

WDM Network Design with Node Protection

An approach based on MOACO

Carlos Bellino

Ingeniería Informática

Facultad Politécnica UNA

Email: carlosbellino@gmail.com

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.

I. 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 Assignment*). 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 disrupciones 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 disrupción de los servicios.

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

II. TRABAJOS RELACIONADOS

La protección contra fallos de enlace ha sido ampliamente estudiado en la literatura [7], [8], [9], [9], [10], [11] y en cambio, existen pocos trabajos que han estudiado el problema de fallo de nodo simple [5], [4].

Multidifusión con protección a fallos de enlace ha sido tratado con enfoques de optimización mono-objetivo basados en árboles disjuntos [12], enlaces directos disjuntos [8], protección de segmentos [9], protección multidifusión en sistemas multi-fibras [13], protección compartida de diferentes sesiones multidifusión [7] y basado en sub-grafos [11]. En [14] se propone un enfoque multi-objetivo el cual extendiendo el trabajo propuesto en [11].

En [5] se plantea el problema de la protección multidifusión contra fallo de nodo simple. En dicho trabajo se propone tres enfoques de protección: re-configuración de toda la red (ET), re-configuración del tráfico que pasa a través del nodo que fallido (GT) y re-configuración del tráfico adyacente al nodo fallido (AD). Básicamente, el árbol primario está conformado por un árbol de luz (LT) mientras que los resguardos están basados en los anteriores enfoques ET, GT y AD. El objetivo en [5] es diseñar redes ópticas que soporten un conjunto de tráfico multidifusión estático para fallo de nodo simple con el fin de minimizar el número fibras óptica de la red.

Reciente en [4] se ha extendido el trabajo [5] a un enfoque de optimización multi-objetivo considerando el costo y el retardo máximo de fin a fin. En ambos trabajos [5], [4] se

llega a la conclusión del beneficio de la reconfiguración total frente a la parcial; es decir, se logra diseño de redes con costos bajos con esquemas de reconfiguración total.

Una cuestión fundamental es que en los enfoques basados en reconfiguración total, el costo bajo se logra al aumentar intrínsecamente el número de reconfiguraciones de árboles de luz. En este contexto, algunos árboles de luz primarios serán reconfigurados aunque no tengan asociados un nodo de red fallido. Estos tipos de reconfiguraciones lo denominamos de ajuste, mientras que la reconfiguración de protección ocurre cuando el árbol de luz reconfigurado tiene un nodo fallido asociado. Por otra parte, los enfoques de reconfiguración parcial generan pocas reconfiguraciones de ajuste pero a costa de un alto costo de diseño de red. En ese sentido, es clara la necesidad de proponer enfoques de reconfiguración híbrida para un diseño de bajo costo y a la vez bajo número de reconfiguraciones de ajuste de ser posible.

Considerando los antecedentes mencionados, este trabajo propone tratar el problema OM-PNF considerando un enfoque de optimización multi-objetivo basado en MOACO [15] en la que se busca minimizar simultáneamente el costo de la red WDM y la calidad de servicio para múltiples solicitudes multidifusión estáticas. El costo de la red óptica está basado en los costos de equipamiento de enlaces y nodos ópticos. En los enlaces se considera el número y distancia de fibras ópticas mientras que en los nodos se considera el número dispositivos como divisores de luz, amplificadores, multiplexores (MUX), demultiplexores (DEMUX), puertos WDM y puertos en los OXC. Por otra parte, la calidad de servicio está dada por el retardo máximo fin a fin y el número de reconfiguraciones de ajuste, ésta última crítica en la pérdida de datos [16].

III. 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.

$K \in \mathbb{N}$

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 [17] 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.

A. Funciones objetivos

- Costo de Red [18], [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 [19], [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 $i \neq s, i \notin D$, $Z_{m,d}^i = 0$ 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:

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

B. 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 ligh-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 al 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 .

IV. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Varios enfoques para problemas MOP han sido propuestos en la literatura [20]. 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 Γ . Cada solución Γ 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.

A. 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.

B. 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

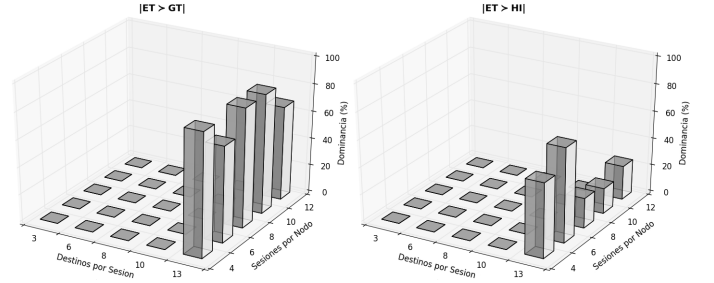


Figura 1: Dominancia de las soluciones de ET sobre GT y HI en NSF.

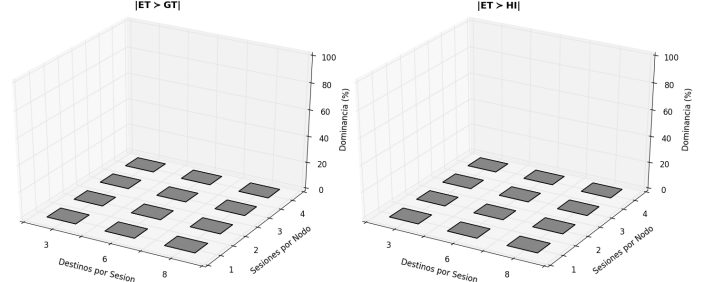


Figura 2: Dominancia de las soluciones de ET sobre GT y HI en USNet.

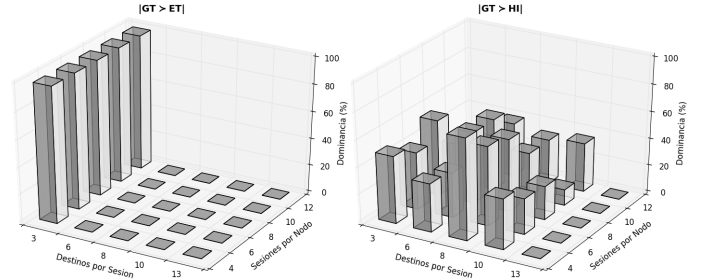


Figura 3: Dominancia de las soluciones de GT sobre ET y HI en NSF.

el árbol primario con el objetivo de re-utilizar rutas similares a las principales en la protección.

V. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las simulaciones se han desarrollado con dos topologías de red. La primera red con una estructura real que es la National Science Foundation Network (NSFNet) de 14 nodos y 42 enlaces [20] y la segunda es la red USNet que consta de 24 nodos y 86 enlaces. 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. Para la red NSF se han utilizado 25 diferentes tipos de carga para las pruebas que se resumen en la Tabla I mientras que para la red USNET se utilizaron 12 distintos tipos de cargas resumidas en la Tabla II. La arquitectura de red y parámetros utilizados en las pruebas se resumen en la siguiente Tabla III.

Para ambas pruebas se define un conjunto de $Alg =$

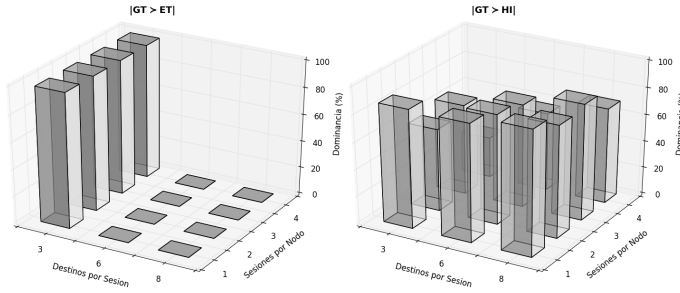


Figura 4: Dominancia de las soluciones de GT sobre ET y HI en USNet.

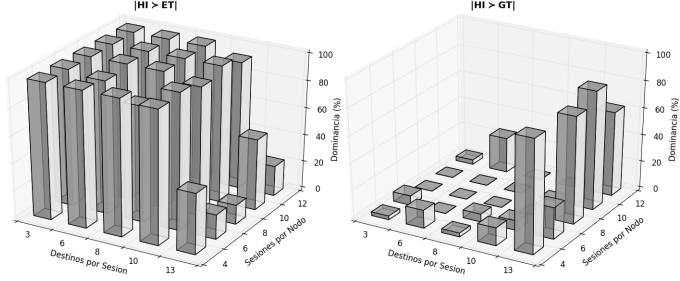


Figura 5: Dominancia de las soluciones de HI sobre ET y GT en NSF.

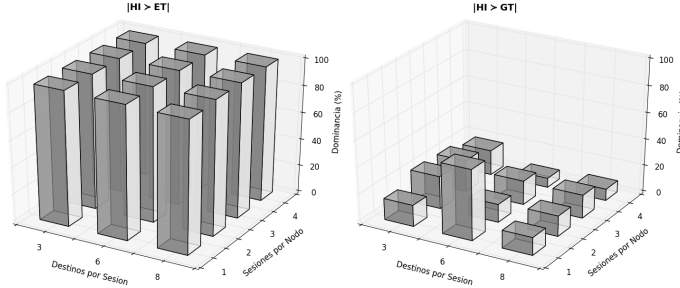


Figura 6: Dominancia de las soluciones de HI sobre ET y GT en USNet.

Tabla I: ESCENARIOS DE PRUEBA EN RED NSF.

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

Tabla II: ESCENARIOS DE PRUEBA EN RED USNET.

Número de Sesiones por nodo	Número de destinos por sesión
1	3
2	6
3	8
3	-

(MOACO-PNF-RT, MOACO-PNF-RP y MOACO-PNF-HI) de algoritmos, 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 conjun-

Tabla III: PARÁMETROS EXPERIMENTALES.

Arquitectura de Red	Símbolo	Detalles
Número de longitudes de ondas	λ	10
Número máximo de splitter	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	$Random(0, 100)$
Importancia de Visibilidad	β_2	$Random(0, 100)$
Importancia de Visibilidad	β_3	$Random(0, 100)$
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 Splitter	c_b	2

tos 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 para la prueba sobre la red NSF fue de 30 minutos y de 60 minutos para la red USNET, adoptado experimentalmente. En resumen, para la prueba sobre la red NSF se realizaron 10 corridas * 3 algoritmos * 25 grupos multidifusión * 1 Topología; totalizando 375 horas de pruebas experimentales, mientras que para la prueba sobre la red USNET se realizaron 10 corridas * 3 algoritmos * 12 grupos multicast * 1 Topología * 60 minutos, por corridas totalizando más 360 horas de pruebas experimentales. Las distancias entre los nodos adyacentes han sido obtenidas de [18]. Los resultados se presentan utilizando la métrica de comparación de dominancia entre frentes Pareto [17] las cuales se detallan a continuación.

A. Desempeño de la reconfiguración Total

En las pruebas sobre la red NSF, 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. Para las demás soluciones, la dominancia es nula en las pruebas realizadas a ambas redes (Figuras 1 y 2).

B. Desempeño de la reconfiguración Parcial

El conjunto de soluciones de la reconfiguración parcial, tanto en las pruebas sobre la red NSF como en la red USNET (Figuras 3 y 4), 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, en las pruebas sobre la red NSF oscila entre el doce y el setenta y cinco por ciento en los casos donde el número de destinos posibles no es la máxima. Este rango de dominancia sobre las pruebas sobre la red USNET comprenden entre el treinta y el

noventa y tres por ciento, siendo superior al setenta por ciento en la mayoría de los casos.

C. Desempeño de la reconfiguración Híbrida

En las pruebas sobre la red NSF (Figura 5), las soluciones dadas por la reconfiguración híbrida, 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, en tanto en las pruebas sobre la red USNET (Figura 6) demuestran una dominancia absoluta sobre las soluciones de la reconfiguración total. Los resultados de las soluciones sobre la reconfiguración parcial, en NSF, demuestran una dominancia alta cuando se toma como destino a cada nodo disponible en la red (*Broadcast*), y una baja para el resto de las soluciones. En USNET se puede apreciar que la dominancia sobre la reconfiguración parcial es baja, no superando el cuarenta por ciento.

VI. 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 disrupción. 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.

Como trabajo futuro se puede considerar el problema de la ubicación de conversores 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. Dávalos, "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] N. Singhal, C. S. Ou, and B. Mukherjee, "Shared protection for multicast sessions in mesh networks," in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2005.
- [8] N. Singhal and B. Mukherjee, "Protecting multicast sessions in WDM optical mesh networks," *Journal of lightwave technology*, vol. 21, no. 4, p. 884, 2003.
- [9] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe, and B. Mukherjee, "Provisioning of survivable multicast sessions against single link failures in optical WDM mesh networks," *Journal of lightwave technology*, vol. 21, no. 11, p. 2587, 2003.
- [10] A. Khalil, A. Hadjiantonis, G. Ellinas, and M. Ali, "Pre-planned multicast protection approaches in WDM mesh networks," in *Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on*. IET, 2005, pp. 25–26.
- [11] Y. Zhang and D. Sidhu, "A multicast protection algorithm for optical WDM networks," in *Computer Communications and Networks, 2004. ICCCN 2004. Proceedings. 13th International Conference on*. IEEE, 2004, pp. 315–320.
- [12] A. Fei, J. Cui, M. Gerla, and D. Cavendish, "A dual-tree scheme for fault-tolerant multicast," in *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2001, pp. 690–694.
- [13] C. Boworntummarat, L. Wuttisittikulkij, and S. Segkhoonthod, "Light-tree based protection strategies for multicast traffic in transport WDM mesh networks with multifiber systems," in *Communications, 2004 IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2004, pp. 1791–1795.
- [14] D. Pinto-Roa, B. Barán, and R. Lugo, "Optical multicast protection with multi-objective evolutionary algorithm approach," in *ALIO-INFORMS Joint International Meeting*.
- [15] S. Arevalos and D. Pinto-Roa, "MRWA bajo restricciones de capa óptica. un enfoque multi-objetivo basado en MOACO," in *CLEI 2008*. CLEI, 2008.
- [16] E. Dávalos, B. Barán, and D. P. Pinto-Roa, "Minimal disruption-reconfiguration problem over wdm optical networks," in *International Information and Telecommunication Technologies Symposium, 2009 Florianópolis - Brazil 8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS-2009)*, 2009.
- [17] C. A. Coello Coello, B. Lamont, Gary, and D. A. van Veldhouzen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer, 2007.
- [18] D. Pinto-Roa, "Multi-objective Design of WDM Networks. An approach based on Evolutionary Algorithm," Ph.D. dissertation, Polytechnical School UNA, September 2011.
- [19] 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.
- [20] 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.