

PLANEAMIENTO ESTÁTICO DE LA EXPANSIÓN DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN: COMPARACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS, BÚSQUEDA TABÚ Y ENUMERACIÓN TRUNCADA

PAOLA BARATTO CALLEJAS
Ingeniera Electricista UIS
Universidad Industrial de Santander
p_baratto@yahoo.com

CAMILO TÁUTIVA MANCERA
Ingeniero Electricista UIS
Universidad Industrial de Santander
c-tautiv@uniandes.edu.co

GERARDO LATORRE BAYONA
Ingeniero Electricista
Profesor Titular Escuela de Ingeniería
Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
glatorre@uis.edu.co

RESUMEN

Este trabajo comprende el estudio y análisis comparativo de tres métodos de planeación de la expansión de sistemas de transporte de energía eléctrica, aplicados a tres sistemas de diferente tamaño y complejidad: Colombiano, Sur brasilero y Norte-nordeste brasilero. Con base en este análisis se establecen criterios de aplicación de dichos métodos al sistema colombiano.

La comparación de los resultados se realizó teniendo en cuenta el costo de inversión, costo de operación y costo de energía no suministrada; estos últimos agrupados en el costo de explotación. Debido a que el software disponible para Búsqueda Tabú (BT) y Algoritmos Genéticos (AG) no proporciona los costos de explotación, fue necesario evaluar las soluciones en modo cobertura utilizando el software de Enumeración Truncada (ET) para obtener esos costos. BT fue quien presentó un mejor desempeño para el sistema colombiano; sin embargo, ET y AG presentaron soluciones cercanas.

Con este estudio se comprobó que la solución es sensible a los parámetros de control que orientan la búsqueda dentro de cada método. Por tanto, es importante seleccionarlos de manera adecuada para obtener soluciones de buena calidad. Además, se puede afirmar que no necesariamente los algoritmos deben manejarse de manera independiente. En consecuencia, es posible obtener resultados muy satisfactorios si se integran los algoritmos, aprovechando las potencialidades de cada uno de ellos. Sin embargo, ET tiene una ventaja frente a los demás métodos, ya que permite considerar diferentes escenarios de demanda y/o generación, además de costos reales.

PALABRAS CLAVE: Expansión Sistemas de Transmisión, Planeamiento a largo plazo, Modelos Heurísticos

INTRODUCCIÓN

La planificación estática de la red de transporte de energía eléctrica es una labor de gran importancia y complejidad para las empresas que se encargan de la explotación y mantenimiento de la misma. El planeamiento de la expansión de la red de transmisión tiene como objeto determinar las ampliaciones en la red de transmisión que deben construirse para un horizonte de planeamiento, cumpliendo con los requisitos de demanda y minimizando los costos.

Dentro de los procesos de planificación existen diferentes factores que deben tenerse en cuenta, tales como la demanda, la generación, características de la red existente, situaciones de hidráulicidad, entre otros. Estos, a su vez, hacen que el problema adquiera complejidad por la gran cantidad de variables a considerar.

La planificación estática de la red ha sido objeto de numerosas investigaciones y se han desarrollado diversos métodos, que aunque persiguen un mismo objetivo, resuelven el problema de optimización de diferentes maneras. En este trabajo se estudian tres de esos métodos: Algoritmos genéticos, que está basado en técnicas de inteligencia artificial; Búsqueda Tabú, de naturaleza meta-heurística y Enumeración Truncada, del tipo heurístico constructivo.

Se realiza un análisis comparativo de resultados tomando en cuenta tres casos reales, para de ésta forma establecer criterios para la aplicación de los métodos estudiados al caso colombiano.

PLANIFICACIÓN DE LA RED

Los estudios de planificación pueden ser de largo plazo (horizontes de 15 a 30 años) ó de mediano plazo (horizontes de 6 a 10 años). En los primeros se obtienen los planes maestros de expansión, mientras que los de mediano plazo sirven para definir de manera concreta y precisa todos los elementos que se añadirán a la red.

Para la planificación de la red se utilizan métodos, que son herramientas de cálculo, con los cuales a partir de una información de entrada se obtiene uno o varios planes de expansión. Según el procedimiento que se siga para obtener el plan de expansión, los métodos se pueden clasificar en: Heurísticos y de Optimización. En los heurísticos se van seleccionando paso a paso las alternativas de expansión, basándose en ciertas reglas para

la clasificación de las opciones, sin garantizar que se encuentre el plan óptimo; mientras que los de optimización encuentran el plan de expansión óptimo a partir de un procedimiento de cálculo que da la solución a una formulación matemática del problema, siempre y cuando el problema formulado sea convexo.

Otra clasificación para los métodos de planificación de la red, teniendo en cuenta el desarrollo temporal del plan, los divide en Estáticos y Dinámicos. Los primeros tienen como objetivo encontrar el plan óptimo de expansión de la red para un único horizonte de planeamiento. Los dinámicos, en cambio, obtienen la expansión óptima durante un período de estudio; en ese caso, se determina dónde, cuándo y cuántos nuevos equipos deben ser instalados en dicho período.

Para la definición del plan óptimo se formula la planificación de la red como un problema de optimización de una función objetivo sujeta a una serie de restricciones. Esta optimización consiste en la minimización de la función objetivo, dentro de la cual se pueden considerar tres componentes: costos de inversión en nuevas instalaciones, costo de la energía no suministrada en condiciones de contingencia y costo de operación. Todos los métodos minimizan los costos de inversión, pero muy pocos consideran además los costos de indisponibilidad o los costos de explotación [Latorre, 1993].

La formulación del problema se plantea de la siguiente manera:

$$\text{Mínimo } CT_{x,y} = CI(x) + CE(y) + CF(y)$$

$$\text{Sujeto a } \begin{aligned} RX(x) &< a \\ RE(x,y) &< b \\ RF(x,y) &< h \end{aligned}$$

Donde:

x	Vector de variables de inversión
y	Vector de variables de explotación
CT	Costos anuales totales
CI	Costos anuales de inversión
CE	Costos anuales de explotación
CF	Costos anuales de indisponibilidad
RX	Restricciones de expansión
RE	Restricciones de explotación
RF	Restricciones de indisponibilidad

MÉTODOS DE PLANIFICACIÓN

Los métodos de planificación estática de la red de transporte de energía eléctrica estudiados en este trabajo se basan en técnicas heurísticas, donde se van generando y evaluando planes alternativos de expansión, hasta que el algoritmo no sea capaz de encontrar un mejor plan bajo los criterios que se hayan establecido. La generación de planes se realiza con base en reglas lógicas (determinadas por sensibilidades) y empíricas (que orientan la búsqueda y limitan el número de evaluaciones).

Enumeración Truncada

Este método se basa en una búsqueda heurística que utiliza un procedimiento de enumeración truncada. El algoritmo parte de un plan de expansión inicial y lo modifica paso a paso. Cada plan surge como resultado de una decisión que puede ser la inclusión o retiro de una línea. El algoritmo permite un número determinado de empeoramientos locales de la función objetivo, es decir, que al tomar una decisión y evaluar el nuevo plan, el valor de la función objetivo empeora (aumenta); este valor puede ser ajustado.

La búsqueda se organiza mediante una estructura en árbol, donde los nodos representan planes de expansión y las ramas, las decisiones tomadas durante el proceso de enumeración y evaluación de planes. Existen nodos que deben ser evaluados (se deben calcular los costos) y otros que no. Los nodos que han de ser evaluados se enumeran según el orden en el que van siendo creados durante el proceso de búsqueda [Latorre, 1993]. Los nodos se pueden clasificar además en nodos abiertos y cerrados. Los cerrados son aquellos donde todas las decisiones han sido congeladas. Los abiertos poseen opciones sin congelar.

De cada nodo se crean dos ramas con soluciones excluyentes, permitiendo así una enumeración exhaustiva de los planes alternativos de expansión. El proceso de búsqueda se basa en desplazamientos en el árbol en dos sentidos: avance, donde se van congelando opciones (progresando en niveles de profundidad o anchura) y retroceso, donde se retrocede hasta encontrar un nodo abierto (regresando en niveles de profundidad o anchura). Todas las ramas recorridas hasta llegar a un nodo cerrado describen una trayectoria de búsqueda. En algunos casos esas trayectorias pueden tener ramas comunes.

En casos reales, con muchas opciones de expansión y varios tipos de líneas, la enumeración de todos los posibles planes de expansión puede ser demasiado extensa. Para

evitar esto se utilizan criterios de truncamiento y de parada de búsqueda local. Los criterios de parada de búsqueda local detienen el proceso de búsqueda o el proceso de avance. Los criterios utilizados son: alcanzar la cota inferior del costo total, violar restricciones de expansión y superar el incremento de inversión admisible.

Para orientar la búsqueda se utiliza el criterio de inversión, que es un valor numérico calculado para cada una de las variables de expansión y que permite ordenarlas, colocando primero la opción más prometedora de las no congeladas. Este criterio se obtiene a partir de una relación costo/beneficio.

El procedimiento interactivo de utilización del modelo consta de tres fases: la primera fase de acercamiento obtiene una solución inicial para la siguiente fase, la segunda, denominada de búsqueda local, determina un mejor plan de expansión de la red mediante una búsqueda local a partir de la solución encontrada en la primera fase. Por último, se realiza una fase de verificación de la mejor solución encontrada.

Búsqueda Tabú

La Búsqueda Tabú es un método meta heurístico de búsqueda iterativa que se mueve de una solución a otra buscando la mejor. Utiliza conceptos generalizados de inteligencia artificial y de optimización combinatorial.

Los conceptos básicos de Búsqueda Tabú son movimientos y memoria. Un movimiento es el "paso" que se le aplica a una solución de prueba para ir a otra, buscando minimizar el valor de la función objetivo. En caso de que ningún movimiento mejore su valor, se tiene un óptimo local y el algoritmo selecciona el movimiento que menos la empeore. Los tipos de movimientos básicos son: adición, retiro e intercambio.

La memoria se utiliza con diferentes objetivos tales como, guiar la búsqueda para evitar ciclos.

El criterio de parada está determinado por alguno de los siguientes aspectos:

- Se sobrepasa el límite de iteraciones establecido.
- Se encuentra un número de soluciones determinado.
- No se consigue mejorar la solución actual en un número dado de iteraciones.
- No se encuentra una solución viable.

El primer criterio de evaluación y el más importante es el factor de sensibilidad con respecto a la susceptancia, que expresa la reducción del costo de operación ocasionada por la reducción del corte de carga, debido a su vez a refuerzos en la capacidad de transporte en una rama. El segundo criterio de evaluación es el costo del circuito, que evalúa la conveniencia económica de adicionar un circuito que puede ser muy atractivo desde el punto de vista del factor de sensibilidad, pero que puede ser no recomendable desde el punto de vista económico. El siguiente criterio considerado es la evaluación de las susceptancias de los N circuitos seleccionados, esto se realiza para evitar decisiones de expansión que no tengan un impacto significativo en el corte de carga. El otro criterio utilizado es el flujo por las líneas. Aquellos circuitos que se encuentran cerca de su límite de capacidad de transporte son más atractivos para ser seleccionados.

Para el proceso de búsqueda en la planeación de la expansión de la red se dan tres fases [Areiza, 1997]:

a. Fase de expansión: Aquí se buscan diferentes soluciones factibles y se identifican aquellos circuitos que más se repiten.

b. Fase de intensificación: En esta fase se busca eliminar los circuitos innecesarios. Se dan dos procesos iterativos: para soluciones con bajo costo y con alto costo.

c. Fase de diversificación: Este proceso lleva a determinar otras redes viables de mínimo costo. Para esto, explora configuraciones de menor costo en el espacio de soluciones, buscando superar las limitaciones de óptimos locales inherentes al problema y en algunos casos, llegando al óptimo global.

Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos son técnicas de solución de problemas de optimización que hacen parte de las llamadas técnicas evolutivas, que requieren de una población inicial (conjunto de soluciones posibles) para su funcionamiento; sin garantía, pero con alta probabilidad de obtener la solución óptima.

El Algoritmo Genético simula el principio de selección natural, que conlleva la supervivencia de los individuos mejor dotados que compiten con otros individuos por los recursos.

Existen cuatro procesos básicos: reproducción, variaciones aleatorias, competición y selección de individuos de una población dada. El resultado final de

estos procesos es la evolución. Los algoritmos genéticos parten de una población inicial; realizan un proceso de selección de las mejores configuraciones que participarán en la generación de nuevos descendientes; realizan recombinación entre estas mejores configuraciones y finalmente un proceso de mutación determina los elementos de la nueva generación.

El proceso de optimización se inicia con la selección de una población, esto es, un conjunto de soluciones (configuraciones) candidatas. Cada configuración es calificada con un valor que corresponde a la función objetivo que presenta. Para distinguir entre las soluciones "buenas" y las soluciones "malas", se debe definir en el proceso una función de adaptabilidad "fitness".

Terminado el proceso de selección, sobre la población de descendientes se aplican los mecanismos de recombinación y mutación. La mutación tiene la finalidad de reestablecer la posible pérdida de información útil y crear diversidad en el material genético de la población.

En el problema de planeamiento, la codificación utilizada es la decimal, debido a que presenta ventajas en cuanto a: espacio de memoria necesario para el almacenamiento de las configuraciones, tiempos de ejecución y facilidades para realizar los procesos de recombinación y mutación [Escobar, 2002].

Existe además un parámetro que penaliza en la función objetivo la demanda no atendida por las configuraciones (corte de carga) y tiene como propósito volver poco atractivas aquellas alternativas que tienen poca inversión en equipos nuevos y que no satisfacen los requerimientos de la demanda futura; este se conoce como a .

CASOS DE PRUEBA

Como sistemas de prueba se seleccionaron el sistema Sur brasilero de 46 nodos, Norte - nordeste brasilero de 87 nodos y Colombiano de 171 nodos. Para este trabajo los resultados de Búsqueda Tabú y Enumeración Truncada se obtuvieron ejecutando dichos programas y los resultados de Algoritmos Genéticos fueron tomados de la referencia [Escobar, 2002]. Las ejecuciones de Búsqueda Tabú, fueron realizadas en ISA - Medellín, tomando como base los archivos de datos de los sistemas que les fueron enviados.

Debido a que sólo el algoritmo de Enumeración Truncada proporciona los costos de explotación (costos de operación y costo de la energía no suministrada), las

soluciones obtenidas a partir de Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos, fueron evaluadas en modo cobertura del programa de Enumeración Truncada, para obtener dichos costos y así poder realizar la comparación.

COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis comparativo de los algoritmos se realizó, revisando su comportamiento para cada uno de los casos estudiados, los cuales presentan diferentes características en tamaño y complejidad. Para la comparación se tuvo en cuenta el costo total de las soluciones obtenidas por cada método, que incluye además del costo de inversión, el costo de la energía no suministrada y los costos de operación. Cabe señalar que debido a los datos con los que se implementaron los casos, los costos de operación son iguales para los tres métodos utilizados.

El valor de la energía no suministrada fue constante en cada caso, es decir, no cambió según el algoritmo, para efectos de comparación. Para el caso Colombiano y Sur brasilero este costo fue de 0,166 \$US/kWh y para el caso Norte nordeste brasilero fue de 0,8 \$US/kWh. El costo total (inversión, operación y energía no suministrada) asociado a un plan de expansión permite realizar la comparación entre los métodos de planeación a pesar de que estos utilizan diferentes criterios para la obtención de dicho plan.

Caso Sur brasilero

Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos coinciden en la mejor solución encontrada para este caso, que además corresponde a la mejor solución citada en la literatura, mientras que Enumeración Truncada encuentra una solución con mayor costo de inversión. Las mejores soluciones encontradas por los métodos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados Caso sur brasilero

Método	Costo inversión (MSUS)	Costo explotación (MSUS)	Corte de carga (%)	Costo total (MSUS)
Enumeración Truncada	163	3 024	0.0	3 187
Búsqueda Tabú	154,2	3 024	0.0	3 178
Algoritmos Genéticos	154,2	3 024	0.0	3 178

Caso Colombiano

Para este sistema de gran tamaño y mediana complejidad la mejor solución fue la encontrada por el método de Búsqueda Tabú, como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados Caso Colombiano

Método	Costo inversión (MSUS)	Costo explotación (MSUS)	Corte de carga (%)	Costo total (MSUS)
Enumeración Truncada	510	8 335	1,49	8 845
Búsqueda Tabú	506,3	8 335	1,49	8 841
Algoritmos Genéticos	560,0	8 295	1,15	8855

Se realizaron unas pruebas de verificación con el método de Enumeración Truncada, tomando como solución inicial las mejores soluciones obtenidas tanto por Búsqueda Tabú como por Algoritmos Genéticos; para esto se utilizaron los parámetros recomendados para verificar la veracidad de la solución final [Latorre, 1993]. La solución de Búsqueda Tabú no pudo mejorarse, es decir, que el algoritmo no encontró una mejor solución. En cambio, la solución de Algoritmos Genéticos se mejoró, obteniéndose una solución con menor costo de inversión (507 millones de dólares) y mayor corte de carga (1,49 %), pero con un menor costo total (8 841 millones de dólares), que fue el mismo costo total de la solución obtenida por el método de Búsqueda Tabú.

Caso Norte-nordeste brasilero

Este es un caso de alta complejidad, ya que presenta una gran cantidad de nodos aislados y muchas opciones de expansión. Es por esto que Búsqueda Tabú presentó problemas de convergencia. Los mejores resultados obtenidos para este caso, se ilustran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados Caso Norte-nordeste brasilero

Método	Costo inversión (MSUS)	Costo explotación (MSUS)	Corte de carga (%)	Costo total (MSUS)
Enumeración Truncada	5 646	13 076	0.001	18 722
Búsqueda Tabú	3 241	13 594	0,26	16 835
Algoritmos Genéticos	2 598	13 081	0,002	15 679

Es importante aclarar que las soluciones de Algoritmos Genéticos mostradas para este caso, corresponden a la solución del problema dinámico 1998-2002-2008. La comparación se realizó en el horizonte global de planeamiento 1998-2008, así que aunque las soluciones del problema dinámico presenten algunas ventajas sobre los estáticos, pueden ser comparables.

CRITERIOS DE APLICACIÓN PARA EL SISTEMA COLOMBIANO

En cuanto a costos totales y plan de expansión, quien presentó un mejor desempeño es el algoritmo de Búsqueda Tabú, teniendo en cuenta que no partió de ninguna solución inicial y llegó a soluciones con bajo corte de carga y bajo costo de inversión. Inicialmente la ejecución parte de unos parámetros base. Si la primera de las configuraciones obtenidas es la mejor de todas, significa que los parámetros utilizados son los adecuados, de lo contrario, estos deben variarse teniendo en cuenta un análisis de sensibilidades de la función objetivo con respecto a cada uno de ellos. El buen desempeño de Búsqueda Tabú para este sistema se debe en parte a que el plan de expansión apunta a refuerzos en la red existente y no presenta problemas de conectividad en la red que son los que causan la falta de convergencia en el método.

Para aplicar Algoritmos Genéticos a este sistema, es necesario utilizar algoritmos heurísticos constructivos eficientes en la etapa de generación de la población inicial tales como Garver y método de mínimo esfuerzo entre otros. Los mecanismos de selección y recombinación que utiliza este método requieren buenas configuraciones iniciales, en las cuales existan ramas de la mejor solución para agruparlas en una única configuración. Además, se necesita que dichas ramas estén presentes en varias de las configuraciones para garantizar que el mecanismo de mutación no las destruya dentro del proceso. Este mecanismo debe utilizar una tasa de mutación variable además de un procedimiento que evalúe el corte de carga de la configuración candidata y permita la adición de nuevos circuitos si el corte de carga es grande, o acepte la eliminación de algunos si el corte de carga es pequeño.

Si se va a utilizar el algoritmo de Enumeración Truncada es importante seleccionar de manera adecuada el valor de la energía no suministrada. Este parámetro es de gran importancia dentro del desempeño del método, pues es clave frente a la decisión de invertir y reducir el corte de carga o no invertir, permitiendo un porcentaje de energía no suministrada. En los otros algoritmos existe la facilidad

de limitar el corte de carga con un porcentaje estipulado por el usuario y por tanto este costo no adquiere tanta relevancia.

Al realizar un análisis de sensibilidades en el algoritmo de Enumeración Truncada se pueden encontrar mejores configuraciones que no han sido revisadas por el algoritmo. Este procedimiento es importante, ya que en muchos casos hay ramas que presentan sensibilidades diferentes de cero, pero cuyo valor no es tan notorio como para que sean incluidas por el algoritmo. Si este análisis es realizado por el usuario, puede incluir o retirar líneas que bajo su criterio presenten sensibilidades que merezcan tenerse en cuenta. De esa forma, se logra una reorientación del proceso de búsqueda que lleve el proceso a regiones no exploradas y donde podría existir el óptimo global. Aunque este procedimiento no garantiza una mejoría y depende en gran manera del criterio de quien ejecute el programa, si se aconseja su aplicación ya que en algunos casos puede llevar a una solución de buena calidad.

De las pruebas realizadas con el algoritmo de Enumeración Truncada, se pudo observar que en algunos casos puede perfeccionar las mejores soluciones encontradas por los otros algoritmos. En el caso colombiano, llevó la mejor solución obtenida por Algoritmos Genéticos a una solución con menor costo total (igual al de Búsqueda Tabú) pero con un plan de expansión diferente. En el caso Norte nordeste brasileiro, no pudo mejorar la solución de Algoritmos Genéticos y en cambio si redujo de manera notoria la solución de Búsqueda Tabú, disminuyendo tanto el corte de carga como el costo de inversión. Este comportamiento muestra que al introducir soluciones iniciales de buena calidad al algoritmo de Enumeración Truncada, en la fase de verificación, este puede mejorarlas hasta llegar a soluciones cercanas a la óptima o incluso a esta. Podemos concluir que no necesariamente deben manejarse estos algoritmos de manera independiente, y se podrían obtener resultados bastante positivos si se integran, aprovechando las potencialidades de cada uno de ellos.

Dependiendo de la aplicación del plan de expansión, debe seleccionarse el algoritmo adecuado. Si se van a tener en cuenta niveles y costos de generación, demanda y costo de energía no suministrada reales, el método de Enumeración Truncada puede mostrar resultados bastante satisfactorios. Aunque su desempeño, en las condiciones estudiadas en esta tesis, no fue el mejor, presentó unos resultados cercanos a los obtenidos por el método de Búsqueda Tabú y no se puede ocultar la ventaja que tiene frente a otros algoritmos, en su condición de considerar el

costo de operación dentro del proceso de búsqueda del plan de expansión. Este estudio se recomienda para trabajos posteriores.

CONCLUSIONES

El principal aporte de este trabajo consistió en el análisis de cada uno de los métodos implementados para tres casos reales de diferente nivel de complejidad, así como la comparación de los resultados obtenidos para establecer ciertos criterios para su posterior aplicación.

El método heurístico de Búsqueda Tabú consigue llegar a soluciones óptimas locales de gran calidad, superiores a las que se obtienen por otros métodos. Una de sus falencias es la falta de convergencia en sistemas con nodos aislados, este es el caso del sistema nortordeste brasilero.

Aunque los algoritmos del tipo heurístico constructivo como Enumeración Truncada han sido considerados de menor calidad que los algoritmos de Optimización Combinatorial como Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos, se ha observado en los ejemplos desarrollados que a pesar de que los resultados aún no superan los obtenidos por dichos métodos, si se encuentran dentro de un margen aceptable y con una utilización adecuada pueden llegar a resultados óptimos. En el caso concreto de Enumeración Truncada, presenta además unas ventajas adicionales como son: análisis de diferentes escenarios de explotación y confiabilidad, consideración de costos de operación y energía no suministrada entre otros.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue posible gracias a la colaboración de los Ingenieros R.D. Cruz y J.M. Areiza de ISA Medellín, quienes no solo ejecutaron los casos en el programa Búsqueda Tabú, sino que hicieron aportes importantes a la investigación. Así mismo agradecemos al Ingeniero A. Escobar de la UTP por su colaboración con la información de Algoritmos Genéticos.

BIBLIOGRAFIA

[1] Areiza, J.M. Metodologia de Expansão Automática da Transmissão utilizando um algoritmo de Busca Tabu, Tesis de Maestría, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil, Diciembre de 1997.

[2] Escobar, A. Planeamiento dinámico de la expansión de sistemas de transmisión utilizando algoritmos combinatoriales. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2002.

[3] Gallego, R., Romero, R., Monticelli, A.J. Tabu Search Algorithm for Network Synthesis. IEEE Trans. Power App. Systems, Vol 15, No. 2, Mayo 2000.

[4] Gallego, R., Romero, R., Monticelli, A.J. Comparative Studies on Non-convex optimization methods for Transmission Network Expansion Planning. IEEE Trans. Power App. Systems, Vol 13, No. 3, Agosto 1998.

[5] Latorre, G. Modelos estáticos para la planificación a largo plazo de la red de transporte de energía eléctrica. Tesis de Doctorado, Universidad Pontificia de Comillas, España, 1993.