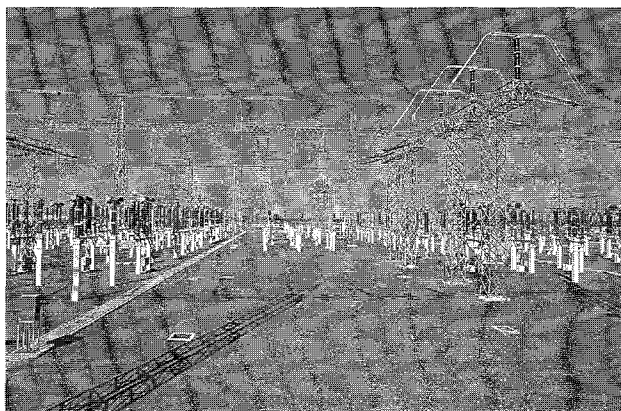


El tamaño de los sistemas eléctricos de potencia de hoy en día, la incertidumbre en las tasas de crecimiento de la demanda y en la ubicación de la generación, convierten el problema de planeación de transmisión en un problema de gran escala, estocástico y combinatorio.



Planeación de la expansión de transmisión con programación evolutiva

*José Luis Ceciliano Meza y
Rolando Nieva Gómez*

Resumen

Se presenta un método de programación evolutiva para la planeación de redes de transmisión en sistemas eléctricos de potencia. Este es un problema entero mixto y no lineal, con una naturaleza combinatoria que conduce a un número muy grande de soluciones posibles para sistemas eléctricos de mediana y gran escala. Se describe brevemente el problema de planeación de transmisión y posteriormente se formula en términos matemáticos. El algoritmo propuesto de programación evolutiva se aplica a una red eléctrica de gran escala que es representativa del sistema eléctrico mexicano.

Introducción

La planeación de la expansión de una red de potencia eléctrica es un proceso

complejo. El objetivo es identificar qué tipo de nuevo equipo (líneas de transmisión), cuándo, cuánto y dónde debería ser instalado, con el propósito de satisfacer la demanda de energía al mínimo costo de inversión y operación. El tamaño de los sistemas eléctricos de potencia de hoy en día, la incertidumbre en las tasas de crecimiento de la demanda y en la ubicación de la generación convierten el problema de planeación de transmisión en un problema de gran escala, estocástico y combinatorio. Se han propuesto simplificaciones del problema [Villasana R. *et al*, 1985] para reducir su complejidad y facilitar la automatización del proceso de planeación a través de técnicas computacionales. Una de estas simplificaciones es el problema determinístico de planeación de transmisión de una etapa (PT1E).

El objetivo en este problema es determinar dónde, cuánto y qué tipo de equipo debería ser instalado para lograr el mínimo costo de inversión y operación, satisfaciendo al mismo tiempo las restricciones impuestas por el sistema. Los datos que son conocidos incluyen la configuración existente de la red y sus límites de transmisión, los costos tecnológicos para el nuevo equipo, las restricciones de inversión, la capacidad de generación y los costos de producción de las

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

unidades generadoras, así como la demanda para diversas condiciones. Aunque es más simple que el problema de varias etapas, el PT1E es un problema difícil de gran escala, entero mixto y no lineal, el cual frecuentemente presenta múltiples óptimos locales, y donde el número de posibles soluciones crece exponencialmente de acuerdo con el tamaño de la red de transmisión.

Durante los últimos treinta años se han propuesto diferentes métodos de solución para resolver el problema PT1E. Se pueden clasificar en dos grupos: los que utilizan técnicas de programación matemática y los que utilizan métodos heurísticos modernos.

Durante los últimos treinta años se han propuesto diferentes métodos de solución para resolver el problema PT1E. Estos métodos se pueden clasificar en dos grupos. El primero incluye una variedad de diversas técnicas de programación matemática, tales como: programación lineal [Garver, 1970], [Villasana, R. *et al.*, 1985], programación no lineal [Romero, R. *et al.*, 1993], programación entera mixta [Romero, R. *et al.*, 1994], [Levi, V., 1995], programación dinámica [Monticelli, A. *et al.*, 1979] y el método de descomposición de Benders [Pereira, M. *et al.*, 1985], [Ruiz, M. *et al.*, 1994]. El segundo grupo incluye métodos heurísticos modernos como los algoritmos genéticos (AG) [Gallego, R. *et al.*, 1996] el método de recocido simulado (RS) [Romero, R. *et al.*, 1996], la búsqueda tabú (BT) [Gallego, R. *et al.*, 1997] y la programación evolutiva (PE) [Ceciliano, J. *et al.*, 1998 y 1999]. El reto para los métodos de solución basados en la programación matemática es resolver problemas de gran escala. La naturaleza combinatoria en las decisiones de expansión origina formulaciones de programación entera mixta, las cuales sólo pueden ser resueltas para sistemas de potencia de pequeña y mediana dimensión. En el caso de las heurísticas modernas, las dificultades principales son el ajuste de los parámetros de ejecución del algoritmo y su lenta convergencia. Aplicaciones recientes de heurísticas modernas en problemas de gran escala han mostrado resultados satisfactorios, sin embargo aún falta más trabajo de investigación para probar su verdadero potencial de utilización. Las aplicaciones del método de recocido simulado en sistemas eléctricos de potencia indican la dificultad en el ajuste de los parámetros del algoritmo y una lenta convergencia de éste para sistemas grandes [Yang, H. *et al.*, 1996]. En el caso de los algoritmos genéticos, existe evidencia de que la forma de llevar a cabo la codificación de variables tiene impacto en la convergencia del algoritmo

[Fogel, L., 1995]; además, las operaciones de cruzamientos en los algoritmos genéticos pueden afectar la liga de comportamiento esencial entre cada padre e hijo de la población, afectando la convergencia hacia la solución óptima. Recientemente se propuso un algoritmo híbrido que combina la búsqueda tabú, el método de recocido simulado y los algoritmos genéticos para resolver el problema PT1E [Gallego, R. *et al.*, 1997]. Los resultados en dicho trabajo indican que el algoritmo híbrido proporciona mejores resultados que las tres heurísticas en forma separada. Los autores de este trabajo han propuesto un nuevo método basado en la programación evolutiva (PE) para la planeación de redes de transmisión, aplicado al problema PT1E [Ceciliano, J. *et al.*, 1999]. La programación evolutiva es un método estocástico de optimización, el cual está inspirado en el proceso de la evolución natural. La creación de descendientes es un proceso aleatorio que incluye la competencia y la selección de una generación de individuos a otra. En comparación con los algoritmos genéticos, la PE no requiere la codificación de las variables de decisión del problema. La forma general del algoritmo de PE se puede consultar en la referencia [Fogel, D., 1994]. Las estrategias evolutivas (EE) o modelos de programación evolutiva se desarrollaron de manera independiente en Alemania [Schwefel, H., 1965], [Rosenberg, I., 1973] y en los Estados Unidos [Fogel, L., 1962].

Formulación del problema

Definición de términos

Nodo. Punto en el cual la carga, capacidad de generación y uno o más arcos tienen una conexión común.

Arco. Camino para la transmisión, el cual conecta un nodo con cualquier otro. Un arco contiene uno o más circuitos eléctricos.

Circuito. Elemento sencillo de transmisión en un arco.

Flujo de potencia. Flujo de potencia eléctrica en un circuito o arco.

Generación. Generación de potencia eléctrica.

Carga. Demanda de potencia eléctrica.

Condición de demanda. Patrón de demandas en los nodos de la red para un instante de tiempo.

Pérdida de carga. Evento de un déficit de potencia eléctrica en uno o más nodos.

Corte de carga. Cantidad de déficit de potencia.

Notación

A. Conjunto de arcos.

N. Número de nodos.

ND. Número de condiciones de demanda.

T_k. Duración de la condición *k*.

- arc_{ij} . Arco que conecta el nodo i con el nodo j . Por convención, el nodo i es el origen y el nodo j es el destino del arco $i-j$.
- O_i . Conjunto de arcos cuyo origen es el nodo i .
- D_i . Conjunto de arcos cuyo destino es el nodo i .
- n_{ij}^0 . Número de circuitos que existen inicialmente en el arco $i-j$.
- c_{ij} . Costo de adición de un circuito en el arco $i-j$.
- cge_i . Costo de generación en el nodo i .
- d_{ik} . Carga en el nodo i durante la condición de demanda k .
- α_i . Valor de un corte de carga en el nodo i .
- \bar{n}_{ij} . Número máximo permitido de circuitos a agregar en el arco $i-j$.
- \bar{f}_{ij} . Capacidad de flujo de un circuito en el arco $i-j$.
- f_{ij} . Flujo de un circuito del arco $i-j$. Es positivo si los flujos de potencia van del nodo i al nodo j .
- $f_{\text{arc}_{ij}}$. Flujo a través del arco $i-j$.
- γ_{ij} . Susceptancia de un circuito en el arco $i-j$.
- \bar{g}_i . Capacidad de generación en el nodo i .
- n_{ij} . Número de nuevos circuitos en el arco $i-j$.
- $f_{\text{arc}_{ij}k}$. Flujo a través del arco $i-j$ en la condición de demanda k .
- g_{ik} . Generación en el nodo i durante la condición k .
- θ_{ik} . Ángulo fase de voltaje en el nodo i durante la condición k .
- r_{ik} . Corte de carga en el nodo i durante la condición k .
- z . Función objetivo.

Función objetivo

La función objetivo se define como la suma del costo de inversión de nuevos circuitos, la penalización por cortes de carga y los costos de generación.

$$z = \sum_{ij \in A} c_{ij} n_{ij} + \sum_{k=1}^{ND} \left[\sum_{i=1}^N \alpha_i r_{ik} + \sum_{i=1}^N cge_i g_{ik} \right] T_k$$

El problema de expansión de transmisión de una etapa es determinar el conjunto de variables reales $\{\theta_{ik}, g_{ik}, r_{ik}; i = 1 \dots ND\}$ y el conjunto de variables enteras no negativas $\{n_{ij}; \forall \text{arc}_{ij}\}$ que minimizan la función objetivo z , sujeto a las siguientes restricciones:

Ecuaciones de flujo en la red

El modelo de flujos de potencia DC representa las ecuaciones de flujo en la red. Así, el flujo de potencia a través de un circuito en el arco $i-j$ se expresa en términos de los ángulos de voltaje en los nodos i y j , y de la susceptancia del circuito:

$$f_{ij} = \gamma_{ij} (\theta_j - \theta_i)$$

El flujo de potencia a través del arco $i-j$ se expresa en función del número de circuitos en el arco:

$$f_{\text{arc}_{ij}} = (n_{ij} + n_{ij}^0) \gamma_{ij} (\theta_j - \theta_i)$$

Las ecuaciones de balance en los nodos toman la forma:

$$\sum_{\text{arc}_{ij} \in D_i} f_{\text{arc}_{ij}k} - \sum_{\text{arc}_{ij} \in O_i} f_{\text{arc}_{ij}k} + g_{ik} + r_{ik} = d_{ik}$$

$$\forall i = 1 \dots N; k = 1 \dots ND$$

El ángulo de voltaje en el nodo de referencia es igual a cero:

$$\theta_{\text{nodo de referencia}} = 0$$

Límite de flujos en los arcos

$$(n_{ij} + n_{ij}^0) \gamma_{ij} |(\theta_i - \theta_j)| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \quad \forall \text{arc}_{ij}; k = 1 \dots ND$$

Capacidad de generación

$$0 \leq g_{ik} \leq \bar{g}_i \quad i = 1 \dots N; k = 1 \dots ND$$

Límite de cortes de carga

$$0 \leq r_{ik} \leq d_{ik} \quad i = 1 \dots N; k = 1 \dots ND$$

Límite del número de circuitos en los arcos

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall \text{arc}_{ij}$$

Propiedades del problema

1. Sustituyendo un conjunto conocido de variables enteras $\{\eta = n_{ij}; \forall \text{arc}_{ij}\}$ en las expresiones presentadas anteriormente, el problema de obtener el óptimo (mínimo) valor objetivo $z(\eta)$ se convierte en un problema de programación lineal de la forma:

$$z(\eta) = \min \sum_{ij \in A} c_{ij} n_{ij} + \sum_{k=1}^{ND} \left[\sum_{i=1}^N \alpha_i r_{ik} + \sum_{i=1}^N cge_i g_{ik} \right] T_k$$

sujeto a:

$$\sum_{\text{arc}_{ij} \in D_i} [(n_{ij} + n_{ij}^0) \gamma_{ij} (\theta_i - \theta_j)] - \sum_{\text{arc}_{ij} \in O_i} [(n_{ij} + n_{ij}^0) \gamma_{ij} (\theta_j - \theta_i)] +$$

$$g_{ik} + r_{ik} = d_{ik}; i = 1 \dots N; k = 1 \dots ND$$

$$(n_{ij} + n_{ij}^0) \gamma_{ij} |(\theta_i - \theta_j)| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \bar{f}_{ij} \quad \forall \text{arc}_{ij}; k = 1 \dots ND$$

$$0 \leq g_{ik} \leq \bar{g}_i \quad i = 1 \dots N; k = 1 \dots ND$$

$$0 \leq r_{ik} \leq d_{ik} \quad i = 1 \dots N; k = 1 \dots ND$$

$$\theta_{\text{nodo de referencia}} = 0$$

Los límites impuestos en la variable r_{ik} garantizan que siempre exista una solución factible para este problema.

2. Las ecuaciones de flujo en la red satisfacen las dos leyes de Kirchhoff (conservación de flujo en cada nodo y conservación de voltaje en cada rama de la red). Al relajar la restricción de que las adiciones de circuitos deben ser enteras y al no cumplir con la segunda ley de Kirchhoff, PTIE se convierte en un problema de programación lineal, el cual es más fácil de resolver. La solución óptima del problema PTIE relajado es una cota inferior para el problema PTIE. Se espera que ambas soluciones óptimas sean muy parecidas, principalmente para redes radiales, en las cuales el número de mallas es mínimo.

El alcance de este artículo puede resumirse en tres objetivos: el primer objetivo fue presentar un panorama general de lo que se ha hecho a través del tiempo sobre la planeación de expansión de transmisión; el segundo objetivo es describir el problema de la expansión de transmisión, así como el algoritmo de PE, y el tercero es mostrar un ejemplo de aplicación.

Método propuesto

El algoritmo de programación evolutiva propuesto se describe en los siguientes pasos:

Paso 1. Población inicial. El procedimiento de búsqueda inicia con una población de Np soluciones candidatas $\{\eta_i; i = 1 \dots Np\}$ seleccionadas aleatoriamente. La solución candidata η_i representa un conjunto de números enteros no negativos $\{\eta_{ij}; \forall \text{arc}_{ij}\}$, donde η_{ij} es el número de circuitos en el arco arc_{ij} . Opcionalmente, uno o más de los candidatos puede ser obtenido de la solución óptima del problema PTIE relajado, al redondear las adiciones de circuitos fraccionarias.

Paso 2. Evaluación de candidatos. Los valores objetivos $z(\eta_i)$ de las soluciones candidatas $\{\eta_i; i = 1 \dots Np\}$ son calculados y el mejor valor objetivo se denota como: z_{\min} .

Paso 3. Creación de descendientes. A través de un proceso de mutación se crea un solo descendiente para cada padre. El descendiente η_i^* se obtiene de η_i usando la siguiente regla:

$$\eta_{ij}^* = \text{parte entera} [\eta_{ij} + N(0, \sigma_{ij}^2)]; \forall \text{arc}_{ij}$$

Donde $N(0, \sigma_{ij}^2)$ denota la variable aleatoria normal con media cero y desviación estándar:

$$\sigma_{ij} = \beta \left(\frac{z(\eta_i)}{z_{\min}} \right) \bar{n}_{ij}$$

Aquí β es un factor positivo de escala menor que 1. Cuando el número de circuitos calculados excede sus límites inferior o superior entonces el número se trunca a su correspondiente valor límite.

Paso 4. Equipo elite. Los Ne individuos con los mejores valores objetivo se seleccionan de las poblaciones de padres e hijos para formar un grupo elite, el cual sobrevivirá y será parte de la siguiente generación.

Paso 5. Competencia y selección. De la población restante de $2Np - Ne$ padres e hijos se selecciona un grupo de $Np - Ne$ individuos con los mejores puntajes obtenidos después de una competencia estocástica. El puntaje del l -ésimo individuo se calcula con la siguiente regla:

$$W_l = \sum_{i=1}^{Np} w_{li}$$

$$w_{li} = \begin{cases} 1 & \text{si } z(\eta_i) < z(\eta_l) \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

El competidor se selecciona aleatoriamente de la población de $2Np - Ne$ individuos. Una nueva generación de Np individuos se forma con los miembros del equipo elite y los $Np - Ne$ individuos con los mejores resultados de puntuación en la competencia estocástica. El valor z_{\min} se actualiza con el mejor valor de la función objetivo.

Paso 6. Criterio de paro. El proceso sigue en el paso 3 mientras el máximo número de generaciones no haya sido alcanzado, de otra manera el proceso termina. Al final se obtiene un conjunto $2Np$ de muy buenas soluciones para el problema.

Ejemplo de aplicación

Sistema eléctrico mexicano

El ejemplo presentado en este trabajo sólo es un estado hipotético del sistema eléctrico mexicano para el año 2007. En la figura 1 se muestra la versión reducida del sistema eléctrico de transmisión mexicano a 230 y 400 kV. En el ejemplo el sistema tiene 205 nodos, 342 unidades generadoras, 448 arcos y 535 circuitos. Las alternativas de expansión incluyen la adición de nuevos circuitos en todos los arcos existentes y en cinco nuevas posibles uniones de nodos. Las proyecciones para este ejemplo de capacidad de generación y demanda pico son: 48 795 MW y 37 203 MW, respectivamente.

El algoritmo de PE se probó primero con una población inicial de soluciones generada aleatoriamente. El mejor valor objetivo inicial fue de 5 298 millones de dólares anuales (622 millones corresponden a inversiones de transmisión). La solución se obtuvo después de veinte mil iteraciones, lo cual significa resolver 120 mil problemas de programación lineal (LP). El mejor plan de expansión decide instalar 48 nuevos circuitos con un costo total de 4 715 millones (73 millones es costo de transmisión). Este costo total es similar a la cota inferior obtenida del problema PTIE relajado (4 662 millones), la diferencia corresponde a un 1.14%. Las líneas oscuras mostradas en la figura 1 representan los arcos donde son instalados nuevos circuitos.

El algoritmo propuesto también fue probado con una población inicial obtenida de la solución del problema PTIE relajado, redondeando las adiciones fraccionarias de circuitos. El valor objetivo inicial para este caso es de 8 239 millones de dólares anuales (\$49.4 millones corresponden a inversiones de transmisión). El alto costo obtenido se debe a la penalización impuesta por cortes de carga. La evaluación

de las soluciones candidatas indica cortes de carga. Como la penalización es veinte veces mayor que el costo de producción del generador más caro, entonces los costos de las soluciones candidatas son muy altos al inicio. Sin embargo, el proceso de mutación, después de muy pocas iteraciones, produce soluciones candidatas sin la existencia de cortes de carga.

El ejemplo presentado en este trabajo sólo es un estado hipotético del sistema eléctrico mexicano para el año 2007.

La solución fue obtenida después de 11 500 iteraciones, lo cual requiere de 69 mil soluciones de LP. La mejor solución instala cincuenta nuevos circuitos y tiene un valor objetivo de 4 710 millones, de los cuales 69 millones son inversiones de transmisión. El uso de una población inicial deducida del problema PTIE relajado originó una solución tan buena como la obtenida con un inicio aleatorio, pero con ahorro de esfuerzo computacional de 42.5%. En la

FIGURA 1

Representación reducida del sistema eléctrico mexicano. Generación adicional de 15 298 MW (1998-2007).

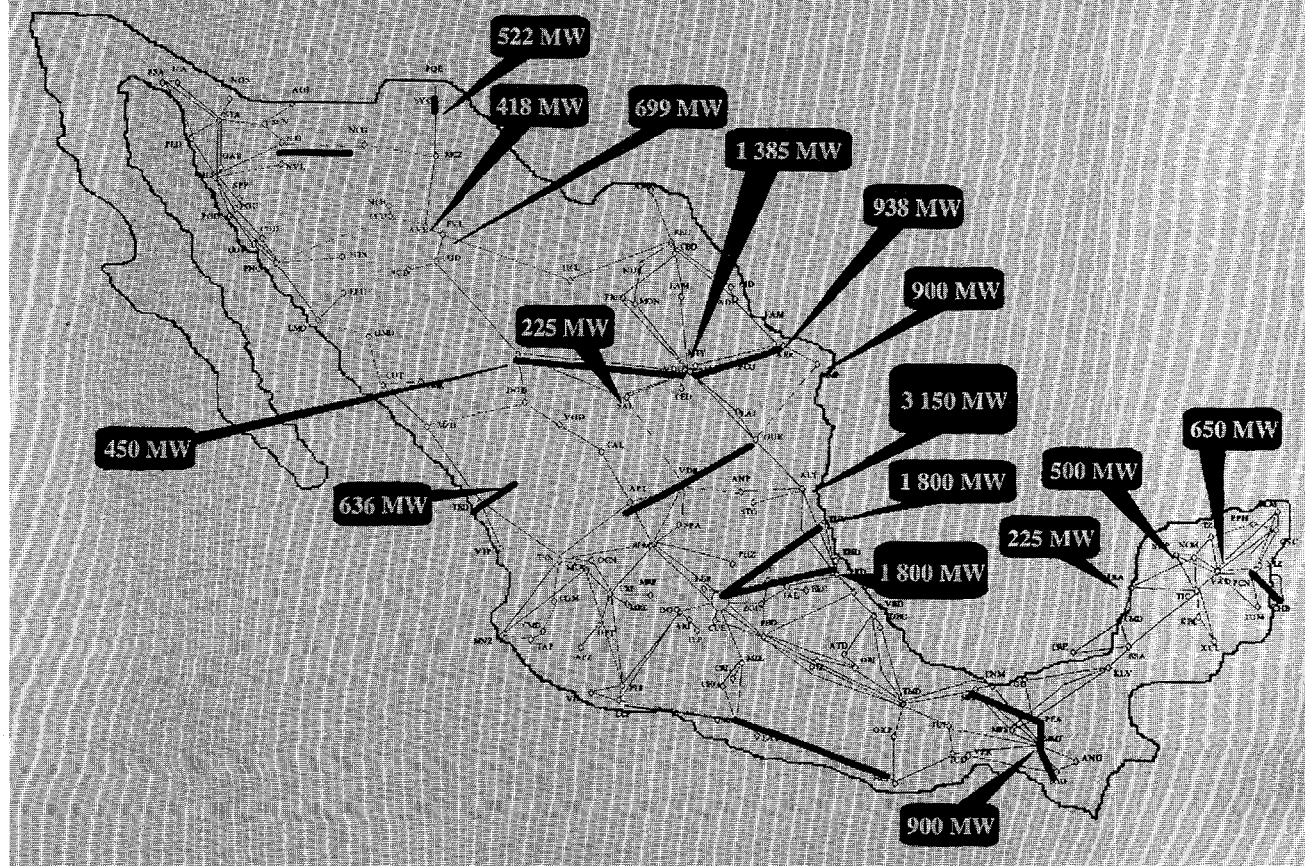


figura 2 se compara, para ambos tipos de inicio, el valor de la función objetivo contra el número de iteraciones.

Se ha descrito un algoritmo de programación evolutiva para la planeación de la transmisión. Los resultados obtenidos a la fecha son prometedores; se ha demostrado que es capaz de generar buenos planes de expansión en sistemas eléctricos de gran tamaño.

Sintonización de parámetros

Los parámetros de ejecución del algoritmo fueron sintonizados con el sistema de Garver [Garver, 1970] y otros sistemas relativamente pequeños. Los mejores resultados fueron obtenidos para valores de b entre 0.2 y 0.3, tamaño de población entre cuatro y seis, y grupos elites de dos soluciones. En el cuadro 1 se muestran los parámetros ajustados para este caso ejemplo.

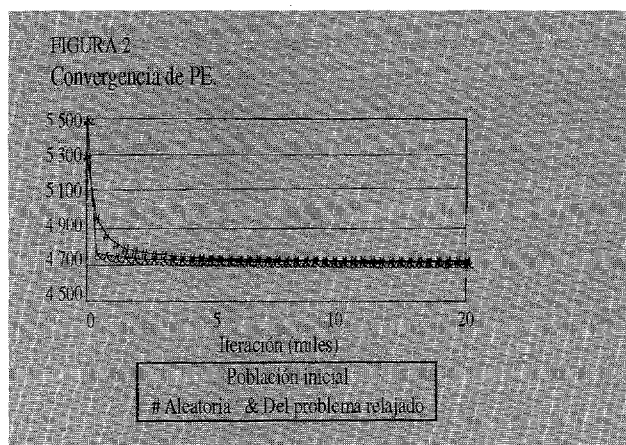
Conclusiones

Se ha descrito un algoritmo de programación evolutiva para la planeación de la transmisión. Los resultados obtenidos a la fecha son prometedores; se ha demostrado que es capaz de generar buenos planes de expansión en sistemas eléctricos de gran tamaño. Los trabajos de investigación en curso se

han enfocado al manejo de la incertidumbre que normalmente se presenta en la planeación de la expansión de la transmisión; es decir, incertidumbre en el crecimiento real de la demanda y en la futura ubicación de la nueva capacidad de generación. El objetivo es acotar los riesgos, aplicando técnicas de toma de decisiones bajo incertidumbre. También se están explorando variantes en el proceso de "mutación" del algoritmo para reducir el esfuerzo de cómputo y los tiempos de ejecución del algoritmo.

Referencias

- Ceciliano, J.L. y R. Nieva, *Transmission network planning using evolutionary programming*, proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, Washington, julio de 1999, pp. 1796-1803.
- Ceciliano, J.L. y R. Nieva, "Planeación de expansión de redes de transmisión eléctrica con programación evolutiva", en *Memorias de la Reunión de Verano de Potencia RVP 98*, Acapulco, julio de 1998.
- Fogel, D.B., "An introduction to simulated evolutionary optimization", en *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 5, núm. 1, enero de 1994, pp. 3-14.
- Fogel, D.B., "Comparison of evolutionary programming and genetic algorithms on selected constrained optimization problems", en *Simulation*, vol. 64, núm. 6, junio de 1995, pp. 397-406.
- Fogel, L.J., "Autonomous automata", en *Industrial Research*, vol. 4, 1962, pp. 14-19.
- Gallego, R.A., A. Monticelli y R. Romero, *Comparative studies on non-convex optimization methods for transmission network expansion planning*, Transaction on Power Systems, vol. 13, núm. 3, febrero 1998, pp. 822-828.
- Gallego, R.A., A. Monticelli y R. Romero, *Transmission system expansion planning by extended genetic algorithm*, submitted for publication.
- Garver, L.L., "Transmission network estimation using linear programming", en *IEEE Trans. Power App. Systems*, vol. PAS-89, septiembre-octubre de 1970, pp. 1688-1697.
- Levi, V., "New mixed-integer methodology for optimal transmission expansion planning", en *Electric Power Systems Research*, vol. 32, núm. 3, marzo de 1995, pp. 227-238.
- Monticelli, A. et al., "Interactive transmission network planning using a least effort criterion", en *IEEE Transactions PAS-101*, 1979.
- Pereira, M.V.F. y L.M.V.G. Pinto et al., "A decomposition approach to automated generation/transmission expansion planning", en *IEEE Trans. Power App. Systems*, vol. PAS-104, núm. 11, noviembre de 1985.
- Rechenberg, I., *Evolutionsstrategie: optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution*, Stuttgart, Frommann Holzboog Verlag, 1973.
- Romero, R. y A. Monticelli, *A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning*, IEEE PES Winter Meeting, Columbus Ohio, enero-febrero de 1993.
- Romero, R. y A. Monticelli, "A zero-one implicit enumeration method for optimization investments in transmission expansion planning", en *IEEE*



CUADRO 1
Parámetros de control usados en PE (sistema mexicano)

Parámetros	Sintonización
NP (población)	6
NE (grupo elite)	2
Número máximo de iteraciones	20 000
β	0.2

Transactions on Power Systems, vol. 9, núm. 3, agosto de 1994, pp. 1385-1391.

Romero, R., R.A. Gallego y A. Monticelli, "Transmission system expansion planning by simulated annealing", en *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, núm. 1, febrero de 1996, pp. 364-369.

Ruiz, M. *et al.*, "PEGyT: una herramienta para la planeación de los sistemas de generación y transmisión", en *Memorias de la RVP94*, IEEE Sección México, Acapulco, agosto de 1994.

Schewefel, H.P., *Kybernetische evolution als strategie der experimentellen forschung in der strmungstechnik*, diploma thesis, Technical Univ. of Berlin, 1965.

Villasana, R., L.L. Garver y S.J. Salon, "Transmission network planning using linear programming", en *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PAS-104, núm. 2, febrero de 1985, pp. 349-356.

Yang, H.T., P.C. Yang y C.L. , Huang, "Evolutionary programming based economic dispatch for units with non-smooth fuel cost functions", en *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, núm. 1, febrero de 1996, pp. 112-11

JOSÉ LUIS CECILIANO MEZA

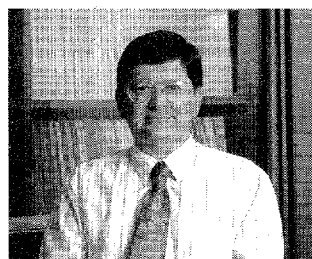


Licenciado en actuaría (1993) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y maestro en ciencias con especialidad en ingeniería industrial (1997) por la Universidad de las

Américas (UDLA), Puebla. Ingresó al IIE en 1994, en donde es investigador de la Gerencia de Análisis de Redes. Se ha especializado en la investigación de operaciones y

en el desarrollo y dirección de proyectos relacionados con la planeación de la expansión y operación de sistemas eléctricos de potencia. Obtuvo el 2º lugar en el XIX Certamen Nacional de Tesis de Maestría 98/99 en el área de redes eléctricas. Es autor de varios artículos presentados en foros nacionales e internacionales.

ROLANDO NIEVA GÓMEZ



Ingeniero mecánico electricista por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y doctor en ingeniería eléctrica por la Universidad de Alberta, Canadá. Ingresó al IIE en

1979 en donde se ha desempeñado como investigador, jefe de proyecto y coordinador de especialidad. Desde 1989 es gerente de Análisis de Redes. Su trabajo se ha centrado en la especialidad de sistemas eléctricos de potencia. Ha dirigido el desarrollo de software especializado para el análisis, la simulación, la operación, la planeación de operación y la planificación de los sistemas eléctricos de potencia. Ha publicado más de cuarenta artículos técnicos tanto en foros nacionales como extranjeros y es coautor de dos libros: Optimal control of distributed nuclear reactors (volumen 41 de la serie Conceptos Matemáticos y Métodos en Ciencia e Ingeniería) y Desarrollo y administración de programas de computadora (software), Editorial CECSA, 1984. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores.