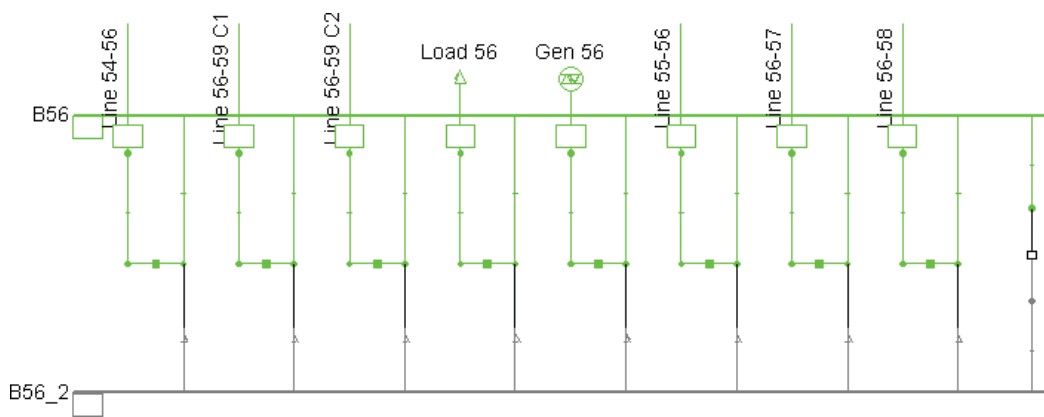


Figura 63. Subestación tipo doble barra 56 perteneciente a la Zona 2.

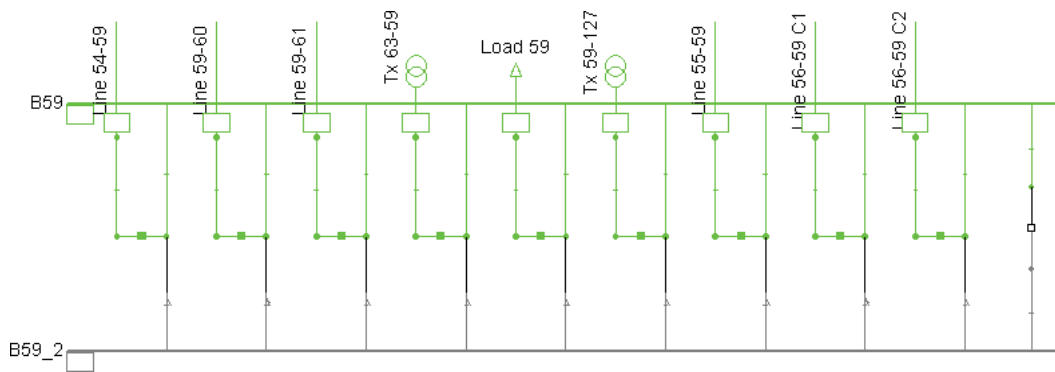


Figura 64. Subestación tipo doble barra 59 perteneciente a la Zona 2.

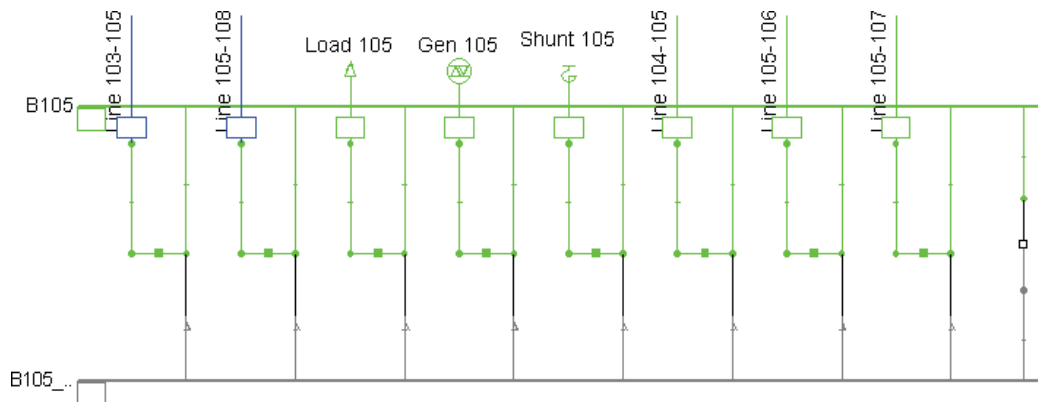


Figura 65. Subestación tipo doble barra 105 perteneciente a la Zona 2.

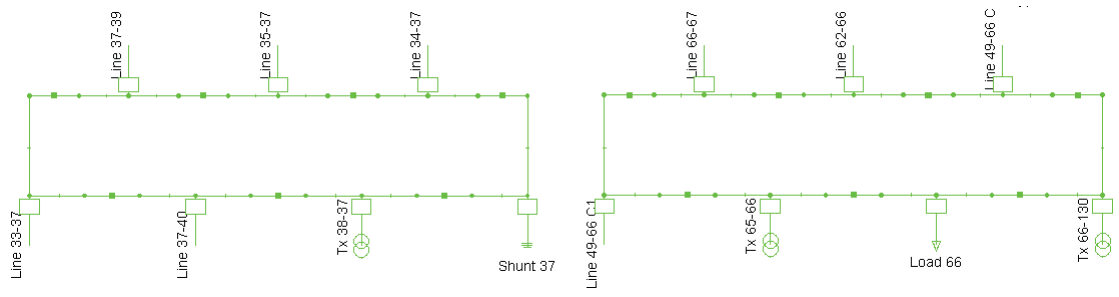


Figura 66. Subestaciones tipo anillo 37 y 66 pertenecientes a la Zona 2.

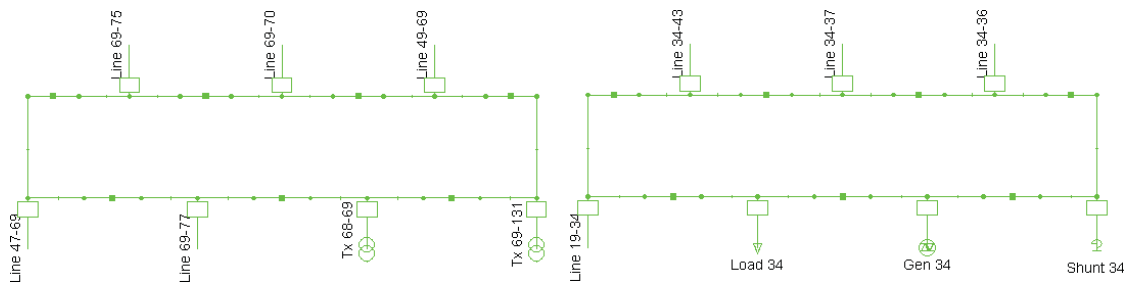


Figura 67. Subestaciones tipo anillo 69 y 34 pertenecientes a la Zona 2.

Las siguientes figuras representan el detalle de conexión de las subestaciones que formaron las soluciones para el caso de acotamiento de áreas. Las siguientes subestaciones conformaron la Zona 3.

Subestaciones 92 y 85.

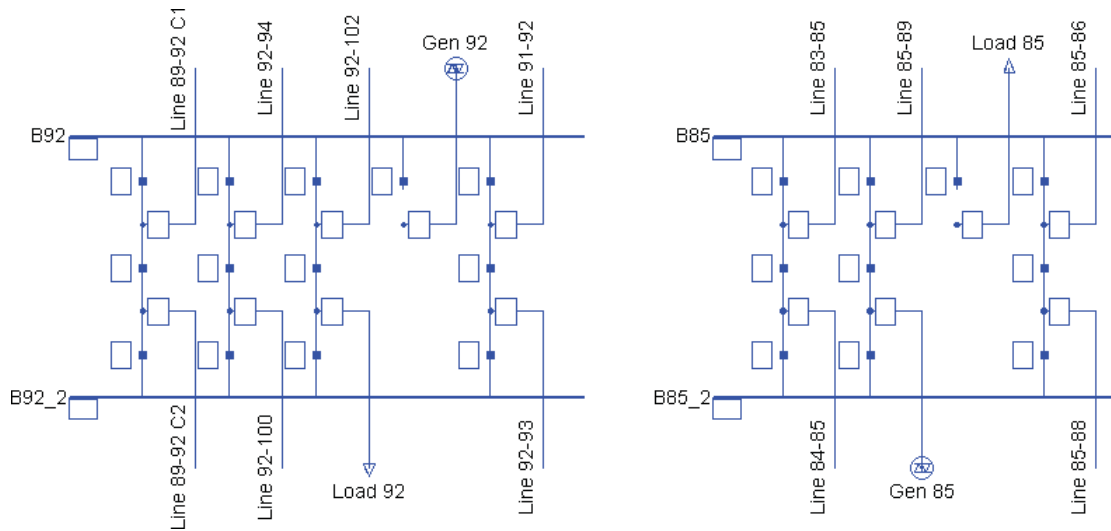


Figura 68. Subestaciones tipo interruptor y medio 92 y 85 pertenecientes a la Zona 3.

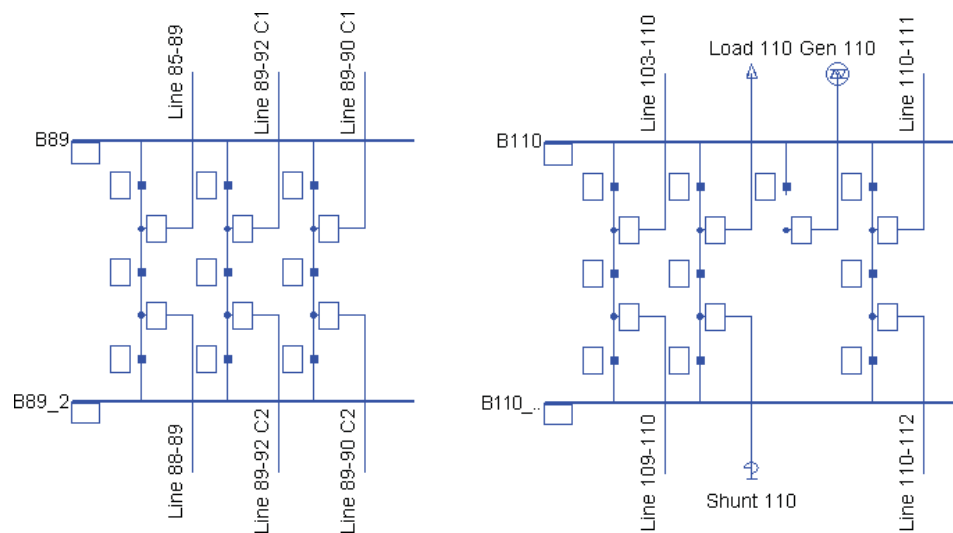


Figura 69. Subestaciones tipo interruptor y medio 89 y 110 pertenecientes a la Zona 3.

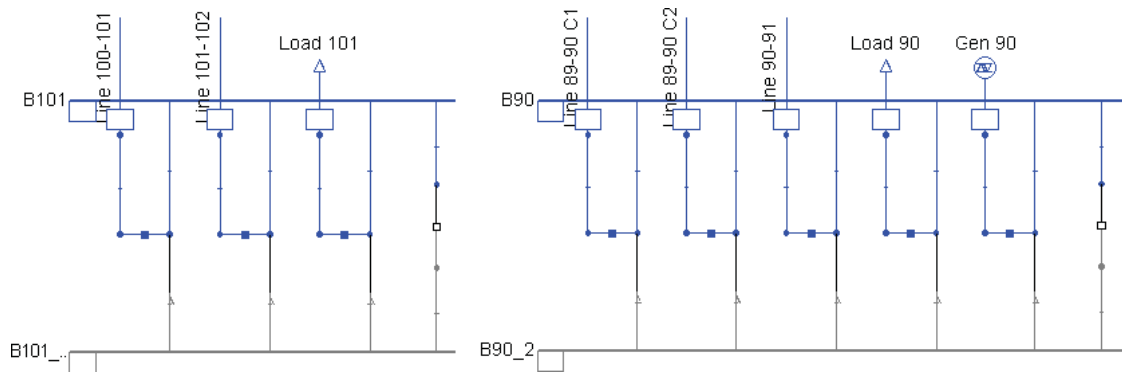


Figura 70. Subestaciones tipo doble barra 101 y 90 pertenecientes a la Zona 3.

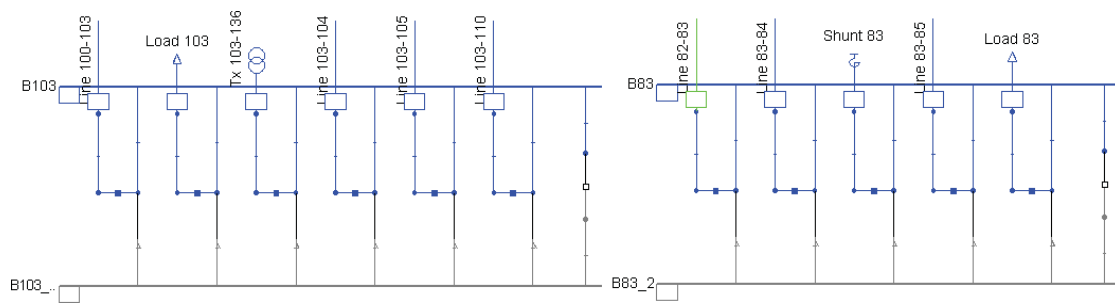


Figura 71. Subestaciones tipo doble barra 103 y 83 pertenecientes a la Zona 3.

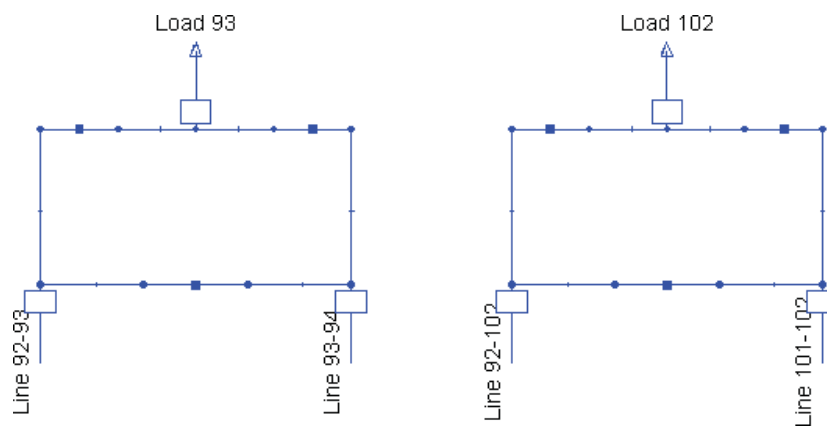


Figura 72. Subestaciones tipo doble barra 93 y 102 pertenecientes a la Zona 3.

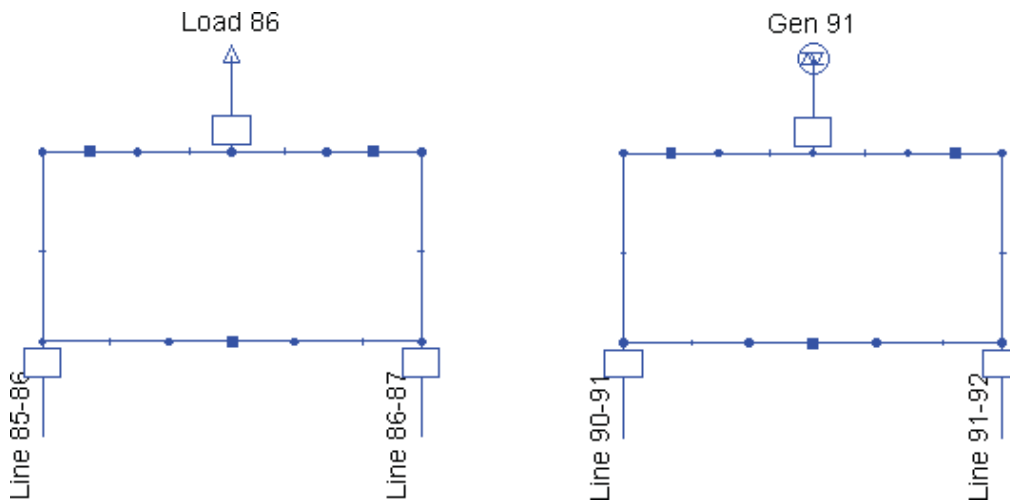


Figura 73. Subestaciones tipo doble barra 86 y 81 pertenecientes a la Zona3.

Anexo B. Detalle de las topologías encontradas con cada método de búsqueda para el caso de pruebas

La Tabla 19 muestra el detalle de la topología encontrada para el caso de pruebas con trece subestaciones tipo interruptor y medio. La primera columna indica el elemento que se tomó como referencia para establecer los estados de la bahía o diámetros asociados, las siguientes columnas muestran las soluciones con el método aleatorio, SA e ILS, respectivamente.

El color verde en las tablas de este anexo indica que existe un cambio respecto al caso base, ya sea en valor de función objetivo o en la forma en que se conecta los elementos en a las subestaciones.

Tabla 19. Detalle de la solución encontrada para el caso de trece subestaciones exploradas tipo interruptor y medio.

	Aleatorio	SA	ILS
Función Objetivo	60	57	58
CollCnr.ElmSubstat	99	99	99
Line 22-23.ElmLne	1	1	1
Load 23.ElmLod	3	3	3
Line 23-25.ElmLne	1	1	1
Crooksvl.ElmSubstat	99	99	99
Line 46-47.ElmLne	1	6	1

	Aleatorio	SA	ILS
Line 47-69.ElmLne	1	1	1
Delaware.ElmSubstat	99	99	99
Line 23-32.ElmLne	1	1	1
Line 32-114.ElmLne	1	1	1
Line 31-32.ElmLne	6	5	6
Gen 32.ElmGenstat	5	5	5
Howard.ElmSubstat	99	99	99
Line 40-42.ElmLne	1	3	1
Line 42-49 C1.ElmLne	1	1	1
Load 42.ElmLod	1	1	1
Muskingum.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-66 C1.ElmLne	1	1	1
Tx 65-66.ElmTr2	7	1	7
Tx 66-130.ElmTr2	3	3	3
Line 62-66.ElmLne	1	2	1
N.Newark.ElmSubstat	99	99	99
Line 44-45.ElmLne	1	2	1
Shunt 45.ElmShnt	3	8	3
Line 45-49.ElmLne	1	6	1
Natrium.ElmSubstat	99	99	99
Line 61-62.ElmLne	1	4	5
Load 62.ElmLod	1	1	1
Line 62-66.ElmLne	1	1	1
Newcmrst.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-51.ElmLne	1	4	7
Line 51-58.ElmLne	1	1	1
Philo.ElmSubstat	99	99	99
Line 42-49 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-50.ElmLne	1	2	1
Line 49-54 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-66 C2.ElmLne	1	1	1
Load 49.ElmLod	1	1	1
Line 42-49 C2.ElmLne	1	1	1
Line 47-49.ElmLne	1	1	1
Sporn.ElmSubstat	99	99	99
Line 47-69.ElmLne	1	1	1
Line 69-77.ElmLne	1	3	1
Tx 69-131.ElmTr2	3	3	3
Line 69-70.ElmLne	1	1	1
Torrey.ElmSubstat	99	99	99

	Aleatorio	SA	ILS
Line 49-54.C1.ElmLne	1	1	1
Line 54-56.ElmLne	8	5	1
Load 54.ElmLod	1	3	1
Line 53-54.ElmLne	1	1	1
WCambrdg.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-50.ElmLne	1	1	1
Load 50.ElmLod	3	3	3
Zanesvll.ElmSubstat	99	99	99
Line 46-48.ElmLne	1	2	1
Load 48.ElmLod	1	5	1

La Tabla 20 muestra el detalle de la topología encontrada para el caso de pruebas con trece subestaciones tipo doble barra. La primera columna indica el elemento que se tomó como referencia para establecer los estados de la bahía o diámetros asociados, las siguientes columnas muestran las soluciones con el método aleatorio, SA e ILS respectivamente.

Tabla 20. Detalle de la solución encontrada para el caso de trece subestaciones exploradas tipo doble barra.

	Aleatorio	SA	ILS
Función Objetivo	61	62	60
CollCnr.ElmSubstat	99	99	99
Line 22-23.ElmLne	1	1	1
Load 23.ElmLod	1	1	1
Line 23-24.ElmLne	1	1	1
Line 23-25.ElmLne	1	1	1
Line 23-32.ElmLne	3	1	1
Crooksvl.ElmSubstat	99	99	99
Line 46-47.ElmLne	1	1	1
Line 47-49.ElmLne	1	1	1
Line 47-69.ElmLne	1	1	1
Load 47.ElmLod	1	1	1
Delaware.ElmSubstat	99	99	99
Line 23-32.ElmLne	1	1	1
Line 32-114.ElmLne	1	1	1
Line 27-32.ElmLne	1	1	1
Line 31-32.ElmLne	1	1	2
Load 32.ElmLod	1	1	1
Gen 32.ElmGenstat	1	1	1
Line 32-113.ElmLne	1	1	1
Howard.ElmSubstat	99	99	99

	Aleatorio	SA	ILS
Line 40-42.ElmLne	1	1	1
Line 41-42.ElmLne	1	1	1
Line 42-49 C1.ElmLne	1	1	1
Load 42.ElmLod	1	1	1
Gen 42.ElmGenstat	1	1	1
Line 42-49 C2.ElmLne	1	1	1
Muskngum.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-66 C1.ElmLne	1	1	1
Tx 65-66.ElmTr2	1	1	1
Load 66.ElmLod	1	1	1
Tx 66-130.ElmTr2	1	1	1
Line 49-66 C2.ElmLne	1	1	1
Line 62-66.ElmLne	1	1	1
Line 66-67.ElmLne	1	1	1
N.Newark.ElmSubstat	99	99	99
Line 44-45.ElmLne	1	1	1
Shunt 45.ElmShnt	1	1	1
Line 45-46.ElmLne	1	1	1
Line 45-49.ElmLne	1	1	1
Load 45.ElmLod	1	1	1
Natrium.ElmSubstat	99	99	99
Line 61-62.ElmLne	1	1	1
Load 62.ElmLod	1	1	1
Gen 62.ElmGenstat	1	1	1
Line 60-62.ElmLne	1	2	3
Line 62-66.ElmLne	1	1	1
Line 62-67.ElmLne	1	1	1
Newcmrst.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-51.ElmLne	1	1	1
Line 51-52.ElmLne	1	1	1
Line 51-58.ElmLne	1	1	1
Load 51.ElmLod	1	1	1
Philo.ElmSubstat	99	99	99
Line 42-49 C1.ElmLne	1	1	1
Line 48-49.ElmLne	1	1	1
Tx 49-125.ElmTr2	1	1	1
Line 49-50.ElmLne	1	1	1
Line 49-51.ElmLne	1	1	1
Line 49-54 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-54 C2.ElmLne	1	1	1

	Aleatorio	SA	ILS
Line 49-66 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-66 C2.ElmLne	1	1	1
Line 49-69.ElmLne	1	1	1
Load 49.ElmLod	1	1	1
Line 42-49 C2.ElmLne	1	1	1
Line 45-49.ElmLne	1	1	1
Line 47-49.ElmLne	1	1	1
Sporn.ElmSubstat	99	99	99
Line 47-69.ElmLne	1	1	1
Line 69-77.ElmLne	1	1	1
Tx 68-69.ElmTr2	1	1	1
Tx 69-131.ElmTr2	1	1	1
Line 49-69.ElmLne	1	1	1
Line 69-70.ElmLne	2	1	1
Line 69-75.ElmLne	1	1	1
Torrey.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-54 C1.ElmLne	1	1	1
Line 54-56.ElmLne	1	1	1
Line 54-59.ElmLne	2	2	2
Load 54.ElmLod	1	1	1
Tx 54-126.ElmTr2	1	1	1
Line 49-54 C2.ElmLne	1	1	1
Line 53-54.ElmLne	1	1	1
Line 54-55.ElmLne	1	1	1
WCambrdg.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-50.ElmLne	1	1	1
Line 50-57.ElmLne	1	1	1
Load 50.ElmLod	1	1	1
Zanesvll.ElmSubstat	99	99	99
Line 46-48.ElmLne	1	1	1
Line 48-49.ElmLne	1	1	1
Load 48.ElmLod	1	1	1
Shunt 48.ElmShnt	1	1	1

La Tabla 21 muestra el detalle de la topología encontrada para el caso de pruebas con trece subestaciones tipo anillo. La primera columna indica el elemento que se tomó como referencia para establecer los estados de la bahía o diámetros asociados, las siguientes columnas muestran las soluciones con el método aleatorio, SA e ILS, respectivamente.

Tabla 21 Detalle de la solución encontrada para el caso de trece subestaciones exploradas tipo anillo.

	Aleatorio	SA	ILS
Función Objetivo	61	63	63
CollCrnr.ElmSubstat	99	99	99
Line 22-23.ElmLne	1	1	1
Line 23-24.ElmLne	1	1	1
Line 23-25.ElmLne	1	1	1
Load 23.ElmLod	1	1	1
Line 23-32.ElmLne	1	1	1
Crooksvl.ElmSubstat	99	99	99
Line 46-47.ElmLne	1	1	1
Line 47-49.ElmLne	1	1	1
Line 47-69.ElmLne	1	1	1
Load 47.ElmLod	1	1	1
Delaware.ElmSubstat	99	99	99
Line 23-32.ElmLne	1	1	1
Line 27-32.ElmLne	3	1	1
Line 31-32.ElmLne	4	1	1
Line 32-114.ElmLne	1	1	1
Load 32.ElmLod	2	1	1
Gen 32.ElmGenstat	1	1	1
Line 32-113.ElmLne	1	1	1
Howard.ElmSubstat	99	99	99
Line 40-42.ElmLne	1	1	1
Line 41-42.ElmLne	1	1	1
Line 42-49 C1.ElmLne	1	1	1
Load 42.ElmLod	1	1	1
Gen 42.ElmGenstat	1	1	1
Line 42-49 C2.ElmLne	1	1	1
Muskngum.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-66 C1.ElmLne	1	2	1
Line 49-66 C2.ElmLne	1	1	1
Line 62-66.ElmLne	1	1	1
Tx 65-66.ElmTr2	1	1	1
Load 66.ElmLod	1	1	1
Tx 66-130.ElmTr2	1	1	1
Line 66-67.ElmLne	1	3	1
N.Newark.ElmSubstat	99	99	99
Line 44-45.ElmLne	1	1	1
Line 45-46.ElmLne	1	1	1
Line 45-49.ElmLne	1	1	1

	Aleatorio	SA	ILS
Shunt 45.ElmShnt	1	1	1
Load 45.ElmLod	1	1	1
Natrium.ElmSubstat	99	99	99
Line 61-62.ElmLne	4	4	1
Line 60-62.ElmLne	1	1	1
Line 62-66.ElmLne	1	1	1
Load 62.ElmLod	2	2	1
Gen 62.ElmGenstat	1	1	1
Line 62-67.ElmLne	3	3	1
Newcmrst.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-51.ElmLne	1	1	1
Line 51-52.ElmLne	1	1	1
Line 51-58.ElmLne	1	1	1
Load 51.ElmLod	1	1	1
Philo.ElmSubstat	99	99	99
Line 42-49 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-66 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-66 C2.ElmLne	1	1	1
Line 49-69.ElmLne	1	1	1
Load 49.ElmLod	1	1	1
Tx 49-125.ElmTr2	1	1	1
Line 42-49 C2.ElmLne	1	1	1
Line 45-49.ElmLne	1	1	1
Line 48-49.ElmLne	1	1	1
Line 49-50.ElmLne	1	1	1
Line 49-51.ElmLne	1	1	1
Line 49-54 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-54 C2.ElmLne	1	1	1
Line 47-49.ElmLne	1	1	1
Sporn.ElmSubstat	99	99	99
Line 47-69.ElmLne	1	1	1
Line 49-69.ElmLne	1	1	1
Line 69-70.ElmLne	1	1	1
Line 69-77.ElmLne	1	1	1
Tx 68-69.ElmTr2	1	1	1
Tx 69-131.ElmTr2	1	1	1
Line 69-75.ElmLne	1	1	1
Torrey.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-54 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-54 C2.ElmLne	1	1	1

	Aleatorio	SA	ILS
Line 53-54.ElmLne	1	1	1
Line 54-56.ElmLne	3	3	3
Line 54-59.ElmLne	4	4	4
Load 54.ElmLod	2	2	2
Tx 54-126.ElmTr2	1	1	1
Line 54-55.ElmLne	1	1	1
WCambrdg.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-50.ElmLne	1	1	1
Line 50-57.ElmLne	1	1	1
Load 50.ElmLod	1	1	1
Zanesvll.ElmSubstat	99	99	99
Line 46-48.ElmLne	1	1	1
Line 48-49.ElmLne	1	1	1
Load 48.ElmLod	1	1	1
Shunt 48.ElmShnt	1	1	1

La Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24 se muestran los resultados en detalle de la búsqueda topológica para la Zona 1, Zona 2 y Zona 3, respectivamente. La primera columna indica el elemento que se tomó como referencia para establecer los estados de la bahía o diámetros asociados, las siguientes columnas muestran las soluciones con el método aleatorio, SA e ILS respectivamente.

Tabla 22. Detalle de las soluciones encontradas para la Zona 1 (se presenta una solución por cada método de búsqueda utilizado).

	Aleatorio	SA	ILS
Función Objetivo	35	35	39
TwinBrch.ElmSubstat	99	99	99
Line 2-12.ElmLne	1	1	2
Line 12-16.ElmLne	1	4	1
Line 3-12.ElmLne	7	7	7
Line 11-12.ElmLne	1	1	1
Load 12.ElmLod	3	3	3
Sorenson.ElmSubstat	99	99	99
Line 15-17.ElmLne	1	1	1
Line 17-18.ElmLne	1	1	1
Line 17-113.ElmLne	1	1	1
Load 17.ElmLod	3	3	3
Portsmth.ElmSubstat	99	99	99
Line 24-70.ElmLne	1	1	1
Line 70-75.ElmLne	1	1	1

	Aleatorio	SA	ILS
Gen 70.ElmGenstat	3	3	3
Line 70-71.ElmLne	1	1	1
FtWayne.ElmSubstat	99	99	99
Line 13-15.ElmLne	1	1	5
Line 15-17.ElmLne	1	1	1
Line 15-33.ElmLne	1	1	3
Gen 15.ElmGenstat	3	3	3
Delaware.ElmSubstat	99	99	99
Line 23-32.ElmLne	2	1	1
Line 32-114.ElmLne	1	2	1
Line 27-32.ElmLne	1	1	1
Line 31-32.ElmLne	2	3	1
Load 32.ElmLod	1	1	1
Gen 32.ElmGenstat	1	1	1
Line 32-113.ElmLne	1	2	1
Olive.ElmSubstat	99	99	99
Line 3-5.ElmLne	1	1	1
Line 4-5.ElmLne	1	1	1
Line 5-6.ElmLne	1	1	1
Line 5-11.ElmLne	1	1	1
Tx 8-5.ElmTr2	1	1	1
Shunt 5.ElmShnt	1	2	1
Madison.ElmSubstat	99	99	99
Line 25-27.ElmLne	1	1	1
Load 27.ElmLod	1	1	1
Gen 27.ElmGenstat	1	1	1
Line 27-28.ElmLne	1	1	1
Line 27-32.ElmLne	1	1	1
Line 27-115.ElmLne	1	1	1
Lincoln.ElmSubstat	99	99	99
Line 15-19.ElmLne	1	1	2
Line 18-19.ElmLne	1	1	1
Line 19-20.ElmLne	1	1	1
Line 19-34.ElmLne	2	3	1
Load 19.ElmLod	1	1	1
Gen 19.ElmGenstat	2	1	1
SouthBnd.ElmSubstat	99	99	99
Line 4-11.ElmLne	1	1	1
Line 5-11.ElmLne	1	1	1
Line 11-12.ElmLne	1	1	1

	Aleatorio	SA	ILS
Line 11-13.ElmLne	3	3	1
Load 11.ElmLod	2	2	1
DeerCrk.ElmSubstat	99	99	99
Line 17-31.ElmLne	1	3	1
Line 29-31.ElmLne	4	1	1
Line 31-32.ElmLne	2	1	1

Tabla 23. Detalle de las soluciones encontradas para la Zona 2 (se presenta una solución por cada método de búsqueda utilizado).

	Aleatorio	SA	ILS
Función Objetivo	10	10	10
Philo.ElmSubstat	99	99	99
Line 42-49 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-50.ElmLne	1	1	1
Line 49-54 C1.ElmLne	1	1	1
Line 49-66 C2.ElmLne	1	1	1
Load 49.ElmLod	1	1	1
Line 42-49 C2.ElmLne	1	1	1
Line 47-49.ElmLne	1	1	1
Glen Lyn.ElmSubstat	99	99	99
Line 92-100.ElmLne	1	1	1
Line 100-101.ElmLne	1	4	1
Line 100-104.ElmLne	1	1	1
Line 98-100.ElmLne	1	1	1
Load 100.ElmLod	1	1	1
CabinCrk.ElmSubstat	99	99	99
Line 77-80 C1.ElmLne	1	1	1
Line 80-98.ElmLne	1	1	1
Tx 81-80.ElmTr2	1	1	1
Line 77-80 C2.ElmLne	1	1	1
Line 80-96.ElmLne	1	1	1
Turner.ElmSubstat	99	99	99
Line 69-77.ElmLne	1	1	1
Line 76-77.ElmLne	1	1	1
Gen 77.ElmGenstat	3	3	3
Line 77-80 C1.ElmLne	1	1	1
Line 77-82.ElmLne	1	1	1
Tidd.ElmSubstat	99	99	99
Line 54-59.ElmLne	1	2	1
Line 59-60.ElmLne	1	1	1

	Aleatorio	SA	ILS
Line 59-61.ElmLne	1	1	1
Tx 63-59.ElmTr2	1	1	1
Load 59.ElmLod	1	1	1
Tx 59-127.ElmTr2	1	1	1
Line 55-59.ElmLne	2	2	2
Line 56-59 C1.ElmLne	1	1	3
Line 56-59 C2.ElmLne	3	1	1
Torrey.ElmSubstat	99	99	99
Line 49-54 C1.ElmLne	1	1	1
Line 54-56.ElmLne	1	1	1
Line 54-59.ElmLne	1	1	1
Load 54.ElmLod	1	1	1
Tx 54-126.ElmTr2	1	1	1
Line 49-54 C2.ElmLne	1	1	1
Line 53-54.ElmLne	1	1	1
Line 54-55.ElmLne	1	3	1
Sunnysde.ElmSubstat	99	99	99
Line 54-56.ElmLne	1	1	1
Line 56-59 C1.ElmLne	1	1	1
Line 56-59 C2.ElmLne	1	1	1
Load 56.ElmLod	1	1	1
Gen 56.ElmGenstat	1	1	1
Line 55-56.ElmLne	1	1	1
Line 56-57.ElmLne	1	1	1
Line 56-58.ElmLne	1	1	1
Roanoke.ElmSubstat	99	99	99
Line 103-105.ElmLne	1	1	1
Line 105-108.ElmLne	1	1	1
Load 105.ElmLod	1	1	1
Gen 105.ElmGenstat	1	1	1
Shunt 105.ElmShnt	1	1	1

Tabla 24. Detalle de las soluciones encontradas para la Zona 3 (se presenta una solución por cada método de búsqueda utilizado).

	Aleatorio	SA	ILS
Función Objetivo	18	18	18
Saltvle.ElmSubstat	99	99	99
Line 89-92 C1.ElmLne	1	1	1
Line 92-94.ElmLne	1	1	1
Line 92-102.ElmLne	1	1	1

	Aleatorio	SA	ILS
Gen 92.ElmGenstat	3	3	3
Line 91-92.ElmLne	1	1	1
Fieldale.ElmSubstat	99	99	99
Line 103-110.ElmLne	1	1	1
Load 110.ElmLod	1	1	1
Gen 110.ElmGenstat	3	3	3
Line 110-111.ElmLne	1	1	1
ClinchRv.ElmSubstat	99	99	99
Line 85-89.ElmLne	1	1	1
Line 89-92 C1.ElmLne	1	1	1
Tx 89-134.ElmTr2	3	3	3
Line 89-90 C1.ElmLne	1	1	1
BeaverCk.ElmSubstat	99	99	99
Line 83-85.ElmLne	1	1	1
Line 85-89.ElmLne	1	1	1
Load 85.ElmLod	3	3	3
Line 85-86.ElmLne	1	1	1
Claytor.ElmSubstat	99	99	99
Line 100-103.ElmLne	1	1	1
Load 103.ElmLod	1	1	1
Tx 103-136.ElmTr2	1	1	1
Line 103-104.ElmLne	1	1	1
Line 103-105.ElmLne	1	1	1
Line 103-110.ElmLne	1	1	1
Sprigg.ElmSubstat	99	99	99
Line 82-83.ElmLne	1	1	1
Line 83-84.ElmLne	2	1	2
Shunt 83.ElmShnt	1	1	1
Line 83-85.ElmLne	1	2	1
Load 83.ElmLod	1	1	1
Holston.ElmSubstat	99	99	99
Line 89-90 C1.ElmLne	1	1	1
Line 89-90 C2.ElmLne	1	1	1
Line 90-91.ElmLne	1	1	1
Load 90.ElmLod	1	1	1
Gen 90.ElmGenstat	1	1	1
Wythe.ElmSubstat	99	99	99
Line 100-101.ElmLne	1	1	1
Line 101-102.ElmLne	1	1	1
Load 101.ElmLod	1	1	1

	Aleatorio	SA	ILS
Tazewell.ElmSubstat	99	99	99
Line 92-93.ElmLne	1	1	1
Line 93-94.ElmLne	1	1	1
Load 93.ElmLod	1	1	1
Smythe.ElmSubstat	99	99	99
Line 92-102.ElmLne	1	1	1
Line 101-102.ElmLne	1	1	1
Load 102.ElmLod	1	1	1
HolstonT.ElmSubstat	99	99	99
Line 90-91.ElmLne	1	1	1
Line 91-92.ElmLne	1	1	1
Gen 91.ElmGenstat	1	1	1
Hazard.ElmSubstat	99	99	99
Line 85-86.ElmLne	1	1	1
Line 86-87.ElmLne	1	1	1
Load 86.ElmLod	1	1	1