

WDM Network Design with Node Protection

An approach based on MOACO

Carlos Bellino, Aditardo Vázquez, and Diego P. Pinto-Roa

Facultad Politécnica UNA,
Av. Mariscal Estigarribia, San Lorenzo, Paraguay
{carlosbellino,vazquez.aditardo,dppintoroa}@gmail.com
<http://www.pol.una.py/>

Abstract. *This work studies the survivable optical network design problem subject to simple node failure where disruption by network reconfiguration degrades the Quality of Service. The impact of the number of reconfigurations when a node fails over other objective functions is critical. Therefore, a Multi-Objective Ant Colony Optimization (MOACO) Algorithm is proposed, which tries to find the best network design as well as the primary and back-up multicast trees considering a multicast request set. The MOACO algorithm simultaneously minimizes the network design cost, the maximum end-to-end optical delay, the total number of reconfigurations and the maximum number of reconfigurations. The experimental results over different instances show the benefits of the proposed approach front to two state-of-the-art protection approaches based on total or partial reconfiguration.*

Keywords: Optical Networks, Multicast, Node Failure, Protection, Reconfiguration, Multi-objective Optimization, Ant Colony Optimization.

1 Introducción

Las redes ópticas han evolucionado substancialmente para hacer frente al crecimiento en la demanda de tráfico [1]. Los servicios con gran demanda de la última década son los de multimedia y vídeo conferencia entre otros. En ese contexto, los cambios principales en su arquitectura son dados por (i) la solución WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) que ha expandido la capacidad de la fibra óptica, y (ii) los dispositivos OXC (*Optical Cross Connects*) con los cuales se logra la escalabilidad de las redes [1,2].

Varios servicios demandan transmisiones de multidifusión, las cuales se cursan en la red a través de árboles de luz que conectan un nodo fuente con otros nodos destinos. El cálculo de árbol de luz es conocido como el problema de enrutamiento de multidifusión y asignación de longitudes de onda (MRWA, *multidifusión Routing and Wavelength Assigment*). El MRWA es un problema NP-completo y tema central de las comunicaciones ópticas cuyo caso particular es el RWA cuando se tiene un nodo fuente y un solo nodo destino [3].

Este trabajo afronta el problema de diseño de redes WDM y su protección contra fallos simple de nodo considerando tráfico multidifusión estático en una arquitectura de red multi-fibra y sin capacidad de conversión de longitud de onda y a su vez mejorar la calidad del servicio y el costo total de la red. El problema tratado es denominado OM-PNF (*Optical Multicast and Protection against Node Failures*) [4]. En el OM-PNF se busca calcular para cada solicitud de multidifusión un árbol de luz primario y un conjunto de árboles de luz de resguardo para cada nodo fallido. En el momento de reconfiguración de la red existen pérdidas de datos por interrupciones innecesarias. Dichas reconfiguraciones son generadas por un diseño de red en la que se prioriza el costo de la misma. El OM-PNF ha sido tratado en la literatura sin estudiar el *problema de la minimización de la reconfiguración* [5,4]. En ese contexto, el principal aporte del presente trabajo es proponer un enfoque basado en colonias de hormigas multi-objetivas (MOACO, *Multi-Objective Ant Colony Optimization*) para el cálculo de los árboles de luz primarios y de resguardos [6] en la que se busca minimizar no solo el costo del diseño de la red sino también la Calidad del Servicio dadas en el retardo máximo fin a fin, el número total de reconfiguraciones de destinos y el número máximo de reconfiguraciones de destinos; esta dos últimas son críticas para la interrupción de los servicios.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: La formulación matemática del problema es expuesta en la Sección 2. En la Sección 3 se presenta la propuesta de este trabajo. Las pruebas experimentales son discutidas en la Sección 4. Finalmente, las conclusiones y trabajos futuros son presentados en la Sección 5.

2 Formulación del Problema

Para una correcta lectura de la formulación matemática del problema la siguiente simbología basada en [4] se propone:

| | |
|------------------|--|
| $ \cdot $ | Cardinalidad de un conjunto. |
| V | Conjunto de nodos de la red. |
| E | Conjunto de enlaces de la red. |
| $(i, j) \in E$ | Enlace desde el nodo i al nodo j ; $i, j \in V$. |
| $G = (V, E)$ | Grafo de red conformado por V y E . |
| $V(i) \subset V$ | Sub-conjunto de nodos; $V(i) = V \setminus \{i\}$. |
| $E(i) \subset E$ | Sub-conjunto de enlaces; $E(i) = E \setminus \{(i, j), (j, i) : \forall j \in V\}$. |
| $G(i) \subset G$ | Sub-grafo de red; $G(i) = (V(i), E(i))$. |
| $s \in V$ | Nodo origen de una solicitud de multidifusión. |
| $d \in V$ | Nodo destino de una solicitud de multidifusión. |
| D | Conjunto de nodos destinos de multidifusión. |
| $m = (s, D)$ | Solicitud de multidifusión. |
| M | Conjunto de solicitudes de multidifusión; $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{ M }\}$ |
| $f_{i,j}^k$ | k -ésima fibra óptica en el enlace (i, j) . |

| | |
|--------------------------|---|
| $\ell_{i,j}^{k,\lambda}$ | Enlace de luz conformado por la λ -ésima longitud de onda en la k -ésima fibra óptica del enlace (i, j) . |
| t_m | Árbol de luz para una solicitud m ; $t_m = (V', \ell)$ con $V' \subseteq V$ y $\ell = \{\ell_{i_1, i_2}^{k_1, \lambda}, \ell_{i_3, i_4}^{k_2, \lambda}, \dots, \ell_{i_{n-1}, i_n}^{k_{n/2}, \lambda}\}$ con $V' = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ donde $s \in V'$, $D \subseteq V'$. |
| $p_m^{s,d} \subset t_m$ | Camino de luz entre el nodo s y un nodo d en t_m ; $p_m^{s,d} = (V'', \ell)$ donde $V'' \subseteq V'$ y $\ell = \{\ell_{i_1, i_2}^{k_1, \lambda}, \ell_{i_3, i_4}^{k_2, \lambda}, \dots, \ell_{i_{n-1}, i_n}^{k_{n/2}, \lambda}\}$, $V'' = \{i_1 = s, i_2, \dots, i_n = d\}$. |
| $\lambda_{i,j}^m$ | Longitud de onda asignada a t_m en el enlace (i, j) . |
| T | Conjunto de árboles de luz para el conjunto M ; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{ M }\}$. |
| T_p | Conjunto de árboles de luz primario para el conjunto M en el grafo G . |
| T_s^i | Conjunto de árboles de luz secundario para el conjunto M en el sub-grafo $G(i)$. |
| $X_{i,j}^{m,s,d}$ | Variable indicadora, si $\ell_{i,j}^{k,\lambda} \in p_m^{s,d}$ entonces $X_{i,j}^{m,s,d} = 1$, sino $X_{i,j}^{m,s,d} = 0$. |
| $R_{i,j}$ | Distancia entre el nodo i y el nodo j en kilómetros. |
| $R = [R_{i,j}]$ | Matriz de distancia entre nodos. |
| $K \in N$ | Número máximo de fibras ópticas por enlace. |
| $F_{i,j} \leq K$ | Número de fibras ópticas asignado al enlace (i, j) . |
| $F_{i,j}^k = \{1, 0\}$ | Variable indicadores, si el enlace (i, j) tiene asignado la k -ésima fibra óptica entonces $F_{i,j}^k = 1$, en otro caso $F_{i,j}^k = 0$. |
| $F = [f_{i,j}^k]$ | Vector de ubicación de fibra óptica. |
| $A_{i,j}^k = \{1, 0\}$ | Variable indicadora, si la k -ésima fibra óptica en el enlace (i, j) tiene asignado un amplificador entonces $A_{i,j}^k = 1$, en otro caso $A_{i,j}^k = 0$. |
| $A = [A_{i,j}^k]$ | Vector de ubicación de amplificadores. |
| B_i | Número de divisores de luz en el nodo i . |
| $B = [B_i]$ | Vector de ubicación de divisores de luz. |
| Γ | Solución al problema OM-PNF; $\Gamma = \{A; B; F; T_p; T_s^1, T_s^2, \dots, T_s^{ V }\}$. |
| Λ | Número máximo de longitudes de onda que soporta el sistema WDM. |
| $C_{i,j}$ | Costo del enlace (i, j) . |
| C_i | Costo del nodo i . |
| c_f | Costo de la fibra óptica por kilómetros. |
| c_a | Costo de amplificadores por kilómetro. |
| c_b | Costo de un divisor de luz. |
| c_w | Costo de un sistema WDM (MUX, DEMUX). |
| c_w^p | Costo de un puerto WDM. |
| c_o^p | Costo de un puerto OXC. |
| $S_{i,j}^{k,\lambda}$ | Potencia de la señal del enlace de luz $\ell_{i,j}^{k,\lambda}$. |
| $N_w(i)$ | Número de multiplexores/ demultiplexores en el nodo i . |
| $N_w^p(i)$ | Número de puertos de multiplexor en el nodo i . |
| $N_o^p(i)$ | Número de puertos OXC en el nodo i . |
| $N_b(i)$ | Número de divisores de luz en el nodo i . |
| O_s | Número máximo de puertos de salida de un divisor de luz. |

Dado un grafo G que representa a la red óptica y un conjunto de solicitudes de multidifusión M , el problema OM-PNF pueden ser tratado como un Problema de Optimización Multi-objetivo [7] en la que se busca la mejor solución Γ que simultáneamente minimice el costo de red f_1 , el retardo máximo f_2 , el número total de reconfiguraciones de ajuste f_3 , y el número máximo de reconfiguraciones de ajuste f_4 , sujeto a las restricciones de continuidad de luz e_1 , utilización de longitud de onda e_2 , potencia mínima de recepción e_3 , número máximo de fibras ópticas por enlace e_4 y número máximo de bifurcaciones por nodo en un árbol de luz e_5 . En este punto es importante resaltar que la reconfiguración de los árboles de luz primarios se realiza por dos causas: (1) cuando el nodo fallido $i \in t_m$, y (2) cuando es necesario una optimización de los recursos. En este último caso se denomina como reconfiguración de ajuste la cual deseamos minimizar como Calidad de Servicio.

Funciones objetivos

- Costo de Red [8,4]:

$$f_1(\Gamma) = \sum_{(i,j) \in E} C_{i,j} + \sum_{i \in V} C_i \quad (1)$$

donde

$$C_{i,j} = (c_f + c_a) \cdot R_{i,j} \cdot F_{i,j} \quad (2)$$

$$F_{i,j} = \sum_{k=1}^K F_{i,j}^k \quad (3)$$

$$C_i = c_w \cdot N_w(i) + c_w^p \cdot N_w^p(i) + c_o^p \cdot N_o^p(i) + c_b \cdot N_b(i). \quad (4)$$

- Retardo Máximo [9,4]:

$$f_2(\Gamma) = \max \{ \Delta_T : T \in \Gamma \} \quad (5)$$

donde Δ_T es el retardo máximo para el conjunto de árboles de luz T :

$$\Delta_T = \max_{t_m \in T} \left\{ \max_{d \in D_m} \left\{ \sum_{(i,j) \in E} X_{i,j}^{m,s,d} \cdot R_{i,j} \right\} \right\}, \forall T \in \Gamma \quad (6)$$

- Número Total de Reconfiguraciones de ajuste:

$$f_3(\Gamma) = \sum_{m \in M} \sum_{d \in m} \sum_{i \in E} Z_{m,d}^i \quad (7)$$

donde $Z_{m,d}^i = 1$ si $p_m^{s,d} \neq \rho_m^{s,d}$ con $p_m^{s,d} \in \tau_m \in T_p$, $\rho_m^{s,d} \in t_m \in T_s^i$ y $i \neq s, i \notin D$, $Z_m^{\tau,t} = 0$ en otro caso.

- Número Máximo de Reconfiguraciones de ajuste:

$$f_4(\Gamma) = \max_{m \in M} \sum_{d \in m} \sum_{i \in E} Z_{m,d}^i \quad (8)$$

Los detalles de componentes de red son los siguientes:

- Número de multiplexores y de-multiplexores:

$$N_w(i) = \sum_{j \in V} (F_{i,j} + F_{j,i}) \quad (9)$$

- Número de puertos WDM (multiplexores y de-multiplexores):

$$N_w^p(i) = \Lambda \cdot \sum_{j \in V} (F_{i,j} + F_{j,i}) \quad (10)$$

- Número de puertos en los conmutadores:

$$N_o^p(i) = N_w^p(i) \quad (11)$$

Restricciones

- e_1 - Continuidad de longitud de onda: cada árbol de luz t debe utilizar la misma longitud de onda en todos sus enlaces

$$\lambda_{i,j}^m = \lambda, \forall (i,j) \in t, \forall t \in \Gamma. \quad (12)$$

- e_2 - Uso de longitud de onda: sea $\ell_{i,j,m}^{k,\lambda}$ un enlace de luz de t_m , dos árboles de luz cualesquiera t_{m_1} y t_{m_2} no pueden utilizar la misma longitud de onda λ en una misma fibra $f_{i,j}^k$

$$\ell_{i,j,m_1}^{k,\lambda} \neq \ell_{i,j,m_2}^{k,\lambda}, \forall t \in \Gamma \quad (13)$$

- e_3 - Potencia mínima en los enlaces: cada lighth-link $\ell_{i,j}^{k,\lambda} \in t$ debe transmitir a una potencia $S_{i,j}^{k,\lambda}$ mayor que o igual a una S_{min} dada la sensibilidad de los sensores ópticos en el receptor

$$S_{i,j}^{k,\lambda} \geq S_{min}, \forall \ell_{i,j}^{k,\lambda} \in t, \forall t \in \Gamma. \quad (14)$$

- e_4 - Número máximo de fibras ópticas por enlace: cada enlace $(i,j) \in E$ puede tener asignado a lo más K fibras ópticas

$$F_{i,j} \leq K, \forall (i,j) \in E. \quad (15)$$

- e_5 - Número máximo de divisores de luz: cada árbol de luz t puede tener una máxima cantidad de bifurcaciones en cada nodo de red, esto está sujeto al número de puertos de salida de cada divisor de luz

$$|\{\ell_{i,j_1}^{k,\lambda}, \ell_{i,j_2}^{k,\lambda}, \dots, \ell_{i,j_n}^{k,\lambda}\}| \leq O_s, \forall i \in V \quad (16)$$

donde $N_i = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ son n nodos adyacentes el nodo i ; por lo tanto, $\ell_{i,j}^{k,\lambda}$ son enlaces de luz que parten del nodo i y llegan a los nodos adyacentes N_i .

3 Propuesta de Solución

Varios enfoques para problemas MOP han sido propuestos en la literatura [10]. El algoritmo propuesto en este trabajo es basado en el MOACO [6] para el problema OM-PNF, el cual utiliza una colonia de H hormigas y una matriz de feromonas τ para construir en cada generación w soluciones T . Cada solución T del problema está conformado por un árbol de luz primario y $|V|$ árboles de luz secundarios/protección. Para cada solicitud de multidifusión los árboles de luz de protección en T_s^i se activarán cuando el nodo i falle, simultáneamente, los árboles de luz primarios en T_p se desactivarán acorde a la política utilizada.

Básicamente, la hormiga construirá progresivamente un árbol de luz desde el nodo s hasta alcanzar todos los nodos $d \in D$ utilizando como medio de decisión la matriz de feromonas τ y las visibilidades η . Durante el proceso la hormiga agrega enlaces de luz a t_m mientras que verifica si se necesita agregar divisores de luz, amplificadores y fibras ópticas. Una vez alcanzado todos los destinos se procede a eliminar aquellos enlaces de luz que conforman ramas libres.

3.1 Enfoque de Protección Propuesto

Una vez construido un árbol de luz primario $t_m \in T_p$, se debe construir los árboles de luz secundarios para cada nodo de red i . Dado que trabajos del estado del arte como [5] proponen dos enfoques de reconfiguración, la total y la parcial los cuales generan soluciones particulares. En este trabajo proponemos un enfoque general basado en *Reconfiguración Híbrida* para la construcción de los árboles de luz secundarios, la cual explota las bondades de los enfoques anteriores.

En la reconfiguración parcial el espacio de búsqueda es mucho menor mientras que en la reconfiguración total la posibilidad de encontrar soluciones menos costosas es mucho mayor. El enfoque de reconfiguración híbrida recibe como parámetro un sub-grafo $G(i)$ que esta compuesto por los nodos y enlaces del grafo original, a excepción del nodo que suponemos fallido y sus enlaces a los nodos adyacentes, un conjunto de solicitudes M para la solución actual, el conjunto de árboles primarios de las sesiones activas, el nodo fallido para generar la protección correspondiente y retorna el sub-conjunto M_i de árboles primarios a ser reconfigurados. El cálculo del conjunto M_i tiene dos partes: (a) los recursos de las sesiones que atraviesan el nodo fallido son liberadas y dichas sesiones son añadidas al subconjunto de sesiones M_i a reconfigurar. (b) Luego se realiza una selección aleatoria de las otras sesiones, que no tienen relación con el nodo fallido, para también ser añadidas al sub-conjunto M_i . Note que si el conjunto $M_i = M$ estamos en una reconfiguración total y si $M_i = \{m : t_m \in T_s^i\}$ estamos en una reconfiguración parcial, que son casos particulares del enfoque de reconfiguración híbrida.

3.2 Funciones Objetivo Propuestas

El trabajo del estado del arte [4] propone minimizar no solo el costo del diseño de la red sino también la Calidad del Servicio considerando solo el retardo máximo

fin a fin. En este trabajo se propone además la Calidad de Servicio dadas en la pérdida de paquetes producidas por las disrupciones durante la reconfiguración de los árboles de luz primarios. En este contexto, se consideran las reconfiguraciones totales de la solución y la máxima percibida por las sesiones multidifusión como medida de equidad.

Con el objetivo de guiar a una convergencia rápida a los MOACO se utiliza como heurísticas la visibilidad η local; la cual está conformada por la visibilidad de distancia $\eta^d = [\eta_{i,j}^d]$ asociada al costo y al retardo, la visibilidad por fibra óptica $\eta^\lambda = [\eta_{i,j}^\lambda]$ asociada al costo, y la visibilidad por reconfiguración $\eta^r = [\eta_{i,j}^r]$ asociada a la disrupción. En este último caso la visibilidad es el peso que se otorga a los enlaces utilizados en el árbol primario con el objetivo de re-utilizar rutas similares a las principales en la protección.

4 Pruebas Experimentales

Las simulaciones se han desarrollado en la topología de red National Science Foundation Network (NSFNet) de 14 nodos y 42 enlaces [10]. Los algoritmos fueron implementados en el lenguaje de programación Java y los mismos se ejecutaron sobre un computador con las siguientes características: Intel Core i7-2670QM CPU 2.2GHz, 4 GB de Memoria RAM y SO ArchLinux de 64 bit. Se han utilizado 25 diferentes tipos de carga para las pruebas que se resumen en la Tabla 1. La arquitectura de red y parámetros utilizados en las pruebas se resumen en la siguiente Tabla 2.

Tabla 1. Escenarios de Prueba

| Número de Sesiones por nodo | Número de destinos por sesión |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 4 | 3 |
| 6 | 6 |
| 8 | 8 |
| 10 | 10 |
| 12 | 13 |

Se define un conjunto de $Alg = (\text{MOACO-PNF-RT}, \text{MOACO-PNF-RP}$ y $\text{MOACO-PNF-HI})$ de algoritmos implementados para las pruebas, donde RT es la reconfiguración total, RP es la reconfiguración parcial y HI es la reconfiguración Híbrida. Para cada grupo de multidifusión M , se calcularon conjuntos de soluciones. Fueron realizadas 10 corridas para cada algoritmo $a \in Alg$. Para cada algoritmo, se obtuvieron 10 conjunto de soluciones no dominadas $Y^a = \{Y_1^a, Y_2^a, \dots, Y_{10}^a\}$ calculados una por cada corrida. Para cada algoritmo se ha obtenido un conjunto Pareto aproximado F_{known}^a mediante la eliminación de las soluciones dominadas Y^a . El criterio de parada para cada corrida fue de 30 minutos, adoptado experimentalmente. En resumen se realizaron 10 corridas

Tabla 2. Parámetros Experimentales

| Arquitectura de Red | Símbolo | Detalles |
|-----------------------------------|-----------|------------------------|
| Número de longitudes de ondas | λ | 10 |
| Número máximo de Divisores de Luz | O_s | 3 |
| Potencia mínima | S_{min} | 0.33 |
| Parámetros ACO | | |
| Número de hormigas | H | 40 |
| % de evaporación de feromona | p | 0.1 |
| Importancia de feromonas | α | 1 |
| Importancia de Visibilidad | β_1 | <i>Random</i> (0, 100) |
| Importancia de Visibilidad | β_2 | <i>Random</i> (0, 100) |
| Importancia de Visibilidad | β_3 | <i>Random</i> (0, 100) |
| Probabilidad Pseudo-aleatoria | 0.9 | ver [6] |
| Costo de Fibra óptica | c_f | 0.1 por kilómetro |
| Costo de Amplificadores ópticos | c_a | 0.6 por kilómetro |
| Costo de Sistema WDM | c_w | 6 |
| Costo de Puerto WDM | c_w^p | 0.5 |
| Costo de Puerto OXC | c_o^p | 0.6 |
| Costo de Divisores de luz | c_b | 2 |

* 3 algoritmos * 25 grupos multidifusión * 1 Topología; totalizando 375 horas de pruebas experimentales. Las distancias entre los nodos adyacentes han sido obtenidas de [8].

Los resultados se presentan utilizando la métrica de comparación de dominancia entre frentes Pareto [7] las cuales se detallan a continuación.

Desempeño de la reconfiguración Total: Los resultados demuestran cierta dominancia sobre las soluciones de reconfiguración parcial e híbrida, exclusivamente cuando cada sesión toma como destino a cada nodo disponible en la red (*Broadcast*). Esta dominancia como puede apreciarse en la Figura 1, es notoriamente mayor sobre las soluciones de reconfiguración parcial que sobre las soluciones de reconfiguración híbrida.

Desempeño de la reconfiguración Parcial: El conjunto de soluciones de la reconfiguración parcial (Figura 2) domina completamente a las soluciones de reconfiguración total únicamente en los casos donde la cantidad de destinos por sesión es de tres. Mientras que la dominancia sobre las soluciones de reconfiguración híbrida, oscila entre el doce y el setenta y cinco por ciento en los casos donde el número de destinos posibles no es la máxima.

Desempeño de la reconfiguración Híbrida: Las soluciones dadas por la reconfiguración híbrida (Figura 3), denotan una amplia dominancia sobre las soluciones de reconfiguración total en los casos donde el número de destinos es inferior al máximo número de destinos posibles, mientras que esta dominancia se reduce cuando el número de destinos por sesión es el máximo, ocurriendo lo opuesto sobre las soluciones de reconfiguración parcial. Ésta

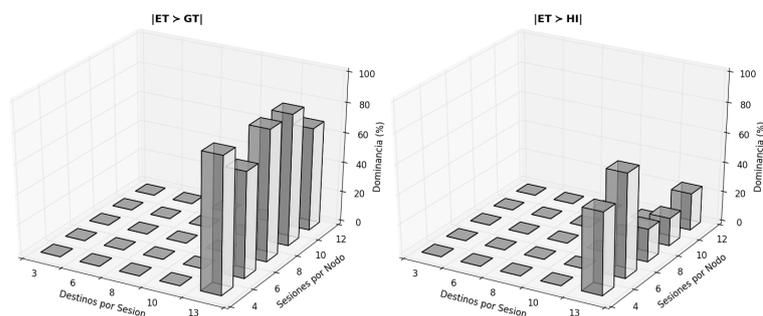


Figura 1. Resultados de dominancia porcentual de las soluciones de ET (*Reconfiguración Total*) sobre las soluciones de GT (*Reconfiguración Parcial*) y HI (*Reconfiguración Híbrida*).

demuestra una amplia dominancia solamente en algunos casos en la que el número de destinos por sesión es el máximo número de destinos posibles.

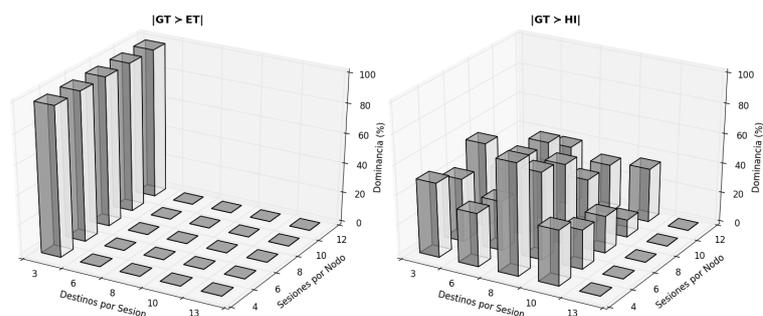


Figura 2. Resultados de dominancia porcentual de las soluciones de GT (*Reconfiguración Parcial*) sobre las soluciones de ET (*Reconfiguración Total*) y HI (*Reconfiguración Híbrida*).

5 Conclusiones y Trabajos Futuros

El presente trabajo ha desarrollado un algoritmo MOACO para el diseño de redes WDM para tráfico estático multidifusión sujeta a recuperación contra fallo simple de nodo considerando reconfiguración parcial, total e híbrida. Cabe destacar que se ha considerado la reconfiguración como un problema crítico dado que se encuentra asociado a pérdida de datos por interrupción. El algoritmo propuesto diseña la red y rutas primarias como de respaldo. Los estudios indican que la reconfiguración híbrida es promisorio al obtener mejores resultados que las total y parcial.

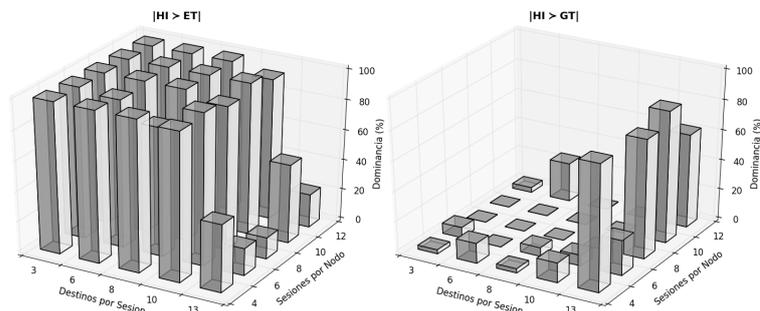


Figura 3. Resultados de dominancia porcentual de las soluciones de HI (*Reconfiguración Híbrida*) sobre las soluciones de ET (*Reconfiguración Total*) y GT (*Reconfiguración Parcial*).

Como trabajo futuro se puede considerar el problema de la ubicación de convertidores de longitud de onda y hacer más pruebas en otras topologías.

Referencias

1. C. S. R. Murthy, *WDM optical networks: Concepts, design, and algorithms*, 2002.
2. B. Mukherjee, "WDM optical communication network: Progress and challenges," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1989.
3. Y. Xin and G. Rouskas, "Multicast routing under optical layer constraints," *IEEE International Conference on Communications*, 2004.
4. A. Vazquez, D. Pinto-Roa, and E. Davalos, "Optical multicast with protection against node failure an approach based on moaco," in *Computing Conference (CLEI), 2013 XXXIX Latin American*, Oct 2013, pp. 1–9.
5. K. Luekijna and C. Saivichit, "Multicast traffic reconfiguration in WDM network for single node failure design," in *Advanced Communication Technology, The 9th International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2007, pp. 1833–1838.
6. M. Schaerer and B. Barán, "A multiobjective ant colony system for vehicle routing problems with time windows," in *Proc. Twenty first IASTED International Conference on Applied Informatics*.
7. C. A. Coello Coello, B. Lamont, Gary, and D. A. van Veldhouzen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer, 2007.
8. D. Pinto-Roa, "Multi-objective Design of WDM Networks. An approach based on Evolutionary Algorithm," Ph.D. dissertation, Polytechnical School UNA, September 2011.
9. B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 4, no. 5, pp. 684–696, 1996.
10. A. Arteta, B. Barán, and D. Pinto-Roa, "Routing and wavelength assignment over WDM optical networks: a comparison between moacos and classical approaches," in *Proceedings of the 4th international IFIP/ACM Latin American conference on Networking*. ACM, 2007, pp. 53–63.