PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CONSIDERANDO CONTINGENCIAS

LUIS ALFONSO GALLEGO P.
Ingeniero Electricista, M.Sc
Profesor
Universidad Tecnológica de Pereira
algallego@utp.edu.co

ANTONIO ESCOBAR ZULUAGA.
Ingeniero Electricista, M.Sc
Profesor asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
aescobar@utp.edu.co

Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos

RESUMEN
En este artículo se presenta una metodología y un modelo matemático que da solución al problema del planeamiento de la expansión cuando se considera desde la etapa del planeamiento el efecto de las contingencias. Se emplea el modelo de flujo de carga DC para representar la red eléctrica. El problema del planeamiento de la expansión puede ser dividido en dos subproblemas, un subproblema de inversión y un subproblema operativo

PALABRAS CLAVES: Planeamiento de la expansión, Modelo de Flujo de Carga DC, Algoritmos Genéticos, Método de Puntos Interiores, Contingencias.

ABSTRACT
In this article one appears a methodology and a mathematical model that solution gives to the problem of the planning of the expansion when the effect of the contingencies is considered from the stage of the planning. The model of flow of load DC is used to represent the electrical network. The problem of the planning of the expansion can be divided in two subproblems, a subproblem of investment and a subproblem operative.

KEYWORDS: *Planning of the expansion, The model of flow of load DC, Genetic Algorithms, Interior Points, and Contingencies.*

1. INTRODUCCIÓN

El problema del planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión de energía eléctrica tiene como objetivo determinar la red de transmisión que se debe construir para atender los requerimientos de la demanda proyectada para un escenario de largo plazo, minimizando la inversión y abasteciendo de energía eléctrica a todos los usuarios.

Los sistemas eléctricos del mundo están incorporando dentro de sus estructuras, políticas regulación, mercado, seguridad y confiabilidad, esta reestructuración plantea nuevos escenarios competitivos, en los cuales el problema de inversión de expansión juega un papel crucial y de gran importancia debido a que permanentemente se debe acondicionar la estructura del sistema eléctrico para permitir la integralidad operativa del sistema. El problema del planeamiento de la expansión debe evolucionar entonces, para tener en cuenta desde el inicio del planeamiento las políticas de regulación, de mercado, de seguridad y de confiabilidad. En esta articulo se realiza el planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión considerando seguridad desde en inicio del planeamiento, entonces los algoritmos implementados tienen en cuenta desde el comienzo el problema de seguridad o contingencias.

2. PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN SIN CONSIDERAR EL EFECTO DE LAS CONTINGENCIAS.

El modelo DC ha sido considerado ideal para representar el problema del planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión de energía eléctrica, y se puede representar de la siguiente forma:

$$
\begin{aligned}
\min\ v &= \sum_{(i,j)\in\Omega} c_{ij}\, n_{ij} \\
s.a\quad & S\, f_{ij} + g = d \\
& f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^{o} + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \\
& \left| f_{ij} \right| \le (n_{ij}^{o} + n_{ij})\, f_{ij}^{\max} \\
& 0 \le g \le g^{\max} \\
& 0 \le n_{ij} \le n_{ij}^{\max} \\
& n_{ij} \quad entero \\
& f_{ij} \quad y \quad \theta_j \quad \text{ilimitados} \\
& (i,j) \in \Omega
\end{aligned}
\tag{1}
$$

donde c_{ij}, γ_{ij}, n_{ij}, n_{ij}^{o}, f_{ij} representan respectivamente el costo del circuito del circuito que puede ser adicionado entre el corredor *i-j,* la susceptancia del circuito, el número de circuitos a ser adicionados entre el corredor *i-j,* el número de circuitos de la red base y el flujo de potencia. f_{ij}^{max} representa el flujo de potencia máximo permitido por corredor. La variable v es la variable de

Fecha de Recepción: 31 Enero de 2006
Fecha de Aceptación: 04 Abril de 2006

inversión, S es la matriz de incidencia transpuesta rama-nodo del sistema de potencia, f es el vector de los elementos f_{ij} , g es un vector de generaciones nodales g_k ,(k es el índice de la barra) y d es el vector de demanda. En el modelo DC, el sistema eléctrico completo debe satisfacer las dos leyes de Kirchhoff. y Ω es el conjunto de todos los posibles caminos.

3. PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN CONSIDERANDO EL EFECTO DE LAS CONTINGENCIAS.

Las contingencias son los eventos que ocurren cuando un elemento es retirado del sistema en forma imprevista o programada. La salida de un elemento o de varios puede producir la operación anormal del sistema e incluso puede provocar su colapso. De otro lado, si se planean las redes de transmisión futuras considerando desde el inicio las contingencias, el costo global: plan de expansión más solución de contingencias, resulta inferior que el que se obtendría si se realizan por separado el plan óptimo de expansión y la solución de contingencias para el plan óptimo resultante. Al incluir el efecto de las contingencias simples (n-1) en el modelo matemático del problema, este asume la siguiente forma:

$$
\begin{aligned}
\min\ v &= \sum_{(i,j)\in\Omega} c_{ij}\, n_{ij} + \beta \sum_{j=1}^{nl} r_{gc}^{j} \\
s.a\quad & S f^{p}_{ij} + g^{p} + r_g - r_c = d \\
& f_{ij}^{p} - \gamma_{ij}(n_{ij}^{o} + n_{ij})(\theta_i^{p} - \theta_j^{p}) = 0 \\
& \forall\,(i,j) \in 1,2,\ldots,nl\ y\ (i,j) \neq p \\
& f_{ij}^{p} - \gamma_{ij}(n_{ij}^{o} + n_{ij} - 1)(\theta_i^{p} - \theta_j^{p}) = 0 \\
& para\ (i,j) = p \\
& \left|f_{ij}\right| \le (n_{ij}^{o} + n_{ij}) f_{ij}^{\max} \\
& \forall\,(i,j) \in 1,2,\ldots,nl\ y\ (i,j) \neq p \\
& \left|f_{ij}\right| \le (n_{ij}^{o} + n_{ij} - 1) f_{ij}^{\max} \\
& para\ (i,j) = p \\
& 0 \le g^{p} \le g^{\max} \\
& 0 \le n_{ij} \le n_{ij}^{\max} \\
& (n_{ij}^{o} + n_{ij} - 1) \ge 0 \quad y \quad entero\ para \quad (i,j) = \\
& n_{ij} \quad entero \quad \forall\,(i,j) \in 1,2,\ldots,nl\ y\ (i,j) \neq p \\
& f_{ij}^{p} \quad y \quad \theta_j^{p} \quad \text{ilimitados} \\
& (i,j) \in \Omega \quad y \quad p = 1,2,\ldots,nl
\end{aligned}
\tag{2}
$$

donde nl es el conjunto de variables de operación, y para las contingencias se consideran todos los caminos $p=(i,j)$ ϵ Ω. Se puede observar que la complejidad el problema aumenta debido a que se incrementan restricciones.

El modelo matemático presentado en (2) se tiene en cuenta el criterio de contingencias simple (n-1), por lo tanto el modelo completo del planeamiento de la expansión considerando contingencias asume la siguiente forma:

$$
\begin{aligned}
\min\ v &= \sum_{(i,j)\in\Omega} c_{ij} n_{ij} + \beta \sum_{j=1}^{nl} r_g^{j} \\
& s.a \\
& s f_{ij} + g + r_g - r_c = d \\
& f_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^{o} + n_{ij})(\theta_i - \theta_j) = 0 \\
& \left|f_{ij}\right| \le (n_{ij}^{o} + n_{ij}) f_{ij}^{\max} \\
& 0 \le g \le g^{\max} \\
& 0 \le r_g \le d^{\max} \\
& 0 \le r_c \le g^{\max} \\
& n_{ij}\ entero \\
& f_{ij}\ y\ \theta_j\ \text{ilimitados} \\
& S f^{p}_{ij} + g^{p} + r_g^{p} - r_c^{p} = d \\
& f_{ij}^{p} - \gamma_{ij}(n_{ij}^{o} + n_{ij})(\theta_i^{p} - \theta_j^{p}) = 0 \\
& \forall\,(i,j) \in 1,2,\ldots,nl\ y\ (i,j) \neq p \\
& f_{ij}^{p} - \gamma_{ij}(n_{ij}^{o} + n_{ij} - 1)(\theta_i^{p} - \theta_j^{p}) = 0 \\
& para\ (i,j) = p \\
& \left|f_{ij}\right| \le (n_{ij}^{o} + n_{ij}) f_{ij}^{\max} \\
& \forall\,(i,j) \in 1,2,\ldots,nl\ y\ (i,j) \neq p \\
& \left|f_{ij}\right| \le (n_{ij}^{o} + n_{ij} - 1) f_{ij}^{\max} \\
& para\ (i,j) = p \\
& 0 \le g^{p} \le g^{\max} \\
& 0 \le n_{ij} \le n_{ij}^{\max} \\
& 0 \le r_g^{p} \le d^{\max} \\
& 0 \le r_c^{p} \le g^{\max} \\
& \left(n_{ij}^{o} + n_{ij} - 1\right) \ge 0 \quad y \quad entero\ para \quad (i,j) = p \\
& n_{ij} \quad entero \quad \forall\,(i,j) \in 1,2,\ldots,nl\ y\ (i,j) \neq p \\
& f_{ij}^{p} \quad y \quad \theta_j^{p} \quad \text{ilimitados} \\
& (i,j) \in \Omega \quad y \quad p = 1,2,\ldots,nl
\end{aligned}
\tag{3}
$$

donde $r_g{}^{j}$ es la suma de los generadores ficticios en el caso del problema sin contingencias, $r_g{}^{j}$ es la suma de los generadores ficticios (corte de carga global) en el caso del problema con contingencias, α es un factor de penalización de la carga no atendida para el caso del planeamiento de la expansión sin considerar contingencias, y β es un factor de penalización de la potencia no atendida (corte de carga global) para el caso del problema con contingencias.

4. ALGORITMO ESPECIALIZADO DE CHU-BEASLY APLICADO AL PROBLEMA DEL PLANEAMIENTO DE REDES DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

El algoritmo genético de Chu-Beasly ***AGCB*** fue diseñado inicialmente para el resolver el problema de la designación generalizada [1]. El ***AGCB*** está basado en la teoría fundamental de los Algoritmos Genéticos, pero presenta algunas diferencias que lo hacen un algoritmo muy competitivo para evaluar sistemas de gran tamaño. Las principales características del ***AGCB*** son: 1) usa la función fitness para identificar el valor de la función objetivo y una función de penalización para cuantificar la infactibilidad de las propuestas de solución. 2) la diferencia entre el Algoritmo Genético propuesto por Holland y el algoritmo propuesto por Chu-Beasly, consiste principalmente en que el algoritmo genético de Chu-Beasly sólo sustituye un individuo a la vez en la población, en cada ciclo generacional. 3) además, el individuo que entra a hacer parte de la población no puede existir en tal población, lo que evita la homogeneidad de la población conservando la diversidad en todos los individuos.

4.1 Codificación del problema.

En el problema del planeamiento de redes de transmisión de energía eléctrica, un individuo de la población es representado por un vector del tamaño de *nl,* donde cada elemento de este representa es un número entero que representa la cantidad de líneas/transformadores del sistema, y puede ir desde 0 hasta el número máximo de circuitos permitidos por corredor.

4.2 Población inicial.

Dependiendo del tipo de problema, existen distintas formas de generar los individuos de la población inicial. Generalmente los métodos heurísticos sirven para generar las soluciones de buena calidad que conforman dicha población, en problemas de alta complejidad. En sistemas de baja o media complejidad, puede generarse la población inicial de manera aleatoria, pero, siempre que pueda aprovecharse algún conocimiento inicial respecto al problema, este debe ser utilizado.

4.3 Función objetivo e infactibilidad.

Para cada individuo de la población se debe evaluar su función objetivo (fitness). La función objetivo representa el costo total de las líneas que se deben adicionar a la red inicial para cumplir con los requerimientos de demanda proyectada. También, se debe evaluar la función de penalización la cual representa el corte de carga, o potencia no servida PNS por la propuesta de inversión. La PNS representa la suma total de los generadores ficticios que se deben adicionar a la red para cumplir con la primera ley de Kirchhoff, (para el caso base y el caso con contingencia) esto se debe realizar para cada individuo de la población.

Como en el algoritmo de Holland, en el ***AGCB*** la función objetivo es usada para implementar el mecanismo de selección y para la sustituir un individuo en la población cuando todos los miembros de la población son factibles. También, La infactibilidad es usada para sustituir un individuo de la población cuando las propuestas de soluciones son infactibles en la población.

4.4 Selección.

En la teoría de fundamental de los algoritmos genéticos existen varias propuestas de selección: 1) selección por ruleta, 2) selección por torneo. En está articulo la selección se realizo usando torneo, este mecanismo de consiste en escoger aletoriamente un número reducido de *k* configuraciones de la población actual, para competir entre ellas con el fin de seleccionar la mejor configuración (mejor función objetivo) que se denominara padre, esto se deber realizar dos veces.

4.5 Recombinación

Las dos configuraciones escogidas en el mecanismo de selección son sometidas a recombinación, la recombinación en los algoritmos genéticos consiste en intercambiar partes de dos vectores para formar dos nuevos vectores donde uno de los vectores nuevos tiene parte de los elementos de un vector y parte de los elementos del otro vector. Esto es también denominado mecanismo de crossing over, (cruzamiento). Generalmente las configuraciones seleccionadas (originales) se denominan configuraciones padres y a las nuevas configuraciones se les denominan configuraciones hijas.

4.6 Mutación

La operación de mutación termina el proceso de obtención del nuevo descendiente. La mutación, en la codificación binaria, implica cambiar el valor de una variable de 0 a 1 ó viceversa. Así, por ejemplo, si en la posición L todas las configuraciones tienen un valor de 0 en la representación binaria y en la configuración óptima el valor correcto en esa posición es 1, entonces el cruzamiento no puede generar un 1 en esa posición mientras que en el proceso de mutación puede resolver esta dificultad, cambiando el 0 por 1. La tasa de mutación varía entre 0.001 y 0.050, en problemas de planeamiento de redes de transmisión de energía eléctrica.

4.7 Mejoramiento de la infactibilidad

En este algoritmo la infactibilidad de las propuestas de inversión disminuyen gradualmente a medida que el proceso de búsqueda avanza. Una configuración es infactible cuando la propuesta de inversión tiene un corte de carga diferente de cero, y la propuesta es factible cuando el corte de carga es cero. No significa esto que la configuración sea la óptima. Además, esta configuración debe cumplir con los requerimientos eléctricos del sistema (modelo DC). Si la configuración propuesta tiene un corte de carga menor que alguna configuración de la población actual se reemplaza esta configuración en la

población, además, se debe verificar que la nueva configuración no este presente en la población actual.

4.8 Mejoramiento de la optimalidad

Cuando el descendiente es factible (corte de carga cero), y a pasado por los procesos de selección, recombinación, mutación, pueden existir circuitos innecesarios, que encarecen la función objetivo. Para determinar que circuitos sobran en la esta configuración, se realiza un ordenamiento descendente, desde los circuitos más costosos hasta llegar a los circuitos con el menores costos, entonces el circuito que no produce infactibilidad (corte de carga igual a cero) en el caso base y en caso con contingencias es eliminado. Si existen varios circuitos en paralelo se realiza esto hasta que al retirar alguno se produzca una infalibilidad, que significa que el circuito retirado es necesario.

4.9 Criterios de aceptación para modificar la población

En el ***AGCB*** en la población sólo se cambia un individuo a la vez en cada ciclo generacional, a diferencia del algoritmo genético tradicional que en cada ciclo generacional modifica toda la población. El descendiente es incorporado a la población actual de acuerdo a los siguientes criterios:

- Si el descendiente es infactible, sólo se puede reemplazar por el más infactible de la población actual.
- Si el descendiente es factible, y en la población hay configuraciones infactibles, se puede reemplazar por el más infactible de la población.
- Si todos los individuos de la población son factibles, entonces el descendiente puede ser sustituido por el individuo peor calificado (mayor función objetivo), si y solo si, el descendiente tiene mejor función objetivo que el peor individuo de la población.
- El descendiente debe ser diferente a todos los individuos de la población actual, si es igual a cualquier miembro de la población el reemplazo es descartado.

Pseudo-Codigo del algoritmo especializado de Chu-Beasley implementado.

1) Especificar los parámetros de control.
2) Crear la población inicial.
3) ***Realizar selección:*** escoger dos configuraciones padres usando selección por torneo.
4) ***Realizar recombinación:***
   - Realizar recombinación de los dos padres, y escoger la mejor configuración (hijo).
5) ***Realizar mutación:*** realizar mutación al hijo escogido en el proceso de recombinación.
6) ***Aplicar los criterios de aceptación:*** Si el criterio de parada es satisfecho, PARE, de lo contrario regresar a 3.

El proceso para si la incumbente (mejor solución encontrada durante el proceso evolutivo) no mejora después de un número determinado de iteraciones o un número máximo de PL`s ejecutados.

5. SISTEMAS DE PRUEBA.

La metodología propuesta para el planeamiento de la expansión considerando contingencias ha sido probada con los sistemas de prueba: sistema de Garver de 6 barras, sistema IEEE de 24 barras, Sur brasileño de 46 barras, sistema eléctrico colombiano. Parámetros y topologías de los sistemas de prueba pueden ser consultados en [5].

5.1 *Sistema Garver de 6 barras*

El sistema de Garver consta de 6 barras, 15 líneas candidatas a ser adicionadas, una demanda y una generación total de 760 MW y un número máximo de 5 líneas que se pueden adicionar por corredor.

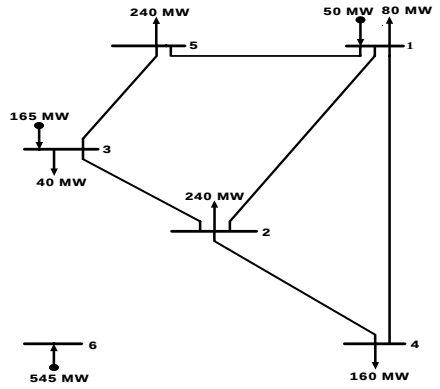

Figura 1. Sistema Garver de 6 barras

En el sistema Garver de 6 barras la solución óptima del problema de planeamiento de la expansión sin contingencias, tiene un costo de inversión v = 200,000 US$ y las líneas que deben ser adicionadas al caso base son las siguientes: $n_{2-6} = 4$, $n_{3-5} = 1$, $n_{4-6} = 2$

En el sistema Garver de 6 barras la solución óptima del problema de planeamiento de la expansión sin contingencias fue encontrada por el algoritmo genético, con los siguientes parámetros: Población inicial aleatoria con 40 individuos, Tasa de mutación 0.02, k = 3, y 360 PLs ejecutados

La solución óptima del problema de planeamiento de la expansión con contingencias tiene un costo de inversión v = 298,000 US$ y las líneas que deben ser adicionadas son las siguientes: $n_{2-6} = 4$, $n_{3-5} = 2$, $n_{3-6} = 1$, $n_{4-6} = 3$.

Se puede observar que el costo de inversión del planeamiento de la expansión considerando contingencias tiene un costo mayor que el planeamiento base, el costo adicional es debido a que se tiene que

cumplir el criterio de contingencia simple (n-1), y para cumplir con este se deben instalar más elementos.
La solución del plan de expansión óptimo con contingencias fue encontrada por el algoritmo genético, con los siguientes parámetros: Población inicial de 40 individuos, Tasa de mutación 0.02, k = 3, y 1791 PLs ejecutados.

5.2 *Sistema Sur Brasileño de 46 barras*

Este sistema consta de 46 barras, una demanda total igual 6,880 MW y no tiene límite máximo de líneas que pueden ser adicionadas por corredor. Este sistema representa una muy buena prueba debido a que es un sistema de la vida real y es de mediano tamaño.

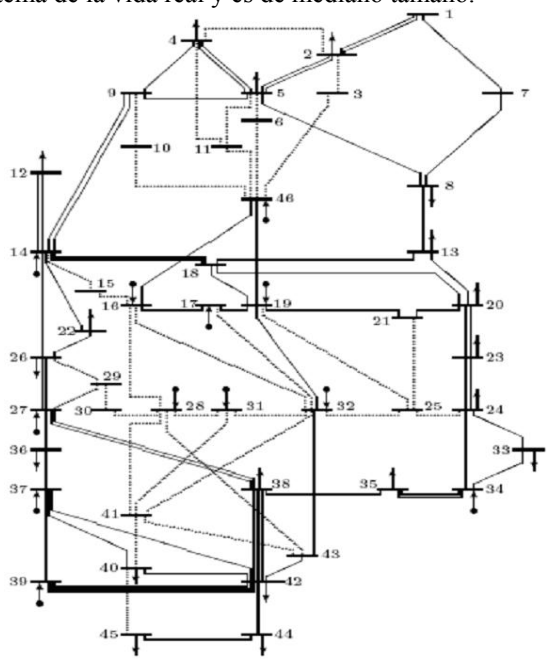

Figura 2. Sistema Sur Brasileño de 46 barras.

La solución óptima del problema de planeamiento de la expansión sin contingencias tiene un costo de inversión v = 72,870,000 US$ y las líneas que deben ser adicionadas a la topología inicial son las siguientes: $n_{02\text{-}05} = 1$, $n_{05\text{-}06} = 2$, $n_{13\text{-}20} = 1$, $n_{20\text{-}21} = 2$, $n_{20\text{-}23} = 1$, $n_{42\text{-}43} = 1$, $n_{46\text{-}06} = 1$

La solución del plan de expansión óptimo sin contingencias fue encontrado por el algoritmo genético, con los siguientes parámetros: Población inicial aleatoria con 100 individuos, Tasa de mutación 0.02, k = 4, y 1,450 PLs ejecutados.

La solución óptima del problema de planeamiento de la expansión con contingencias tiene un costo de inversión v = 213,156,000 US$ y las líneas que deben ser adicionadas son las siguientes: $n_{02\text{-}05} = 1$, $n_{05\text{-}06} = 3$, $n_{12\text{-}14} = 1$, $n_{19\text{-}21} = 1$, $n_{20\text{-}21} = 3$, $n_{20\text{-}23} = 2$, $n_{31\text{-}32} = 1$, $n_{32\text{-}43} = 1$, $n_{42\text{-}43} = 1$, $n_{42\text{-}44} = 1$, $n_{44\text{-}45} = 1$, $n_{46\text{-}06} = 2$

La solución del plan de expansión óptimo fue encontrado por el algoritmo genético, con los siguientes parámetros: Población inicial aleatoria con 100 individuos, Tasa de mutación 0.05, k = 3, y 231,825 PLs ejecutados.

5.3 *Sistema Eléctrico Colombiano 2012*

El sistema colombiano 2012 puede clasificarse como un sistema de gran tamaño y mediana complejidad. El sistema consta de 93 barras y 155 líneas/trafos para ser adicionados.
La mejor solución reportada en [2] del planeamiento de la expansión del sistema de transmisión de Colombia, sin contingencias fue encontrada por ***AGCB***, con los siguientes parámetros: Población inicial con 100 individuos, Tasa de mutación 5/100, k = 3, y 10318 PLs ejecutados

La mejor solución encontrada presenta un costo de inversión en transmisión de 560.002 millones de dólares, un corte de carga 0.38 MW y las siguientes adiciones de líneas:

$n_{43\text{-}88}$ *(OCAN-CESA) = 2*
$n_{30\text{-}65}$ *(CGVC-TLUA) = 1*
$n_{55\text{-}57}$ *(CMA5-CHI5) = 1*
$n_{56\text{-}57}$ *(SAB5-CHI5) = 1*
$n_{27\text{-}29}$ *(JUTO-YUMB) = 1*
$n_{50\text{-}54}$ *(TERN-SAB2) = 1*
$n_{54\text{-}56}$ *(SAB2-SAB5)= 1*
$n_{19\text{-}82}$ *(MALE-MAL5) = 2*
$n_{68\text{-}86}$ *(NDE2-SOG2) = 1*
$n_{15\text{-}18}$ *(BARB-GTPE) = 1*
$n_{30\text{-}72}$ *(CGVC-VIRG) = 1*
$n_{55\text{-}84}$ *(CMA5-SJOR) = 1*
$n_{55\text{-}62}$ *(CMA5-SAC5) = 1*
$n_{29\text{-}64}$ *(YUMB-MARC) = 1*
$n_{62\text{-}73}$ *(SAC5-VIR5) = 1*
$n_{72\text{-}73}$ *(VIRG-VIR5) = 1*
$n_{82\text{-}85}$ *(MAL5-FAC5) = 1*

Para el planeamiento de la expansión del sistema eléctrico colombiano considerando contingencias, la mejor solución encontrada tiene un costo de inversión de 1268.966 y presenta un corte de carga igual a cero.

La mejor solución encontrada por ***AGCB*** para el planeamiento de la expansión del sistema de transmisión colombiano considerando contingencias, fue con los siguientes parámetros: Población inicial con 100 individuos, Tasa de mutación 5/100, k = 3

La mejor solución encontrada en 695 ciclos generacionales del ***AGCB*** y que requiere de 308,901 llamados al PL. La solución encontrada presenta un costo de inversión en transmisión de 1,258.501 millones de dólares, un corte de carga 0.0 MW y las siguientes adiciones de líneas:

$n_{52\text{-}88}$(COPEY-CESA) = 2	$n_{43\text{-}88}$(OCAN-CESA) = 1
$n_{13\text{-}14}$(ANCON E-ANCON ISA) = 1	$n_{02\text{-}04}$(BAES-MESA)= 1
$n_{02\text{-}83}$(BAES-FACA.220)= 1	$n_{09\text{-}83}$(NOROESTE- FACA.220)= 1
$n_{15\text{-}18}$(BARB-GTPE)= 1	$n_{27\text{-}80}$(JUANCHITO-PEZ)= 1
$n_{45\text{-}54}$(CARTAGEN-SABAN.220)= 2	$n_{45\text{-}50}$(CARTAGEN-TERN)= 1
$n_{30\text{-}65}$(CARTAGO-TULUA)= 1	$n_{30\text{-}72}$(CARTAGO-VIRGINIA2)= 2
$n_{55\text{-}57}$(CMA5-CHI5)= 1	$n_{57\text{-}84}$(CHI5-SJORGE)= 1
$n_{55\text{-}84}$(CMA5-SJOR)= 2	$n_{56\text{-}57}$(SAB5-CHI5)= 2
$n_{59\text{-}67}$(CHIVOR-SOCHAGOTA)= 1	$n_{03\text{-}71}$(CIR-MIRADOR)= 1
$n_{55\text{-}62}$(CMA5-SCARLOS.500)= 2	$n_{29\text{-}31}$(YUMB-ESMER)= 1

$n_{31\text{-}72}$(ESMER-VIRGI2)= 1	$n_{18\text{-}58}$(GTPE-JAGUAS)= 1
$n_{18\text{-}20}$(GTPE-MIRP)= 1	$n_{04\text{-}36}$(MESA-MIRILONDO)= 1
$n_{27\text{-}64}$(JUANCHITO-SMARCOS)= 2	$n_{27\text{-}29}$(JUANCHITO-YUMB)= 1
$n_{19\text{-}66}$(PRIMAVERA-SIERRA)= 1	$n_{54\text{-}63}$(SABAN.220-BARRANQUI)= 1
$n_{67\text{-}68}$(SOCHA-GUATA)= 1	$n_{21\text{-}22}$(ORIE-PLAY)= 1
$n_{62\text{-}73}$(SCARLOS.500-VIRG.500)= 2	$n_{54\text{-}56}$(SABAN.220-SABAN.500)= 2
$n_{72\text{-}73}$(VIRG2-VIRGINIA.500)= 1	$n_{19\text{-}82}$(PRIMA-PRIMA.500)= 2
$n_{55\text{-}82}$(CERRO-PRIMA.500)= 1	$n_{83\text{-}85}$(FACA.220-FACA.500)= 1
$n_{82\text{-}85}$(MAL5-FAC5)= 2	$n_{68\text{-}86}$(NDE2-SOG2)= 2
$n_{07\text{-}90}$(TUNAL-USM2)= 1	

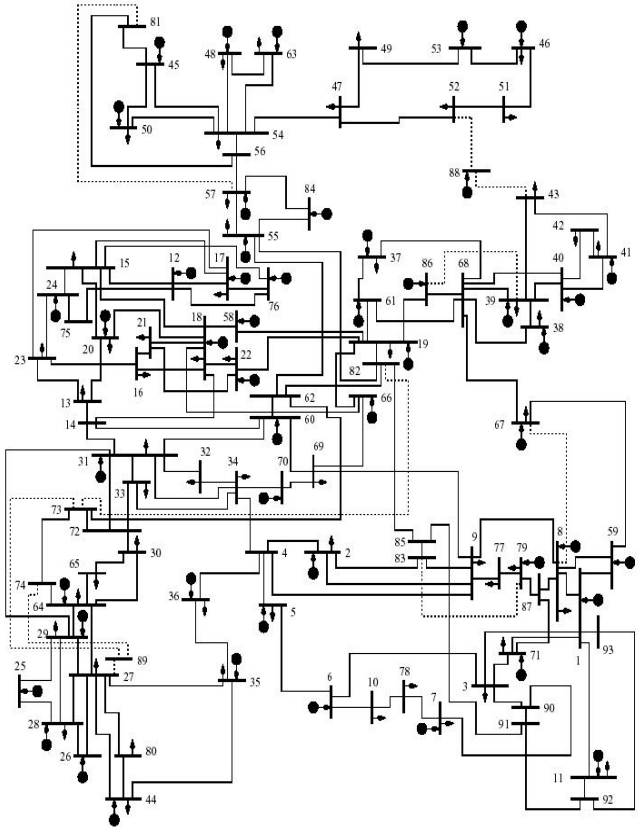

Figura 3. Sistema Eléctrico Colombiano 2012.

Para el caso del sistema eléctrico colombiano se hace una comparación entre el número de PLs ejecutadas en esta investigación y los reportados en [2]. Se puede notar que el ***AGCB*** implementado obtiene la mejor solución en un número menor de PLs.

Sistema eléctrico colombiano	PLs ejecutados
AGCB	10318
***G* [2]**	67490

El problema del planeamiento puede ser dividido en dos subproblemas, el primer subproblema, el de inversión es resuelto usando el ***AGCB***, y el subproblema operativo, que es un problema de programación lineal, y es solucionado empleando el método de Puntos Interiores [4].

6. CONCLUSIONES

El problema del planeamiento considerando contingencias, es un problema más complejo de solucionar que el planeamiento clásico, debido a que para cada configuración de inversión propuesta por el algoritmo se debe evaluar el corte de carga global, resultante al retirar línea por línea o transformador por transformador y calcular el corte de carga que produce la salida de cada elemento que hace parte de la configuración, por lo tanto el tiempo computacional requerido para evaluar cada configuración es alto.

Para el caso del planeamiento sin contingencias el ***AGCH*** ha mostrado ser una herramienta muy eficiente para la solución del problema del planeamiento. El ***AGCB*** requiere de un tiempo computacional (llamados de PLs) menor que los presentados en artículos que se tienen disponibles en la literatura especializada. La eficiencia del algoritmo principalmente se debe a que se preserva la diversidad de los individuos que hacen parte de la población, esto es debido a que el ***AGCH*** sólo incorpora un individuo en la población actual, que debe ser diferente a los demás individuos que hacen parte de la población.

En el ***AGCB*** existen parámetros de control que deben ser ajustados. Estos deben ajustar para que el algoritmo trabaje de manera eficiente. En el proceso de selección el valor de *k* deber estar en entre 3 y 6. La tasa de mutación debe se más alta que la tasa de mutación que se emplea en el algoritmo genético tradicional y debe estar entre 5 % y 7 %. El tamaño de la población es otro parámetro de control muy importante, la convergencia del algoritmo se ve muy afectada por este parámetro. Por lo tanto, la eficiencia del algoritmo genético depende principalmente de la sintonización de estos parámetros de control y de la calidad de las configuraciones que conforman la población inicial.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Chu, P.C., and Beasley, J. E. "A genetic algorithm for the generalized Assignment problem," Computers Operations Research, 24(1), pp 17-23, 1997.

[2] Escobar A., "Planeamiento Dinámico de la Transmisión en Sistemas de Transmisión Usando Algoritmos Combinatoriales", Tesis de Maestría, Universidad Tecnología de Pereira, Colombia, Febrero de 2002.

[3] Gallego, R.A.: "Planejamento a Longo Prazo de Sistemas de Transmissao Usando Técnicas de Otimizacao Combinatorial ", Tesis de Doctorado, FEEC DSEE Unicamp, Brasil, Octubre de 1997.

[4] Gallego L. A., "Metodología para Solucionar el Modelo DC para Redes de Transmisión de Energía Eléctrica Usando Puntos Interiores", Scientia et Technica Año XI No 28 Octubre de 2005 UTP.

[5] Gallego L.A., "Planeamiento de la Expansión de sistemas de transmisión de energía eléctrica considerando contingencias", Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira, Nov de 2005.