

Algoritmo Genético para Optimizar la Planeación de la Expansión de la Red de Transmisión de Forma Dinámica

RAMOS-ROJAS, Luis Demetrio^{1,3†*}, TORRES-JIMÉNEZ, Jacinto¹, FIGUEROA-GODOY, Fernando¹, GARCÍA-TORRES, Alicia²

¹Maestría en Ingeniería Eléctrica,²Ingeniería en Logística, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Carretera Irapuato - Silao Km. 12.5, C.P. 36821 Irapuato, Guanajuato, México. ³Comisión Federal de Electricidad, División de Distribución Bajío, Pastita # 55 Col. Paxtitlán, C.P. 36090, Guanajuato, Gto.

Recibido Febrero 15, 2017; Aceptado Marzo 20, 2017

Resumen

En este artículo se presenta un Algoritmo Genético (AG) para la Planeación de la Expansión de una Red de Transmisión (PERT) de forma Dinámica. El AG propuesto se basa en los principios de los algoritmos evolutivos para encontrar el conjunto óptimo de soluciones factibles que cumplan con la función objetivo de minimizar los costos de las obras, cumpliendo la restricción de capacidad máxima de las líneas de la red. La PERT Dinámica se refiere a la Planeación Multianual que se tiene que realizar para satisfacer la demanda de energía eléctrica sin afectar el compromiso de suministro en cuanto a la confiabilidad. La solución anual define los proyectos u obras necesarias que deben de entrar anualmente, tomadas dentro de un conjunto de soluciones pre-definidas. El conjunto total de obras obtenido, es la suma de las obras anuales, las cuales pueden ser sometidas a una evaluación económica no incluida en este trabajo para saber el conjunto de obras definitivas.

Planeación de la Expansión de una Red de Transmisión (PERT), Algoritmo Genético (AG), Optimización, Expansión Dinámica

Abstract

In this paper, a Genetic Algorithm (GA) for the dynamic Expansion Planning Network Transmission (EPNT) is presented. The GA proposed is based in evolutive algorithms principles to find a factible solution optimal set, that them comply cost minimizing objective function and network lines maximum capacity constraint. Dynamic EPNT meaning is the multi-annual network transmission planning will realize to satisfy electric energy demand without affect reliability supply commitment. Annual solution defines necessary projects must will be build among a pre-defined projects set. Total projects group obtained, is the sum of annual solutions, that them may be economically evaluated (not include in this paper) to know definitive projects set.

Expansion Planning Network Transmission (EPNT), Genetic Algorithm (GA), Optimization, Dynamic Expansion

Citación: RAMOS-ROJAS, Luis Demetrio, TORRES-JIMÉNEZ, Jacinto, FIGUEROA-GODOY, Fernando, GARCÍA-TORRES, Alicia. Algoritmo Genético para Optimizar la Planeación de la Expansión de la Red de Transmisión de Forma Dinámica. Revista de Tecnologías Computacionales. 2017. 1-1:1-14

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: luisdan6788@gmail.com

Introducción

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) está conformado por diversos elementos interconectados entre sí y tiene como finalidad la distribución de energía eléctrica para satisfacer la demanda de potencia activa y reactiva, la cual es despachada desde las centrales generadoras. La energía generada tiene que recorrer diferentes elementos y niveles de voltaje hasta los usuarios finales para la satisfacción de su demanda de energía eléctrica. Es importante que en todo momento, el voltaje en los nodos del sistema se mantenga dentro de un perfil adecuado, esto permitirá una reducción de las pérdidas por efecto Joule en las líneas de transmisión y distribución.

Para un futuro escenario de crecimiento de la demanda de potencia, el principal objetivo de la PERT es encontrar el mejor conjunto de obras de refuerzo en la red de transmisión que garantice una adecuada entrega de potencia a los consumidores, y que represente el menor impacto económico para la empresa suministradora. En la actualidad, existe una gran preocupación por el gran esfuerzo económico que se tiene que realizar para fortalecer la red de transmisión y distribución para satisfacer el incremento de la demanda futura. Grandes inversiones deben ser programadas para hacer frente al crecimiento de la red de transmisión y distribución. En la mayoría de los países desarrollados, estas inversiones son realizadas desde hace tiempo por empresas privadas. En países emergentes, ante el declive y encarecimiento del petróleo a nivel mundial y por las nuevas políticas internacionales en lo que respecta al medio ambiente, se tiene que abrir el mercado de energía para convocar a la iniciativa privada a participar con proyectos de generación a partir de fuentes renovables de energía, que por ser proyectos más caros que los que usan fuentes de energía convencionales, el impacto económico es considerable.

Ante un pronóstico de crecimiento de la demanda en un período de n años, el saber el conjunto de obras a realizar es valioso, pero lo es aún más, saber la programación de los proyectos a realizar año con año. La empresa responsable de la gestión del mercado de energía debe saber con el mayor grado de certidumbre posible, qué inversión se irá necesitando año con año, para así realizar las convocatorias de licitación a la iniciativa privada, para la realización de los proyectos necesarios.

El conjunto de obras necesarias año con año para satisfacer el incremento de la demanda debe ser a un costo mínimo, con un mínimo de pérdidas de potencia y con un nivel de voltaje adecuado que cumpla con valores establecidos.

Características de un SEP

Un SEP se compone de diversos elementos y dispositivos tales como: líneas, generadores, cargas en derivación, compensadores estáticos de vars (CEV's), transformadores, relevadores, etc. Estos elementos deben funcionar al mismo tiempo para satisfacer la demanda de energía, y ante la ocurrencia de una falla mantenerse estable y con un mínimo de pérdida de carga.

Debe tener la suficiente capacidad para suministrar sin problema la demanda de las cargas interconectadas, que en la mayoría de las veces cambian de un momento a otro. En un sistema de potencia existen diferentes elementos y dispositivos de generación, transmisión y carga. Las unidades de generación y las cargas se encuentran distribuidas a través del sistema eléctrico.

Las plantas de generación normalmente se encuentran a grandes distancias de los centros de carga, si se transmitiera la energía eléctrica al nivel de voltaje generado (13.8 kV, 23 kV y 34.5 kV) las pérdidas de potencia serían grandísimas con relación a la energía transmitida.

Es por eso que para disminuir las pérdidas de potencia activa sea necesario elevar los niveles de voltaje de las plantas de generación para transmitirla a niveles de ≥ 230 kV y su posterior entrega a subestaciones reductoras que vuelven a bajar el nivel de voltaje a los centros de consumo para su fácil utilización. En la práctica industrial la tensión normalmente se clasifica en tres niveles:

- Transmisión (230 kV o mayores)
- Sub-transmisión (entre 69 y 161 kV)
- Distribución (60 kV y menores).

Para poder elevar o bajar los niveles de tensión a lo largo de la red y/o en determinado punto del sistema se requieren instalar transformadores de diferentes capacidades. Los transformadores o conjuntos de transformadores se ubican en las diferentes subestaciones distribuidas en el sistema. Cada subestación está equipada con circuitos interruptores, transformadores de corriente (TC), transformadores de potencia (TP), equipos de protección, etc.

La función principal que se busca en un SEP es convertir la energía disponible de forma natural en energía eléctrica y transportarla a los puntos de consumo. La energía eléctrica que se transporta es consumida en otras formas de energía tales como calor, luz y energía mecánica. La ventaja de utilizar la energía eléctrica es que puede ser transportada y controlada con relativa facilidad y con un alto grado de eficiencia y confiabilidad.

Un sistema de potencia diseñado y operado correctamente debe satisfacer los siguientes requerimientos fundamentales: El sistema debe ser capaz de satisfacer la demanda de carga en constante cambio de la potencia activa y reactiva.

Por lo que, la reserva rodante es definida como la cantidad expresada en MW de la diferencia entre la capacidad máxima de las unidades generadoras sincronizadas del sistema y la demanda del sistema eléctrico en cada instante, debe ser apropiadamente mantenida y controlada en todo momento.

El sistema debe suministrar energía al menor costo y con el mínimo impacto ecológico.

La calidad del suministro de potencia debe satisfacer ciertos estándares mínimos con respecto a los siguientes parámetros:

- a. Frecuencia constante
- b. Voltaje constante
- c. Nivel de confiabilidad

Para mantener los parámetros eléctricos del sistema en niveles aceptables de operación, a fin de satisfacer los estándares de calidad se necesitan utilizar varios controles que implican una compleja gama de dispositivos. Estos controles operan directamente sobre los elementos o dispositivos del sistema. Por ejemplo, en las unidades de generación se requiere controlar el motor primario y el sistema de excitación. Los controles del motor primario se encargan de la regulación de la velocidad y el control de variables del sistema de suministro de energía tales como, presión de la caldera, temperaturas y flujos.

La función del control de excitación es regular el voltaje de generación y la salida de potencia reactiva. Las salidas de potencia activa que se desean en las unidades de generación son determinadas mediante el control de generación del sistema. El principal propósito del control del sistema de generación es balancear la generación y la carga del sistema, de modo que se mantenga el intercambio de frecuencia y potencia deseadas con otros sistemas.

Para controlar la transmisión de la energía eléctrica incluyen dispositivos de control de voltaje y potencia, tales como compensadores estáticos de VAR, condensadores síncronos, capacitores, reactores, cambiadores de derivación de transformadores, transformadores de cambio de fase y HVDC. Los controles contribuyen para que la operación del sistema de potencia mantenga los valores de voltajes y frecuencia y otras variables del sistema dentro de sus límites.

Fundamentos de Algoritmos Evolutivos

La optimización de la PERT consiste en definir el número de líneas eléctricas que se deben adicionar e interconectar sobre trayectorias factibles nuevas o existentes. Es decir, se quiere determinar el mejor plan de expansión que presente menor costo de inversión sin sobrepasar la capacidad máxima de los elementos, con el objetivo de satisfacer la futura demanda de energía eléctrica [1-3].

Para mantener el suministro eléctrico, es indispensable la expansión correcta del sistema de transmisión así como el desarrollo adecuado de la plantas de generación [4]. Sin embargo, encontrar la mejor topología que presente menores costos de inversión dentro del espacio de las soluciones factibles, es un problema de optimización complejo que para su solución se requiere utilizar técnicas heurísticas y meta-heurística especializadas como son: Colonias de hormigas (CH) [5], Algoritmos Evolutivos (AE) [6], programación evolutiva (PE), búsqueda tabú (BT), colonias de abejas (CA), optimización inmune (OI), recocido simulado (RS), enjambre de partículas (EP), algoritmos genéticos (AG) de las más significativas [7]. De la familia de los AE, los Algoritmos Genéticos (AG) son la técnica de optimización que han sido utilizados satisfactoriamente para optimizar diversos objetivos en los sistemas eléctricos de potencia.

Los AG tienen la principal características de poder realizar una búsqueda local y global basada en una población inicial utilizando la hipótesis de la selección y genética natural [8]. En este trabajo se propone un AG para optimizar la PERT dinámica, utilizando criterios de optimización multi-objetivo. La finalidad de utilizar un AG es lograr obtener la mejor configuración topológica que permita minimizar las pérdidas por el efecto Joule y los costos por transmisión, además de mejorar los niveles de voltaje en los nodos.

Las configuraciones que se propongan como soluciones posibles deben cumplir con la restricción de no sobrecargar las líneas de transmisión, además, se deben considerar el incremento de la capacidad de las unidades de generación para diferentes periodos de tiempo. Por otra parte el AG que se propone utilizar codificará de forma apropiada la topología de la red. Además se propone desarrollar operadores genéticos de recombinación y mutación eficientes que permitan realizar una adecuada búsqueda local y global en el espacio de las soluciones factibles. La característica principal del AG es que realiza y dirige la búsqueda por medio de tres acciones fundamentales: selección, cruzamiento y mutación [9-11].

La optimización global consiste en encontrar el máximo o el mínimo de una o varias funciones objetivo en un espacio de búsqueda. En cualquier problema de optimización, el algoritmo debe decidir sobre los siguientes puntos:

- Variables dependientes e independientes.
- Funciones de restricciones.
- Funciones Objetivo.

En las variables independientes, el algoritmo tiene que determinar sus valores óptimos y en base a ellos, otras variables (dependientes) se pueden determinar.

Un problema de n variables independientes resulta en un espacio de solución de n dimensiones en donde cualquier punto dentro de ese espacio puede ser una solución [12]. Por consiguiente la optimización es el proceso de ajustar las entradas o características de un dispositivo, proceso matemático, o de experimentación donde se busca encontrar el mínimo o el máximo de la salida o resultado. Se ajustan las variables de entrada para lograr un resultado deseado (ver Figura 1). La entrada consiste de variables; el proceso o función es conocido como la función de costo, función objetivo o función de aptitud; y la salida es el costo o la aptitud.



Figura 1 Diagrama de una función o proceso para ser optimizado

Los AG nacieron con el planteamiento de crear un algoritmo con la misma filosofía que emplea la naturaleza en la selección natural, en donde los individuos más aptos tienen más posibilidades de sobrevivir y transmitir su código genético a sus descendientes. Fueron inicialmente formulados por Holland [13]. Actualmente los AG han sido extensamente utilizados en un gran número de aplicaciones en sistemas de potencia.

La teoría básica de AG es la siguiente

Se genera de forma aleatoria un conjunto de las posibles soluciones, cada una va a ser llamada individuo (In), y a dicho conjunto de individuos se le denomina población inicial. Cabe mencionar que cada individuo es una potencial solución para el problema que se pretende resolver y es típicamente codificado como una cadena de longitud fija denominado cromosoma. El cromosoma puede incluir valores reales y/o caracteres.

El algoritmo envuelve a la población a través de una aplicación secuencial e iterativa de tres procesos: selección, cruzamiento (o recombinación como es referida por otros autores) y mutación.

Después de cada iteración la población se actualiza con los individuos que se generan de los operadores genéticos del cruzamiento y la mutación [14-17]. Los AG son la técnica más conocida en la categoría de los algoritmos de optimización evolutiva y poseen tres características que los distinguen de otros algoritmos evolutivos:

- La representación de los cromosomas mediante una cadena de caracteres alfanuméricos.
- El método de selección.
- El método para producir variaciones mediante la recombinación.

De estas tres características, el principal distintivo de los AG es el énfasis que se le proporciona al operador genético de cruzamiento [18]. En general, la estructura de los AG es como se muestra en el pseudocódigo de la Figura 2.

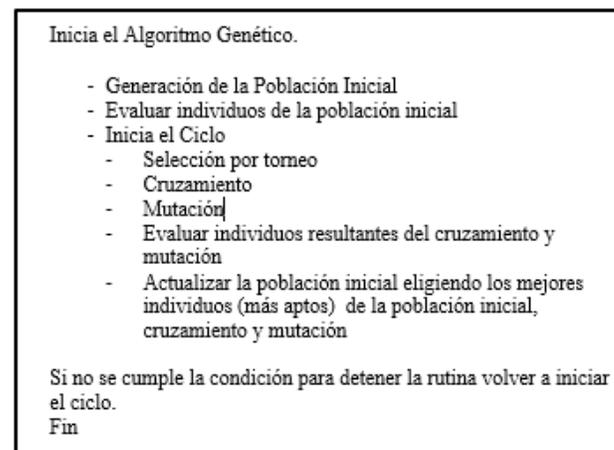


Figura 2 Estructura general de un algoritmo genético

Algoritmo genético para la optimización de la planeación de la red de transmisión (PERT)

Antes de generar la población inicial (Pi), primeramente se debe realizar la codificación del problema. Su configuración se caracteriza por un vector n, donde n es el número de trayectorias o caminos en donde se permite añadir nuevas líneas. Se pueden agregar nuevas líneas en cada trayectoria, teniendo como límite un máximo de 4 líneas nuevas y/o existentes por trayectoria para el sistema de prueba y 3 para los casos de estudio. En la Fig. 3 se muestra la codificación inicial para el sistema de prueba que se presenta en la Figura 4. En esta codificación inicial los ceros indican claramente que no se han agregado líneas o circuitos adicionales.

$$n_0 = \begin{matrix} 1-2 & 1-3 & 1-4 & 1-5 & 1-6 & 2-3 & 2-4 & 2-5 & 2-6 & 3-4 & 3-5 & 3-6 & 4-5 & 4-6 & 5-6 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Figura 2 Estructura general de un algoritmo genético

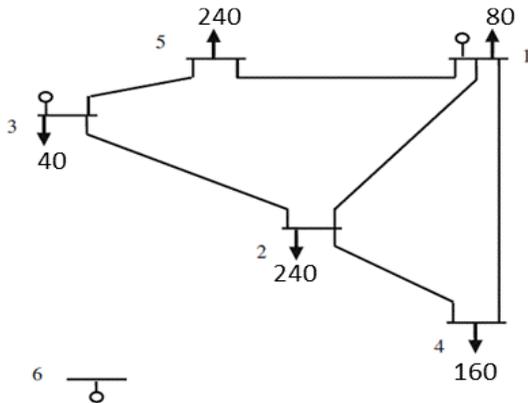


Figura 4 Configuración del sistema

El número de líneas que se pueden añadir en cada trayectoria se determinan de forma aleatoria, y así se va formando una topología diferente y por consiguiente un cromosoma nuevo. A manera de ejemplo: en las trayectorias 1-5 y 3-6 se añaden 2 y 4 líneas respectivamente, la codificación y configuración de ese cromosoma quedaría como en la Figura 5 y la topología del sistema se muestra en la Figura 6 [19].

$$n_1 = \begin{matrix} 1-2 & 1-3 & 1-4 & 1-5 & 1-6 & 2-3 & 2-4 & 2-5 & 2-6 & 3-4 & 3-5 & 3-6 & 4-5 & 4-6 & 5-6 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Figura 5 Codificación del nuevo cromosoma

Por otra parte, para incrementar la probabilidad de encontrar una solución óptima, se tiene que utilizar un tamaño de la población adecuado, ya que un tamaño pequeño de la población corre el riesgo de no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda y trabajar con poblaciones de gran tamaño nos puede generar problemas computacionales [20].

Por consiguiente, para formar la población inicial es importante elegir un tamaño adecuado. En base a esto y a la experiencia, la población inicial debe de ser directamente proporcional a la cantidad de nodos existente en el sistema. Por ejemplo, para el sistema de prueba (24 nodos) se obtienen resultados satisfactorios utilizando poblaciones iniciales de 30, 40 o 50 individuos. Mientras que para un sistema de 118 nodos se obtienen mejores resultados con una población inicial de 80 a 100 individuos.

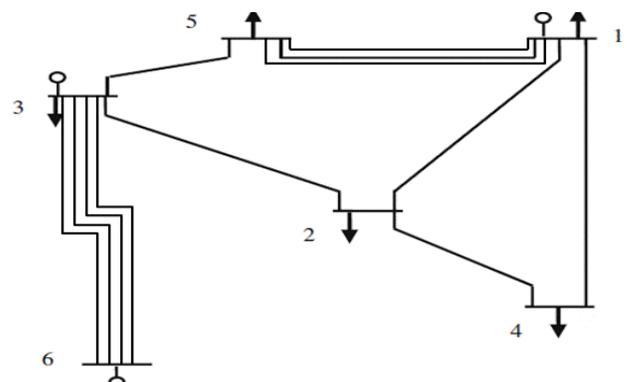


Figura 6 Configuración nueva del Sistema de Prueba

Selección por Torneo

En general el proceso de selección en los algoritmos genéticos es utilizado para determinar a los individuos que tendrán una representación en las siguientes generaciones.

Los individuos con un mayor valor de aptitud son los que tienen mayor posibilidad de sobrevivir para transmitir sus genes a las futuras generaciones, por el contrario, los individuos con menor valor de aptitud tienden a desaparecer. Este proceso de selección no puede generar nuevos individuos en la población por sí solo, es decir, no puede encontrar nuevos puntos en el espacio de búsqueda. Sin embargo, tiene una influencia significativa para dirigir la búsqueda hacia áreas que prometen encontrar mejores soluciones en menos tiempo. No obstante, se debe evitar que el algoritmo genético converja prematuramente hacia una solución óptima local. Esto se logra manteniendo la diversidad de la población de las nuevas generaciones [21].

Este esquema de selección es implementado de forma aleatoria sobre algún número de individuos de la población. Existen diversos esquemas de selección [22,23], sin embargo en este trabajo se utilizará la selección por torneo binario porque se adapta de forma adecuada al problema de la optimización en la planeación de la red de transmisión. Es importante destacar que la selección por torneo binario puede ser implementada muy eficientemente por que no se requiere clasificación de la población [25].

Normalmente, el torneo binario es frecuentemente celebrado únicamente entre dos individuos, donde selecciona el mejor individuo de este grupo y lo reubica en una segunda población, conocida como población de cruzamiento, y se repite este proceso hasta llenar esta segunda población. La cantidad de individuos que se deben seleccionar es determinada por la probabilidad de cruzamiento P_c , por ejemplo, para el sistema de prueba [24] si se tiene una población inicial de 10 individuos y una P_c de 0.6 se elegirán $P_c \cdot P_i$ individuos.

En la Tabla 1 se muestran los individuos de la población inicial con su respectiva aptitud (costo de inversión) para el ejemplo del sistema de prueba. Y en la Tabla 2 se presentan los individuos seleccionados para pasar a la etapa de cruzamiento, también llamada población de cruzamiento.

I_n	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	$\$S$
1	4	0	1	3	2	2	0	2	2	3	0	3	0	2	4	1403
2	4	4	1	3	1	4	3	0	2	4	4	3	3	1	0	1639
3	2	0	0	2	3	4	1	2	4	0	3	0	4	2	4	1442
4	3	3	0	1	1	0	3	4	1	0	3	4	3	0	1	1298
5	3	2	4	1	4	1	0	0	3	1	1	1	1	1	2	1380
6	4	1	4	0	4	3	4	3	0	2	3	0	0	1	4	1675
7	2	4	1	4	2	4	0	1	3	1	0	1	1	1	0	1109
8	1	2	2	0	4	0	1	2	3	0	4	2	0	3	1	1227
9	3	4	3	2	0	1	2	0	1	2	0	0	3	2	2	1311
10	4	3	1	2	4	4	4	1	3	4	3	2	1	2	1	1783

Tabla 1 Población Inicial de 10 individuos

I_n	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	$\$S$
9	3	4	3	2	0	1	2	0	1	2	0	0	3	2	2	1311
7	2	4	1	4	2	4	0	1	3	1	0	1	1	1	0	1109
1	4	0	1	3	2	2	0	2	2	3	0	3	0	2	4	1403
8	1	2	2	0	4	0	1	2	3	0	4	2	0	3	1	1227
3	2	0	0	2	3	4	1	2	4	0	3	0	4	2	4	1442
4	3	3	0	1	1	0	3	4	1	0	3	4	3	0	1	1298

Tabla 2 Población de Cruzamiento, $P_c=0.6$

Cruzamiento

El cruzamiento es un operador muy controversial debido a su naturaleza disruptiva (puede dejar fuera información importante) [26], idealmente se espera que los padres hereden sus mejores genes a los hijos aunque existe la posibilidad de que los descendientes hereden los peores genes de los padres. Afortunadamente el algoritmo genético tiene la capacidad de eliminar esos malos individuos en el transcurso del proceso de optimización. El operador de cruzamiento representa la reproducción sexual, opera sobre dos cromosomas a la vez para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres, los cuales son elegidos al azar de la población de cruzamiento.

El AG propuesto utiliza un punto de cruzamiento a la mitad o cercano a la mitad del cromosoma (Figura 7), donde los dos padres son cortados y los segmentos localizados después del punto de corte se intercambian. Los cromosomas resultantes son los hijos, ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. A continuación se describe el funcionamiento del proceso de cruzamiento que se utilizó para optimizar la PERT:

1. De la población de cruzamiento se seleccionan aleatoriamente dos individuos (Padre 1 y Padre 2) para ser cruzados y/o recombinados.
2. Cada padre es cortado a la mitad formado dos segmentos, las secciones que se obtienen después del punto se intercambian. Lo cual genera dos hijos (dos nuevos individuos) por cada pareja formada, como se ilustra en la Figura 7.
3. Los dos puntos anteriores se repiten $\frac{P_c P_1}{2}$ veces, formando así nuevos individuos.

En la Figura 8 se puede observar que los cromosomas hijos obtienen aptitudes diferentes a la los padres debido al intercambio de genes, lo cual beneficia a la diversidad de la población. El hijo dos obtuvo mejores genes que el hijo uno, logrando así una mejor aptitud. Inclusive mejor que los cromosomas padres.

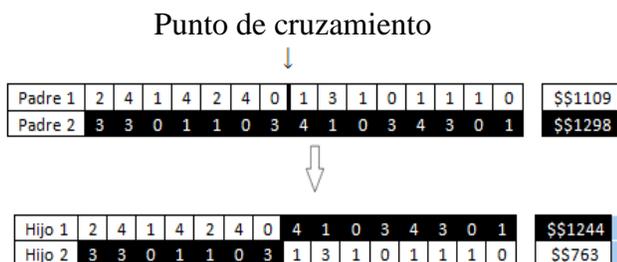


Figura 7 Descendientes obtenidos del cruzamiento.

Las topologías de red tanto de los padres como de los hijos se muestran en las Figuras 8 y 9. En las que se observa claramente que la topología del hijo 2 es menos robusta que la de los padres y el hijo 1, adicionando 19 nuevas líneas.

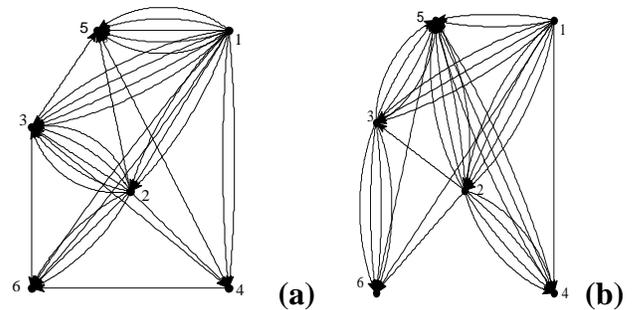


Figura 8 Topologías de Red del Padre 1 (a) y Padre 2 (b).

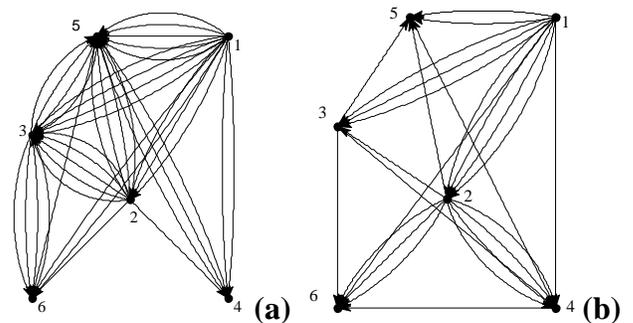


Figura 9 Topologías de Red del Hijo

Mutación

Si nos referimos en términos de evolución, la mutación se manifiesta de forma extraordinaria. En promedio las mutaciones suelen ser muy beneficiosas, pues contribuyen a la diversidad genética de la población. En este trabajo de investigación la mutación consiste en modificar ciertos genes de forma aleatoria atendiendo la probabilidad de mutación (P_m) previamente establecida. Una vez que se elige aleatoriamente el punto de mutación (gen o localidad del cromosoma) de un descendiente, la decisión de incrementar o reducir el número de líneas en cada unidad debe ser tomada de forma aleatoria [14].

A manera de ejemplo se realizará el proceso de mutación en un cromosoma donde el gen elegido cambiará su estado inicial de 3 líneas y se reducirá a 1 línea, como se puede observar en la Figura 10. Se observa como el gen mutado ocasionó una mejor aptitud (costo de inversión) en el cromosoma del Hijo 2, obteniendo una configuración con menos cantidad de líneas, ver Figura 11. La mutación en el algoritmo genético propuesto se puede resumir de la siguiente forma:

1. De los hijos resultantes de la etapa de cruzamiento se eligen al azar Pm individuos para ser mutados.
2. Una vez que se tienen los individuos se elige aleatoriamente un punto de mutación.
3. Ya que se tiene el punto de mutación, el algoritmo aumenta o disminuye el número de líneas en cada punto de forma aleatoria.

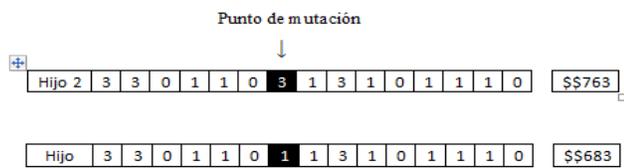


Figura 10 Mutación

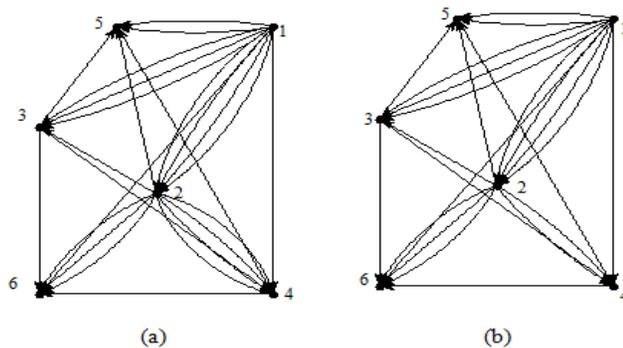


Figura 11 Topologías de Red del Hijo 2 (a) y del Hijo Resultante de la Mutación (b)

Planeación de la Expansión de la Red de Transmisión (PERT) estática

El principal objetivo de la PERT es determinar en qué trayectorias (derechos de vía) construir nuevas líneas de transmisión con el propósito de satisfacer la carga futura de forma económica. En general la optimización de la expansión de la red de transmisión consiste en definir cuando y donde se necesitan y deben ser instalados nuevas líneas en la red para satisfacer, de manera eficaz y eficiente el crecimiento de energía eléctrica en el mercado. La expansión de la red debe satisfacer una serie de restricciones eléctricas, económicas, financieras, sociales y ambientales. Generalmente, la PERT se puede clasificar en dos tipos: estática o dinámica. La expansión de la red de forma estática determina donde y cuantas líneas de transmisión se deben instalar a futuro en un plazo total de tiempo. Si la PERT estática, se separa en varias etapas de tiempo (1, 2, 3 años) entonces se convierte en PERT dinámica.

A continuación se presenta el proceso de la planificación de la expansión de la red de transmisión utilizando el AG, para el caso de estudio de la Figura 4, donde se propone optimizar la red futura del sistema Garver, mostrado en la Figura 12 para una demanda total. Los datos de las líneas y buses del sistema Garver se presentan en las Tablas 3 y 4 respectivamente.

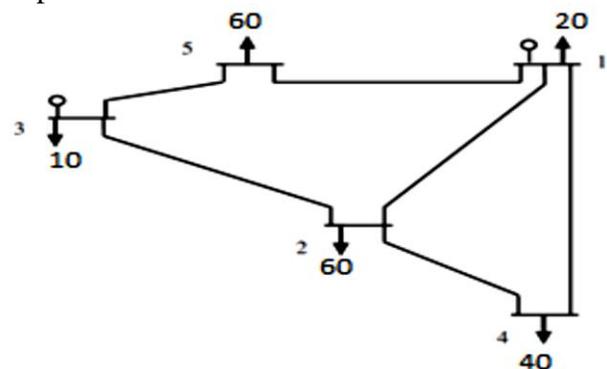


Figura 12 Configuración inicial del sistema Garver.

Líneas	Costo (\$)	R (pu)	X (pu)	Capacidad (MW)
1-2	40	0.10	0.40	100
1-4	60	0.15	0.60	80
1-5	20	0.05	0.20	100
2-3	20	0.05	0.20	100
2-4	40	0.10	0.40	100
3-5	20	0.05	0.20	100

Tabla 3 Datos iniciales de líneas del sistema de prueba

En la expansión del sistema de transmisión de prueba para un periodo de tiempo de 10 años, la carga aumentará cuatro veces su valor inicial. Para satisfacer la demanda se deben optimizar primero la generación y después la PERT. Derivado de la optimización de la planeación de la generación se encontró que para satisfacer la demanda, se instala un nuevo nodo de generación como se muestra en la Tabla 5.

Bus	P _G	Carga (MW)
1	50	20
2	0	60
3	165	10
4	0	40
5	0	60

Tabla 4 Datos de generación y carga iniciales del sistema de

Bus	P _G	Carga (MW)
1	50	80
2	0	240
3	165	40
4	0	160
5	0	240
6	545	0

Tabla 5 Datos de generación y carga finales del sistema de prueba

En las Tablas 7, 8 y Figura 13 se muestra el resultado final de la PERT estática (de las trayectorias posibles de líneas mostradas en la Tabla 6) siguiendo el procedimiento indicado en el punto anterior. Este resultado no indica en qué años deben entrar las obras necesarias, por lo que mediante el algoritmo propuesto basado en el punto anterior se obtendrá la PERT dinámica.

Líneas	Costo (\$)	R (pu)	X (pu)	Capacidad (MW)
1-2	40	0.10	0.40	100
1-3	38	0.09	0.38	100
1-4	60	0.15	0.60	80
1-5	20	0.05	0.20	100
1-6	68	0.17	0.68	70
2-3	20	0.05	0.20	100
2-4	40	0.10	0.40	100
2-5	31	0.08	0.31	100
2-6	30	0.08	0.30	100
3-4	59	0.15	0.59	82
3-5	20	0.05	0.20	100
3-6	48	0.12	0.48	100
4-5	63	0.16	0.63	75
4-6	30	0.08	0.30	100
5-6	61	0.15	0.61	78

Tabla 6 Matriz de trayectorias posibles Zlin donde se obtiene la población inicial P_i prueba.prueba

Líneas	Costo (\$)	R (pu)	X (pu)	Capacidad(MW)
1-2	40	0.10	0.40	100
1-4	60	0.15	0.60	80
1-5	20	0.05	0.20	100
2-3	20	0.05	0.20	100
2-4	40	0.10	0.40	100
2-6	30	0.08	0.30	100
2-6	30	0.08	0.30	100
2-6	30	0.08	0.30	100
2-6	30	0.08	0.30	100
3-5	20	0.05	0.20	100
3-5	20	0.05	0.20	100
4-6	30	0.08	0.30	100
4-6	30	0.08	0.30	100

Tabla 7 Datos finales de líneas de la solución del sistema Garver derivado de la PERT estática

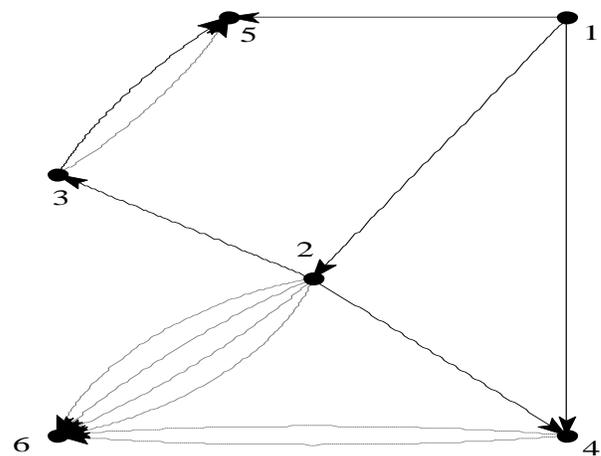


Figura 13 Configuración Óptima

	J. Silva [4]	H. Khorasani [74]	K. Y. Lee [5]	AG propuesto
Técnica de optimización	AG	CHA	SA	AG
Solución del sistema	$n_{3-3}=1, n_{2-6}=4, n_{4-6}=2$	$n_{3-3}=1, n_{2-6}=4, n_{4-6}=2$	$n_{3-3}=1, n_{2-6}=4, n_{4-6}=2$	$n_{3-3}=1, n_{2-6}=4, n_{4-6}=2$
Líneas adicionales totales	7	7	7	7
Iteración	51	11	200-1200	17
Costos	\$200 000 USD	\$200 000 USD	\$200 000 USD	\$200 000 USD

Tabla 8 Optimización estática del sistema de 6 nodos

Planeación de la Expansión de la Red de Transmisión (PERT) Dinámica

Para realizar la PERT Dinámica se obtiene la demanda anual del sistema que es mostrada en la Tabla 9.

Bus	Crecimiento anual de la demanda en MW en un horizonte de 10 años										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20	26	32	38	44	50	56	62	68	74	80
2	60	78	96	114	132	150	168	186	204	222	240
3	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40
4	40	52	64	76	88	100	112	124	136	148	160
5	60	78	96	114	132	150	168	186	204	222	240
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	170	247	304	361	418	475	532	589	646	703	760

Tabla 9 Datos de demanda anual

También se tiene que hacer lo mismo con las generaciones, en éste caso las generaciones de los buses 1 y 3 se mantienen constantes y el generador del bus 6 es el que satisface los incrementos de demanda anual. El AG se puede realizar mediante cualquier software que cuente con herramientas de optimización y de flujos de potencia tales como el MatPower de MATLAB® para la optimización y las corridas de flujos de potencia. El diagrama de flujos del algoritmo propuesto se muestra en la Figura 14. Donde se observa los datos iniciales que no cambian durante todo el proceso, en el ciclo de 1 a 10 años.

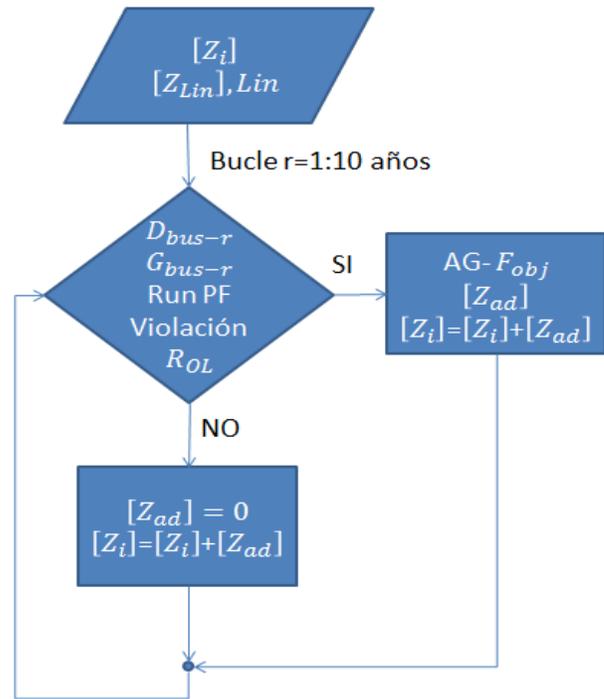


Figura 14 Diagrama de flujo para la PERT Dinámica

En cada año se incrementa la demanda, y se corren flujos de potencia para saber si la restricción de capacidad máxima no se sobrepasa, si es así, se corre el AG en base a la función objetivo que puede ser por costo, por pérdidas de potencia o por perfil de voltaje y se obtienen la configuración que arroja una Z_{ad} que se va sumando a la Z_{Lin} , Si no se sobrepasa la restricción de capacidad máxima, la Z_{ad} es igual a cero y se suma a la Z_{Lin} . Al final del bucle queda una Z_{final} . Si es una sola función objetivo, se pueden obtener varias configuraciones, que pueden ser evaluadas económicamente.

Para el sistema Garver se obtuvieron varias soluciones que se muestran en la Figura 15. En la Tabla 10 se muestra el mejor resultado que coincide con la solución obtenida en la PERT estática.

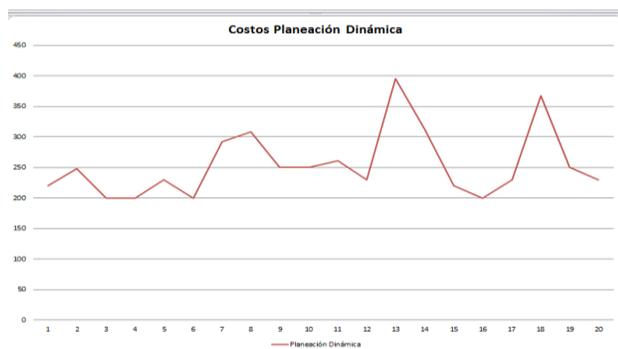


Grafico 1 Corridas obtenidas en la PERT Dinámica

Línea	Líneas agregadas por año (Solución PERT Dinámica)																				TOTAL				
	0	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		C	\$		
		C	\$	C	\$	C	\$	C	\$	C	\$	C	\$	C	\$	C	\$	C	\$	C	\$				
1-2	1																						1	0	
1-4	1																						1	0	
1-5	1																						1	0	
2-3	1																						1	0	
2-4	1																						1	0	
2-6	1	1	30							1	30				1	30					1	30	4	120	
3-5	1									1	20												2	20	
4-6	1				1	30	1	30															2	60	
TOTAL	6	1	30	0	0	1	30	1	30	2	50	0	0	1	30	0	0	1	30	0	0	1	30	13	200

Tabla 10 Mejor opción obtenida en la PERT Dinámica

Conclusiones

Se desarrolló este algoritmo para la PERT a n años de sistemas reales de más de 100 nodos, ya que el tiempo del estudio se reduce considerablemente. Se obtienen más opciones de proyectos y se puede ampliar la búsqueda de más de una función objetivo, tales como minimización de pérdidas de potencia, maximización de perfil de voltaje o maximización de la confiabilidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México-DGEST, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato (CONCYTEG) y a Comisión Federal de Electricidad División Bajío por su apreciable apoyo en la realización de este proyecto de investigación.

Referencias

[1] A.C. Santos, A.C.B. Delbem, J.B.A. London, N.G. Bretas, "Node Depth Encoding and Multiobjective Evolutionary Algorithm Applied to Large-Scale Distribution System Reconfiguration", IEEE Transaction on Power Systems, vol.25, No.3. pp.1254-1265, Agosto 2010.

[2] Y.M Attwa, E.f. El-Saadany, "Wind based distribution generation, uncertainties and planning obstacles", IEEE Power engineering society general meeting 2007, 24-28 June 2007 pp. 1-5, ISBN 1932-5517.

[3] B.H Bakken, H.I. Skjelbred, "Planning of distributed energy supply to suburb", IEEE power engineering society general meeting 2007", 24-28 Junio 2007 pp. 1-8 Tampa, Florida ISSN 1932-5517, ISBN:1932-5517.

[4] Y. Katsuhisa, Y. Keiichiro Y. Ryuichi, "Transmission Expansion Planning Using Neuro-Computing Hybridized with Genetic Algorithm," Tokyo Metropolitan University, 1995.

[5] M. Dorigo, L.M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," IEEE Trans. Evolut. Comput., Vol. 1, No. 1, pp. 53-66, 1997.

[6] Caponetto R, Fortuna L, Fazzino S, Xibilia M, "Chaotic sequences to improve the performance of evolutionary algorithms", IEEE Trans. Evol. Comput., Vol. 7, No. 3, pp. 289-304, 2003.

[7] Lee, K. Y. and M. A. El-Sharkawi (Editors), Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems, IEEE Press, ISBN: 978-0-471-45711-4, Wiley: New York, 2008.

- [8] Randy L. Haupt, Sue Ellen Haupt, "Practical Genetic algorithms", second edition, Editors Wiley Interscience, John Wiley and Sons, 2004.
- [9] L. Painton, J. Campbell, "Genetic algorithms in Optimization of system reliability," IEEE Transactions on Reliability, vol. 44, pp. 172-178, 1995.
- [10] A Kumar, R M. Pathak and Y. P. Gupta, "Genetic-algorithm-based reliability optimization for computer expansion", IEEE Transactions on Reliability, vol. 44, pp. 63-72, 1995.
- [11] D. E. Coit, A E. Smith, "Reliability optimization of series-parallel systems using a genetic algorithm", IEEE Transactions on Reliability, vol. 45, pp. 254-260, 1996.
- [12] H. Seifi, M. S. Sepasian, Electric Power System Planning, ISBN 978-3-642-17988-4, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [13] Holland, J.H., "Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence," The University of Michigan Press, 1975.
- [14] J. Silva et al., "Transmission Network Expansion Planning With Security Constraints," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 152, no. 6, pp. 828-836, Nov. 2005.
- [15] Alexandre P. Alves da Silva, "Tutorial on Genetic Algorithms," Learning and Nonlinear Models (Journal of the Brazilian Neural Network Society), Vol. 1, No. 1, 2002, pp. 43-58.
- [16] Goldberg, D.E, "Genetics algorithms in search, optimization and machine Learning," Addison Wesley, Reading, Mass., USA, 1989.
- [17] Michalewicz, Z., "Genetic algorithms+data structures evolution programs," Artificial Intelligence, Springer, Berlin, Germany, 1996.
- [18] Baeck T, Fogel D.B., Michalewicz Z., "Evolutionary computation, vol.1, basic algorithms and operators", United Kingdom 2000.
- [19] J. Montecilli Alcir y R. Ruben, "Network Planning," en Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems, 1st. Ed: Wiley-IEEE Press, 2002, pp. 114-129.
- [20] R. A. Ahmed, "Genetic Algorithm-Based Power Transmission Expansion Planning," 7th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (Cat. No.00EX445), Vol. 2, 2000, pp. 642-645.
- [21] Da Silva E.L., H.A. Gil y Areiza J.M., "Transmission Network Expansion Planning Under an Improved Genetic Algorithm," IEEE Transactions on Power systems, Vol. 15, No. 3, 2000, pp. 1168-1174.
- [22] D.E. Goldberg and L. Thiele, "A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms," in Foundations of Genetic Algorithms, Morgan Kaufman, 1991, pp. 69-63.
- [23] T. Blicke y L. Thiele, "A comparison of selection schemes used in genetic algorithms," Swiss Federal Institute of Technology, TIK-Report, 2nd Ed., No. 11, 1995.
- [24] L.L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming," IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-89, No. 7, pp. 1688-1697, Sep./Oct., 1970.

[25] J. B. Park, K. Y. Lee et al., "An Improved Genetic Algorithm of Generation Expansion Planning," IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 916-922, Agosto 2000.

[26] R. A. Ahmed, "Genetic Algorithm-Based Power Transmission Expansion Planning," 7th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (Cat. No.00EX445), Vol. 2, 2000, pp. 642-645.