

TÉCNICA DE OPTIMIZACIÓN COMBINATORIAL APLICADA AL DISEÑO DE REDES DE COMUNICACIÓN POR CABLE

Combinatorial Optimization Technique for Cable Communication Network Design

RESUMEN

Este trabajo muestra un algoritmo genético especializado para solucionar el problema del diseño de redes de sistemas de comunicación por cable con el fin de minimizar el costo de inversión. El modelaje matemático del problema de las redes de comunicación por cable es un problema de programación no lineal entero mixto (PNLEM) con una explosión combinatorial del número de topologías posibles, siendo la exigencia de radialidad un factor complicante en la solución del problema. En este trabajo se presenta un método perteneciente al grupo de los denominados algoritmos combinatoriales. El algoritmo utilizado presenta excelentes resultados en un sistema de prueba de la vida real.

PALABRAS CLAVES: Sistemas de Comunicación, Algoritmos Genéticos, Optimización Combinatorial, Redes de Comunicación por cable.

ABSTRACT

This paper presents a specialized genetic algorithm to solve the problem of cable communication network design with the purpose of minimizing the investment cost. The mathematical model of this problem is a mixed integer non linear programming problem (PNLEM) with a combinatorial explosion of the number of possible topologies. The methodology proposed using a specialized genetic algorithm is probed in a real life test system.

KEYWORDS: Communication Systems, Genetic Algorithms, Combinatorial Optimization, Cable communication Network.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño y operación de las redes de comunicación por cable considera una estructura radial. En este contexto aparece el problema de cómo configurar la estructura de estas redes para encontrar una topología radial óptima. Encontrar la topología óptima exige analizar implícita y/o explícitamente todas las topologías radiales posibles en el sistema. Una forma de caracterizar el problema consiste en encontrar un árbol del grafo que minimice la inversión y satisfaga las restricciones de operación que son: (1) nivel de señal, (2) capacidad de los circuitos y (3) ecuaciones de flujo de señal. Los circuitos que forman el árbol de un grafo son denominados ramas del árbol y los circuitos que están fuera del árbol son denominados ramas de conexión o ramas del cóarbol.

El modelo matemático del problema mencionado es un problema de programación no lineal entero mixto (PNLEM) con una explosión combinatorial del número de topologías posibles. La exigencia de radialidad es un factor complicante adicional en la solución del problema. La figura 1 muestra una red de datos y televisión por cable que utiliza una arquitectura tipo Blaster [1, 2].

Luis Fernando Galindres

Ingeniero de Sistemas.
Universidad Tecnológica de Pereira.
lugal@utp.edu.co

Antonio H. Escobar Z

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor de la Universidad
Tecnológica de Pereira.
aescobar@utp.edu.co

Ramón A. Gallego Rendón

Ingeniero Electricista, Ph.D.
Profesor de la Universidad
Tecnológica de Pereira.
ragr@utp.edu.co

Integrantes del Grupo de Investigación
en Planeamiento de Sistema Eléctricos y
Desarrollo en Investigación Operativa
DINOP- UTP

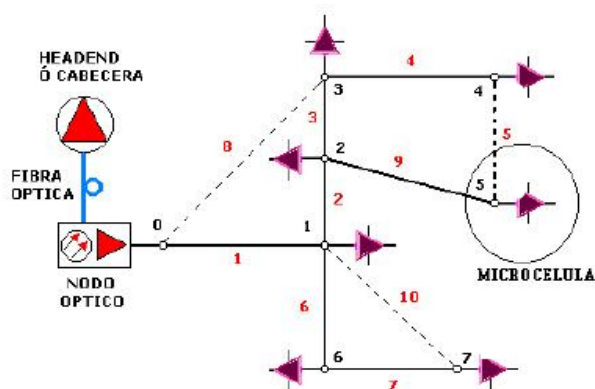


Figura 1: Sistema de 8 nodos

Se puede verificar que este sistema de 8 nodos tiene muchos árboles o topologías candidatas. Cuando aumenta el número de ramas de conexión del grafo de un sistema como este entonces el número de soluciones posibles del problema crece de forma combinatorial haciendo inviábiles las técnicas de optimización clásicas para encontrar la topología óptima de este problema.

En este artículo se presenta un algoritmo genético especializado para resolver el problema del diseño de la

red de comunicación por cable con el fin de minimizar el costo de inversión. Las soluciones obtenidas con este algoritmo se comparan con las soluciones encontradas con la ayuda de un programa comercial utilizado para esta clase de diseño denominado Lode data [3].

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

El óptimo del problema de las redes de comunicación por cable consiste en determinar la cantidad de cable coaxial y de elementos para división de señal (acopladores direccionales y divisores de señal), que permita llevar la señal a todos los abonados, de tal forma que cada usuario tenga una señal de buena calidad y que el costo de inversión sea mínimo.

La función objetivo f_0 , es formulada como la suma del costo de inversión y de un factor de penalización como se muestra a continuación:

$$f_0 = \min \left(\sum_{i,j \in \Omega} c_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{k_1} d_i^l [c_d]_i^l + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^{k_2} e_i^m [c_a]_i^m + \alpha \sum_{i=1}^n r_i \right)$$

s.a.

$$\begin{aligned} G(db_i) &= 0 \\ H(b_i) &\geq 0 \\ f_{\min} &\leq f_{oper} \leq f_{\max} \\ \prod_{r_f} \lambda_{r_f} &= 1 \\ \sum_{i=1}^{k_1} d_i^l &\leq 1; i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^{k_2} e_i^m &\leq 1; i = 1, 2, \dots, n \\ k_{1\min} &\leq k_1 \leq k_{1\max} \\ k_{2\min} &\leq k_2 \leq k_{2\max} \\ db_i - db_{i\min} &\leq 0 \Rightarrow r_i = db_i - db_{i\min} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $G(db_i)$ corresponde a $n-1$ ecuaciones que describen el problema de flujo de señal y son de la forma $(db_i - db_j - \text{atenuación } i-j - \text{pérdidas por conexión en } j = 0)$, $H(db_i)$ corresponde a n inecuaciones de la forma $(db_i \geq 0)$, cantidad de decibeles en el nodo i , c_{ij} costo del cable coaxial entre los nodos $i-j$, d_i^l variable binaria que define si existe o no un splitter de l divisiones en el nodo i , $[c_d]_i^l$ costo del splitter localizado en el nodo i y con k_l divisiones, e_i^m variable binaria que define si existe o no un acoplador de señal localizado en el nodo i y m divisiones, $[c_a]_i^m$ costo del acoplador de señal localizado en el nodo i y con k_m divisiones, db_i cantidad de decibeles a la entrada del amplificador i , r_i cantidad de decibeles por debajo del mínimo en el nodo i , f_{\min} frecuencia mínima de operación, f_{\max} frecuencia máxima

de operación, f_{oper} frecuencia de la señal, K_1 número de salidas de señal del splitter, K_2 número de salidas de señal del acoplador, α factor de conversión de decibeles a pesos, se estima que por cada decibel abajo del límite se debe tener una penalización en la función objetivo. Este factor podrá ser seleccionado en un rango entre el $[20 - 100]\%$, Ω conjunto de caminos candidatos y F caminos entre los nodos terminales y el nodo fuente.

La función objetivo del problema (1) tiene dos partes: la primera parte representa el costo de inversión en elementos de la red; la segunda representa un costo de penalización asociado al déficit de señal en el nodo a la entrada del amplificador dada en pesos/decibeles.

3. TECNICA DE SOLUCION

En esta sección son representadas las principales características del algoritmo genético modificado para el problema redes de comunicación tipo Blaster. También es presentado, de forma resumida, el algoritmo genético propuesto.

El algoritmo genético es una técnica de optimización de problemas complejos, cuya teoría se basa en la selección natural de los seres vivos y la evolución de las especies. Los operadores genéticos del algoritmo simulan la dinámica de funcionamiento de los cromosomas en los seres vivos y las informaciones genéticas contenidas en esos cromosomas. Entretanto, pueden ser desarrollados operadores genéticos que no simulan mecánicamente el trabajo del código genético de los seres vivos sino que intentan simular la lógica fundamental del funcionamiento de la información genética existente en ellos. Con esta lógica aparecen los denominados algoritmos evolutivos. La teoría básica sobre algoritmos genéticos y/o evolutivos pueden ser encontradas en [4,5,6,7,8,9].

El algoritmo genético inicia el proceso de optimización de un problema complejo a partir de un conjunto de topologías iniciales que conforman la denominada población inicial, la cual puede ser encontrada de forma aleatoria o usando algoritmos heurísticos constructivos rápidos. En forma iterativa se determina el conjunto de topologías, que corresponden a la población de la nueva generación, a partir de la población actual, usando los operadores de selección, recombinación y mutación. Así, en cada nueva iteración son encontradas topologías de mejor calidad y eventualmente, se puede encontrar la solución óptima del problema. En cada paso se actualiza la incumbente, la cual, al final del proceso representa la solución del proceso iterativo. En otras palabras, un algoritmo genético realiza una búsqueda usando un conjunto de soluciones y a través de un proceso iterativo son encontradas nuevas soluciones. Dado que el número de soluciones evaluadas corresponde a un número muy reducido del espacio de soluciones posibles, el algoritmo genético debe adecuarse para que explore las regiones

más atractivas del espacio de soluciones evitando quedar atrapado en óptimos locales de baja calidad.

3.1 Codificación del problema

El problema de diseño de redes de comunicación por cable tiene variables binarias y reales, y un conjunto de restricciones de operación entre las cuales se encuentra la restricción de radialidad. La codificación usada en este trabajo es igual a la propuesta presentada en [10] donde se codifican solamente las variables binarias correspondientes a las ramas del grafo de la red. El flujo de señal y el estado de las señales, se evalúa usando un algoritmo de flujo de señal. Así, la codificación de la topología mostrada en la figura 1 asume la forma mostrada en la figura 2. Por lo tanto, solamente las ramas del grafo son codificadas como variables binarias.

1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 2: Codificación de la topología de la figura 1.

En la figura 2, se puede verificar que las ramas del árbol son representadas por 1 y las ramas del gráfico que están fuera del árbol, denominadas ramas de conexión, son representadas por 0. Esta propuesta tiene la ventaja de codificar únicamente a las variables binarias lo cual permite controlar fácilmente la radialidad de la topología.

3.2 Determinación de la población inicial

En relación a la población, se debe especificar su tamaño y el método utilizado para generarla. En este trabajo se analizaron tres formas de generar la población inicial: (1) usando una heurística simple, (2) usando un algoritmo de árbol de expansión mínima y (3) usando una estrategia aleatoria controlada.

En la primera estrategia, a partir de una topología básica, se selecciona una rama de conexión y se retira una rama del árbol que forme un lazo con la rama de conexión escogida, esto con el fin de mantener la radialidad. En el segundo caso se genera una topología radial correspondiente al árbol de expansión mínima. Para la estrategia de generación del árbol usando el método de expansión mínima se resuelve el algoritmo heurístico de Kruskal [11]. La tercera forma de generar las topologías de la población inicial es un proceso aleatorio controlado. En este proceso, a partir del nodo óptico se escoge en cada paso, de forma aleatoria, una rama que debe hacer parte del árbol.

3.3 El proceso de selección

En este trabajo se implementaron tres tipos de selección presentados en la literatura: (1) la selección proporcional, (2) la selección estocástica del residuo y, (3) la selección basada en torneo.

3.4 El proceso de recombinación

La recombinación consiste en seleccionar dos topologías con derecho a generar descendientes para que intercambien información y permitan generar dos nuevas topologías. La implementación de la recombinación requiere un especial cuidado ya que presenta dos aspectos críticos que pueden afectar el desempeño de un algoritmo genético. El principal problema es que una recombinación de dos topologías radiales, usando el tipo de codificación seleccionado, puede dar origen a topologías no radiales, limitando de manera significativa el desempeño de este operador genético. En este trabajo se implementan dos tipos de recombinación: la recombinación propuesta en [10] que denominamos recombinación tipo I y una nueva propuesta de recombinación que denominamos recombinación tipo II.

En la recombinación tipo I, una vez seleccionadas las dos topologías que deben ser recombinadas, se generan los descendientes a través de los siguientes pasos: (1) las ramas de conexión que están presentes en ambas topologías, con valores iguales a cero en la codificación, son copiadas en ambos descendientes, (2) las ramas de conexión diferentes en las topologías generadoras son copiadas en los descendientes de forma aleatoria y, (3) las ramas del árbol de cada topología generadora son copiadas sin modificaciones. En este tipo de recombinación pueden surgir configuraciones no radiales o con secciones aisladas. Estas configuraciones deben ser descartadas y sustituidas.

En la recombinación tipo II, propuesta en este trabajo, se busca preservar la lógica de trabajo de la recombinación genética donde son generados gametos formados por grupos de genes iguales a uno o dos cromosomas gemelos que genera el gameto. En esta propuesta, una topología descendiente es generada a través de los siguientes pasos: (1) escoger una de las topologías seleccionadas, (2) identificar todas las ramas extremas del árbol de la topología seleccionada, (3) escoger una de esas ramas extremas aleatoriamente e identificar todas las ramas de ese árbol que están en el camino de la rama extrema hacia el nodo óptico, (4) copiar todas las ramas identificadas en el paso anterior de la nueva topología y, (5) completar un árbol de la nueva topología usando las ramas de la otra topología seleccionada. En este tipo de recombinación, todas las configuraciones obtenidas son radiales y se preserva el material genético de los padres evitando la pérdida de diversidad durante el proceso evolutivo con el propósito de impedir la homogenización de la población.

3.5 El proceso de mutación

La mutación se implementó usando la misma estrategia propuesta en [10,12] que se considera la más adecuada. En esta propuesta, se escoge una rama de conexión aleatoriamente y, también aleatoriamente, una rama del

árbol que hace un lazo con esa rama de conexión. después es implementado un intercambio de la rama del árbol con la rama de conexión seleccionadas. Ese proceso de intercambio permite que la mutación genere siempre topologías radiales. Es evidente que una mutación realizada en la forma convencional propuesta por un algoritmo genético produce topologías no radiales en este problema.

En caso de ser necesario aumentar la diversidad y disminuir el tiempo de convergencia, se pueden implementar mutaciones dobles o triples [13].

4. ALGORITMO PROPUESTO

El algoritmo genético propuesto puede ser resumido en los siguientes pasos:

Paso 1: Parámetros de control y población inicial. Se seleccionan los parámetros del proceso y se genera la población inicial.

Paso 2: Cálculo de función objetivo de la población.

Paso 3: Selección. Se verifica factibilidad de las topologías de la población y se aplica uno de los modos de selección.

Paso 4: Recombinación. Se aplica recombinación de un punto. La incumbente pasa a la siguiente generación sin recombinación.

Paso 5: Mutación. Se aplica mutación a un porcentaje de la población y se verifica factibilidad para aceptar la mutación.

Paso 6: Criterio de parada. Si la incumbente no es mejorada durante un cierto número de generaciones, finaliza. Si no, regresa al paso 2.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para verificar el desempeño del algoritmo propuesto fueron probados dos sistemas de la vida real: un sistema de 11 nodos del Barrio Gama de la ciudad de Pereira (Colombia) y un sistema de 38 nodos de los Barrios Gama y Corales de la ciudad de Pereira.

A. Sistema Gama de 11 nodos y 49 ramas: Este sistema de pequeño tamaño correspondiente a la zona 2 del barrio Gama de la ciudad de Pereira, y que es presentado en la figura 1, es utilizado para mostrar el comportamiento de los parámetros mas importantes asociados al método de los algoritmos genéticos, y el cual es descrito a través de las siguientes características: Sistema de 11 nodos y 49 ramas. 50 decibels de salida en el receptor óptico, nivel mínimo de entrada a los amplificadores 16 decibels, calibre de cable 0.500. Frecuencia mínima 5 Megahertz, Frecuencia Crítica 870 Megahertz. Porcentaje de penalización 20 %.

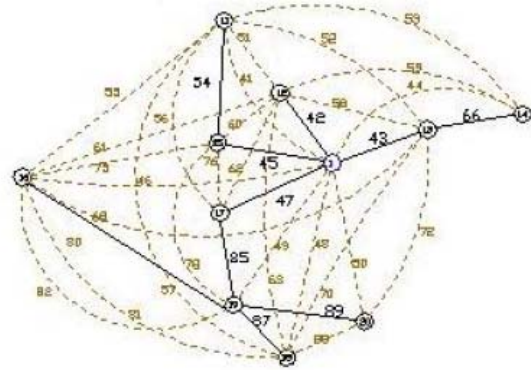


Figura 3: Zona 2 del barrio gama de Pereira

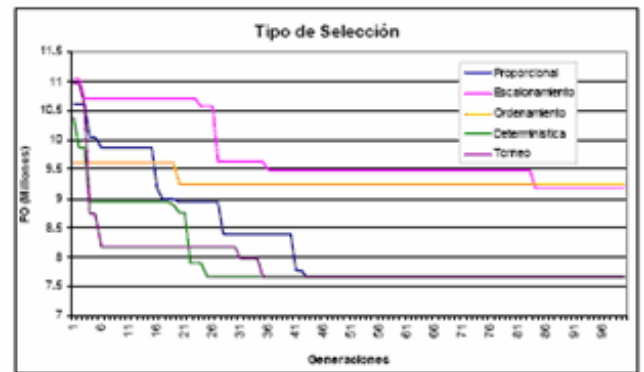


Figura 4: Desempeño del tipo de selección



Figura 5: Desempeño del tipo de mutación

De los resultados se observa una gran influencia del tamaño de la población, así como de la población inicial y en el cual el mejor comportamiento se obtuvo usando una heurística simple.

El máximo número de descendientes deberá ser menor o igual que 3. Las tasas de mutación presentan un buen desempeño cuando están en un rango del [0.5 – 3.0] %.

Los tipos de selección de mejor desempeño fueron el proporcional y por torneo.

La mejor tasa de recombinación fue la del 70%.

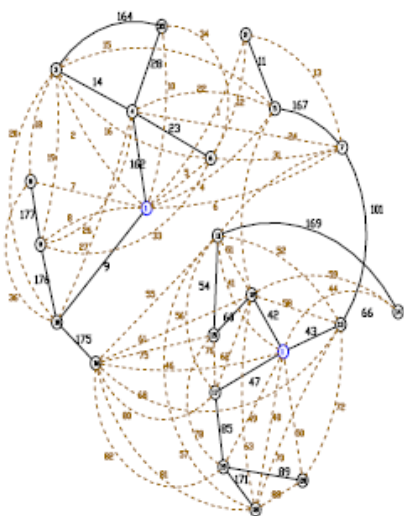


Figura 6: zonas 1 y 2 (Gama)

B. Sistema Gama – Corales de 38 nodos y 185 ramas: Estos sistemas son mostrados en las figuras 6 y 7 y fueron utilizados para llevar a cabo un análisis comparativo entre las soluciones encontradas por el algoritmo genético y por un experto con la ayuda de un programa especializado de diseño denominado Lode Data. La información de este sistema es la correspondiente a los barrios Gama y Corales de la ciudad de Pereira.



Figura 7: zonas 3 y 4 (Corales)

Los parámetros empleados fueron: los siguientes: porcentaje de penalización 20 %, nivel de salida 50 decibeles, nivel mínimo de entrada a los amplificadores 16 decibeles, calibre de cable QR 540.

Tabla 1 Costos de Inversión obtenidos con el software de diseño Lode Data y con los algoritmos genéticos.

	Inversión Total (miles)	Costo por Amplificador (miles)
Experto	32020.0	787.36
Genético	28175.0	756.89
Ahorro	3845.0	30.48

6. CONCLUSIONES

Las redes de comunicación por cable son operadas y diseñadas en configuración radial, muy semejante a las redes eléctricas de distribución [14]. Estas semejanzas son aprovechadas en esta investigación para aplicarlas al problema del diseño de redes de comunicación por cable.

El algoritmo genético presentado tiene un desempeño superior a otras propuestas alternativas de algoritmos genéticos presentados en la literatura [15]. La ventaja radica en el uso de operadores genéticos especializados con los cuales siempre es satisfecha la restricción de radialidad, esta característica ya fue comprobada por los autores en el problema de la reconfiguración de redes de distribución, obteniendo resultados superiores a los logrados en el caso en el que no se emplean operadores genéticos especializados.

La recombinación tipo II propuesta en este trabajo presenta excelentes resultados y se introdujeron mejoras adicionales, porque se considera que el operador de recombinación es uno de los más críticos en el desempeño de un algoritmo genético o evolutivo.

Se pudo comprobar como la forma en que son encontradas las topologías de la población inicial determina la calidad y el esfuerzo computacional del algoritmo. La propuesta de mutación también se mostró competitiva. El algoritmo implementado presentó excelentes resultados respecto a los obtenidos con la ayuda de un software especializado para el diseño de redes de datos y televisión por cable.

Se pudo observar que cuando los sistemas de gran tamaño se subdividen por zonas, según algún criterio, y se resuelve el problema, la solución encontrada es de peor calidad que cuando se resuelve el mismo problema sin subdividir.

Se recomienda probar sistemas de mayor tamaño para encontrar los puntos críticos de desempeño del algoritmo genético.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Code of Federal Regulation. Title 47 - Telecommunications, chapter 1: Federal Communications Commission (FCC), part 76 - Multichannel video and cable television service. U.S.A.: 2001. Available from internet: <http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx01/47cfr7601.html>
- [2] GENERAL INSTRUMENT. Blaster: Broadband layered architecture strategy to enhance reliability. USA. G.I. 2000. Available from internet: <http://www.gi.com>
- [3] LODE DATA corporation. www.lodedata.com
- [4] D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley, 1989.
- [5] T. Back, "Evolutionary Algorithms in Theory and Practice", Oxford University Press, 1996.
- [6] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Artificial Intelligence, 1992.
- [7] P. J. B. Hancock, "Selection Methods for Evolutionary Algorithms: New Frontiers", Vol. II, Ed. By Lance Chambers, CRC Press, 1995.
- [8] M. Mitchell, "Introduction to Genetic Algorithms", Editorial Cambridge, MIT Press, 1996.
- [9] M. Srinivas, L.M. Patnaik, "Genetic Algorithms", *IEEE Computer*, pp. 17-26, 1994.
- [10] C.C. Kuo, H.C. Chan, "Applying a Refined Genetic Algorithms to Network Reconfiguration for Loss Reduction", *IEE of Japan Power and Energy*, pp.37-42, 1994.
- [11] M.C. Golbarg - H.P. Luna, "Otimização combinatoria e programação linear", Editora Campos, 2000.
- [12] K. Nara, A.K. Deb, A. Shiose, M. Kitagawa, T. Ishihara, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Reconfiguration", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 1044-1051, August 1992.
- [13] Jaramillo J. C., Orozco A. "Reconfiguración de Alimentadores Primarios Utilizando Algoritmo Evolutivo". Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira. 2000
- [14] Sarfi. R.J, M.M.A.Salama and A.Y. Chikhani. "A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration for system loss reduction". *Electric Power System Research* 31 (1994) pg 61-70.
- [15] H. Chou, G. Premkumar, Chao-Hsien Chu, "Genetic Algorithms for Communications Network Design-An Empirical Study of the Factors that Influence Performance". *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, vol 5 No.3, June 2001.