

PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DE REDES DE TRANSMISIÓN
CONSIDERANDO REPOTENCIACIÓN, RECONFIGURACIÓN DE CIRCUITOS
EXISTENTES Y UBICACIÓN DE COMPENSACIONES EN SERIE Y EN
DERIVACIÓN

JAIME ANDRÉS LÓPEZ LÓPEZ

Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería

Director
Ph.D JESÚS MARÍA LÓPEZ LEZAMA
Docente del Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Antioquia

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2017

RESUMEN

En este trabajo de investigación se aborda el problema de Planeamiento de la Expansión de la Red de Transmisión (PERT). El PERT consiste en determinar el conjunto de nuevos circuitos necesarios en un sistema eléctrico de potencia para atender una demanda futura a un mínimo costo. En su versión clásica el PERT considera como candidatos de solución únicamente la adición de nuevas líneas y transformadores al sistema. La principal contribución de este trabajo consiste en la inclusión de candidatos de solución no convencionales en el PERT. Dichos candidatos de solución son la repotenciación, reconfiguración de circuitos existentes y la ubicación de compensación en serie y en derivación. Para tener en cuenta estos últimos, se considera un modelo AC de la red de transmisión. La solución al modelo propuesto es llevada a cabo mediante algoritmos genéticos híbridos. Los resultados obtenidos son contrastados y validados con publicaciones previas de la literatura técnica enfocadas en este tipo de problemas. Para probar la efectividad de los métodos propuestos se utilizan los sistemas Garver de 6 barras e IEEE de 24 barras. En una primera instancia, al considerar como único candidato de solución las opciones clásicas, los resultados obtenidos por las técnicas metaheurísticas desarrolladas muestran una solución igual a lo reportado por la literatura técnica. Luego, en una segunda instancia, son considerados los candidatos de solución no convencionales a precios competitivos, y como resultado se obtienen costos de expansión menores a los reportados con soluciones clásicas, lo que valida la potencialidad de la inclusión de este tipo de candidatos en el PERT.

Palabras clave: Planeamiento de la expansión de la red de transmisión, optimización combinatorial, técnicas metaheurísticas, algoritmos genéticos, repotenciación de circuitos, reconfiguración de circuitos, compensación serie, compensación en derivación.

ABSTRACT

In this research project the Transmission Network Expansion Planning (TNEP) problem is addressed. The TNEP determines the set of new circuits required in an electrical power system to meet future energy demand at a minimum cost. In its classic version the TNEP only considers as solution candidates the addition of new lines and transformers. The main contribution of this work is the inclusion of non-conventional solution candidates in the TNEP. Such solution candidates are: repowering, reconfiguration of existing circuits and location of series and shunt compensation. To take into account these last ones, an AC model of the transmission network is considered. The solution to the proposed model is carried out by means of hybrid genetic algorithms. The obtained results are contrasted and validated with previous publications of the technical literature focused on this type of problems. To test the effectiveness of the proposed methods the Garver 6 bus power system and the IEEE 24 bus power system are considered. In a first instance, considering only classic solution candidates, the results obtained by the developed metaheuristic techniques are equal to those reported by the technical literature. Then, in a second instance, non-conventional candidate solutions are considered at competitive prices, and as a result, lower costs of expansion are obtained than those reported for classic candidate solutions, which validates the potential of the inclusion of this type candidates in the PERT.

Keywords: Transmission network expansion planning, combinatorial optimization, metaheuristic techniques, genetic algorithms, circuit repowering, circuit reconfiguration, series compensation, shunt compensation.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. ESTADO DEL ARTE DEL PERT	11
1.1. MODELOS PARA LA REPRESENTACIÓN DEL PERT	11
1.2. MÉTODOS DE SOLUCIÓN	12
1.2.1. Programación Matemática	12
1.2.2. Técnicas Heurísticas	12
1.2.3. Técnicas Metaheurísticas	13
1.2.4. Métodos Híbridos	14
1.2.5. Clasificación de los métodos de solución	15
2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PERT Y CANDIDATOS DE SOLUCIÓN NO CONVENCIONALES.....	17
2.1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PERT	17
2.2. CANDIDATOS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DEL PERT	19
2.3. SISTEMAS DE PRUEBA	22
2.3.1. Sistema Garver de 6 barras	22
2.3.2. Sistema IEEE de 24 barras (IEEE24).....	23
3. ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO – GRASP (AGHG)	25
3.1. CODIFICACIÓN.....	25
3.2. FUNCIÓN OBJETIVO.....	26
3.3. POBLACIÓN INICIAL	27
3.4. SELECCIÓN.....	28
3.5. RECOMBINACIÓN	29
3.6. MUTACIÓN (GRASP).....	30
3.7. FUNCIONAMIENTO DEL AGHG	31
3.8. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL AGHG.....	32
3.8.1. Sistema Garver - Primer caso de validación	33
3.8.2. Sistema Garver - Segundo caso de validación.....	35
3.8.3. Sistema IEEE de 24 barras	37

4. ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO – TABÚ (AGHT).....	41
4.1. CODIFICACIÓN.....	41
4.2. FUNCIÓN OBJETIVO.....	42
4.3. POBLACIÓN INICIAL	43
4.4. SELECCIÓN.....	43
4.5. RECOMBINACIÓN	43
4.6. MUTACIÓN (TABÚ).....	43
4.7. FUNCIONAMIENTO DEL AGHT	46
4.8. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL AGHT	47
4.8.1. Sistema Garver - Primer caso de validación	48
4.8.2. Sistema Garver - Segundo caso de validación.....	50
4.8.3. Sistema IEEE de 24 barras	52
5. CONCLUSIONES.....	58
6. BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXO B	73
ANEXO C	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de entrada del AGHG.	33
Tabla 2. Resumen de resultados obtenidos por el AGHG.	40
Tabla 3. Parámetros de entrada del AGHT.	48
Tabla 4. Resumen de resultados obtenido por el AGHT.	57
Tabla 5. Datos de generación y demanda, sistema Garver Caso 01.	71
Tabla 6. Datos de la red y parámetros para la adición de circuitos, sistema Garver Caso 01.	71
Tabla 7. Parámetros utilizados para la repotenciación de circuitos, sistema Garver Caso 01.	71
Tabla 8. Parámetros utilizados para la compensación en derivación.	72
Tabla 9. Parámetros utilizados para la compensación serie, sistema Garver Caso 01.	72
Tabla 10. Parámetros utilizados para la reconfiguración de circuitos, sistema Garver Caso 01.	72
Tabla 11. Datos de generación y demanda, sistema Garver Caso 02.	73
Tabla 12. Datos de la red y parámetros para la adición de circuitos, sistema Garver Caso 02.	73
Tabla 13. Parámetros utilizados para la repotenciación de circuitos, sistema Garver Caso 02.	73
Tabla 14. Parámetros utilizados para la compensación serie, sistema Garver Caso 02.	74
Tabla 15. Parámetros utilizados para la reconfiguración de circuitos, sistema Garver Caso 02.	74
Tabla 16. Datos de generación y demanda, sistema IEEE24.	75
Tabla 17. Datos de la red y parámetros para la adición de circuitos, sistema IEEE24.	75
Tabla 18. Parámetros utilizados para la repotenciación de circuitos, sistema IEEE24.	77
Tabla 19. Parámetros utilizados para la compensación serie, sistema IEEE24.	78
Tabla 20. Parámetros utilizados para la reconfiguración de circuitos, sistema IEEE24.	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las técnicas de solución del PERT.....	15
Figura 2. Técnicas de solución del PERT.....	16
Figura 3. Tipo de publicaciones consultadas.....	16
Figura 4. Solución clásica al problema del PERT.....	19
Figura 5. Candidato no convencional, repotenciación de circuitos.....	20
Figura 6. Candidato no convencional, reconfiguración de circuitos.....	21
Figura 7. Candidato no convencional, compensación serie y en derivación.....	22
Figura 8. Sistema Garver de 6 barras.....	23
Figura 9. Sistema IEEE de 24 barras.....	24
Figura 10. Codificación de los individuos del AGHG.....	26
Figura 11. Generación de la población inicial para el AGHG.....	28
Figura 12. Proceso de selección por torneo.....	29
Figura 13. Proceso de recombinación.....	29
Figura 14. Proceso de mutación – GRASP.....	30
Figura 15. Diagrama del funcionamiento del AGHG.....	32
Figura 16. Resultado para el primer caso de validación, costo alto para candidatos no convencionales, AGHG.....	33
Figura 17. Representación de la solución obtenida por el AGHG, costo alto para candidatos no convencionales (primer caso de validación).....	34
Figura 18. Resultado para el primer caso de validación, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHG.....	34
Figura 19. Representación de la solución obtenida por el AGHG, costos competitivos para candidatos no convencionales (primer caso de validación).....	35
Figura 20. Resultado para el segundo caso de validación, costo alto para candidatos no convencionales, AGHG.....	35
Figura 21. Representación de la solución obtenida por el AGHG, costo alto para candidatos no convencionales (segundo caso de validación).....	36
Figura 22. Resultado para el segundo caso de validación, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHG.....	36
Figura 23. Representación de la solución obtenida por AGHG, costos competitivos para candidatos no convencionales (segundo caso de validación).....	37
Figura 24. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, costo alto para candidatos no convencionales, AGHG.....	38
Figura 25. Representación de la solución obtenida por AGHG para el sistema IEEE de 24 barras, costo alto para candidatos no convencionales.....	38

Figura 26. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHG.	39
Figura 27. Representación de la solución obtenida por AGHG para el sistema IEEE de 24 barras, costos competitivos para candidatos no convencionales.	39
Figura 28. Codificación de los individuos del AGHT.	42
Figura 29. Lista tabú utilizada para los corredores.	44
Figura 30. Lista tabú para la compensación en derivación.	45
Figura 31. Proceso de mutación para el AGHT.	45
Figura 32. Diagrama de funcionamiento del AGHT.	47
Figura 33. Resultado para el primer caso de validación, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHT.	48
Figura 34. Representación de la solución obtenida por el AGHT, costos competitivos para candidatos no convencionales (primer caso de validación).	49
Figura 35. Resultado para el primer caso de validación, costo alto para candidatos no convencionales, AGHT.	49
Figura 36. Representación de la solución obtenida por el AGHT, costo alto para candidatos no convencionales (primer caso de validación).	50
Figura 37. Resultado para el segundo caso de validación, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHT.	50
Figura 38. Representación de la solución obtenida por el AGHT, costos competitivos para candidatos no convencionales (segundo caso de validación). ...	51
Figura 39. Resultado para el segundo caso de validación, AGHT. Opción de expansión con reconfiguración activa.	51
Figura 40. Representación de la solución obtenida por el AGHT. Opción de expansión con reconfiguración activa (segundo caso de validación).	52
Figura 41. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHT.	53
Figura 42. Representación de la solución obtenida por el AGHT para el sistema IEEE de 24 barras, costos competitivos para candidatos no convencionales. Fuente: Propia.	53
Figura 43. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, costo alto para candidatos no convencionales, AGHT.	54
Figura 44. Representación de la solución obtenida por el AGHT para el sistema IEEE de 24 barras, costo alto para candidatos no convencionales.	54
Figura 45. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, AGHT. Opción de expansión con reconfiguración activa.	55
Figura 46. Representación de la solución obtenida por el AGHT para el sistema IEEE de 24 barras. Opción de expansión con reconfiguración activa.	56

INTRODUCCIÓN

El problema del Planeamiento de la Expansión de la Red de Transmisión (PERT) obedece, principalmente, al continuo aumento de la demanda de energía eléctrica en los sistemas de potencia. En su versión clásica, este problema consiste en identificar un conjunto de nuevos elementos que deben ser incorporados a la red de transmisión (típicamente líneas y transformadores), de tal modo que se atienda una demanda futura a mínimo costo. El PERT se puede abordar desde una perspectiva estática o dinámica. Es decir, en el primer caso, se determinan los elementos que deben ser incorporados a la red y donde deben ser instalados. En el segundo caso, se debe determinar, adicionalmente, el momento en el que deben ser instalados en la red.

El PERT debe garantizar confiabilidad, flexibilidad y seguridad en la operación del sistema. Para ello, se deben tener en cuenta las restricciones propias de la red de transmisión (contingencias críticas, futuros proyectos de generación ya definidos, regulación, tipo de mercado, etc.). Adicionalmente, dadas las crecientes restricciones ambientales, cada vez es más difícil acceder a un espacio disponible para la construcción de nuevas líneas de transmisión. En este contexto, se han explorado opciones de expansión diferentes a las clásicas, como la repotenciación y reconfiguración de redes existentes y la ubicación de compensación en serie y derivación. Estas últimas incluyen la ubicación de capacitores y dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) que constituyen opciones atractivas para el problema del PERT.

La representación más aproximada del PERT corresponde a un problema de Programación No Lineal Entero Mixto que involucra funciones no lineales, como también variables continuas y enteras. Debido a su naturaleza combinatoria, el PERT es un problema de alta complejidad matemática. Al simplificar la representación del PERT se obtienen modelos que pueden ser abordados usando programación matemática clásica (Programación Lineal, Programación No Lineal, Programación Lineal Entera Mixta, Programación Cuadrática y Programación Dinámica). El PERT puede ser representado mediante el modelo de transporte, modelo DC, modelo híbrido, modelo disyuntivo y modelo AC [1]–[5].

Los métodos de solución aplicados al PERT se pueden clasificar en tres grandes grupos: métodos basados en programación matemática clásica, técnicas heurísticas y técnicas metaheurísticas. Dentro de éstas últimas se destacan los Algoritmos Genéticos (AG) [6]–[27], Búsqueda Tabú [28]–[31], Enjambre de Partículas [32]–[36] y Algoritmos Híbridos [37]–[43] a partir de éstos, como los más utilizados para la solución del PERT.

A pesar de que en la literatura técnica se han propuesto muchas metodologías para abordar el problema del PERT, se ha explorado poco la posibilidad de incorporar candidatos no convencionales de solución. Al respecto, existen trabajos que por separado han considerado la inclusión de compensación serie [44], ubicación de bancos de compensación en derivación [45], o el cambio de nivel de tensión y la tecnología de los conductores en ciertos circuitos [15] y [8].

En este sentido, el aporte principal de este trabajo es el modelamiento de candidatos no convencionales: repotenciación y reconfiguración de redes existentes y la ubicación de elementos de compensación en serie y en derivación; todos considerando un modelo AC de la red de transmisión, el cual permite por definición observar el efecto de que tienen estos candidatos, en las tensiones de los nodos y la potencia reactiva circulante en los sistemas eléctricos de potencia. Los resultados obtenidos a partir de la inclusión de este tipo de candidatos, muestran que es posible explorar un conjunto de soluciones más amplio y, en ocasiones, contribuir con opciones de expansión de menor costo para la solución del PERT. La solución al modelo es realizada mediante técnicas metaheurísticas, más específicamente con la implementación de Algoritmos Híbridos, construidos a partir de Algoritmos Genéticos, Búsqueda Local (GRASP - *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) y Búsqueda Tabú.

La estructura del documento es la siguiente: en el Capítulo 1 se presenta un estado del arte sobre el PERT. En este se describen los modelos utilizados para la representación del problema, las técnicas de solución del mismo y una clasificación de dichas técnicas de acuerdo a una revisión bibliográfica exhaustiva. En el Capítulo 2 se muestra la formulación matemática del PERT considerando un modelo AC de la red de transmisión, la descripción de los candidatos de solución no convencionales y los sistemas de prueba utilizados. En el Capítulo 3 se ilustra la implementación de un algoritmo genético híbrido que incorpora una búsqueda local GRASP, utilizado para la solución del PERT. En el Capítulo 4 se muestra un desarrollo adicional de una técnica metaheurística híbrida, basada en un algoritmo genético que incorpora una Búsqueda Tabú (BT), igualmente utilizada para la solución del PERT. Tanto en el Capítulo 3 como en el Capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos con los sistemas de prueba Garver de 6 barras e IEEE de 24 barras. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo y los retos a futuro para el problema del PERT.

1. ESTADO DEL ARTE DEL PERT

En este capítulo se describe cada uno de los modelos utilizados para la representación del PERT, así como las técnicas utilizadas para abordarlo. Adicionalmente, se presentada una clasificación histórica de las técnicas de solución, y se describen los sistemas de prueba usados para validar las técnicas de solución propuestas para el PERT.

1.1. MODELOS PARA LA REPRESENTACIÓN DEL PERT

En la literatura técnica son presentados cinco tipos de modelos para abordar el PERT: modelo de transporte [1], modelo de flujo de potencia DC [4], modelo híbrido [5], [46], modelo disyuntivo [2] y el modelo AC [3], [14], [47], [48]. A continuación se describen dichos modelos:

Modelo de transporte: El modelo de transporte considera solo la primera ley de Kirchhoff, la cual establece que la sumatoria de flujos de potencia que entran en una barra es igual a la sumatoria de flujos de potencia que salen de esta.

Modelo DC: El modelo DC considera las dos leyes de Kirchhoff. La primera ley de Kirchhoff se debe cumplir en todas las barras del sistema y la segunda ley se debe satisfacer en todos los lazos existentes. Este es el modelo más comúnmente utilizado en la solución del PERT.

Modelo Híbrido: El modelo híbrido es una mezcla entre el modelo DC y el modelo de transporte. Lo que debe satisfacer el modelo es que se cumpla la primera ley de Kirchhoff en todas las barras del sistema y la segunda ley de Kirchhoff solamente en aquellos lazos que ya existen en la configuración base.

Modelo Disyuntivo: El uso del modelo DC para el PERT implica resolver un problema de programación no lineal entero mixto. Sin embargo, es posible transformar este modelo en un problema cuya formulación matemática corresponda a un problema lineal entero mixto. Esto es posible al transformar un problema no lineal cuadrático con variables binarias y reales, en un problema lineal con variables binarias y reales, usando una transformación que permite separar los términos cuadráticos en relaciones lineales. El resultado final de esta transformación es el llamado modelo lineal disyuntivo, y su solución es igual a la del modelo DC.

Modelo AC: El modelo AC de la red considera el efecto de las tensiones y la potencia reactiva, por lo que es una representación más realista de la misma. Sin embargo, su uso en el PERT no es tan común, ya que agrega complejidad matemática a la formulación del problema. Una de las ventajas de la formulación AC es que se pueden obtener soluciones más aproximadas a la realidad.

1.2. MÉTODOS DE SOLUCIÓN

1.2.1. Programación Matemática

Al simplificar el PERT es posible obtener un modelo que puede ser abordado usando programación matemática clásica. Sin embargo, los resultados obtenidos deben pasar por pruebas de verificación de tipo técnico, económico, medio ambientales, de confiabilidad, etc, antes de ser tomada una decisión final por el planeador.

En la literatura técnica se han propuesto varios métodos de solución del PERT basados en programación matemática clásica, los cuales incluyen: Programación Lineal, Programación No Lineal, Programación Dinámica y Programación Lineal Entera Mixta. Las metodologías mencionadas anteriormente pueden involucrar técnicas de solución matemática como Descomposición de Benders [49]–[59], Branch and Bound [60]–[72], Specialised Branch and Bound y Branch and Cut [39]–[41]. También es común el uso de métodos de optimización enfocados en programación matemática que consideran estocasticidad, como por ejemplo, la simulación de Monte Carlo [76]–[83].

1.2.2. Técnicas Heurísticas

Como se había mencionado antes, el PERT es un problema de alta complejidad matemática, no lineal y de naturaleza combinatoria. Para abordar este tipo de problemas es posible utilizar algoritmos heurísticos [50]–[60]; estos normalmente requieren un esfuerzo computacional mucho menor para encontrar soluciones de alta calidad. Las soluciones obtenidas con una técnica heurística pueden servir como condición inicial o punto de partida para un análisis más exhaustivo y finalmente la obtención de mejores soluciones.

Los algoritmos heurísticos utilizan procedimientos simples, como la generación, evaluación y selección de las opciones de expansión, mediante técnicas empíricas basadas en la lógica y la experiencia. Estos algoritmos pueden ser clasificados como algoritmos constructivos, algoritmos de descomposición y división,

algoritmos de reducción, algoritmos de manipulación del modelo y algoritmos de búsqueda a través de vecindades [95]. Los algoritmos heurísticos pueden utilizar procedimientos y técnicas mucho más elaboradas y de esta forma se convierten en técnicas de solución llamadas metaheurísticas.

1.2.3. Técnicas Metaheurísticas

Algoritmos Evolutivos o Genéticos: Estos algoritmos se basan en mecanismos de evolución y genética natural. Inicialmente se considera una población inicial o un conjunto de soluciones candidatas del problema. Posteriormente se calcula la función de adaptación o función objetivo de cada una de las soluciones candidatas. La representación de cada individuo está dada por un único cromosoma, el cual contiene una codificación con una posible solución del problema. El proceso de búsqueda de este tipo de algoritmos es considerado multidireccional, ya que evalúa simultáneamente varios puntos del espacio de soluciones, tantos como individuos pueda tener la población.

Una vez se tiene un conjunto inicial de soluciones, sobre este se aplican los operadores de selección, recombinación y mutación. En la etapa de selección se deben escoger los individuos “padres” que serán encargados de generar nuevos individuos mediante la recombinación. La etapa de mutación permite al algoritmo escapar de óptimos locales y mantener la diversidad de la población. En [61]–[80] se presentan aplicaciones de algoritmos evolutivos a la solución del PERT.

Búsqueda Tabú: Este método pertenece a las técnicas de búsqueda local. La BT utiliza estructuras de memoria para aumentar el rendimiento de la búsqueda. Una vez se encuentra una solución esta es marcada como “Tabú” para no ser visitada en un cierto número de iteraciones. La BT puede utilizar memorias de corto y largo plazo, como también memoria basada en frecuencia; en donde se permite el almacenamiento de características que indican el número de veces que estuvieron presentes o no eventos específicos, y de esta manera explorar nuevas regiones del espacio de búsqueda que no han sido visitadas. En [28]–[31] se presentan aplicaciones de BT para solucionar el PERT.

Optimización por Enjambre de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*): El PSO trabaja con una población (enjambre) de posibles soluciones (partículas). Dichas partículas se desplazan en todo el espacio de soluciones de acuerdo a unas simples reglas matemáticas. El movimiento de cada partícula depende de su mejor posición obtenida, así como de la mejor posición global hallada en todo el espacio de soluciones. A medida que se descubren nuevas y

mejores posiciones, éstas pasan a orientar los movimientos de las partículas. El proceso se repite hasta que se logra encontrar una solución satisfactoria, de acuerdo al criterio de parada adoptado. En [32]–[36] se presentan aplicaciones de PSO para la solución del PERT.

Recocido Simulado (*Simulated Annealing* - SA): El nombre viene del proceso de recocido del acero y cerámicas, una técnica que consiste en calentar y luego enfriar lentamente el material para variar sus propiedades físicas. El calor causa que los átomos aumenten su energía y que puedan así desplazarse de sus posiciones iniciales (un mínimo local de energía); el enfriamiento lento les da mayores probabilidades de recristalizar en configuraciones con menor energía que la inicial (mínimo global).

En cada iteración, el recocido simulado evalúa algunos vecinos del estado actual y probabilísticamente decide entre efectuar una transición a un nuevo estado o quedarse en el estado inicial. El algoritmo comienza con un valor de T (temperatura) muy alto, que va decreciendo en cada iteración siguiendo un cierto protocolo de recocido, que puede ser diferente para cada problema, pero que siempre debe terminar con $T=0$. Así el sistema será libre inicialmente de explorar una gran porción del espacio de búsqueda, ignorando pequeñas variaciones de la energía entre los estados vecinos evaluados, para más tarde centrarse en regiones con estados de baja energía y, al final, cambiar solo a estados con energía menor que la inicial, hasta alcanzar un mínimo. En [61] y [90] se presentan aplicaciones del SA para resolver el problema del PERT.

1.2.4. Métodos Híbridos

Un algoritmo híbrido combina componentes presentes en algoritmos “puros” (algoritmos evolutivos, SA, BT y GRASP), con componentes de algoritmos de optimización clásica o algoritmos heurísticos constructivos. También existen múltiples algoritmos híbridos que asumen nombres propios y otros son simplemente llamados híbridos. Por ejemplo un algoritmo híbrido basado en una estructura de un algoritmo genético pero utilizando una optimización local entre dos generaciones sucesivas es un algoritmo híbrido extendido, pasando a ser conocido como algoritmo memético. En [37]–[43] se presenta aplicaciones de métodos híbridos aplicados al problema del PERT.

1.2.5. Clasificación de los métodos de solución

A partir de una revisión bibliográfica en bases de datos de IEEE y Elsevier desde 2004 se clasificaron las técnicas de solución utilizadas para abordar el problema del PERT. En la Figura 1 es posible observar que el 41% de los trabajos consultados utilizan metaheurísticas para solucionar el PERT. Por otro lado el 40% utiliza técnicas de programación matemática y el 19% técnicas heurísticas. En la Figura 2 se ilustra la evolución en el tiempo de las técnicas de solución. Se puede observar que se mantiene la tendencia de utilizar metaheurísticas. Finalmente, en la Figura 3 se ilustra el tipo de publicaciones consultadas y su respectiva evolución en el tiempo.

Un aspecto que ha cobrado relevancia en la evolución de los modelos, es la integración de las técnicas de solución mencionadas anteriormente con nuevas metodologías [96]–[102] para considerar aspectos de mercados eléctricos [103]–[106], evaluación financiera y económica [107], mecanismos regulatorios [108], redes inteligentes [109], generación con recursos renovables [94], [110]–[121] y respuesta de la demanda [122], [123].

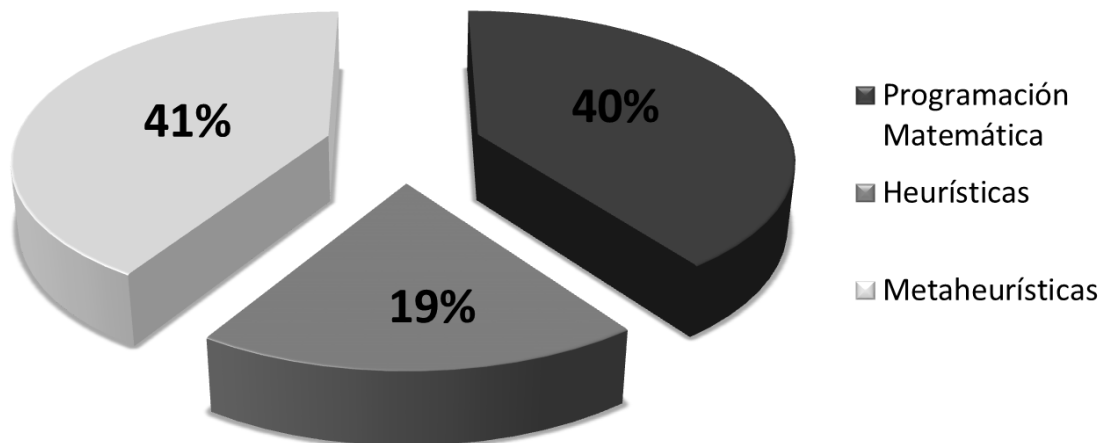


Figura 1. Clasificación de las técnicas de solución del PERT.
Fuente: Propia.

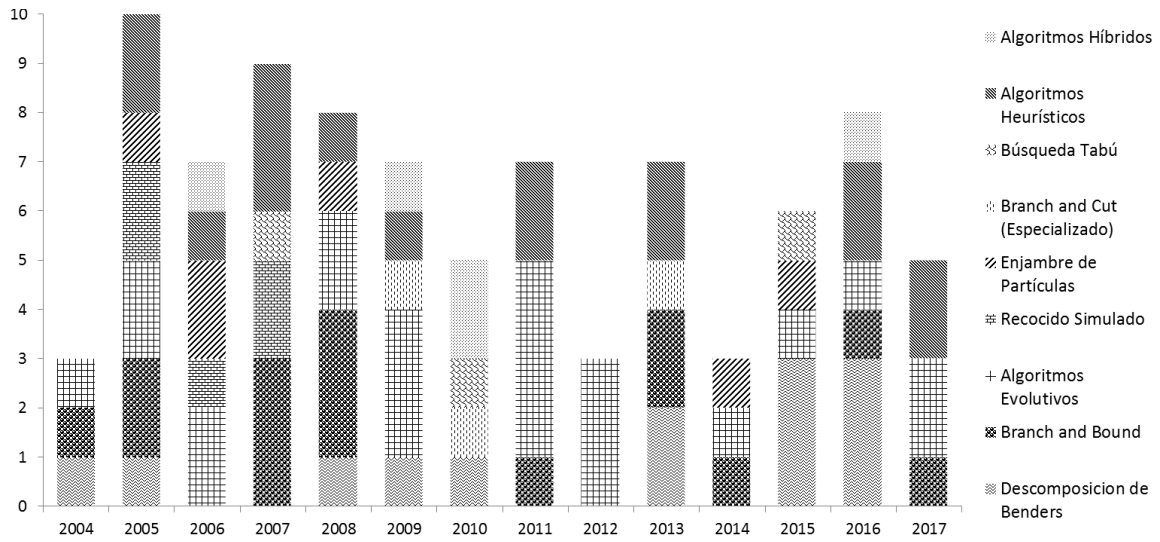


Figura 2. Técnicas de solución del PERT.
Fuente: Propia.

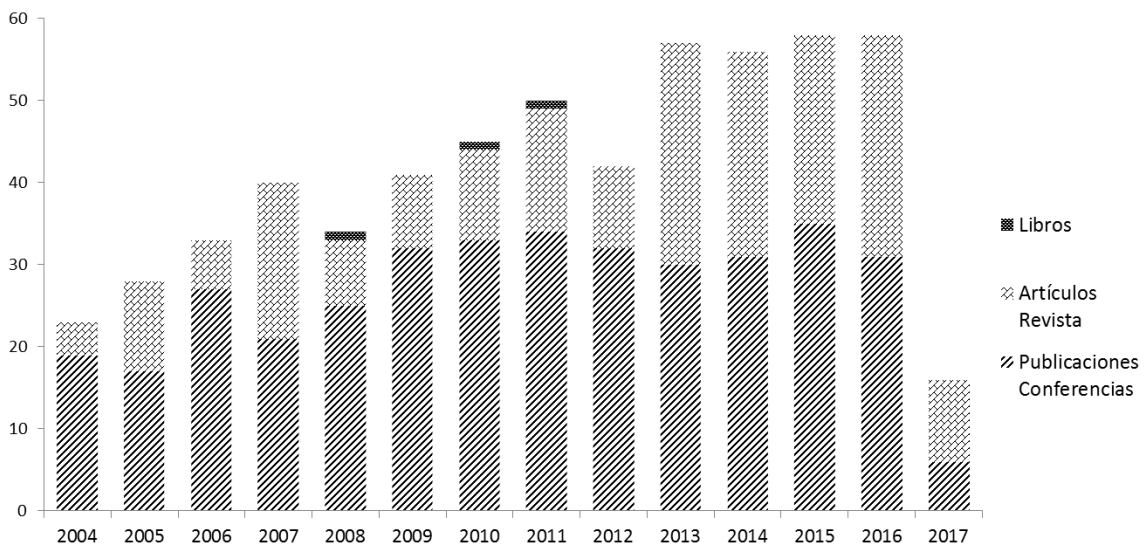


Figura 3. Tipo de publicaciones consultadas.
Fuente: Propia.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PERT Y CANDIDATOS DE SOLUCIÓN NO CONVENCIONALES

Este capítulo tiene como objetivo presentar la formulación matemática del PERT considerando el modelo AC de la red de transmisión. Adicionalmente, se describen los candidatos de solución clásicos y no convencionales. Finalmente se ilustran los sistemas de prueba utilizados para la implementación de los algoritmos híbridos desarrollados.

2.1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PERT

La formulación matemática compacta del PERT está dada por las ecuaciones (1)-(9), [3]. En este trabajo se utiliza el modelo AC para la representación de la red. Si bien la formulación matemática es más compleja, se pueden entregar soluciones más aproximadas a la realidad (especialmente en el corto y mediano plazo). El uso del modelo AC de la red implica resolver un problema de programación no lineal entero mixto, lo cual justifica el uso de técnicas metaheurísticas para su solución.

$$\text{Min } v = c^T n \quad (1)$$

Sujeto a:

$$P(V, \theta, n) - P_G + P_D = 0 \quad (2)$$

$$Q(V, \theta, n) - Q_G + Q_D = 0 \quad (3)$$

$$\underline{P}_G \leq P_G \leq \bar{P}_G \quad (4)$$

$$\underline{Q}_G \leq Q_G \leq \bar{Q}_G \quad (5)$$

$$\underline{V} \leq V \leq \bar{V} \quad (6)$$

$$(N + N^0)S^{from} \leq (N + N^0)\bar{S} \quad (7)$$

$$(N + N^0)S^{to} \leq (N + N^0)\bar{S} \quad (8)$$

$$0 \leq n \leq \bar{n} \quad (9)$$

n entero y θ ilimitado

Donde c y n representan el vector de costos del circuito que puede ser agregado a la red y el vector de circuitos agregados, respectivamente; N y N^0 son matrices

diagonales que contienen el vector n y los circuitos existentes en la configuración base, respectivamente; v es el costo de inversión debido a la adición de circuitos a las redes; \bar{n} es el vector que contiene el número máximo de circuitos que pueden ser agregados; θ es el vector del ángulo de fase. P_G y Q_G son los vectores de potencia activa y reactiva generada. P_D y Q_D son los vectores de la potencia activa y reactiva demanda; V es el vector de la magnitud de la tensión; \bar{P}_G , \bar{Q}_G y \bar{V} son los vectores de los límites máximos de generación de potencia activa, reactiva y las magnitudes de las tensiones, respectivamente. \underline{P}_G , \underline{Q}_G y \underline{V} son los vectores de los límites mínimos de generación de potencia activa, reactiva y las magnitudes de las tensiones, respectivamente. S^{from} , S^{to} y \bar{S} son los vectores del flujo de potencia aparente (MVA) en las ramas, en ambos terminales y sus límites. Los elementos de los vectores $P(V, \theta, n)$ y $Q(V, \theta, n)$ son calculados mediante (10) y (11), respectivamente.

$$P_i(V, \theta, n) = V_i \sum_{j \in N} V_j [G_{ij}(n) \cos \theta_{ij} + B_{ij}(n) \sin \theta_{ij}] \quad (10)$$

$$Q_i(V, \theta, n) = V_i \sum_{j \in N} V_j [G_{ij}(n) \sin \theta_{ij} - B_{ij}(n) \cos \theta_{ij}] \quad (11)$$

Donde $i, j \in N$ son índices que representan las barras y N es el conjunto de todas las barras; $i-j$ representan el circuito entre la barra i y la barra j . $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ representa la diferencia angular entre la barra i y la barra j . Los elementos de la matriz de admitancias (G y B) están dados por (12) y (13).

$$G = \begin{cases} G_{ij}(n) = -(n_{ij} g_{ij} + n_{ij}^0 g_{ij}^0) \\ G_{ii}(n) = \sum_{j \in \Omega_i} (n_{ij} g_{ij} + n_{ij}^0 g_{ij}^0) \end{cases} \quad (12)$$

$$B = \begin{cases} B_{ij}(n) = -(n_{ij} b_{ij} + n_{ij}^0 b_{ij}^0) \\ B_{ii}(n) = b_i^{\text{sh}} + \sum_{j \in \Omega_i} [n_{ij} (b_{ij} + b_{ij}^{\text{sh}}) + n_{ij}^0 (b_{ij}^0 + (b_{ij}^{\text{sh}})^0)] \end{cases} \quad (13)$$

Donde Ω_i representa el conjunto de todos los buses directamente conectados al bus i ; g_{ij} , b_{ij} y b_{ij}^{sh} son la conductancia, susceptancia y la susceptancia en derivación de la línea de transmisión o transformador $i-j$ (si $i-j$ es un transformador $b_{ij}^{\text{sh}} = 0$), respectivamente, y b_i^{sh} es la susceptancia en derivación en el bus i . Note que en (13), la posibilidad de una diferente línea de transmisión o transformador de ser agregado en paralelo con una existente (en el caso base) es considerado, aunque los parámetros del circuito equivalente pueden ser diferentes. En este

caso, las derivaciones de los transformadores (taps) no son considerados. Tanto las líneas de transmisión como los transformadores tienen circuitos equivalentes similares.

Los elementos (i-j) de los vectores S^{from} y S^{to} son obtenidos mediante las ecuaciones (14) a (19).

$$S_{ij}^{from} = \sqrt{(P_{ij}^{from})^2 + (Q_{ij}^{from})^2} \quad (14)$$

$$P_{ij}^{from} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (15)$$

$$Q_{ij}^{from} = -V_i^2 (b_{ij}^{sh} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (16)$$

$$S_{ij}^{to} = \sqrt{(P_{ij}^{to})^2 + (Q_{ij}^{to})^2} \quad (17)$$

$$P_{ij}^{to} = V_j^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (18)$$

$$Q_{ij}^{to} = -V_j^2 (b_{ij}^{sh} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (19)$$

2.2. CANDIDATOS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DEL PERT

Como se mencionó anteriormente, el problema del PERT es resuelto adicionando candidatos de expansión de la red de transmisión. El abordaje clásico del PERT consiste en adicionar circuitos a la red y de esta forma aumentar la transferencia de potencia entre dos nodos, este tipo de candidato de solución es ilustrado en la Figura 4.

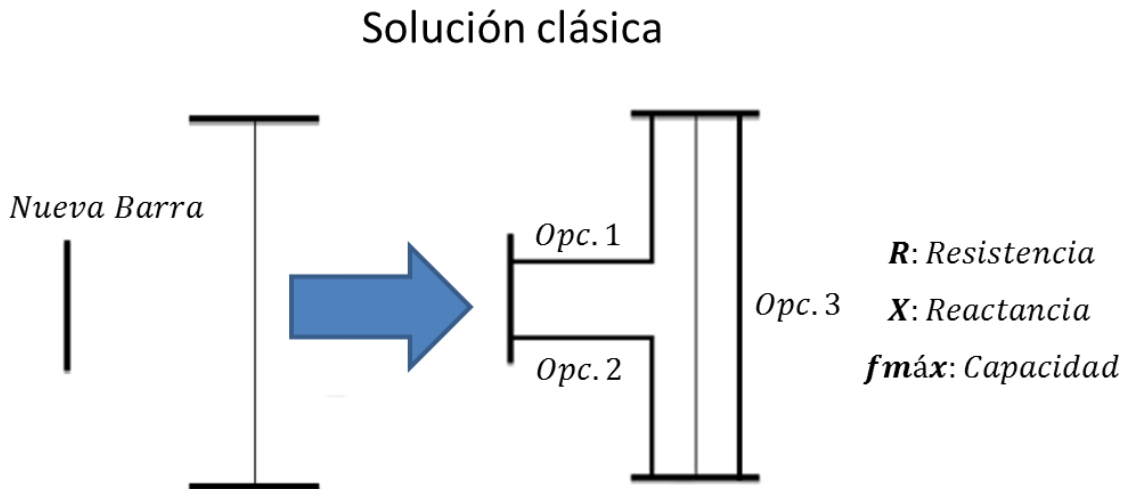


Figura 4. Solución clásica al problema del PERT.
Fuente: Propia.

Dadas las crecientes restricciones ambientales y las dificultades para la obtención de nuevos terrenos y servidumbres para las nuevas líneas de transmisión, se han planteado candidatos no convencionales para la solución del PERT. Uno de estos es la repotenciación de circuitos existentes (aplicaciones reales en [124]–[126]). Esto constituye una opción atractiva de expansión de la red, ya que se aprovechan los corredores existentes y parte de la infraestructura ya instalada. De acuerdo a lo anterior, este candidato se considera de menor costo que la adición de un nuevo circuito. En la Figura 5 se ilustra la repotenciación como candidato no convencional. En este caso en particular se ha supuesto que la línea repotenciada tiene la mitad de la resistencia y la impedancia, y el doble de capacidad de la línea actual.

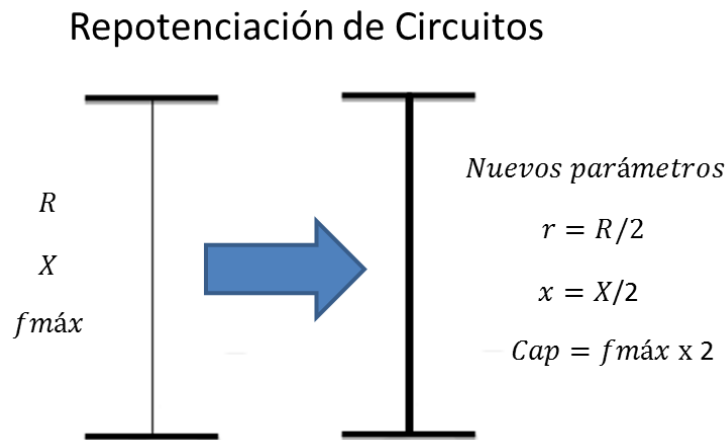


Figura 5. Candidato no convencional, repotenciación de circuitos.
Fuente: Propia.

Otro candidato no convencional que aprovecha la infraestructura de red ya instalada es la reconfiguración de circuitos existentes (aplicación real en [127]), la cual consiste en una reorganización de las líneas y de esta forma modificar los flujos de potencia en la red. En la Figura 6 se ilustra un ejemplo, el cual muestra el corredor existente b-c, que posteriormente es reconfigurado generando dos nuevos, el corredor a-b y el a-c. En los anexos se encuentran detallados los parámetros utilizados para las opciones de reconfiguración en cada uno de los sistemas de prueba.

Reconfiguración de Circuitos

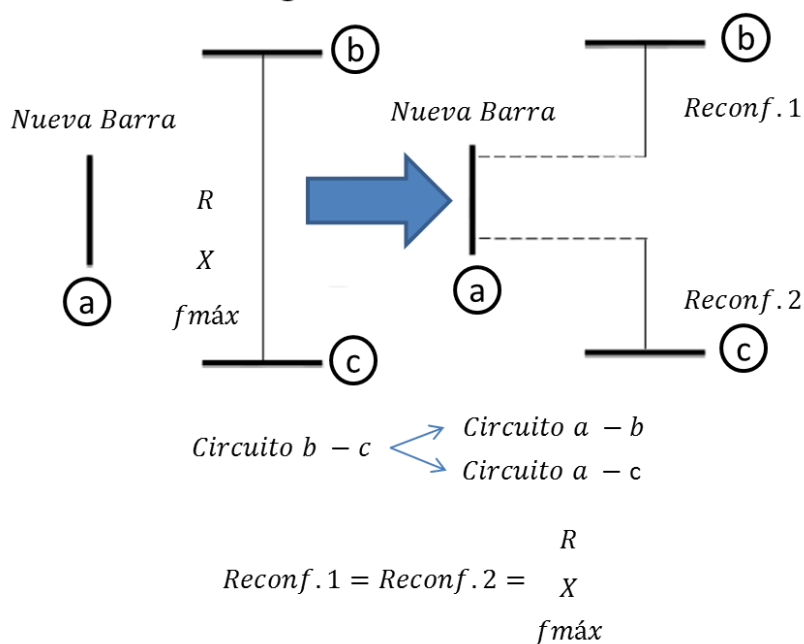


Figura 6. Candidato no convencional, reconfiguración de circuitos.
Fuente: Propia.

Otro tipo de candidatos de expansión de la red que permiten la modificación de los flujos de potencia, son la compensación serie y en derivación. Comúnmente utilizado el concepto de estas compensaciones en dispositivos conocidos con el nombre de bancos de capacitores, reactores, SVCs (Static VAR Compensator), STATCOMs (Static Synchronous Compensator), y demás dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission System) (aplicaciones en [4] y [5]), utilizados para el control de los flujos de potencia reactiva y tensiones en la red eléctrica de potencia. En la Figura 7 se ilustra tanto la compensación serie como en derivación. Para la compensación serie es afectado el parámetro de la reactancia de las líneas, y de esta forma es posible simular el efecto de la capacidad máxima de un TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor) o un TCSR (Thyristor-Controlled Series Reactor). Para la compensación en derivación, se instalan bancos de capacitores o reactores en los nodos de la red. En los anexos se encuentran detallados los parámetros utilizados para las compensaciones serie y en derivación en cada uno de los sistemas de prueba.

Compensación Serie y Shunt

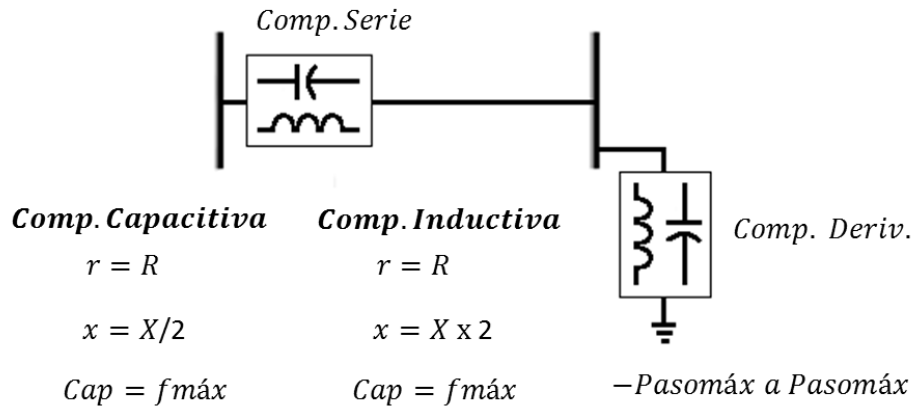


Figura 7. Candidato no convencional, compensación serie y en derivación.
Fuente: Propia.

Los costos de expansión para los candidatos de solución no convencionales fueron tomados como supuestos, a partir de costos reportados en la literatura técnica. Con esto se busca que las opciones no convencionales de expansión presenten costos competitivos para evaluar su efecto en el PERT.

2.3. SISTEMAS DE PRUEBA

Para evaluar la efectividad de los algoritmos propuestos, se consideraron dos sistemas de prueba: el sistema Garver de 6 barras y el sistema IEEE de 24 barras. Estos sistemas han sido comúnmente utilizados por la literatura técnica, lo cual permite contrastar y validar los resultados obtenidos en este trabajo.

2.3.1. Sistema Garver de 6 barras

Este sistema consta de 6 barras, 3 nodos de generación y 6 circuitos existentes [1]. En la Figura 8 se muestra el sistema mencionado; en éste se plantean alternativas de expansión al introducir nueva generación en el nodo 6, y se permiten un máximo de 5 líneas por corredor. En el ANEXO A y el ANEXO B, se presentan en detalle los datos y parámetros del sistema.

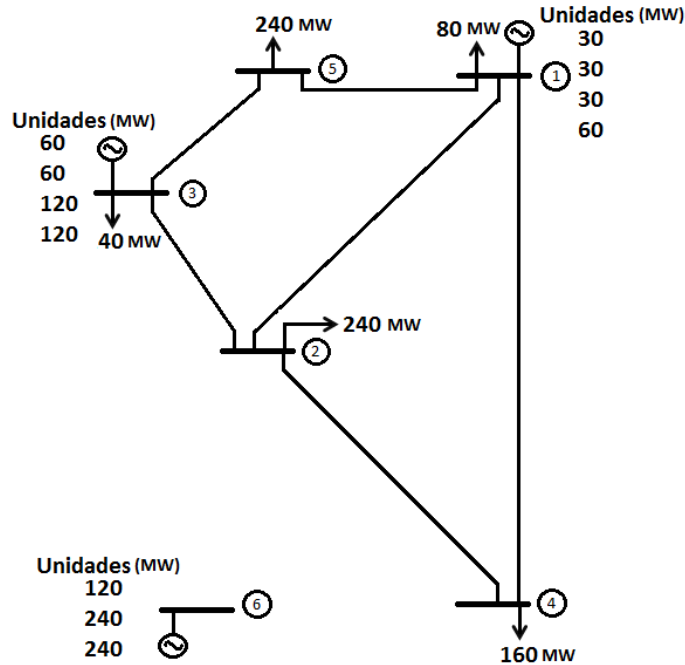


Figura 8. Sistema Garver de 6 barras.
Fuente: Propia a partir de [1].

2.3.2. Sistema IEEE de 24 barras (IEEE24)

Este sistema consta de 24 barras, 12 nodos de generación y 38 circuitos existentes. Los datos del mismo pueden ser consultados en [3] y [128]. En la Figura 9 se ilustra el sistema mencionado. Para el problema del PERT se plantean alternativas de expansión al aumentar en tres veces la demanda de potencia [3] y se permiten un máximo de 3 líneas por corredor. En el ANEXO C, se encuentran descritos en detalle los datos y parámetros del sistema.

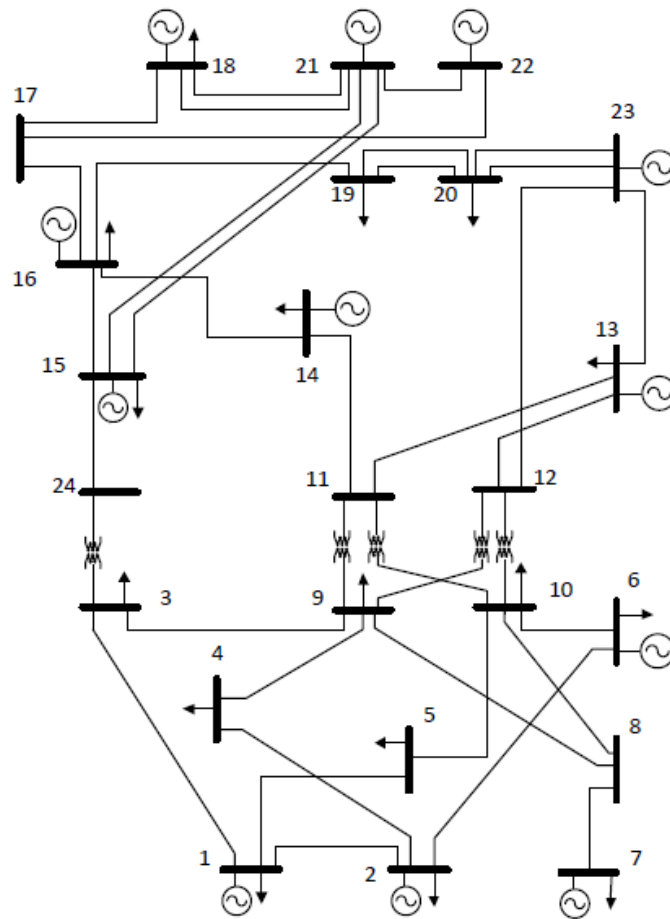


Figura 9. Sistema IEEE de 24 barras.
Fuente: Propia a partir de [105].

3. ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO – GRASP (AGHG)

En este capítulo se describe en detalle un algoritmo genético híbrido, que incorpora una búsqueda local de tipo GRASP. El AG se encarga de realizar la tarea de diversificación, explorando diferentes regiones del espacio de búsqueda mientras el GRASP se encarga de realizar la intensificación (búsqueda de óptimos locales); esto es, mejorar las soluciones que el AG obtiene en cada una de sus generaciones.

Los algoritmos propuestos se programaron en MATLAB [129], usando como subrutina para calcular los flujos de carga AC el paquete de archivos MATPOWER [130]. Para presentar el detalle del AGHG, se utiliza el sistema de prueba Garver como ilustración; no obstante, la implementación del sistema IEEE de 24 barras se hace de forma idéntica, pues la programación del AGHG permite el escalamiento a diferentes sistemas.

Es importante mencionar que en este capítulo solo se tendrán en cuenta como candidatos de solución no convencionales la repotenciación de circuitos existentes y la compensación en derivación. Esto es debido a que el AGHG, inicialmente solo involucraba estos dos candidatos de solución no convencionales, para lo cual se obtuvieron soluciones de buena calidad en un tiempo de cómputo aceptable. Posteriormente, con el objetivo de realizar la implementación de un modelo integrado con la totalidad de los candidatos de solución no convencionales, se incluyen también la reconfiguración de circuitos existentes y la compensación serie en el AGHG; se realizan diferentes pruebas al modelo, obteniendo soluciones de baja calidad y en un tiempo de cómputo muy extenso. Se identifica que al incluir la totalidad de los candidatos, el espacio de soluciones aumenta considerablemente, y dificulta la solución del problema. Por este motivo se toma la decisión de incluir una técnica metaheurística (Búsqueda Tabú) adicional que permita reducir los tiempos de cómputo y una mayor exploración de los espacios de solución. En el Capítulo 4 se muestra el desarrollo de todos los candidatos de solución no convencionales en un modelo integrado, un algoritmo híbrido que involucra un Algoritmo Genético y una Búsqueda Tabú (AGHT).

3.1. CODIFICACIÓN

En la Figura 10 se presenta la codificación utilizada usando como ilustración el sistema Garver. Para este sistema en particular la codificación se basa en un vector de 18 bits. Los primeros 15 bits corresponden a los corredores del sistema.

El contenido de las casillas indica el número de circuitos en el corredor correspondiente. Los 3 bits finales indican los nodos 2, 4 y 5 donde es posible ubicar bancos de capacitores (nodos previamente evaluados y establecidos como candidatos para la compensación en derivación). El contenido de la casilla correspondiente indica el número de pasos a los cuales se ajusta el banco de capacitores. Por ejemplo, en la Figura 10 se indica que en el nodo 2 se instalara un banco de capacitores de 3 pasos, 60 MVar (20 MVar por paso, ANEXO A).

Para los primeros 15 bits, enteros de 0 a 5 (máximo número de líneas por corredor - LNmax, parámetro establecido en [1], [47] y [3]), indican el número de circuitos en el corredor correspondiente. Por ejemplo, observe que en los corredores 1-5 y 2-3 existe solo una línea. El número 6 (LNmax+1) indica la repotenciación de los circuitos existentes (topología base) en el corredor correspondiente. Por ejemplo, para los corredores 1-2 y 2-4 se indica la repotenciación de cada uno de estos. La repotenciación de circuitos solo es considerada como una opción de expansión en los corredores donde originalmente (topología base) hay líneas. En el sistema Garver estos son los corredores 1-2, 1-4, 1-5, 2-3, 2-4 y 3-5. Es de notar que estas casillas no podrán tomar valores iguales a cero, ya que por definición poseen circuitos.

Corredores															Comp. Deriv.		
1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N2	N4	N5
6	0	3	1	0	1	6	0	0	0	4	0	0	0	0	3	0	1

Figura 10. Codificación de los individuos del AGHG.

Fuente: Propia.

3.2. FUNCIÓN OBJETIVO

Cada una de las posibles soluciones del PERT tiene un costo asociado. Este costo es determinado por el número de líneas o circuitos, normales o repotenciados, el número de bancos de capacitores que sea necesario adicionar y una penalización. Esta última consiste en un valor de cero cuando el flujo de carga AC converge, lo que indica que la solución es factible, mientras, que si éste no tiene convergencia el valor de la penalización es un número muy alto; el costo de una posible solución está dado por la ecuación (20).

$$\begin{aligned}
 F.O. = & (\text{costo nuevas líneas}) + (\text{costo repotenciación de líneas}) \\
 & + (\text{costo ubicación de capacitores}) \\
 & + (\text{penalización por convergencia})
 \end{aligned} \tag{20}$$

Para la comparación y validación de resultados, los costos reportados en la literatura técnica para las mejores opciones de expansión, son tomados de las referencias [1] y [47] (para el sistema IEEE de 24 barras, los costos pueden ser consultados en [3]). Para el caso de repotenciación de líneas se asume un costo igual a la mitad del costo de instalar nuevos circuitos (ver anexos). Esto se da porque en la repotenciación se puede utilizar la misma servidumbre de la línea original, evitando adquisición de nuevos predios. Adicionalmente, en el ANEXO A se indican los parámetros utilizados para los bancos de capacitores. Es importante mencionar que todos los costos mencionados en este trabajo se refieren a unidades monetarias relativas.

3.3. POBLACIÓN INICIAL

Primero es generado un individuo o vector que representa una solución factible del PERT, mediante un algoritmo constructivo (técnica heurística). Éste es obtenido a partir de la topología inicial (en la mayoría de los casos el flujo de carga AC no converge para este punto inicial), adicionando aleatoriamente líneas nuevas, repotenciando o reconfigurando circuitos existentes y ubicando compensaciones serie y derivación (como se mencionó anteriormente en el AGHG solo se tienen como candidatos de expansión no convencionales la repotenciación de circuitos existentes y la compensación en derivación) hasta que el individuo permita la convergencia del flujo de carga AC. Finalmente, a partir de este individuo inicial factible, se procede a generar la población inicial con movimientos aleatorios en uno de los bits de este vector factible. En la Figura 11 es ilustrado este proceso. Es importante mencionar que mediante un algoritmo de comprobación se garantiza que todos los individuos de la población sean diferentes, lo que permite explorar un mayor espacio de soluciones. Adicionalmente, luego de realizar los movimientos aleatorios se comprueba la factibilidad de cada uno de los individuos de la población inicial, descartando los individuos que no cumplan esta condición. Un individuo es considerado infactible cuando la configuración que tiene de red (codificación), no permite la convergencia del flujo de carga AC.

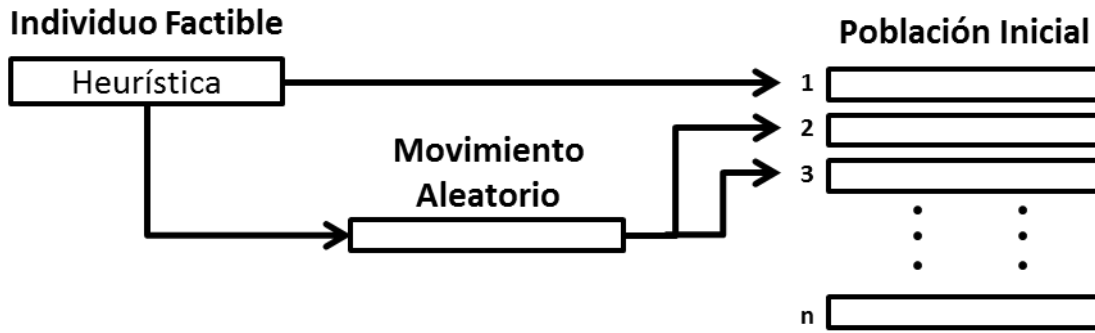


Figura 11. Generación de la población inicial para el AGHG.
Fuente: Propia.

3.4. SELECCIÓN

Los operadores de selección son los encargados de identificar en la población, cuáles de los individuos son los más aptos para la reproducción y cuáles no, realizando un símil a como ocurre en la naturaleza. No obstante, sin eliminar por completo la posibilidad de reproducción de los individuos menos aptos. La selección por torneo es uno de los tipos de selección comúnmente utilizados en la estructura de los algoritmos genéticos. La selección por torneo es el utilizado en el modelamiento de este trabajo ya que posee una gran velocidad de aplicación, dado que no es necesario evaluar ni comparar toda la población, siendo esto una gran ventaja.

El proceso de selección por torneo consiste en tomar dos individuos de la población inicial, evaluar su función objetivo y determinar cuál de los dos posee la mejor. Posteriormente este individuo es ingresado a una nueva población. El número de torneos realizado es "k". Este proceso se ilustra en la Figura 12. En éste, el mismo individuo puede eventualmente participar en más de un torneo. Sin embargo, la probabilidad de que esto ocurra es baja puesto que solo se toman dos individuos por torneo.

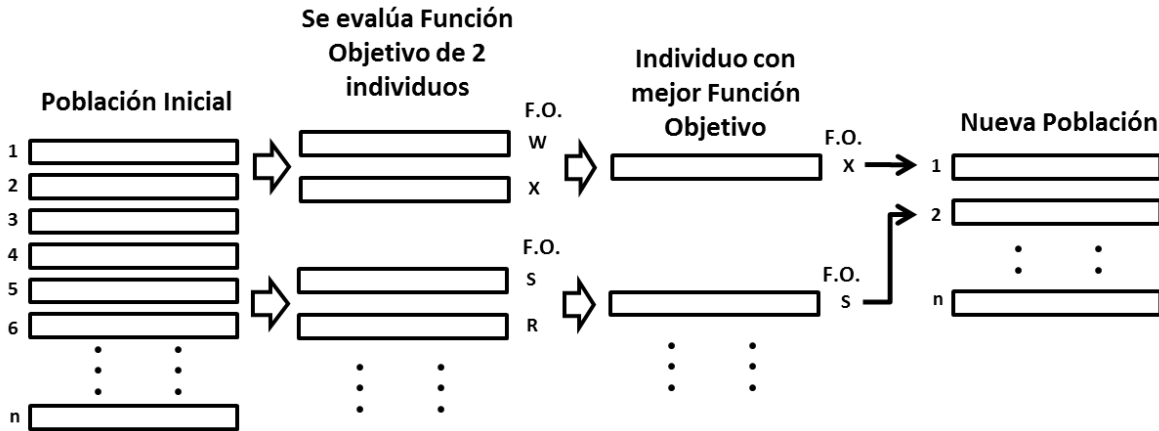


Figura 12. Proceso de selección por torneo.
Fuente: Propia.

3.5. RECOMBINACIÓN

Partiendo de la nueva población generada en el paso anterior, se lleva a cabo el proceso de recombinación el cual consiste en generar dos nuevos individuos a partir del material genético de dos padres como se ilustra en la Figura 13. En este caso la recombinación se hace en un solo punto seleccionado al azar. El número de veces que se realiza la recombinación es $k/2$, tomando pares de individuos de la población elaborada anteriormente, generando una nueva población recombinada de tamaño k .

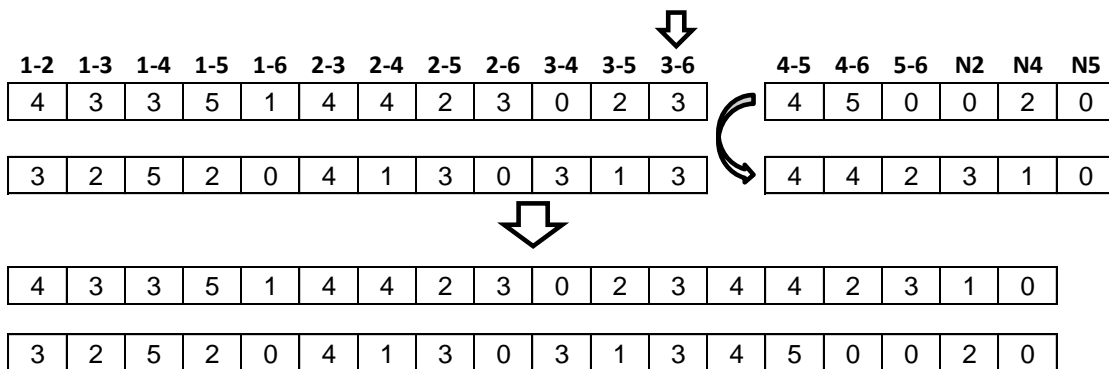


Figura 13. Proceso de recombinación.
Fuente: Propia.

3.6. MUTACIÓN (GRASP)

Comúnmente en los algoritmos genéticos el operador de mutación tiene la propiedad de realizar una alteración a un individuo que viene del proceso de recombinación. En el AGHG propuesto, la alteración que realiza el operador de mutación es una intensificación de la búsqueda a partir de un individuo factible, mediante un GRASP. El proceso de mutación se activa con una probabilidad preestablecida (para el caso del AGHG se utilizó el 50%), y consiste en realizar una búsqueda local, la cual explora mejores soluciones para cada una de las generaciones del AGHG, asegurando que el algoritmo pueda converger a una solución de alta calidad. En este caso se modifica el valor de cada uno de los bits de izquierda a derecha, el proceso se ilustra en la Figura 14, y es descrito en detalle a continuación:

Antes de iniciar la búsqueda local se evalúa la función objetivo del vector actual y se almacena esta información como referencia. Adicionalmente, se tiene un operador “w”, el cual toma los valores $w = \{1, 2, 3\}$. El valor 1 indica la reducción de una línea en el corredor que se está evaluando. El valor 2 indica la adición de una línea. El valor 3 indica evaluar la repotenciación para el corredor que se está evaluando si éste posee circuitos existentes en el caso base. En cada uno de los bits del vector (excepto en los correspondientes a los capacitores) es evaluado el operador “w” (se recorren sus 3 valores).

Para el caso de la compensación en derivación, el valor del bit es reemplazado por uno nuevo, al azar, en el rango entre 0 y 5 (pasos máximos del banco).

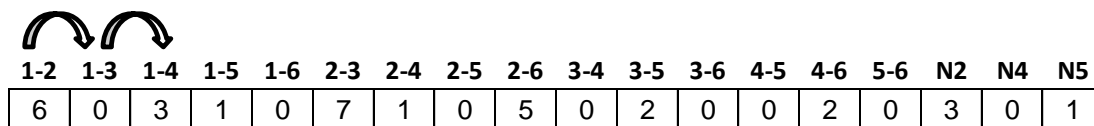


Figura 14. Proceso de mutación – GRASP.

Fuente: Propia.

Cada vez que se realiza un cambio al individuo se evalúa nuevamente la función objetivo, con el fin de determinar si esta mejora. El proceso es realizado de esta forma para enfocar la búsqueda local en reducir el número de líneas, evaluar la repotenciación y la ubicación de bancos de capacitores como posibles candidatos de solución. Una vez se termina el GRASP, se almacena el mejor individuo encontrado (incumbente).

3.7. FUNCIONAMIENTO DEL AGHG

En la Figura 15 se presenta un diagrama ilustrativo del AGHG. Comenzando por la construcción de un individuo factible mediante un algoritmo constructivo, seguido por la generación de la población inicial, a partir del individuo mencionado. Luego, es realizada la selección por torneos y posteriormente se ejecuta el proceso de recombinación. El mejor individuo de la población recombinada pasa al operador de mutación, donde se hace una búsqueda local (GRASP). El individuo obtenido luego del proceso de mutación es comparado con la mejor solución encontrada hasta el momento (incumbente). Si el nuevo individuo es mejor, se actualiza la incumbente.

El proceso ejecutado por el AGHG finaliza cuando se completan el número de generaciones que le fueron establecidas como parámetro inicial al algoritmo. Mientras no se cumpla este criterio, luego de la comprobación de la mejor solución se regresa a la sección de selección por torneos como se indica en el diagrama.

Para mejorar la calidad de la población inicial, luego del proceso de mutación, el individuo obtenido es comparado con los existentes en la población inicial y si éste mejora dicha población, es reemplazado por el peor existente.

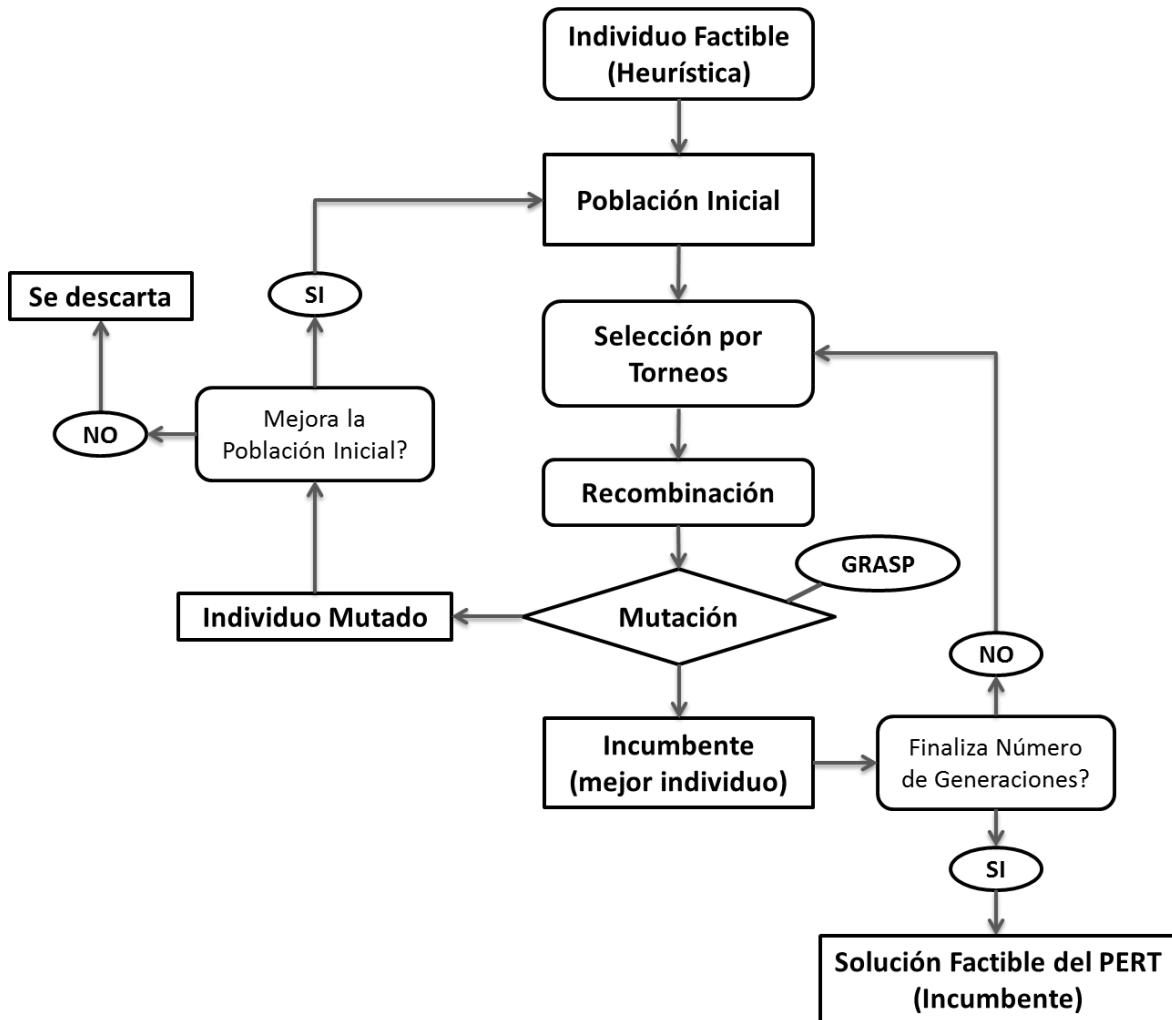


Figura 15. Diagrama del funcionamiento del AGHG.
Fuente: Propia.

3.8. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL AGHG

Con el objetivo de calibrar los parámetros de entrada del AGHG se realizaron varias corridas, modificando el tamaño de la población, el número de torneos y la probabilidad de mutación. Los datos ajustados, mediante un análisis de sensibilidad, que arrojaron los mejores resultados se ilustran en la Tabla 1. En este caso se encontraron resultados satisfactorios con los mismos parámetros para ambos sistemas de prueba (Sistemas Garver y IEEE24). Sin embargo, es importante mencionar que el proceso de parametrización de las técnicas metaheurísticas puede variar de un sistema a otro.

Los resultados obtenidos con el AGHG fueron contrastados y validados con dos publicaciones de la literatura técnica para el sistema Garver. El primer caso de validación se realiza con la publicación original de Garver [1]; el segundo caso se realiza con el mismo sistema, pero adoptando las modificaciones de red propuestas en [47] (ver anexos). Adicionalmente, son presentados los resultados obtenidos al implementar el AGHG para el sistema IEEE de 24 barras.

Tabla 1. Parámetros de entrada del AGHG.

Parámetro	Valor
Tamaño de la población inicial (n)	100
Número de torneos (k)	100
Probabilidad de mutación	50%
Número de generaciones	2000

Fuente: Propia.

3.8.1. Sistema Garver - Primer caso de validación

Inicialmente, para reproducir los resultados reportados en [1], se considera un costo más alto que la instalación de nuevos circuitos, para la repotenciación de circuitos y la ubicación de condensadores. En la Figura 16 se ilustra la mejor solución obtenida por el AGHG que coincide con la reportada en [1]. En este caso se indica la adición de 1 línea en 3-5, 4 líneas en 2-6 y 2 líneas en 4-6, para un costo de US\$ 200. En la Figura 17 se ilustra el sistema de potencia con la solución implementada.

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N2	N4	N5
1	0	1	1	0	1	1	0	4	0	2	0	0	2	0	0	0	0

Figura 16. Resultado para el primer caso de validación, costo alto para candidatos no convencionales, AGHG.

Fuente: Propia.

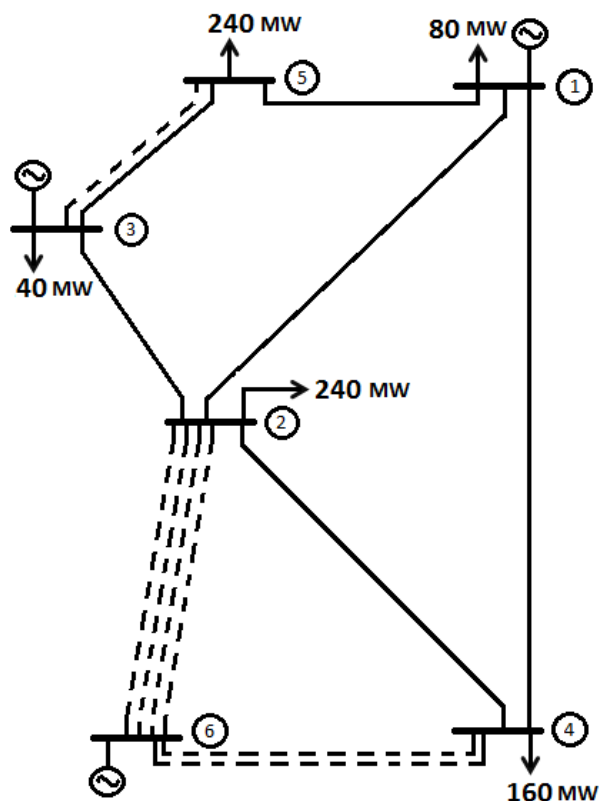


Figura 17. Representación de la solución obtenida por el AGHG, costo alto para candidatos no convencionales (primer caso de validación).
Fuente: Propia.

Posteriormente se asumen costos competitivos (ver ANEXO A) para los candidatos no convencionales: repotenciación de circuitos y ubicación de bancos de capacitores. Los resultados obtenidos se ilustran en la Figura 18. El vector solución indica la repotenciación del circuito existente en 3-5, la adición de 4 líneas en 2-6 y 2 líneas en 4-6, con un costo de US\$ 190. En la Figura 19 se ilustra el sistema de potencia con la solución implementada. Se puede observar que para el primer caso de validación la inclusión de candidatos no convencionales en el PERT conduce a una reducción del costo equivalente a US\$ 10. En este caso la solución no contempla la adición de capacitores en derivación.

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N2	N4	N5
1	0	1	1	0	1	1	0	4	0	6	0	0	2	0	0	0	0

Figura 18. Resultado para el primer caso de validación, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHG.
Fuente: Propia.

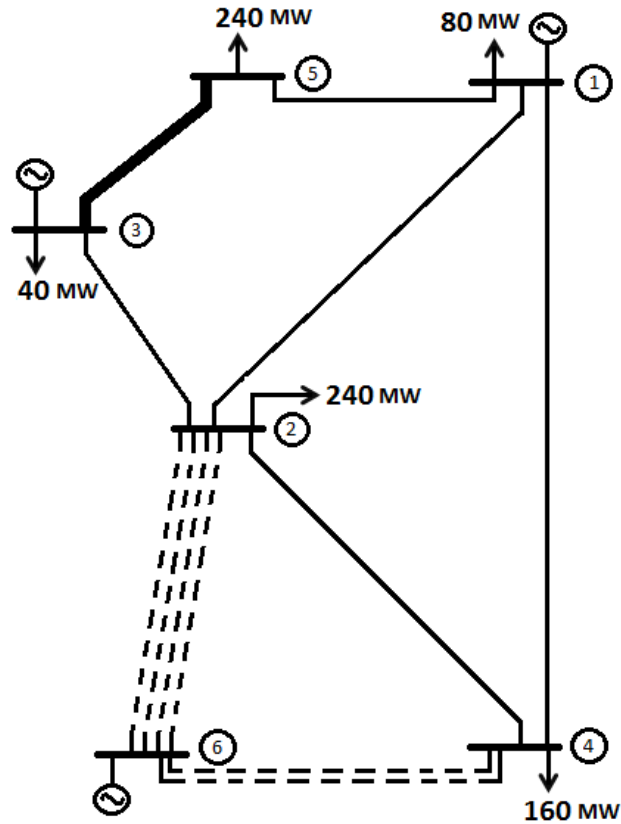


Figura 19. Representación de la solución obtenida por el AGHG, costos competitivos para candidatos no convencionales (primer caso de validación).
Fuente: Propia.

3.8.2. Sistema Garver - Segundo caso de validación

Para el segundo caso de validación se ajustaron los datos de la red según lo indicado en [47]. Inicialmente se considera un costo más alto que la instalación de nuevos circuitos, para la repotenciación y los bancos de capacitores, llegando al mismo resultado reportado en [47]. Esta solución es ilustrada en la Figura 20. En este caso es necesaria la adición de 2 líneas en 3-5, 2 líneas en 2-6 y 2 líneas en 4-6, para un costo de US\$ 160. En la Figura 21 se ilustra el sistema de potencia con la solución implementada.

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N2	N4	N5
1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	3	0	0	2	0	0	0	0

Figura 20. Resultado para el segundo caso de validación, costo alto para candidatos no convencionales, AGHG.
Fuente: Propia.

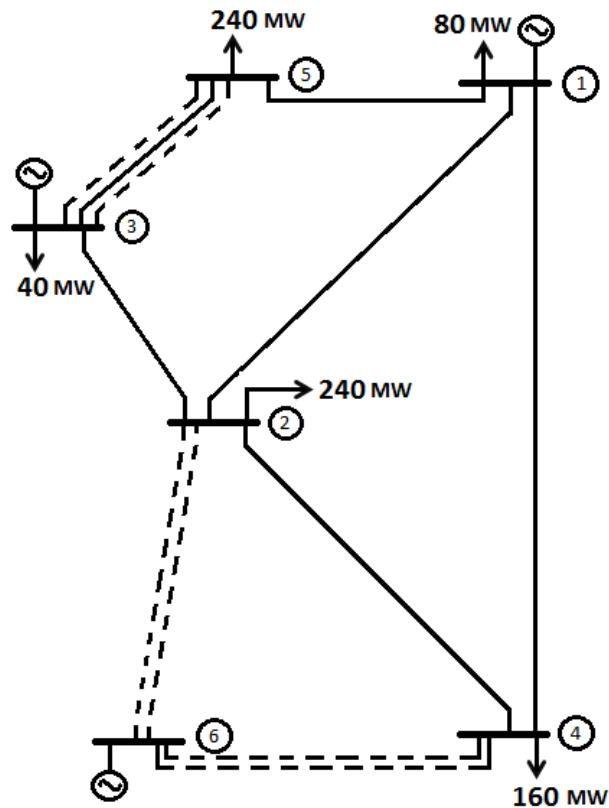


Figura 21. Representación de la solución obtenida por el AGHG, costo alto para candidatos no convencionales (segundo caso de validación).

Fuente: Propia.

Posteriormente, se consideran costos competitivos (ver ANEXO B) para la repotenciación y ubicación de bancos de capacitores, obteniendo la solución ilustrada en la Figura 22, la cual indica 1 circuito repotenciado en 3-5, la adición de 2 líneas en 2-6, 1 línea en el corredor 4-6, 1 banco de capacitores de 2 pasos (40 MVar) en el nodo 4 y 1 banco de capacitores de 1 paso (20 MVar) en el nodo 5, para un costo de US\$ 106. En la Figura 23 se ilustra el sistema de potencia con la solución implementada. En este caso se obtiene una reducción del costo del PERT de US\$ 54 debido a la inclusión de candidatos no convencionales.

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N2	N4	N5
1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	6	0	0	1	0	0	2	1

Figura 22. Resultado para el segundo caso de validación, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHG.

Fuente: Propia.

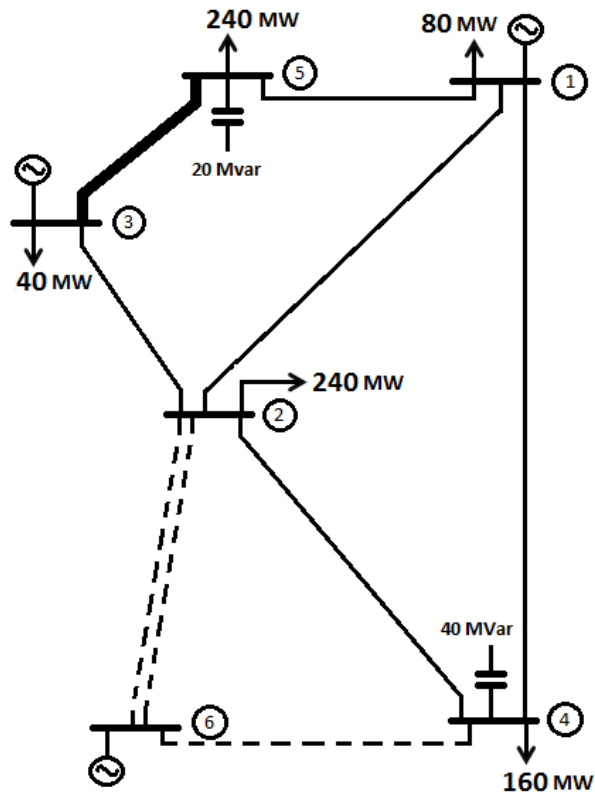


Figura 23. Representación de la solución obtenida por AGHG, costos competitivos para candidatos no convencionales (segundo caso de validación).
Fuente: Propia.

3.8.3. Sistema IEEE de 24 barras

Como se mencionó anteriormente los datos de este sistema pueden ser consultados en [3] y en el ANEXO C. Para la repotenciación de líneas se asume un costo relativo igual a la mitad del costo de instalar nuevos circuitos. Adicionalmente, al igual que para el sistema Garver se establece en [1] y [47] un máximo de 5 líneas por corredor, de acuerdo a lo establecido en [3] para el sistema IEEE de 24 barras se indica un máximo de 3 líneas por corredor.

Inicialmente, se asumen costos altos a los candidatos de repotenciación y ubicación de capacitores. En la Figura 24 se ilustra la mejor solución obtenida por el AGHG para el sistema IEEE de 24 barras. En este caso se indica la adición de 1 línea en los corredores en 3-24, 12-13, 14-23, 15-16 y 15-24, 2 líneas en 6-10 y 7-8, para un costo de US\$ 362 x 10⁶. Los resultados son consistentes con los reportados en [13], [52] y [106]; en especial con respecto a los corredores en los cuales el AGHG adiciona nuevas líneas de transmisión. La no exactitud en resultados obtenidos para este sistema, respecto a las publicaciones mencionadas

anteriormente se debe a diferencias en el modelo AC/DC, metodologías utilizadas y candidatos de solución empleados. En la Figura 25 se ilustra el sistema de potencia con la solución implementada.

1-2	1-3	1-5	1-8	2-4	2-6	2-8	3-9	3-24	4-9	5-10	6-7	6-10	7-8	8-9	8-10	9-11	9-12	10-11	10-12	11-13	11-14	12-13
1	1	1	0	1	1	0	1	2	1	1	0	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2
12-23	13-14	13-23	14-16	14-23	15-16	15-21	15-24	16-17	16-19	16-23	17-18	17-22	18-21	19-20	19-23	20-23	21-22					
1	0	1	1	1	2	2	2	1	1	0	1	1	2	2	0	2	1					

Figura 24. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, costo alto para candidatos no convencionales, AGHG.

Fuente: Propia.

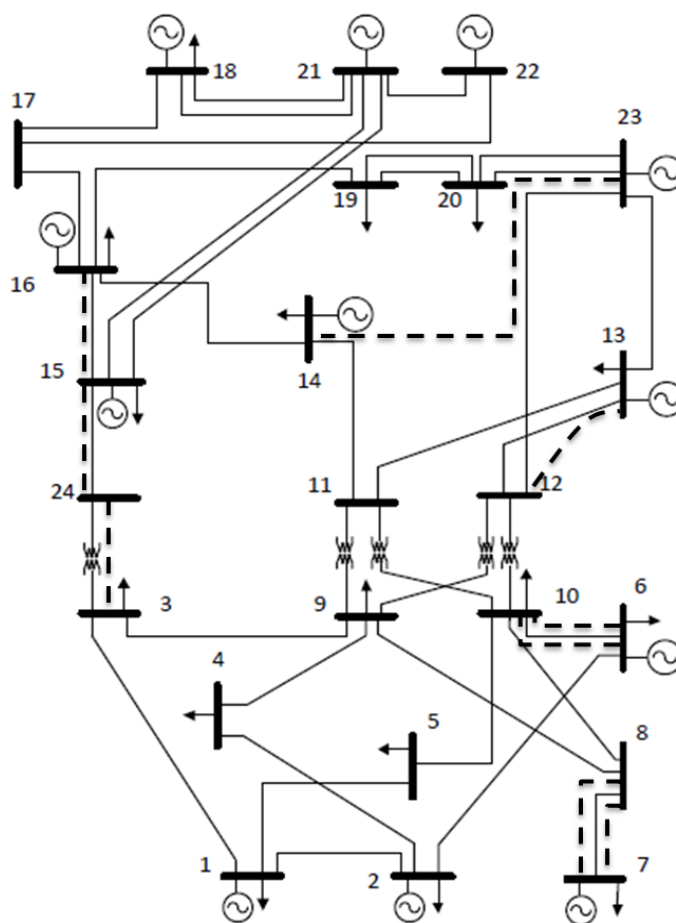


Figura 25. Representación de la solución obtenida por AGHG para el sistema IEEE de 24 barras, costo alto para candidatos no convencionales.

Fuente: Propia.

Posteriormente se asumen costos competitivos para los candidatos de solución no convencionales (repotenciación de circuitos existentes y ubicación de capacitores),

obteniendo el resultado ilustrado en la Figura 26. Este indica la repotenciación (línea más gruesa) de los circuitos existentes en 2-4, 3-24, 7-8, 9-12, 11-13, la adición de 1 línea en 6-10, la ubicación de un banco de capacitores de 5 pasos (100 Mvar) en los nodos 3 y 10, y la ubicación de un banco de capacitores de 3 pasos (60 Mvar) en el nodo 8, con un costo de US\$ 149.5 x 10⁶. En la Figura 27 se ilustra el sistema de potencia con la solución implementada. Se puede observar que al realizar la inclusión de candidatos no convencionales en el PERT ésta conduce a una reducción del costo equivalente a US\$ 212.5 x 10⁶.

1-2	1-3	1-5	1-8	2-4	2-6	2-8	3-9	3-24	4-9	5-10	6-7	6-10	7-8	8-9	8-10	9-11	9-12	10-11	10-12	11-13	11-14	12-13	12-23
1	1	1	0	4	1	0	1	4	1	1	0	2	4	1	1	1	4	1	1	4	1	1	1
13-14	13-23	14-16	14-23	15-16	15-21	15-24	16-17	16-19	16-23	17-18	17-22	18-21	19-20	19-23	20-23	21-22	N3	N8	N10	N14			
0	1	1	0	1	2	1	1	1	0	1	1	2	2	0	2	1	5	3	5	0			

Figura 26. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHG.

Fuente: Propia.

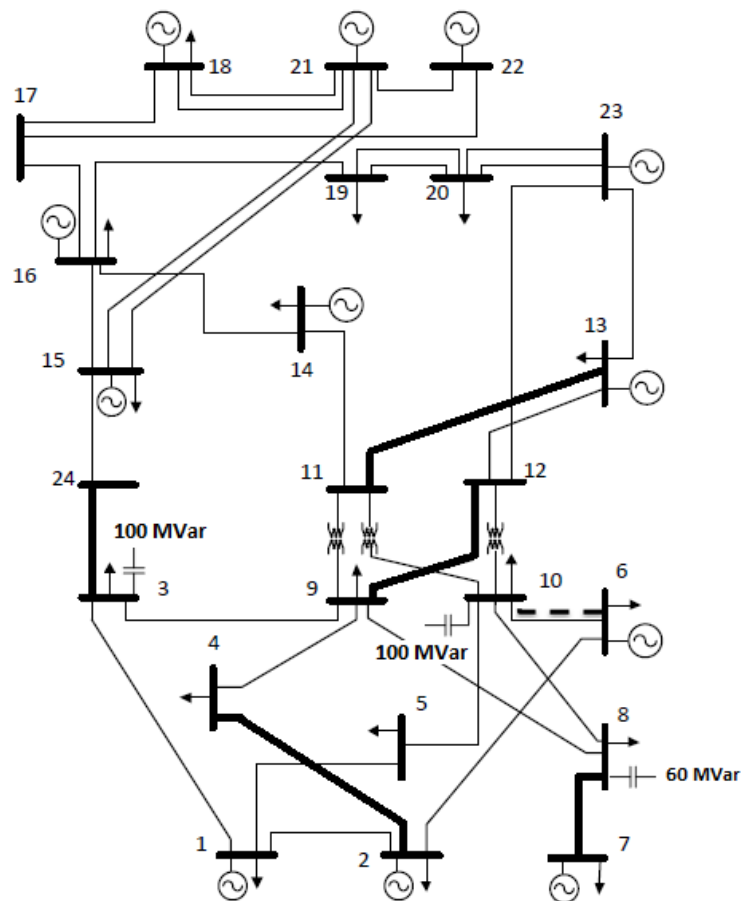


Figura 27. Representación de la solución obtenida por AGHG para el sistema IEEE de 24 barras, costos competitivos para candidatos no convencionales.

Fuente: Propia.

En la Tabla 2 se presenta el resumen de resultados obtenido por el AGHG para los sistemas de prueba Garver de 6 barras e IEEE de 24 barras. El costo alto indica un costo elevado para los candidatos no convencionales, como se mencionó anteriormente en la descripción detallada de las soluciones encontradas. Es posible observar en la Tabla 2 que al asignar a los candidatos de expansión no convencionales un costo competitivo, la solución del PERT (valor de la función objetivo) obtenida es más atractiva, al ser de menor costo que las soluciones clásicas reportadas por la literatura técnica, y adicionalmente, incluir una mayor variedad de opciones de expansión para el sistema eléctrico de potencia.

Tabla 2. Resumen de resultados obtenidos por el AGHG.

AGHG					
Caso 1 Garver		Caso 2 Garver		IEEE24	
Costo Alto	Costo Competitivo	Costo Alto	Costo Competitivo	Costo Alto	Costo Competitivo
US \$200	US \$190	US \$160	US \$106	US \$ 362 x 10 ⁶	US \$ 149.5 x 10 ⁶
n ₃₋₅ = 1	n ₃₋₅ = Rep.	n ₃₋₅ = 2	n ₃₋₅ = Rep.	n ₃₋₂₄ = 1	n ₂₋₄ = Rep.
n ₂₋₆ = 4	n ₂₋₆ = 4	n ₂₋₆ = 2	n ₂₋₆ = 2	n ₁₂₋₁₃ = 1	n ₃₋₂₄ = Rep.
n ₄₋₆ = 2	n ₄₋₆ = 2	n ₄₋₆ = 2	n ₄₋₆ = 1	n ₁₄₋₂₃ = 1	n ₇₋₈ = Rep.
			N ₄ = 40 Mvar	n ₁₅₋₁₆ = 1	n ₉₋₁₂ = Rep.
			N ₅ = 20 Mvar	n ₁₅₋₂₄ = 1	n ₁₁₋₁₃ = Rep.
				n ₆₋₁₀ = 2	n ₆₋₁₀ = 1
				n ₇₋₈ = 2	N ₃ = 100 Mvar
					N ₁₀ = 100 Mvar
					N ₈ = 60 Mvar

Fuente: Propia.

4. ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO – TABÚ (AGHT)

En el capítulo anterior se describió un algoritmo genético híbrido, el cual involucra en su operador de mutación un algoritmo de búsqueda local (GRASP), con dos principales objetivos, la diversificación y la intensificación en la búsqueda de soluciones para el PERT. En este capítulo también se buscan esos dos objetivos. La diversificación, al igual que para el AGHG, se lleva a cabo mediante un algoritmo genético como base. Luego, la intensificación se realiza mediante una Búsqueda Tabú, la cual está en el interior del operador de mutación del AG. La BT incorpora una memoria de corto plazo; de esta forma el algoritmo puede “recordar” soluciones ya evaluadas y hacer una búsqueda más efectiva.

Es importante mencionar que en este capítulo se desarrolla un modelo integrado de todos los candidatos de solución mencionados a lo largo del trabajo de investigación (repotenciación y reconfiguración de circuitos existentes, ubicación de compensación serie y en derivación), por este motivo algunas características del AGHT difieren del desarrollo presentado en el capítulo anterior. A continuación se presenta en detalle cada una de las partes que conforman el AGHT. De forma similar a como se hizo para el AGHG, se utiliza el sistema de prueba Garver como ilustración; no obstante, vale la pena aclarar que el AGHT permite el escalamiento a otros sistemas.

4.1. CODIFICACIÓN

La codificación del AGHT es similar a la presentada en el capítulo anterior, con la diferencia de que al individuo, se le adicionan las opciones de reconfiguración en la última parte del vector. Las convenciones para la identificación de cada uno de los candidatos de solución se describen a continuación.

Corredores:

- LNmax, máximo número de líneas por corredor en paralelo (5 para el sistema Garver).
- (LNmax+1), indica la repotenciación de los circuitos existentes (topología base).
- (LNmax+2), indica la ubicación de compensación serie capacitiva.
- (LNmax+3), indica la ubicación de compensación serie inductiva.

Compensación en derivación:

- En esta parte del individuo se muestran los posibles nodos susceptibles de ubicación de compensación en derivación, y el bit indica el número de pasos del banco. Este puede ir desde un valor negativo (-Pasomáx, compensación inductiva), hasta un valor positivo (Pasomáx, compensación capacitiva) máximo.

Opciones de reconfiguración:

- En la última parte del individuo son ubicadas las opciones de reconfiguración de la red, que previamente han sido evaluadas y consideradas como una posible opción de expansión. Cuando el bit pasa de 0 a 1, se indica que la opción de reconfiguración correspondiente se encuentra activa en la red. Más adelante en la sección de pruebas y resultados se detallan las opciones de reconfiguración consideradas para cada uno de los sistemas de prueba. Adicionalmente, en los anexos, se muestra el detalle de los parámetros considerados para este candidato.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, es posible observar en la Figura 28 que para el corredor 1-2 se indica la ubicación de compensación serie inductiva, para el corredor 1-4 la adición de dos nuevos circuitos en paralelo, para el corredor 2-4 la repotenciación del circuito existente, para el corredor 3-5 la ubicación de compensación serie capacitiva, en el corredor 4-6 la construcción de un circuito, en el nodo 2 la ubicación de una compensación capacitiva de 3 pasos, en el nodo 5 una de 1 paso y la activación de las opciones de reconfiguración 2 y 3.

Corredores															Comp. Deriv.			Opc. Reconf.		
1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N2	N4	N5	R1	R2	R3
8	0	3	1	0	1	6	0	0	0	7	0	0	1	0	3	0	1	0	1	1

Figura 28. Codificación de los individuos del AGHT.

Fuente: Propia.

4.2. FUNCIÓN OBJETIVO

La formulación para la evaluación de la función objetivo de las posibles soluciones del PERT está dada en (21). En ésta se incluye el costo de la reconfiguración de

circuitos existentes y la ubicación de las compensaciones serie y en derivación. El resto de la formulación es similar a como se describió en el capítulo anterior.

$$\begin{aligned} F.O. = & (\text{costo nuevas líneas}) + (\text{costo repotenciación de líneas}) \\ & + (\text{costo reconfiguración de líneas}) \\ & + (\text{costo ubicación de compensación serie}) \\ & + (\text{costo ubicación de compensación en derivación}) \\ & + (\text{penalización por convergencia}) \end{aligned} \quad (21)$$

4.3. POBLACIÓN INICIAL

La población inicial del AGHT es generada de la misma forma que la indicada en el numeral 3.3 del capítulo anterior.

4.4. SELECCIÓN

La selección por torneo del AGHT es realizada de la misma forma que la indicada en el numeral 3.4 del capítulo anterior.

4.5. RECOMBINACIÓN

El proceso de recombinación del AGHT es realizado de la misma forma que la indicada en el numeral 3.5 del capítulo anterior.

4.6. MUTACIÓN (TABÚ)

Para encontrar soluciones de alta calidad para el problema del PERT, se plantea que la alteración realizada por el operador de mutación del AGHT sea una Búsqueda Tabú. Esta incorpora una memoria de corto plazo, que almacena movimientos realizados al individuo para no repetirlos en ciertas etapas del proceso, a menos que se cumpla un criterio de aspiración específico. En este caso se utilizaron dos listas tabú: una para la sección del individuo que corresponde a los corredores, y otra para la compensación en derivación. A continuación se detalla la BT y las listas tabú elaboradas.

Lista tabú - corredores:

En la Figura 29 se ilustra la forma en que es construida la lista tabú para los corredores. Esta almacena cada uno de los bits (corredores) que son recorridos hasta un tamaño de lista tabú para los corredores (TamListCor). Cuando es visitado un bit, en éste se recorren todos los posibles valores que puede tomar y se identifica el que mejor función objetivo genera para el individuo. Se recorren tantos bits, como el valor del TamListCor. El objetivo de esta lista tabú es recordar los bits visitados y no repetir mientras se completa el proceso. Es importante mencionar que cada uno de los bits es elegido aleatoriamente movimiento a movimiento (cada vez que se cambia de bit se verifica la lista tabú).

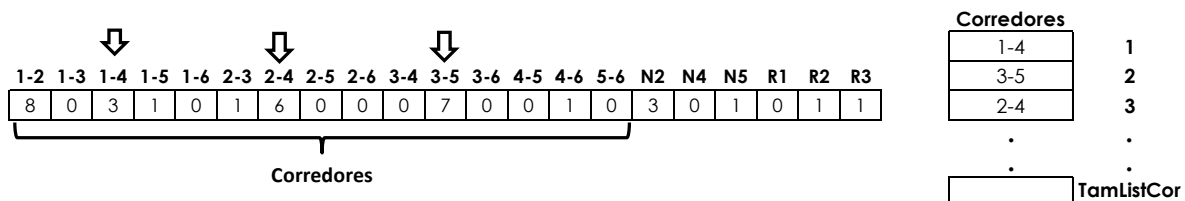


Figura 29. Lista tabú utilizada para los corredores.

Fuente: Propia.

Lista tabú – compensación en derivación:

En la Figura 30 se ilustra la construcción de la lista tabú para la compensación en derivación. En este se muestran todos los posibles valores (forma matricial) que pueden tomar los bits correspondientes a los nodos establecidos para la ubicación de compensación en derivación. La lista tabú es una matriz (valores binarios, el “0” indica que no ha sido evaluado ese posible valor, el “1” indica que ya fue evaluado) que recuerda los valores evaluados, y se construye a partir de los valores que son visitados movimiento a movimiento para cada uno de los nodos mencionados. Se visitan tantos posibles valores, como el tamaño de lista tabú para compensación en derivación (TamListSh).

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N2	N4	N5	R1	R2	R3
8	0	3	1	0	1	6	0	0	0	7	0	0	1	0	3	-2	1	0	1	1

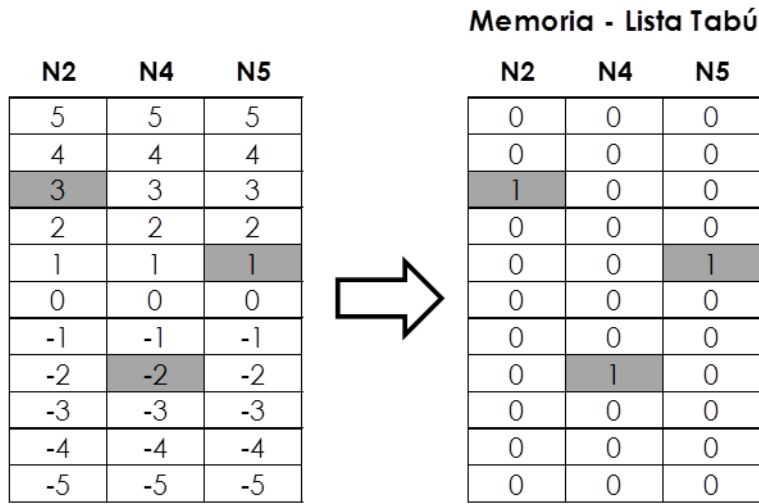


Figura 30. Lista tabú para la compensación en derivación.
Fuente: Propia.

En la Figura 31 se ilustra el proceso realizado al interior del operador de mutación del AGHT. El proceso de mutación se activa con una probabilidad preestablecida; luego, se cuenta con un operador “w”, el cual determinara aleatoriamente el orden en que se realizara la intensificación del individuo para cada una de sus tres partes (recorrer corredores $w=1$, ubicación de compensación en derivación $w=2$ y reconfiguración de circuitos $w=3$). Es importante mencionar que para la reconfiguración de circuitos existentes no se desarrolló una lista tabú, el proceso de intensificación se realiza evaluando la activación o desactivación de cada una de las opciones de reconfiguración y se almacena la mejor solución (mejor F.O.).

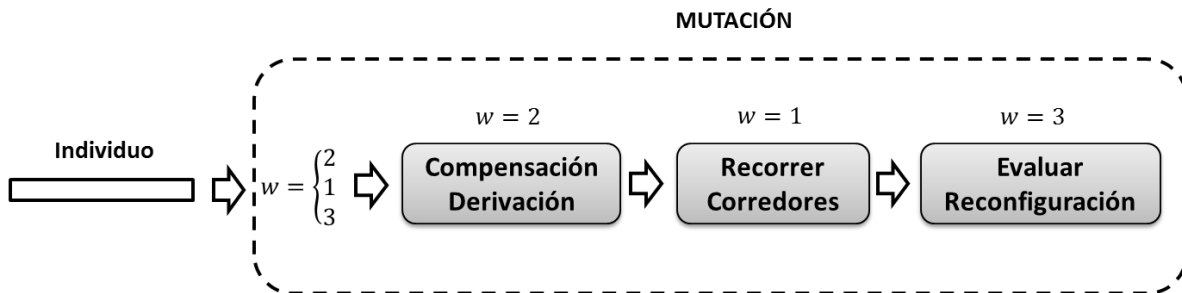


Figura 31. Proceso de mutación para el AGHT.
Fuente: Propia.

4.7. FUNCIONAMIENTO DEL AGHT

En la Figura 32 se ilustra el funcionamiento del AGHT, el cual presenta variaciones respecto al presentado en numeral 3.7. Este nuevo funcionamiento muestra un mejor comportamiento para el AGHT, respecto al problema de la alta combinación de soluciones y el tiempo computacional requerido para la convergencia a una solución de alta calidad.

El proceso inicia con la construcción de un individuo factible mediante un algoritmo constructivo, seguido por la generación de la población inicial, a partir del individuo mencionado. Luego, es realizada la selección por torneos y posteriormente se ejecuta el proceso de recombinación. El mejor individuo de la población recombinada pasa al operador de mutación, donde es intensificado mediante una Búsqueda Tabú. El individuo obtenido luego del proceso de mutación es comparado con la mejor solución encontrada hasta el momento (incumbente). Si el nuevo individuo es mejor, se actualiza la incumbente.

Luego de la comprobación de la mejor solución, es adicionado un proceso en el cual se verifica el número de veces que se ha repetido el mismo valor de la incumbente durante un valor "p" (parámetro inicial establecido) de generaciones. Si se completa "p", es generada de nuevo la población inicial como se indica en el diagrama. Este proceso permite que cuando el AGHT detecte que su población inicial se está homogenizando (posiblemente convergiendo a un óptimo local), se diversifiquen las posibles soluciones para el PERT mediante una nueva población.

El proceso ejecutado por el AGHG finaliza cuando se completan el número de generaciones que le fueron establecidas como parámetro inicial al algoritmo. Mientras no se cumpla este criterio, luego de la comprobación de la incumbente se regresa a la sección de selección por torneos como se indica en el diagrama.

Para mejorar la calidad de la población inicial, luego del proceso de mutación, el individuo obtenido es comparado con los existentes en la población inicial y si éste mejora dicha población, es reemplazado por el peor existente.

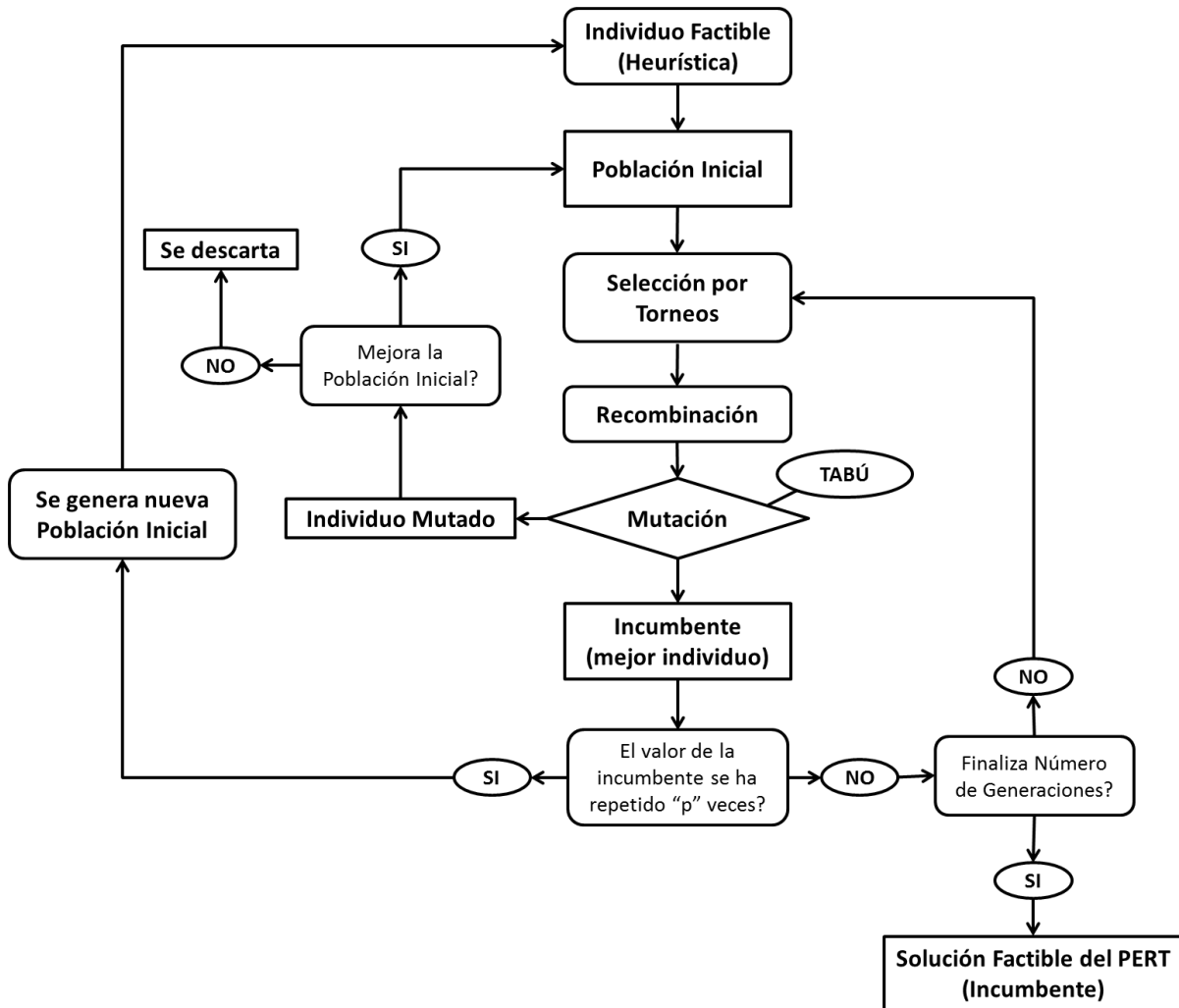


Figura 32. Diagrama de funcionamiento del AGHT.
Fuente: Propia.

4.8. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL AGHT

Al igual que se mencionó en el capítulo anterior, para el AGHT fueron realizadas varias corridas al modelo y se sintonizaron los parámetros de entrada del algoritmo, respecto a la convergencia y la obtención de soluciones de alta calidad. En la Tabla 3 se describen los parámetros utilizados.

A diferencia que de lo presentando en Tabla 1, para el AGHT se incluye un nuevo parámetro, el “Indicador generación nueva P.I. (p)”, éste se encarga de generar una nueva población inicial cuando se detecta que la incumbente no cambia luego de transcurrir “p” generaciones, tal como se indicó en el numeral 3.7. Adicionalmente, se ajusta el valor del número de torneos (k) a 10, se observó que

esto permite la selección de individuos más diferenciados desde este punto, hasta el momento de la realización de la mutación. La probabilidad de ejecución de ésta última se ajusta en un 100%, con el objetivo de que en cada generación se obtenga un individuo mutado, refinado por la Búsqueda Tabú. Finalmente, el número de generaciones es disminuido, ya que para el AGHT se obtuvieron soluciones de alta calidad para un valor de generaciones menor que para el AGHG.

Tabla 3. Parámetros de entrada del AGHT.

Parámetro	Valor
Tamaño de la población inicial (n)	100
Número de torneos (k)	10
Probabilidad de mutación	100%
Indicador generación nueva P.I. (p)	50
Número de generaciones	1000

Fuente: Propia.

4.8.1. Sistema Garver - Primer caso de validación

Considerando los datos de red presentados en el ANEXO A, y costos competitivos para los candidatos de solución, el AGHT obtiene la solución presentada en la Figura 33, con un costo de US\$ 172. Este valor es menor al presentado en el numeral 2.8.1. (US\$ 190, Figura 18), lo que indica una mejor opción de expansión del sistema.

En la Figura 34 se ilustra la solución implementada en el sistema Garver. Esta indica la repotenciación de los circuitos existentes en los corredores 1-5 y 3-5, la adición de 3 circuitos en el corredor 2-6, 2 circuitos en el corredor 4-6 y la ubicación de una compensación en derivación capacitiva en el nodo 4 de un paso (20 MVar).

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N1	N2	N3	N4	N5	N6	R1
1	0	1	6	0	1	1	0	3	0	6	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0

Figura 33. Resultado para el primer caso de validación, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHT.

Fuente: Propia.

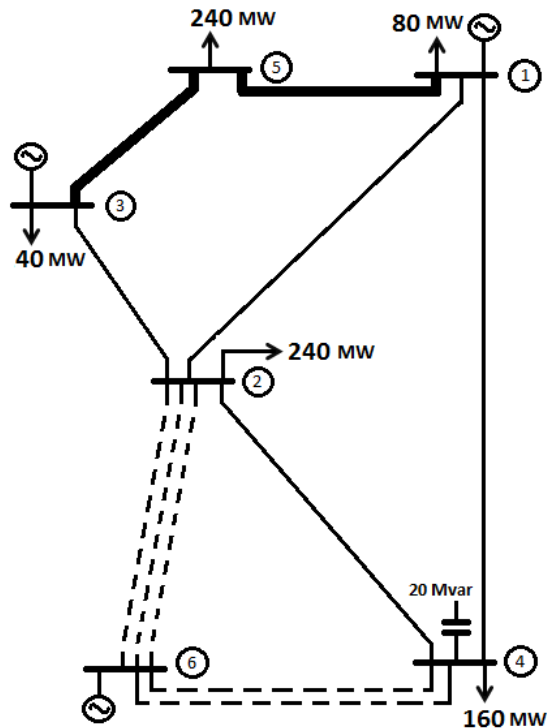


Figura 34. Representación de la solución obtenida por el AGHT, costos competitivos para candidatos no convencionales (primer caso de validación).
Fuente: Propia.

También es realizado el ejercicio de considerar un precio más alto para los candidatos no convencionales, que la adición de nuevos circuitos. El AGHT obtiene la solución presentada en el capítulo anterior (US\$ 200, Figura 16), y adicionalmente encuentra una nueva configuración de la red para el mismo costo de expansión US\$ 200, Figura 35.

En la Figura 36 se ilustra la solución implementada en el sistema Garver. Esta indica la adición de 3 circuitos en los corredores 2-6 y 4-6, y la adición de un circuito en el corredor 3-5.

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N1	N2	N3	N4	N5	N6	R1
1	0	1	1	0	1	1	0	3	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 35. Resultado para el primer caso de validación, costo alto para candidatos no convencionales, AGHT.
Fuente: Propia.

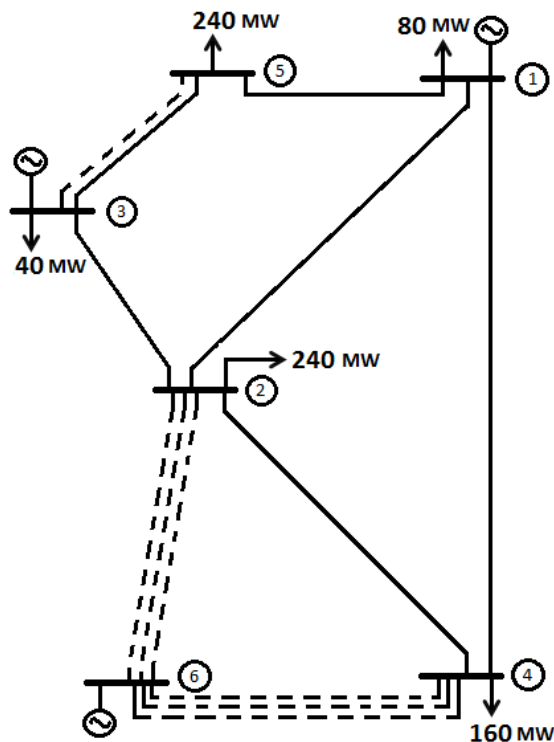


Figura 36. Representación de la solución obtenida por el AGHT, costo alto para candidatos no convencionales (primer caso de validación).

Fuente: Propia.

4.8.2. Sistema Garver - Segundo caso de validación

Considerando los datos de red presentados en el ANEXO B, y costos competitivos para los candidatos de solución, el AGHT obtiene la solución presentada en la Figura 37, con un costo de US\$ 104. Este valor es menor al presentado en el numeral 2.8.2. (US\$ 106, Figura 22), lo que indica una mejor opción de expansión del sistema.

En la Figura 38 se ilustra la solución implementada en el sistema Garver. Esta indica la repotenciación del circuito existente en el corredor 3-5, la adición de 1 circuito en el corredor 2-6, 2 circuitos en el corredor 4-6 y la ubicación de compensaciones en derivación capacitiva en los nodos 1 y 3 de un paso (20 MVar).

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N1	N2	N3	N4	N5	N6	R1
1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	6	0	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0

Figura 37. Resultado para el segundo caso de validación, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHT.

Fuente: Propia.

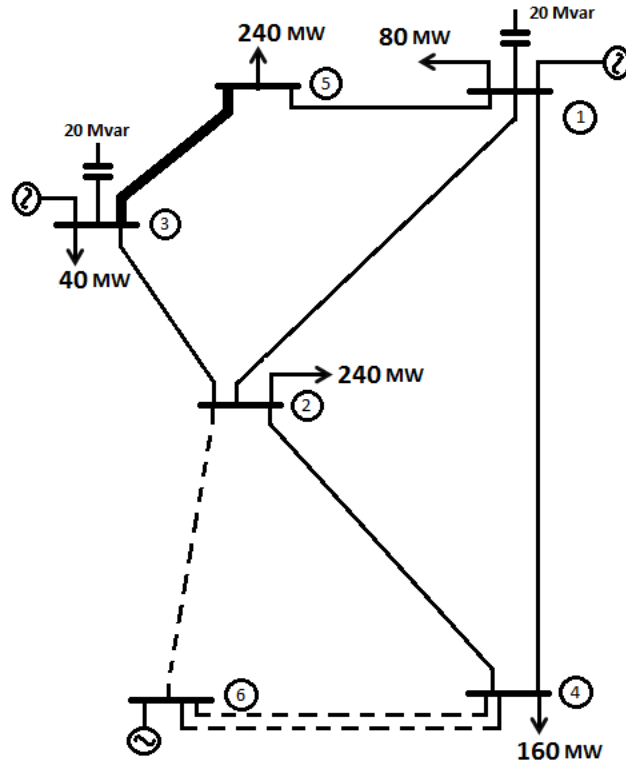


Figura 38. Representación de la solución obtenida por el AGHT, costos competitivos para candidatos no convencionales (segundo caso de validación).
Fuente: Propia.

Es importante mencionar que al considerar costos altos para los candidatos no convencionales, el AGHT obtiene la solución presentada en el numeral 2.8.2. (US\$ 160, Figura 20).

En la Figura 39 se presenta una posible solución del PERT para el sistema Garver (segundo caso de validación), la cual muestra activa la reconfiguración de circuitos existentes considerada como candidato no convencional de expansión. El costo asociado a esta solución es de US\$ 120.33. Es de notar que este valor es menor a la solución clásica del PERT para el sistema Garver (US\$ 160, Figura 20) y por ende, una opción atractiva de expansión.

1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6	N1	N2	N3	N4	N5	N6	R1
1	0	7	1	0	8	0	0	1	0	6	0	0	1	1	4	2	0	2	0	0	1

Figura 39. Resultado para el segundo caso de validación, AGHT. Opción de expansión con reconfiguración activa.
Fuente: Propia.

En la Figura 40 se ilustra la solución presentada anteriormente para el sistema Garver. Esta indica la ubicación de una compensación serie capacitiva en el

corredor 1-4, la ubicación de una compensación serie inductiva en el corredor 2-3, la repotenciación del circuito existente en el corredor 3-5, la adición de un circuito en el corredor 5-6, la ubicación de una compensación en derivación capacitiva en el nodo 1 de 4 pasos (80 MVar), la ubicación de una compensación en derivación capacitiva en los nodos 2 y 4 de 2 pasos (40 MVar) y finalmente la reconfiguración del circuito existente en el corredor 2-4 con el nodo 6, generando un nuevo circuito para los corredores 2-6 y 4-6. Nótese que en la Figura 39 el bit correspondiente al corredor 2-4 aparece con un valor de cero "0", ya que éste fue reconfigurado.

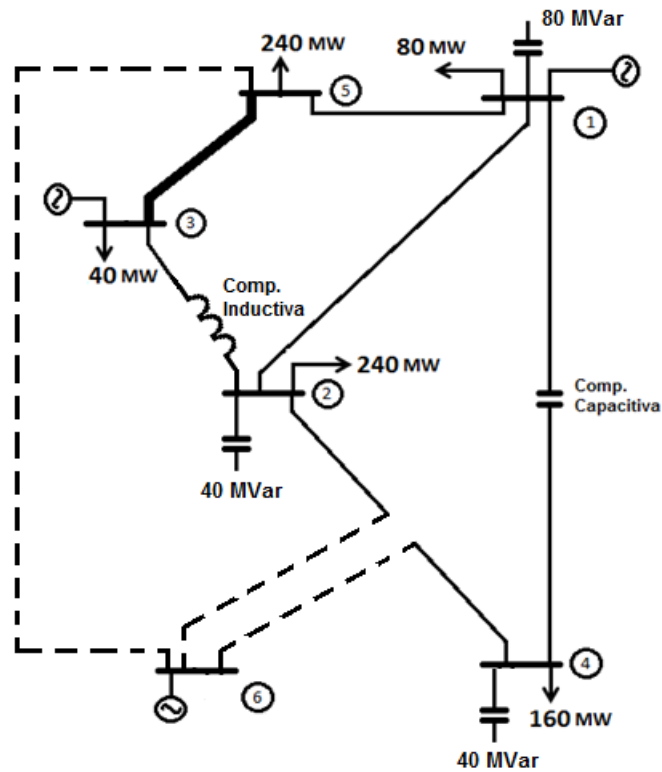


Figura 40. Representación de la solución obtenida por el AGHT. Opción de expansión con reconfiguración activa (segundo caso de validación).

Fuente: Propia.

4.8.3. Sistema IEEE de 24 barras

Considerando los datos de la red presentados en el ANEXO C, y costos competitivos para los candidatos de solución no convencionales, el AGHT obtiene la solución presentada en la Figura 41, con un costo de US\$ 108 x 10⁶. Este valor es menor al presentado en el numeral 2.8.3. (US\$ 149.5 x 10⁶, Figura 26), lo que indica una mejor opción de expansión del sistema.

En la Figura 42 se ilustra la solución implementada en el sistema IEEE24. Esta indica la repotenciación de los circuitos existentes en los corredores 7-8 y 11-13, la adición de 2 circuitos en el corredor 6-10, compensaciones serie capacitivas en los corredores 3-24 y 9-11, y la ubicación de una compensación en derivación capacitiva en el nodo 3 de 5 pasos (100 MVar).

1-2	1-3	1-5	1-8	2-4	2-6	2-8	3-9	3-24	4-9	5-10	6-7	6-10	7-8	8-9	8-10	
1	1	1	0	1	1	0	1	5	1	1	0	3	4	1	1	
9-11	9-12	10-11	10-12	11-13	11-14	12-13	12-23	13-14	13-23	14-16	14-23	15-16	15-21	15-24	16-17	
5	1	1	1	4	1	1	1	0	1	1	0	1	2	1	1	
16-19	16-23	17-18	17-22	18-21	19-20	19-23	20-23	21-22	N3	N8	N10	N11	R1	R2	R3	R4
1	0	1	1	2	2	0	2	1	5	0	0	0	0	0	0	0

Figura 41. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, costos competitivos para candidatos no convencionales, AGHT.

Fuente: Propia.

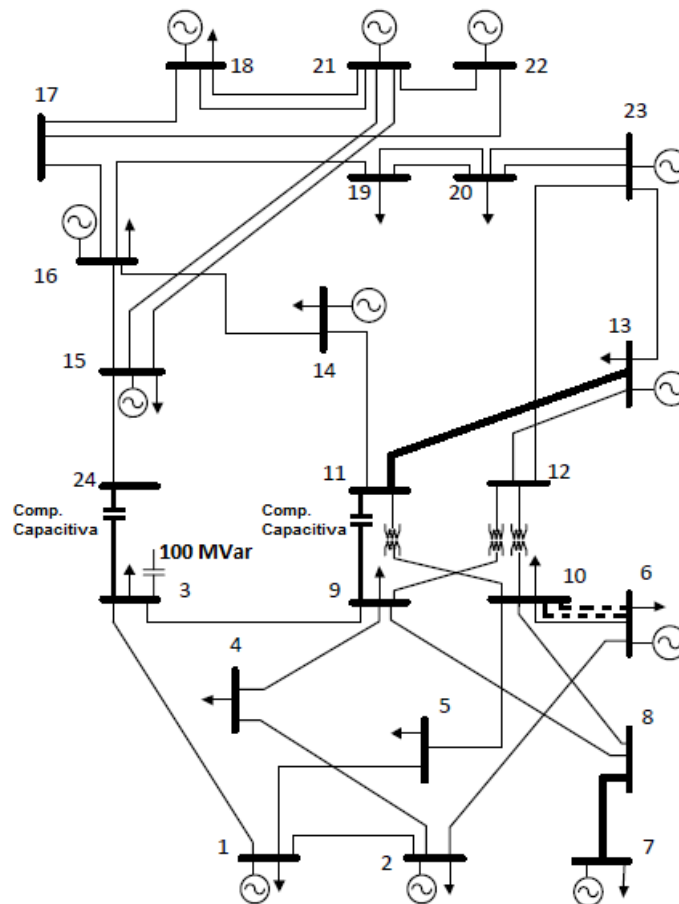


Figura 42. Representación de la solución obtenida por el AGHT para el sistema IEEE de 24 barras, costos competitivos para candidatos no convencionales.

Fuente: Propia.

Al considerar un precio más alto para los candidatos no convencionales, el AGHT obtiene la solución presentada en la Figura 43, con un costo de US\$ 319 x 10⁶. Costo menor al presentado en el numeral 2.8.3. (US\$ 362 x 10⁶, Figura 24). En la Figura 44 se ilustra la solución implementada en el sistema IEEE24. Esta indica la adición de 2 circuitos en el corredor 6-10, y la adición de un circuito en los corredores 1-3, 3-24, 7-8, 9-11, 10-11 y 11-13.

1-2	1-3	1-5	1-8	2-4	2-6	2-8	3-9	3-24	4-9	5-10	6-7	6-10	7-8	8-9	8-10	
1	2	1	0	1	1	0	1	2	1	1	0	3	2	1	1	
9-11	9-12	10-11	10-12	11-13	11-14	12-13	12-23	13-14	13-23	14-16	14-23	15-16	15-21	15-24	16-17	
2	1	2	1	2	1	1	1	0	1	1	0	1	2	1	1	
16-19	16-23	17-18	17-22	18-21	19-20	19-23	20-23	21-22	N3	N8	N10	N11	R1	R2	R3	R4
1	0	1	1	2	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 43. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, costo alto para candidatos no convencionales, AGHT.

Fuente: Propia.

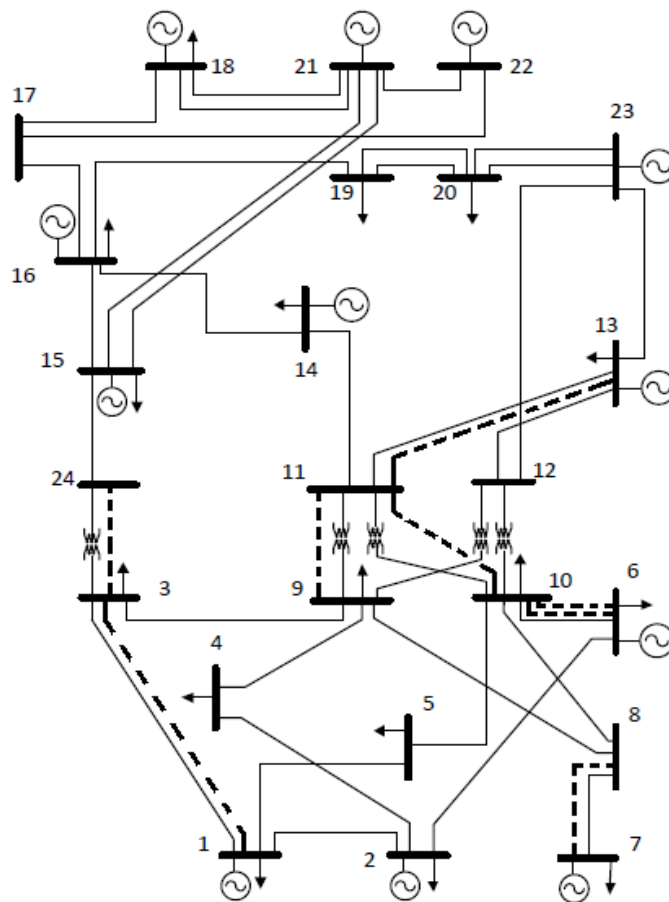


Figura 44. Representación de la solución obtenida por el AGHT para el sistema IEEE de 24 barras, costo alto para candidatos no convencionales.

Fuente: Propia.

Al igual que en el numeral anterior, en la Figura 45 se presenta una posible solución del PERT para el sistema IEEE de 24 barras, la cual muestra activa la reconfiguración de circuitos existentes considerada como candidato no convencional de expansión. El costo asociado a esta solución es de US\$ 117 x 10⁶. Es de notar que este valor es menor a la solución del PERT para el sistema IEEE24, presentada en este numeral en la Figura 43 (US\$ 319 x 10⁶); solución en la cual se consideraba muy atractivo solo la adición de circuitos (solución clásica), respecto a los candidatos no convencionales. Luego, la solución obtenida presentada en la Figura 45, se considera una opción muy atractiva de expansión al considerar candidatos no convencionales.

1-2	1-3	1-5	1-8	2-4	2-6	2-8	3-9	3-24	4-9	5-10	6-7	6-10	7-8	8-9	8-10	
1	1	1	0	1	1	0	1	5	1	1	0	3	4	1	1	
9-11	9-12	10-11	10-12	11-13	11-14	12-13	12-23	13-14	13-23	14-16	14-23	15-16	15-21	15-24	16-17	
5	1	1	1	4	1	1	1	0	1	1	0	1	2	1	1	
16-19	16-23	17-18	17-22	18-21	19-20	19-23	20-23	21-22	N3	N8	N10	N11	R1	R2	R3	R4
1	0	1	1	2	2	0	2	1	5	0	0	0	0	0	1	0

Figura 45. Resultado para el sistema IEEE de 24 barras, AGHT. Opción de expansión con reconfiguración activa.
Fuente: Propia.

En la Figura 46 se ilustra la solución implementada en el sistema IEEE de 24 barras. Esta indica la repotenciación de los circuitos existentes en los corredores 7-8 y 11-13, la adición de 2 circuitos en el corredor 6-10, compensaciones serie capacitivas en los corredores 3-24 y 9-11, la ubicación de una compensación en derivación capacitiva en el nodo 3 de 5 pasos (100 MVar) y finalmente la reconfiguración del circuito existente en el corredor 4-9 con el nodo 5 (opción de reconfiguración 3, ANEXO C) , generando un nuevo circuito para los corredores 4-5 y 9-5.

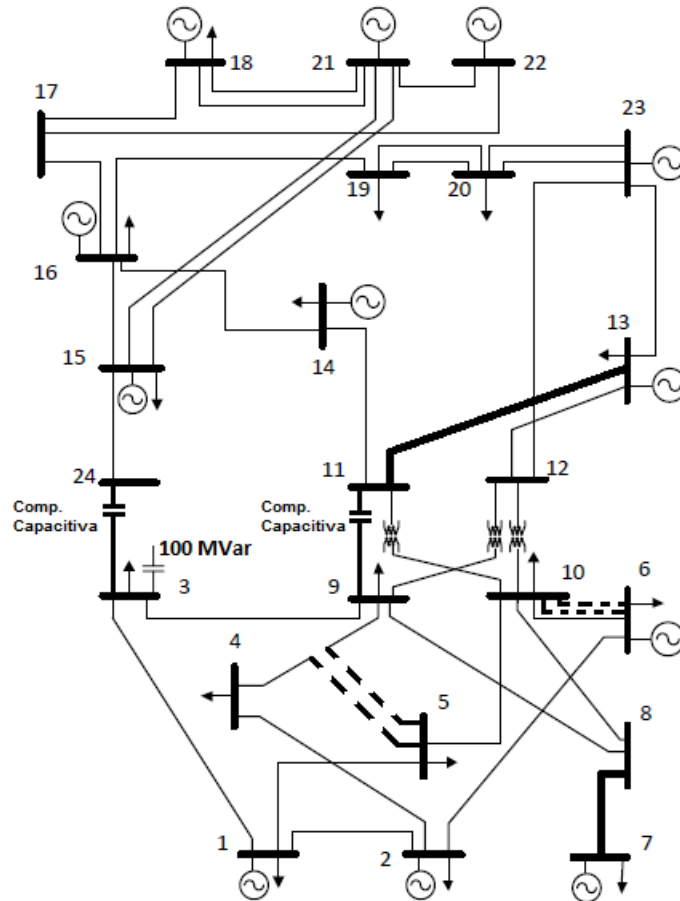


Figura 46. Representación de la solución obtenida por el AGHT para el sistema IEEE de 24 barras. Opción de expansión con reconfiguración activa.
Fuente: Propia.

En la Tabla 4 se presenta el resumen de resultados obtenido por el AGHT para los sistemas de prueba Garver de 6 barras e IEEE de 24 barras. El costo alto indica un costo elevado para los candidatos no convencionales, como se mencionó anteriormente en la descripción detallada de las soluciones encontradas.

Es posible observar en la Tabla 4 que al asignar a los candidatos de expansión no convencionales un costo competitivo, al igual que para el AGHG, el valor de la función objetivo obtenido por el AGHT, es de menor costo que el reportado por la literatura técnica para las soluciones clásicas. Es importante mencionar que durante las generaciones recorridas por el AGHT es posible obtener soluciones al problema del PERT de buena calidad, por ejemplo, soluciones que incluyen la opción de reconfiguración de redes existentes, más específicamente las mencionadas en este capítulo y también presentadas en la Tabla 4. Éstas

soluciones aunque globalmente no sean las mejores obtenidas por el AGHT, si representan una opción importante en el momento de tomar una decisión de expansión de la red, ya que de igual forma se está obteniendo un costo menor que al utilizar solo los candidatos de solución clásicos.

Tabla 4. Resumen de resultados obtenido por el AGHT.

AGHT					
Caso 1 Garver		Caso 2 Garver		IEEE24	
Costo Alto	Costo Competitivo	Costo Alto	Costo Competitivo	Costo Alto	Costo Competitivo
US \$200	US \$172	US \$160	US \$104	US \$ 319 x 10 ⁶	US \$ 108 x 10 ⁶
n ₃₋₅ = 1	n ₁₋₅ = Rep.	n ₃₋₅ = 2	n ₃₋₅ = Rep.	n ₁₋₃ = 1	n ₇₋₈ = Rep.
n ₂₋₆ = 4	n ₃₋₅ = Rep.	n ₂₋₆ = 2	n ₂₋₆ = 1	n ₃₋₂₄ = 1	n ₁₁₋₁₃ = Rep.
n ₄₋₆ = 2	n ₄₋₆ = 2	n ₄₋₆ = 2	n ₄₋₆ = 2	n ₇₋₈ = 1	n ₆₋₁₀ = 2
	n ₂₋₆ = 3		N ₁ = 20 Mvar	n ₉₋₁₁ = 1	n ₃₋₂₄ = Serie Cap.
US \$200	N ₄ = 20 Mvar		N ₃ = 20 Mvar	n ₁₀₋₁₁ = 1	n ₉₋₁₁ = Serie Cap.
n ₃₋₅ = 1				n ₁₁₋₁₃ = 1	N ₃ = 100 Mvar
n ₂₋₆ = 3			Opción Reconfiguración:	n ₆₋₁₀ = 2	Opción Reconfiguración:
n ₄₋₆ = 3			US \$120.33		US \$ 117 x 10 ⁶
			n ₁₋₄ = Serie Cap.		n ₇₋₈ = Rep.
			n ₂₋₃ = Serie Ind.		n ₁₁₋₁₃ = Rep.
			n ₃₋₅ = Rep.		n ₆₋₁₀ = 2
			n ₅₋₆ = 1		n ₃₋₂₄ = Serie Cap.
			N ₁ = 80 Mvar		n ₉₋₁₁ = Serie Cap.
			N ₂ = 40 Mvar		N ₃ = 100 Mvar
			N ₄ = 40 Mvar		n ₄₋₉ = Reconfig.
			n ₂₋₄ = Reconfig.		
			n ₄₋₆ = 1		n ₄₋₅ = 1
			n ₂₋₆ = 1		n ₉₋₅ = 1

Fuente: Propia.

5. CONCLUSIONES

Como respuesta al crecimiento de los sistemas de potencia, se evidencia la tendencia a lo largo del tiempo de la aparición de nuevas técnicas para encontrar la mejor opción de expandir el sistema. En la revisión bibliográfica se pudo observar que éstas técnicas han tenido una evolución en el tiempo, empezando con la programación matemática clásica y luego con las técnicas heurísticas y metaheurísticas. Estas últimas, si bien no garantizan la obtención de un óptimo global, pueden proporcionar soluciones de alta calidad con un menor esfuerzo computacional.

Al observar la evolución en el tiempo de las técnicas de solución es posible determinar como la tendencia hacia las técnicas metaheurísticas ha aumentado considerablemente en los últimos años al representar el 41% de las técnicas encontradas en la revisión bibliográfica. Además del aumento en el interés de incluir en los modelos aspectos relacionados con estudios de mercado, financieros, regulatorios, costos de inversión y operación para el corto y largo plazo, nuevas tecnologías (energías renovables) de generación eléctrica y respuesta de la demanda.

El principal aporte de este trabajo es la introducción de candidatos no convencionales, como la repotenciación y reconfiguración de circuitos existentes, ubicación de compensaciones serie y en derivación para la solución del PERT. Además, el uso de un modelo AC como representación de la red, lo que permite tener un mayor acercamiento a los fenómenos reales presentes en los sistemas eléctricos de potencia.

Al incluir candidatos no convencionales en la solución del PERT es posible explorar un conjunto mayor de posibles soluciones y encontrar nuevas alternativas de expansión que involucran menores costos, comparados con los obtenidos al considerar solo los candidatos clásicos como solución del PERT. Tanto para el AGHG como para el AGHT la validación fue satisfactoria, al encontrar y mejorar las soluciones para el problema del PERT que han sido reportadas previamente en la literatura técnica. El AGHT requirió una implementación más compleja que el AGHG, pero como ventajas se logró mayor rapidez en la convergencia a una solución de alta calidad y mayor exploración de los espacios de todo el conjunto de soluciones, aprovechando al máximo el esfuerzo computacional sin recorrer caminos ya visitados. Lo anterior debido a la introducción de un algoritmo de Búsqueda Tabú como el operador de intensificación de posibles soluciones.

En trabajos futuros es posible considerar otro tipo de aspectos en la solución del PERT, como lo es la confiabilidad de los sistemas (contingencias N-k), cambios de niveles de tensión en las opciones de expansión, estabilidad de tensión; además de utilizar otras técnicas metaheurísticas y combinaciones de éstas, para la búsqueda de soluciones de alta calidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Garver, "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1688–1697, Sep. 1970.
- [2] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. Pereira, and S. Granville, "A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 560–565, 2001.
- [3] M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "Power system transmission network expansion planning using AC model," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 5, pp. 731–742, 2007.
- [4] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, and S. Haffner, "Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning," *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 149, no. 1, pp. 27–36, 2002.
- [5] R. Villasana, L. L. Garver, and S. J. Salon, "TRANSMISSION NETWORK PLANNING USING LINEAR PROGRAMMING," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, no. 2, pp. 349–356, 1985.
- [6] R. Alvarez, A. Moser, and C. A. Rahmann, "Novel Methodology for Selecting Representative Operating Points for the TNEP," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 2234–2242, 2017.
- [7] J. T. Jiménez, J. L. Guardado, S. Member, N. G. Cabrera, J. R. Rodríguez, and F. Figueroa, "Using Algorithm Genetic with Multi-Objective Criterion," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, no. 3, pp. 563–568, 2017.
- [8] A. H. Domínguez, A. E. Z, and R. A. Gallego, "Transmission Expansion Planning Considering Conductor Proposals with Different Wire Size and Technology," *Transm. Distrib. Conf. Expo. - Lat. Am. (PES T&D-LA)*, 2014.
- [9] T. F. Silva, A. N. Souza, and P. C. Jr, "Developing an Optimization Tool for Evaluating the Transmission System Expansion," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 4, pp. 998–1004, 2015.
- [10] I. Alhamrouni, A. Khairuddin, A. K. Ferdavani, and M. Salem, "Transmission expansion planning using AC-based differential evolution algorithm," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 10, pp. 1637–1644, 2014.
- [11] a. M. Leite da Silva, L. S. Rezende, L. M. Honório, and L. a. F. Manso, "Performance comparison of metaheuristics to solve the multi-stage transmission expansion planning problem," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 3, p. 360, 2011.
- [12] P. Murugan, S. Kannan, and S. Baskar, "Application of NSGA-II Algorithm to Single-Objective Transmission Constrained Generation Expansion Planning,"

IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 4, pp. 1790–1797, Nov. 2009.

- [13] P. Maghouli, S. H. Hosseini, M. O. Buygi, and M. Shahidehpour, “A Multi-Objective Framework for Transmission Expansion Planning in Deregulated Environments,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 1051–1061, May 2009.
- [14] L. A. Gallego, M. J. Rider, R. Romero, and A. V Garcia, “A Specialized Genetic Algorithm to Solve the Short Term Transmission Network Expansion Planning,” *IEEE Bucharest Power Tech Conf. Bucharest, Rom.*, pp. 1–7, 2009.
- [15] S. Jalilzadeh, A. Kazemi, M. Mahdavi, and H. Haddadian, “TNEP Considering Voltage Level , Network Losses and Number of Bundle Lines Using GA,” *Electr. Util. Deregul. Restruct. Power Technol.*, no. April, pp. 1580–1585, 2008.
- [16] R. Romero, M. J. Rider, and I. D. J. Silva, “A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 2289–2291, 2007.
- [17] Z. Xu, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, “Transmission planning in a deregulated environment,” *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 153, no. 3, pp. 326–334, 2006.
- [18] I. D. J. Silva, M. J. Rider, R. Romero, and C. A. F. Murari, “Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty in Demand,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1565–1573, 2006.
- [19] I. D. J. Silva, M. J. Rider, R. Romero, A. V Garcia, and C. A. Murari, “Transmission network expansion planning with security constraints,” *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 6, pp. 828–836, 2005.
- [20] M. J. Rider, I. de J. Silva, R. Romero, A. V. Garcia, and C. a. Murari, “Transmission network expansion planning in full open market considering security constraints,” *2005 IEEE Russ. Power Tech*, pp. 1–6, Jun. 2005.
- [21] A. H. Escobar, R. A. Gallego, and R. Romero, “Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 735–744, 2004.
- [22] E. Luiz, H. A. Gil, and J. M. Areiza, “Transmission Network Expansion Planning Under an Improved Genetic Algorithm,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 1168–1175, 2000.
- [23] R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, “Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm,” *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 145, no. 3, pp. 329–335, 1998.
- [24] A. H. Domínguez, A. E. Zuluaga, and R. Gallego, “Un método híbrido de

optimización para el Planeamiento de la transmisión considerando diferentes niveles de tensión,” *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, pp. 154–164, 2012.

- [25] P. Maghouli, S. H. Hosseini, M. Oloomi Buygi, and M. Shahidehpour, “A Scenario-Based Multi-Objective Model for Multi-Stage Transmission Expansion Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 470–478, Feb. 2011.
- [26] H. Yu, C. Y. Chung, and K. P. Wong, “Robust Transmission Network Expansion Planning Method With Taguchi’s Orthogonal Array Testing,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1573–1580, 2011.
- [27] V. S. K. M. Balijepalli and S. A. Khaparde, “A Holistic Approach for Transmission System Expansion Planning Studies : An Indian Experience,” *IEEE Syst. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 199–212, 2011.
- [28] A. Escobar, E. Toro, and R. Gallego, “Encadenamiento de trayectorias aplicado al problema del planeamiento de la transmisión,” *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 53, pp. 185–195, 2010.
- [29] H. Mori and Y. Iimura, “Transmission Network Expansion Planning with a Hybrid Meta-heuristic Method of Parallel Tabu Search and Ordinal Optimization,” *2007 Int. Conf. Intell. Syst. Appl. to Power Syst.*, pp. 1–6, Nov. 2007.
- [30] E. Luiz, G. C. De Oliveira, S. Binato, and J. M. A. Ortiz, “Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 62–68, 2001.
- [31] Y. Sone and H. Mori, “A Parallel Tabu Search Based Approach to Transmission Network Expansion Planning,” *IEEE Porto Power Tech Conf.*, pp. 1–6, 2001.
- [32] E. Karimi and A. Ebrahimi, “Inclusion of Blackouts Risk in Probabilistic Transmission Expansion Planning by a Multi-Objective Framework,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2810–2817, 2015.
- [33] Q. Yu, J. Guo, and X. Duan, “Dynamic Multi-stage Transmission Network Expansion Planning,” *Electr. Util. Deregul. Restruct. Power Technol.*, no. April, pp. 635–640, 2008.
- [34] D. Niu, Y. Ling, Q. I. Zhao, and Q. Zhao, “AN IMPROVED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD BASED ON BORDERLINE SEARCH STRATEGY FOR TRANSMISSION NETWORK EXPANSION PLANNING,” *Int. Conf. Mach. Learn. Cybern.*, no. August, pp. 13–16, 2006.
- [35] D. Kavitha and K. S. Swarup, “Transmission Expansion Planning using LP-Based Particle Swarm Optimization,” in *in Proc. of the 2006 IEEE Power Conference, New Delhi, India, 2006*, pp. 1–5.

- [36] Y. Jin, H. Cheng, J. Yan, and L. Zhang, "Local Optimum Embranchment Based Convergence Guarantee Particle Swarm Optimization and Its Application in Transmission Network Planning," *2005 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Asia Pacific*, pp. 1–6, 2005.
- [37] R. a. Gallego, a. B. Alves, a. Monticelli, and R. Romero, "Parallel simulated annealing applied to long term transmission network expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 181–188, 1997.
- [38] R. A. Gallego, A. Monticelli, and R. Romero, "COMPARATIVE STUDIES ON NON-CONVEX OPTIMIZATION METHODS FOR TRANSMISSION NETWORK EXPANSION PLANNING," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 822–828, 1998.
- [39] A. S. D. Braga and J. T. Saraiva, "A Multiyear Dynamic Approach for Transmission Expansion Planning and Long-Term Marginal Costs Computation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1631–1639, Aug. 2005.
- [40] Z. Xu, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, "A Hybrid Planning Method for Transmission Networks in a Deregulated Environment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 925–932, 2006.
- [41] T. Sum-Im, G. a. Taylor, M. R. Irving, and Y. H. Song, "Differential evolution algorithm for static and multistage transmission expansion planning," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 3, no. 4, p. 365, 2009.
- [42] A. Motamedi, H. Zareipour, M. O. Buygi, and W. D. Rosehart, "A Transmission Planning Framework Considering Future Generation Expansions in Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1987–1995, 2010.
- [43] A. Verma, B. K. Panigrahi, and P. R. Bijwe, "Harmony search algorithm for transmission network expansion planning," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. 6, pp. 663–673, 2010.
- [44] M. Rahmani *et al.*, "Multistage Transmission Expansion Planning Considering Fixed Series Compensation Allocation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3795–3805, 2013.
- [45] T. S. P. and C. C.A., "Expansion planning for smart transmission grids using AC model and shunt compensation," *Gener. Transm. Distrib. IET*, vol. 8, no. 5, pp. 966–975, 2014.
- [46] E. Carreño, E. N. Asada, A. V Garcia, and R. Romero, "A Branch and Bound Algorithm Using the Hybrid Linear Model in the Transmission Network Expansion Planning," *IEEE Power Tec Russ.*, pp. 1–6, 2004.
- [47] M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "A constructive heuristic algorithm to short term transmission network expansion planning," *Proc. 2004 IEEE*

Power Eng. Soc. Gen. Meet. Denver, USA, vol. 2, pp. 2108–2114, 2004.

- [48] M. J. Rider, L. A. Gallego, R. Romero, and A. V. García, “Heuristic Algorithm to Solve the Short Term Transmission Network Expansion Planning,” *Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–7, 2007.
- [49] R. Romero and A. Monticelli, “A HIERARCHICAL DECOMPOSITION APPROACH FOR TRANSMISSION NETWORK EXPANSION PLANNING,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 373–380, 1994.
- [50] S. Binato, M. V. F. Pereira, and S. Granville, “A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 235–240, May 2001.
- [51] S. H. M. Hashimoto, R. Romero, and J. R. S. Mantovani, “Efficient linear programming algorithm for the transmission network expansion planning problem,” *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 5, pp. 0–6, 2003.
- [52] N. Alguacil, A. L. Motto, and A. J. Conejo, “Transmission Expansion Planning: A Mixed-Integer LP Approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1070–1077, 2003.
- [53] G. B. Shrestha and P. a. J. Fonseka, “Congestion-Driven Transmission Expansion in Competitive Power Markets,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1658–1665, Aug. 2004.
- [54] P. Sánchez-martín, A. Ramos, and J. F. Alonso, “Probabilistic Midterm Transmission Planning in a Liberalized Market,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 2135–2142, 2005.
- [55] O. B. Tor, A. N. Guven, and M. Shahidehpour, “Congestion-Driven Transmission Planning Considering the Impact of Generator Expansion,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 781–789, 2008.
- [56] A. Khodaei, M. Shahidehpour, and S. Kamalinia, “Transmission Switching in Expansion Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1722–1733, Aug. 2010.
- [57] C. Transmission, A. Moreira, S. Member, A. Street, J. M. Arroyo, and S. Member, “An Adjustable Robust Optimization Approach for Expansion Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 4, pp. 2013–2022, 2015.
- [58] S. Lumbreras and A. Ramos, “How to solve the transmission expansion planning problem faster: acceleration techniques applied to Benders’ decomposition,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 10, pp. 2351–2359, 2016.
- [59] S. Teimourzadeh, S. Member, F. Aminifar, and S. Member, “MILP Formulation for Transmission Expansion Planning With Short-Circuit Level Constraints,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 3109–3118, 2016.

- [60] M. S. Calovic and V. A. Levi, "Linear-programming-based decomposition method for optimal planning of transmission network investments," *IEE PROCEEDINGS-C*, vol. 140, no. 6, 1993.
- [61] S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia, J. Mantovani, and R. Romero, "Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model," *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 147, no. 3, pp. 149–156, 2000.
- [62] J. Choi, A. R. A. El-keib, and T. Tran, "A Fuzzy Branch and Bound-Based Transmission System Expansion Planning for the Highest Satisfaction Level of the Decision Maker," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 476–484, 2005.
- [63] J. Choi, T. Tran, A. R. A. El-keib, R. Thomas, H. Oh, and R. Billinton, "A Method for Transmission System Expansion Planning Considering Probabilistic Reliability Criteria," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1606–1615, 2005.
- [64] C. Rocha, R. Romero, E. N. Asada, and E. Carreño, "Constructive heuristic algorithm in branch-and-bound structure applied to transmission network expansion planning," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 2, pp. 318–323, 2007.
- [65] J. Choi, T. D. Mount, and R. J. Thomas, "Transmission Expansion Planning Using Contingency Criteria," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 2249–2261, 2007.
- [66] M. J. Rider, A. V Garcia, and R. Romero, "Branch and Bound Algorithm for Transmission Network Expansion Planning Using DC Model," *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, pp. 1350–1355, 2007.
- [67] S. De Torre, A. J. Conejo, and J. Contreras, "Transmission Expansion Planning in Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 238–248, 2008.
- [68] M. J. Rider, A. V Garcia, and R. Romero, "Transmission system expansion planning by a branch-and-bound algorithm," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 2, no. 1, pp. 90–99, 2008.
- [69] P. Wu, H. Cheng, and J. Xing, "The Interval Minimum Load Cutting Problem in the Process of Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainty in Demand," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1497–1506, Aug. 2008.
- [70] M. Rahmani, R. A. Romero, and M. J. Rider, "Risk / investment-driven transmission expansion planning with multiple scenarios," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. October 2012, pp. 154–165, 2013.
- [71] T. Akbari and M. T. Bina, "Approximated MILP model for AC transmission

expansion planning: global solutions versus local solutions,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 7, pp. 1563–1569, 2016.

- [72] C. A. Sima, G. C. Lazaroiu, S. M. Ieee, V. Dumbrava, and M. Ieee, “Transmission Expansion Planning Optimization for Improving RES Integration on Electricity Market,” *10th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng.*, pp. 855–859, 2017.
- [73] S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia, and R. Romero, “Specialised branch-and-bound algorithm for transmission network expansion planning,” *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 148, no. 5, pp. 482–488, 2001.
- [74] L. P. Garcés, A. J. Conejo, R. García-bertrand, and R. Romero, “A Bilevel Approach to Transmission Expansion Planning Within a Market Environment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1513–1522, 2009.
- [75] J. M. Arroyo, N. Alguacil, and M. Carrión, “A Risk-Based Approach for Transmission Network Expansion Planning Under Deliberate Outages,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1759–1766, 2010.
- [76] V. A. Levi and M. S. Calovic, “A NEW DECOMPOSITION BASED METHOD FOR OPTIMAL EXPANSION PLANNING OF LARGE TRANSMISSION NETWORKS,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 3, pp. 937–943, 1991.
- [77] J. Á. López, K. Ponnambalam, and V. H. Quintana, “Generation and Transmission Expansion Under Risk Using Stochastic Programming,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 1369–1378, 2007.
- [78] M. Carrión, J. M. Arroyo, and N. Alguacil, “Vulnerability-Constrained Transmission Expansion Planning: A Stochastic Programming Approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1436–1445, 2007.
- [79] J. H. Roh, M. Shahidehpour, and L. Wu, “Market-Based Generation and Transmission Planning With Uncertainties,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1587–1598, 2009.
- [80] A. K. Kazerooni and J. Mutale, “Transmission Network Planning Under Security and Environmental Constraints,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 1169–1178, 2010.
- [81] J. H. Zhao, J. Foster, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, “Flexible Transmission Network Planning Considering Distributed Generation Impacts,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1434–1443, 2011.
- [82] S. López, G. Member, A. Aguilera, and G. Blanco, “Uncertainty: An Approach based on Real Option and Game Theory Against Nature,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 11, no. 1, pp. 566–571, 2013.
- [83] S. Alaei, R. Hooshmand, S. Member, and R. Hemmati, “Incorporating Reliability Solved Using SFLA Meta-heuristic Optimization Technique,”

CSEE J. POWER ENERGY Syst., vol. 2, no. 2, pp. 79–86, 2016.

- [84] R. Romero, C. Rocha, M. Mantovani, and J. R. S. Mantovani, “Analysis of heuristic algorithms for the transportation model in static and multistage planning in network expansion systems,” *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 5, pp. 521–526, 2003.
- [85] I. G. Sánchez, R. Romero, J. R. S. Mantovani, and M. J. Rider, “Transmission-expansion planning using the DC model and nonlinear-programming technique,” *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 6, pp. 763–769, 2005.
- [86] R. Romero, C. Rocha, J. R. S. Mantovani, and I. G. Sánchez, “Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning,” *IEEE Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 2, pp. 277–282, 2005.
- [87] E. J. de Oliveira, I. C. da Silva, J. L. R. Pereira, and S. Carneiro, “Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1616–1621, 2005.
- [88] R. K. Gajbhiye, D. Naik, S. Dambhare, and S. A. Soman, “An Expert System Approach for Multi-Year Short-Term Transmission System Expansion Planning: An Indian Experience,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 226–237, 2008.
- [89] M. S. Sepasian, H. Seifi, a. a. Foroud, and a. R. Hatami, “A Multiyear Security Constrained Hybrid Generation-Transmission Expansion Planning Algorithm Including Fuel Supply Costs,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1609–1618, Aug. 2009.
- [90] G. Vinasco, M. J. Rider, R. Romero, and S. Member, “A Strategy to Solve the Multistage Transmission Expansion Planning Problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2574–2576, 2011.
- [91] R. Bent, G. L. Toole, and A. Berscheid, “Transmission Network Expansion Planning With Complex Power Flow Models,” *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–9, 2011.
- [92] H. Zhang, S. Member, G. T. Heydt, L. Fellow, V. Vittal, and J. Quintero, “An Improved Network Model for Transmission Expansion Planning Considering Reactive Power and Network Losses,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3471–3479, 2013.
- [93] M. Rahmani, S. Member, R. Romero, S. Member, and M. J. Rider, “Strategies to Reduce the Number of Variables and the Combinatorial Search Space of the Multistage,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2164–2173, 2013.
- [94] S. Majumder, R. M. Shereef, and S. A. Khaparde, “Two-stage algorithm for

- efficient transmission expansion planning with renewable energy resources,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 3, pp. 320–329, 2017.
- [95] R. A. Gallego Rendón, A. E. Zuluaga, and R. A. Romero Lazaro, *TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN COMBINATORIAL*. 2006.
- [96] J. Choi, T. D. Mount, R. J. Thomas, and R. Billinton, “Probabilistic reliability criterion for planning transmission system expansions,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 153, no. 6, pp. 719–727, 2006.
- [97] M. Xie, J. Zhong, and F. F. Wu, “Multiyear Transmission Expansion Planning Using Ordinal Optimization,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1420–1428, Nov. 2007.
- [98] A. Kazemi, S. Jalilzadeh, M. Mahdavi, and H. Haddadian, “Genetic algorithm-based investigation of load growth factor effect on the network loss in TNEP,” *2008 3rd IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 764–769, Jun. 2008.
- [99] H. Yu, C. Y. Chung, K. P. Wong, and J. H. Zhang, “A Chance Constrained Transmission Network Expansion Planning Method With Consideration of Load and Wind Farm Uncertainties,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1568–1576, 2009.
- [100] J. H. Zhao, Z. Y. Dong, P. Lindsay, and K. P. Wong, “Flexible Transmission Expansion Planning With Uncertainties in an Electricity Market,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 479–488, 2009.
- [101] H. Zhang, V. Vittal, G. T. Heydt, and J. Quintero, “A Mixed-Integer Linear Programming Approach for Multi-Stage Security-Constrained Transmission Expansion Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–9, 2011.
- [102] J. Kwon and K. W. Hedman, “Transmission expansion planning model considering conductor thermal dynamics and high temperature low sag conductors,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 15, pp. 2311–2318, 2015.
- [103] H. A. Gil, E. Luiz, and F. D. Galiana, “Modeling Competition in Transmission Expansion,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 1043–1049, 2002.
- [104] M. O. Buygi, G. Balzer, H. M. Shanechi, and M. Shahidehpour, “Market-Based Transmission Expansion Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 2060–2067, 2004.
- [105] R. Fang and D. J. Hill, “A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 374–380, 2006.
- [106] G. B. Shrestha and P. A. J. Fonseka, “Optimal transmission expansion under different market structures,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 5, pp. 697–706, 2007.

- [107] E. E. Sauma and S. S. Oren, "Economic Criteria for Planning Transmission Investment in Restructured Electricity Markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1394–1405, Nov. 2007.
- [108] P. R. Gribik, D. Shirmohammadi, J. S. Graves, and J. G. Kritikson, "Transmission Rights and Transmission Expansions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1728–1737, Nov. 2005.
- [109] S. P. Torres and C. A. Castro, "Expansion planning for smart transmission grids using AC model and shunt compensation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 5, pp. 966–975, 2014.
- [110] M. Moeini-aghtaie, A. Abbaspour, and M. Fotuhi-firuzabad, "Incorporating Large-Scale Distant Wind Farms in Probabilistic Transmission Expansion Planning — Part II: Case Studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–8, 2012.
- [111] M. Moeini-aghtaie, A. Abbaspour, and M. Fotuhi-firuzabad, "Incorporating Large-Scale Distant Wind Farms in Probabilistic Transmission Expansion Planning — Part I: Theory and Algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–9, 2012.
- [112] G. A. Orfanos, P. S. Georgilakis, S. Member, and N. D. Hatziargyriou, "Transmission Expansion Planning of Systems With Increasing Wind Power Integration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1355–1362, 2013.
- [113] R. A. Jabr and S. Member, "With Uncertain Renewable Generation and Loads," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4558–4567, 2013.
- [114] A. Arabali, S. Member, M. Ghofrani, and S. Member, "A Multi-Objective Transmission Expansion Planning Framework in Deregulated Power," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 3003–3011, 2014.
- [115] R. Chatthaworn and S. Chaitusaney, "Improving method of robust transmission network expansion planning considering intermittent renewable energy generation and loads," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 13, pp. 1621–1627, 2015.
- [116] J. Wen *et al.*, "Transmission Network Expansion Planning Considering Uncertainties in Loads and Renewable Energy Resources," *CSEE J. POWER ENERGY Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 78–85, 2015.
- [117] C. Li, Z. Dong, G. Chen, F. Luo, and J. Liu, "Flexible transmission expansion planning associated with large-scale wind farms integration considering demand response," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 15, pp. 2276–2283, 2015.
- [118] C. Correa, A. Sanchez, and G. Marulanda, "Expansion of Transmission Networks Considering Large Wind Power Penetration and Demand Uncertainty," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 3, pp. 1235–1244, 2016.

- [119] H. Doagou-mojarrad, H. Rastegar, and G. B. Gharehpetian, "Probabilistic multi-objective HVDC / AC transmission expansion planning considering distant wind / solar farms," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 140–149, 2016.
- [120] J. Li, L. Ye, Y. Zeng, and H. Wei, "A Scenario-Based Robust Transmission Network Expansion Planning Method for Consideration of Wind Power Uncertainties," *CSEE J. POWER ENERGY Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 11–18, 2016.
- [121] Z. Wu, S. Member, and P. P. Zeng, "Two-Stage Stochastic Dual Dynamic Programming for Transmission Expansion Planning with Significant Renewable Generation and N - k Criterion," *CSEE J. POWER ENERGY Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 3–10, 2016.
- [122] B. Alizadeh, S. Dehghan, N. Amjady, S. Jadid, and A. Kazemi, "Robust transmission system expansion considering planning uncertainties," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. January, pp. 1318–1331, 2013.
- [123] Ö. Özdemir, F. D. Munoz, J. L. Ho, S. Member, and B. F. Hobbs, "Economic Analysis of Transmission Expansion Planning With Price-Responsive Demand and Quadratic Losses by Successive LP," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1096–1107, 2016.
- [124] A. S. A. O. y E. Torres, "Estudio de repotenciación de las líneas de transmisión Itaipú - Margen Derecha en 500kV con conductores Termoresistentes," *Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, Puerto Iguazú*. pp. 1–6, 2009.
- [125] E. de T. E. S. A. (ETESA), "Informe de proyectos al 31 de diciembre de 2011," *Gerencia de Proyectos, Panamá*. 2011.
- [126] C. de O. E. del S. I. N. (COES), "Informe DP-01-2012: Propuesta de la Actualización del Plan de Transmisión 2013 - 2022," 2012.
- [127] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), "Plan de Expansión de Referencia Generación – Transmisión 2012 – 2025," *Bogotá: Ministerio de Minas y Energía*. 2012.
- [128] Reliability Test System Task Force, "The IEEE Reliability Test System - 1996," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 1010–1020, 1999.
- [129] Mathworks, "MATLAB," *The MathWorks, Inc.*, 1994. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [130] G. D. P. Zimmerman R, Murillo C, "MATPOWER: Steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 12–19, 2011.

ANEXO A

Tabla 5. Datos de generación y demanda, sistema Garver Caso 01.

Barra	Tipo	PG (MW)	Pd (MW)	PG Máx. (MW)
1	V θ	50	80	150
2	PQ	0	240	0
3	PV	165	40	360
4	PQ	0	160	0
5	PQ	0	240	0
6	PV	545	0	600

Fuente: Propia a partir de [1].

Tabla 6. Datos de la red y parámetros para la adición de circuitos, sistema Garver Caso 01.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.1	0.4	100	40
1-3	0.09	0.38	100	38
1-4	0.15	0.6	80	60
1-5	0.05	0.2	100	20
1-6	0.17	0.68	70	68
2-3	0.05	0.2	100	20
2-4	0.1	0.4	100	40
2-5	0.08	0.31	100	31
2-6	0.08	0.3	100	30
3-4	0.15	0.59	82	59
3-5	0.05	0.2	100	20
3-6	0.12	0.48	100	48
4-5	0.16	0.63	75	63
4-6	0.08	0.3	100	30
5-6	0.15	0.61	78	61

Fuente: Propia a partir de [1].

Tabla 7. Parámetros utilizados para la repotenciación de circuitos, sistema Garver Caso 01.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.05	0.2	200	20
1-4	0.075	0.3	160	30

1-5	0.025	0.1	200	10
2-3	0.025	0.1	200	10
2-4	0.05	0.2	200	20
3-5	0.025	0.1	200	10

Fuente: Propia.

Tabla 8. Parámetros utilizados para la compensación en derivación.

Parámetro	Valor
Número máximo de pasos (NP máx)	-5 a 5
Costo por paso (US\$)	2
Capacidad por paso (Mvar)	20

Fuente: Propia.

Tabla 9. Parámetros utilizados para la compensación serie, sistema Garver Caso 01.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.) Comp. Capacitiva	X (p.u.) Comp. Reactiva	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.1	0.2	0.8	100	10
1-4	0.15	0.3	1.2	80	15
1-5	0.05	0.1	0.4	100	5
2-3	0.05	0.1	0.4	100	5
2-4	0.1	0.2	0.8	100	10
3-5	0.05	0.1	0.4	100	5

Fuente: Propia.

Tabla 10. Parámetros utilizados para la reconfiguración de circuitos, sistema Garver Caso 01.

Corredor Existente	Nuevos Corredores (Reconfiguración)		R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
2-4	2-6	4-6	0.1	0.4	100	13.33

Fuente: Propia.

ANEXO B

Tabla 11. Datos de generación y demanda, sistema Garver Caso 02.

Barra	Tipo	Pd (MW)	Qd (MVar)	PG Máx. (MW)	PG Mín. (MW)	QG Máx. (MVar)	QG Mín. (MVar)
1	V θ	80	16	160	0	48	-10
2	PQ	240	48	-	-	-	-
3	PV	40	8	370	0	101	-10
4	PQ	160	32	-	-	-	-
5	PQ	240	48	-	-	-	-
6	PV	0	0	610	0	183	-10

Fuente: Propia a partir de [47].

Tabla 12. Datos de la red y parámetros para la adición de circuitos, sistema Garver Caso 02.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.04	0.4	120	40
1-3	0.038	0.38	120	38
1-4	0.06	0.6	100	60
1-5	0.02	0.2	120	20
1-6	0.068	0.68	90	68
2-3	0.02	0.2	120	20
2-4	0.04	0.4	120	40
2-5	0.031	0.31	120	31
2-6	0.03	0.3	120	30
3-4	0.059	0.59	102	59
3-5	0.02	0.2	120	20
3-6	0.048	0.48	120	48
4-5	0.063	0.63	95	63
4-6	0.03	0.3	120	30
5-6	0.061	0.61	98	61

Fuente: Propia a partir de [47].

Tabla 13. Parámetros utilizados para la repotenciación de circuitos, sistema Garver Caso 02.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.02	0.2	240	20

1-4	0.03	0.3	200	30
1-5	0.01	0.1	240	10
2-3	0.01	0.1	240	10
2-4	0.02	0.2	240	20
3-5	0.01	0.1	240	10

Fuente: Propia.

Tabla 14. Parámetros utilizados para la compensación serie, sistema Garver Caso 02.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.) Comp. Capacitiva	X (p.u.) Comp. Reactiva	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.04	0.2	0.8	120	10
1-4	0.06	0.3	1.2	100	15
1-5	0.02	0.1	0.4	120	5
2-3	0.02	0.1	0.4	120	5
2-4	0.04	0.2	0.8	120	10
3-5	0.02	0.1	0.4	120	5

Fuente: Propia.

Tabla 15. Parámetros utilizados para la reconfiguración de circuitos, sistema Garver Caso 02.

Corredor Existente	Nuevos Corredores (Reconfiguración)		R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
2-4	2-6	4-6	0.04	0.4	120	13.33

Fuente: Propia.

ANEXO C

Tabla 16. Datos de generación y demanda, sistema IEEE24.

Barra	Tipo	Pd (MW)	Qd (MVar)	PG Máx. (MW)	PG Mín. (MW)	QG Máx. (MVar)	QG Mín. (MVar)
1	V θ	324	66	576	0	240	-150
2	PV	291	60	576	0	240	-150
3	PQ	540	111	-	-	-	-
4	PQ	222	45	-	-	-	-
5	PQ	213	42	-	-	-	-
6	PV	408	84	0	0	0	-300
7	PV	375	75	900	0	540	0
8	PQ	513	105	-	-	-	-
9	PQ	525	108	-	-	-	-
10	PQ	585	120	-	-	-	-
11	PQ	0	0	-	-	-	-
12	PQ	0	0	-	-	-	-
13	PV	795	162	1773	0	720	0
14	PV	582	117	0	0	600	-150
15	PV	951	192	645	0	330	-150
16	PV	300	60	465	0	240	-150
17	PQ	0	0	-	-	-	-
18	PV	999	204	1200	0	600	-150
19	PQ	543	111	-	-	-	-
20	PQ	384	78	-	-	-	-
21	PV	0	0	1200	0	600	-150
22	PV	0	0	900	0	288	-180
23	PV	0	0	1980	0	930	-375
24	PQ	0	0	-	-	-	-

Fuente: Propia a partir de [3].

Tabla 17. Datos de la red y parámetros para la adición de circuitos, sistema IEEE24.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.0026	0.0139	200	3
1-3	0.0546	0.2112	220	55
1-5	0.0218	0.0845	220	22
1-8	0.0348	0.1344	220	35

2-4	0.0328	0.1267	220	33
2-6	0.0497	0.192	220	50
2-8	0.0328	0.1267	220	33
3-9	0.0308	0.119	220	31
3-24	0.0023	0.0839	600	50
4-9	0.0268	0.1037	220	27
5-10	0.0228	0.0883	220	23
6-7	0.0497	0.192	220	50
6-10	0.0139	0.0605	200	16
7-8	0.0159	0.0614	220	16
8-9	0.0427	0.1651	220	43
8-10	0.0427	0.1651	220	43
9-11	0.0023	0.0839	600	50
9-12	0.0023	0.0839	600	50
10-11	0.0023	0.0839	600	50
10-12	0.0023	0.0839	600	50
11-13	0.0061	0.0476	625	66
11-14	0.0054	0.0418	625	58
12-13	0.0061	0.0476	625	66
12-23	0.0124	0.0966	625	134
13-14	0.0057	0.0447	625	62
13-23	0.0111	0.0865	625	120
14-16	0.005	0.0389	625	54
14-23	0.008	0.062	625	86
15-16	0.0022	0.0173	625	24
15-21	0.0063	0.049	625	68
15-24	0.0067	0.0519	625	72
16-17	0.0033	0.0259	625	36
16-19	0.003	0.0231	625	32
16-23	0.0105	0.0822	625	114
17-18	0.0018	0.0144	625	20
17-22	0.0135	0.1053	625	146
18-21	0.0033	0.0259	625	36
19-20	0.0051	0.0396	625	55
19-23	0.0078	0.0606	625	84
20-23	0.0028	0.0216	625	30
21-22	0.0087	0.0678	625	94

Fuente: Propia a partir de [3].

Tabla 18. Parámetros utilizados para la repotenciación de circuitos, sistema IEEE24.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.0013	0.00695	400	1.5
1-3	0.0273	0.1056	440	27.5
1-5	0.0109	0.04225	440	11
2-4	0.0164	0.06335	440	16.5
2-6	0.02485	0.096	440	25
3-9	0.0154	0.0595	440	15.5
3-24	0.00115	0.04195	1200	25
4-9	0.0134	0.05185	440	13.5
5-10	0.0114	0.04415	440	11.5
6-10	0.00695	0.03025	400	8
7-8	0.00795	0.0307	440	8
8-9	0.02135	0.08255	440	21.5
8-10	0.02135	0.08255	440	21.5
9-11	0.00115	0.04195	1200	25
9-12	0.00115	0.04195	1200	25
10-11	0.00115	0.04195	1200	25
10-12	0.00115	0.04195	1200	25
11-13	0.00305	0.0238	1250	33
11-14	0.0027	0.0209	1250	29
12-13	0.00305	0.0238	1250	33
12-23	0.0062	0.0483	1250	67
13-23	0.00555	0.04325	1250	60
14-16	0.0025	0.01945	1250	27
15-16	0.0011	0.00865	1250	12
15-21	0.00315	0.0245	1250	34
15-24	0.00335	0.02595	1250	36
16-17	0.00165	0.01295	1250	18
16-19	0.0015	0.01155	1250	16
17-18	0.0009	0.0072	1250	10
17-22	0.00675	0.05265	1250	73
18-21	0.00165	0.01295	1250	18
19-20	0.00255	0.0198	1250	27.5
20-23	0.0014	0.0108	1250	15
21-22	0.00435	0.0339	1250	47

Fuente: Propia.

Tabla 19. Parámetros utilizados para la compensación serie, sistema IEEE24.

Corredores	R (p.u.)	X (p.u.) Comp. Capacitiva	X (p.u.) Comp. Reactiva	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-2	0.0026	0.00695	0.0278	200	0.75
1-3	0.0546	0.1056	0.4224	220	13.75
1-5	0.0218	0.04225	0.169	220	5.5
2-4	0.0328	0.06335	0.2534	220	8.25
2-6	0.0497	0.096	0.384	220	12.5
3-9	0.0308	0.0595	0.238	220	7.75
3-24	0.0023	0.04195	0.1678	600	12.5
4-9	0.0268	0.05185	0.2074	220	6.75
5-10	0.0228	0.04415	0.1766	220	5.75
6-10	0.0139	0.03025	0.121	200	4
7-8	0.0159	0.0307	0.1228	220	4
8-9	0.0427	0.08255	0.3302	220	10.75
8-10	0.0427	0.08255	0.3302	220	10.75
9-11	0.0023	0.04195	0.1678	600	12.5
9-12	0.0023	0.04195	0.1678	600	12.5
10-11	0.0023	0.04195	0.1678	600	12.5
10-12	0.0023	0.04195	0.1678	600	12.5
11-13	0.0061	0.0238	0.0952	625	16.5
11-14	0.0054	0.0209	0.0836	625	14.5
12-13	0.0061	0.0238	0.0952	625	16.5
12-23	0.0124	0.0483	0.1932	625	33.5
13-23	0.0111	0.04325	0.173	625	30
14-16	0.005	0.01945	0.0778	625	13.5
15-16	0.0022	0.00865	0.0346	625	6
15-21	0.0063	0.0245	0.098	625	17
15-24	0.0067	0.02595	0.1038	625	18
16-17	0.0033	0.01295	0.0518	625	9
16-19	0.003	0.01155	0.0462	625	8
17-18	0.0018	0.0072	0.0288	625	5
17-22	0.0135	0.05265	0.2106	625	36.5
18-21	0.0033	0.01295	0.0518	625	9
19-20	0.0051	0.0198	0.0792	625	13.75
20-23	0.0028	0.0108	0.0432	625	7.5
21-22	0.0087	0.0339	0.1356	625	23.5

Fuente: Propia.

Tabla 20. Parámetros utilizados para la reconfiguración de circuitos, sistema IEEE24.

Corredor Existente	Nuevos Corredores (Reconfiguración)		R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad (MW)	Costo US\$
1-3	1-4	3-4	0.0546	0.2112	220	18.33
2-6	2-8	6-8	0.0497	0.192	220	16.67
4-9	4-5	9-5	0.0268	0.1037	220	9.00
12-23	12-14	23-14	0.0124	0.0966	625	44.67

Fuente: Propia.