

ALGORITMO EVOLUTIVO PARA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA DE MEDIANO PLAZO

Galo Nina
Análisis y Control

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es investigar la aplicación de la metodología de estrategias evolutivas para resolver el problema de la planificación energética de mediano plazo. Este problema ha sido solucionado en la mayoría de los casos, mediante algoritmos de programación matemática, éstos por lo general necesitan cumplir condiciones especiales para su aplicación.

El problema es definido como de programación no lineal y es resuelto con un algoritmo de estrategias evolutivas. Éste toma en cuenta como variable descriptiva del sistema a los turbinamientos de los embalses equivalentes del sistema y realiza la recombinación y mutación de esta variable para encontrar la solución. Esta metodología es una alternativa para solucionar los complejos problemas de la planificación energética del SNI Ecuatoriano.

PALABRAS CLAVE: Planificación Energética, Estrategias Evolutivas.

1. INTRODUCCIÓN

El problema en la planificación operativa energética de un sistema de potencia es complejo, estocástico y de muy grande porte, por lo cual su solución debe ser descompuesta en diferentes problemas que establecen una jerarquía de solución.

Así, el problema de mayor jerarquía es aquel en el cual tomando en cuenta la aleatoriedad de los afluentes a los embalses, se determine cuál es la evolución del almacenamiento de los mismos; este problema tiene un horizonte de varios años. En el segundo problema de jerarquía menor, conocida la energía que los embalses deben disponer en un período de un año se debe determinar cuál es la energía de las Centrales Térmicas para cubrir una demanda conocida.

Finalmente, el problema de despacho determina para el día siguiente cómo deben operar las Centrales, teniendo en cuenta la demanda horaria y las afluencias a los embalses conocidas determinísticamente, considerando restricciones de la red eléctrica.

En el presente trabajo, se trata el segundo problema en la cadena jerárquica.

Este problema ha sido resuelto en el SNI Ecuatoriano, utilizando un modelo no lineal y resolviéndolo mediante programación dinámica y lineal (1). En este caso la

solución está limitada por la “maldición de la dimensionalidad” inherente a la programación dinámica. Se ha utilizado también, un modelo lineal y resolviéndolo mediante flujo en redes (2). En esta solución se deben realizar simplificaciones al modelo para su adaptación al modelo lineal de flujo en redes.

Recientemente, metaheurísticas se han aplicado a la resolución de esta clase de problemas. Zoumas et Al (3), analizan la aplicación de un algoritmo genético para solucionar el problema en mención. La representación del problema toma en cuenta los turbinamientos de las Centrales Hidráulicas y aplica operadores evolutivos y de mutación para generar nuevos individuos.

Leite et Al (4) analizan la planificación de la operación energética usando también, algoritmos genéticos. En este caso la representación del problema está en los porcentajes de agua almacenados en los embalses.

Werner (5) resuelve un problema similar, mediante algoritmos genéticos, utilizando como representación los turbinamientos y los estados de las centrales térmicas (prendido/apagado).

En este trabajo se utiliza el modelo no lineal de (1) y se descompone en los problemas concernientes a la evolución de los embalses y de asignación de los recursos térmicos e hidráulicos a curva de Potencia - Energía. El primer problema toma como representación el turbinamiento en los embalses equivalentes (6) y se resuelve utilizando estrategias evolutivas. El modelo de los embalses equivalentes incluye los límites operativos y las eficiencias dependientes de la cota.

El problema de la asignación de los recursos térmicos e hidráulicos a la curva de Potencia – Energía se modela como un problema de programación lineal y se resuelve mediante un algoritmo de ajuste dual heurístico (8).

En contraste con otros modelos se utiliza una representación simple y un método de solución (estrategias evolutivas) aplicado por primera vez al problema en mención.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

El problema de la planificación estratégica de mediano plazo puede ser formulado de la siguiente manera:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I a_{kt} C_i P_{ikt}$$

s.a.

$$V_{jt} = V_{jt-1} - Q_{jt} - S_{jt} - I_{jt}$$

$$\underline{Q}_j \leq Q_{jt} \leq \overline{Q}_j$$

$$\underline{V}_j \leq V_{jt} \leq \overline{V}_j$$

$$P_{jt} = f(V_{jt}) Q_{jt}$$

$$\sum_{i=1}^I P_{ikt} + \sum_{j=1}^J P_{jkt} \geq D_{kt}$$

$$\sum_{k=1}^K a_{kt} P_{ikt} \leq E_{it}$$

$$\sum_{k=1}^K P_{ikt} \geq \overline{P}_{it}$$

$$\sum_{k=1}^K a_{kt} P_{jkt} \leq Q_{jt}$$

$$\sum_{k=1}^K P_{jkt} \geq P_{jt}$$

$$V_{j0} = V_{jini}$$

$$V_{jT} = V_{jfin}$$

Donde:

VARIABLES NO DEPENDIENTES:

P_{ikt} = Potencia de la unidad térmica i , en el segmento k , en la etapa t .

Q_{jt} = Turbinamiento del embalse j , en la etapa t .

P_{jkt} = Potencia de la unidad hidráulica j , en el segmento k , en la etapa t .

VARIABLES DEPENDIENTES:

V_{jt} = Volumen del embalse j , en la etapa t .

P_{jt} = Potencia de la unidad hidráulica j , en la etapa t .

PARÁMETROS:

I_{jt} = Afluencia al embalse j , en la etapa t .

D_{kt} = Demanda de carga en el segmento k , en la etapa t .

E_{it} = Oferta de energía de la unidad térmica i , en la etapa t .

\overline{P}_{it} = Potencia máxima de la unidad térmica i , en la etapa t .

a_{kt} = Tangente del segmento k , de la demanda de carga en la etapa t .

C_i = Costo unitario de energía de la unidad térmica i .

V_{jini}, V_{jfin} = Volumen inicial, final del embalse j .

2.1 Estrategias Evolutivas (9)

Las estrategias evolutivas no utilizan la estructura genética, ni tampoco una codificación detallada de los cromosomas de los individuos. Desde el punto de vista de las estrategias evolutivas se representa la información hereditaria de un individuo en vectores de números reales (fenotipos).

La función de calidad Q de las estrategias evolutivas está en función de un vector de variables de decisión $x = (x_1, x_2, \dots)$ y $x \in X$ conocidos como parámetros objeto. X puede ser cualquier estructura de datos, ejemplos de X son el espacio R^n , o el espacio Z^n .

Las estrategias evolutivas trabajan en poblaciones P de individuos a_k con el índice k engloba la totalidad del parámetro objeto x_k ; su función de calidad $Q_k = F(x_k)$ y usualmente un conjunto de parámetros endógenos s_k de la estrategia.

$$a_k = (x_k, s_k, Q(x_k))$$

Los parámetros endógenos de la estrategia son utilizados para controlar determinadas características estadísticas de los operadores genéticos, especialmente, los operadores de mutación. Los parámetros endógenos de la estrategia pueden cambiarse durante el proceso evolutivo.

Existen diferentes factores que llevan a una evolución, éstos son: recombinación, mutación y selección.

Mediante la recombinación de la información genética, los individuos seleccionados heredan a los descendientes las diferentes características de ellos.

La mutación de los descendientes busca un cambio de los rasgos existentes, este cambio puede ser una mejora, pero también un empeoramiento del descendiente.

La selección en función de la calidad de los individuos conduce a poblaciones que mejoran continuamente.

El proceso de una estrategia evolutiva se divide principalmente en tres partes. Primero son inicializadas las variables principales y se genera una población inicial. Para esta población se determina la función de calidad de cada individuo.

En la segunda parte, son generados sucesivamente nuevas generaciones, en las cuales cada nuevo descendiente puede ser generado por un número n de

padres. Los parámetros de los padres son recombinados y el correspondiente descendiente es mutado. De este conjunto de nuevos individuos y sus padres en algunos casos, el algoritmo genera una nueva población con los mejores individuos en relación a la función de calidad. Este proceso continúa hasta que se cumpla un criterio de parada. Al final tiene lugar en el tercer paso la entrega del resultado con la mejor solución encontrada para el problema.

En resumen el algoritmo de estrategias evolutivas tiene la siguiente estructura:

1. Inicialización de una población.
2. Generación de los descendientes de la población actual (por medio de recombinación y mutación).
3. Cálculo de la función de calidad de los individuos.
4. Realización de la selección.
5. Repetición de los pasos 2 al 4, hasta que:
 - a. Un criterio de parada se cumpla; o,
 - b. Se obtenga una solución.

Existen varias formas de estrategias evolutivas, una forma de representarlas es la siguiente (7):

$$[\mu' \mid \rho', \lambda' (\mu \mid \rho, \lambda)^\gamma]^\gamma$$

Donde:

- μ' = Número de poblaciones padre.
- λ' = Número de poblaciones descendientes.
- ρ' = Número de las poblaciones que se mezclan.
- λ = Número de padres.
- μ = Número de descendientes.
- ρ = Número de individuos que se mezclan.
- γ, γ' = Cuantas veces se debe repetir el proceso en paréntesis.

2.2. Estrategias Evolutivas Aplicadas a la Planificación Energética

2.2.1. Selección de los Individuos

Para la selección de los individuos del problema de Planificación Energética de Mediano Plazo, debemos en principio tomar en cuenta las variables no dependientes del problema, es decir, el turbinamiento de los embalses Q_{jt} y las potencias de las unidades térmicas P_{ikt} e hidráulicas P_{jkt} ; sin embargo, considerando que una vez conocido Q_{jt} , las variables dependientes V_{jt} , volumen del embalse y P_{jt} su potencia respectiva pueden ser calculadas; el problema que resta es como asignar el turbinamiento Q_{jt} en energía y la potencia P_{jt} a la demanda del sistema

representada por la curva Potencia – Energía, el cual determina los valores de P_{ikt} y P_{jkt} .

Las ofertas térmicas, por otro lado, tanto de energía como en potencia son fijas y dependen de la disponibilidad declarada en cada una de las etapas dentro del horizonte de planificación considerado.

El problema de asignación de la energía y potencia de las unidades de generación a la curva parabólica de demanda, puede ser resuelto entonces, mediante un algoritmo de ajuste multiplicativo dual (8).

Estas consideraciones hacen que sea necesario solo escoger como individuos los turbinamientos de los diferentes embalses en todas las etapas.

2.2.2. Selección de la Función de Calidad

La función objetivo del problema de la Sección 2, es la función objetivo de la formulación matemática total del problema. Por otro lado, la restricción $V_{jT} = V_{jfn}$ es una restricción que tiene que ser considerada en la función objetivo como una función de penalización que tiene la siguiente forma:

$$\Lambda(V_{jt}) = \alpha(V_{jT} - V_{jfn})^2$$

Donde:

α = Es un parámetro.

De esta forma la función de calidad sería:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I a_{kt} c_i P_{ikt} + \sum_{j=1}^J \Lambda(V_{jt})$$

Esta función nos permite realizar la selección de los mejores individuos entre padres y descendientes o solo entre los descendientes de acuerdo a la estrategia evolutiva utilizada.

2.2.3. Recombinación

Para generar los descendientes de una población determinada se emplea la recombinación. En la recombinación se combinan valores de las variables que definen a los padres para determinar un descendiente. En este trabajo, se emplea tanto la no recombinación como la multirecombinación, en la cual las variables de los padres son combinadas continua o discretamente. En el caso de la multirecombinación discreta, las variables de los descendientes son tomadas independientemente y con igual probabilidad tanto de uno u otro padre. La multirecombinación continua se toma el valor medio de los padres.

2.2.4. Mutación

La mutación es el principal mecanismo de impulso para búsqueda en el espacio genético, para esto, se han tomado en cuenta dos puntos importantes:

- Las restricciones no deben ser violadas por la mutación.
- Pequeños cambios de las características de los individuos deben ocurrir con más frecuencia que cambios grandes, ya que cambios de este tipo no estarían en concordancia con lo que sucede en la naturaleza y serían de todas maneras no plausibles (10).

Ya que los turbinamientos en los embalses en las diferentes etapas describen a los individuos, es necesario que estos al mutar cumplan con las restricciones:

$$Q_j \leq Q_{jt} \leq \bar{Q}_j$$

El segundo punto, es alcanzado cuando las mutaciones siguen una función de distribución de Gauss. La Mutación de los individuos se realiza mediante la ecuación $x_i = x_i + \Delta x_i$ con el paso de mutación $\Delta x_i = z$ donde z es una variable aleatoria según una función de distribución $N(0, \sigma)$.

2.3 Resultado de las Pruebas

De manera de evaluar el desempeño de la metodología

propuesta, ésta es aplicada al SNI.

El Sistema está compuesto por dos embalses: Pucará y Paute. Se han realizado diferentes experimentos, en primer lugar para comparar la metodología utilizada con la programación dinámica y en segundo lugar para observar la convergencia de la metodología ante diferentes estrategias evolutivas. El horizonte de planificación es de 12 meses y se utiliza hidrología media.

Tal como se mencionó las variables para el problema son los turbinamientos de los embalses, por tanto, tenemos un vector de 24 posiciones que debe ser utilizado.

Se adoptó también, para los experimentos unos volúmenes iniciales y finales fijos para los embalses.

La Tabla 1, presenta la capacidad, volumen y turbinamiento para cada embalse, éstos últimos traducidos a energía.

El primer experimento considera la comparación entre el algoritmo de programación dinámica y la metodología de estrategias evolutivas.

En este experimento, la estrategia evolutiva utilizada fue (2,5) 5/5. La Tabla 2, presenta los costos de la función objetivo alcanzado con estas metodologías.

Se experimentó también con diferentes estrategias evolutivas, los resultados constan en la Tabla 3.

TABLA 1: Datos Embalses

Embalse	Capacidad Disponible (MW)	Volumen (Gwh)				Turbinamiento (Gwh)	
		Min	Max	Terminal	Inicial	Min	Max
Pucará	70,0	16,2	88,7	42,7	36,9	12,0	35,0
Amaluza	480,0	13,3	138,0	138,0	58,62	180,0	300,0

TABLA 2: Parámetros del Experimento y Resultados

	Programación Dinámica	Estrategias Evolutivas	
Número de Unidades Termo	23	23	
Número de Variables		24	
Número de Generaciones	-	500	1000
Función Objetivo	8 184,62	8 694,32	8 296,62

TABLA 3: Resultados Variación Estrategias
Función de Calidad y Paso de Mutación Promedio de los Mejores Padres

Estrategias	Número Generaciones	
	500	1000
(2,5) 5/5	$Q_n = 8 694,32, \Delta X_n = 1,300$	$Q_n = 8 296,62, \Delta X_n = 1,0346$
(2/2,5) 5/5	$Q_n = 8 676,72, \Delta X_n = 0,7692$	$Q_n = 7 942,50, \Delta X_n = 1,0346$
(5,20) 5/5	$Q_n = 7 829,98, \Delta X_n = 0,9810$	$Q_n = 6 492,35, \Delta X_n = 0,9800$
(5/5,20) 5/5	$Q_n = 7 791,98, \Delta X_n = 1,0867$	$Q_n = 6 730,46, \Delta X_n = 0,9810$

4. CONCLUSIONES

Un método para la solución para la planificación energética de mediano se ha presentado. Esta metodología ha sido aplicada al SNI ecuatoriano y se han obtenido resultados satisfactorios comparables con la metodología de planificación dinámica y lineal.

La metodología propuesta permite una representación del problema que es fácil de implementar y tiene tiempos de procesamientos compatibles con la metodología de programación dinámica y lineal.

Dada las características intrínsecas de la metodología esta permite resolver algunas dificultades inherentes a las metodologías de programación matemática como serían en el caso las no linealidades y la "maldición de la dimensionalidad" de la programación dinámica.

Al variar las estrategias el mejor resultado se obtiene cuando se tienen 1000 generaciones y una estrategia (5,20)5/5; es decir, se puede concluir para este problema que cuando se tiene mayor número de padres y descendientes, se obtiene mejores resultados. Así mismo, se tiene mejores resultados cuando no se mezclan las características de los padres y se consideran las características completas de una forma aleatoria.

Los resultados obtenidos nos permiten concluir que la metodología de estrategias evolutivas es una opción importante para la solución de los problemas de planificación energética y debería ser considerada para nuevos desarrollos tanto académicos como prácticos en esta clase de problemas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] NINA G.; Un Sistema Integrado para la Planificación de la Operación, JIEE, Vol. 5, 1984, PP 55-62.
- [2] GÓMEZ J.; Modulo CHUQUI, 1999.

- [3] ZOUMAS, Bakirtzis; THEOCHARIS, Petridis, A.; Genetic Algorithm Solution Approach to the Hydrothermal Coordination Problem. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No.2, May 2004.
- [4] LEITE, Carreiro Carvalho; Energetic Operation Planning Using Genetic Algorithms. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 1, February 2002.
- [5] WERNER; Evolutionsstrategien Zur Kurzfristigen Einsatz Optimierung Hydro Thermischer Kraftwerkssysteme, Tesis Doctoral, Universidad Wupertal Alemania, 2002.
- [6] NINA G.; Una Revisión de las Metodologías Utilizadas en la Planificación de la Operación a Largo Plazo de SEP, JIEE Vol. 9, 1998.



Galo Nina S.

Ingeniero Eléctrico por la ESPOL, M. Sc. en Ingeniería de Sistemas (Optimización) por la COPPE/UFRJ Brasil; y, D. Ing. en Ingeniería Económica por FHTE Esslingen Alemania.

Desde 1981 hasta 1988 y desde 1994 hasta 1995, trabajó en INECEL en Planificación de la Operación y Control de Gestión, en la Dirección de Operaciones del SNI.

Desde 1999 se desempeña como Jefe de Análisis y Control en la Corporación CENACE.