

# MRWA bajo restricciones de Capa Óptica Un enfoque Multi-objetivo basado en MOACO

Sara Arévalos y Diego Pinto

Universidad Nacional de Asunción - Facultad Politécnica  
P.O. Box 2111 - Paraguay  
{sarevalos, dpinto}@pol.una.py  
<http://www.pol.una.py>

**Resumen** — Las redes ópticas transparentes con capacidad de transmisión punto-multipunto imponen al tráfico severas restricciones de capa óptica, como son: la de continuidad y la de conflicto en la utilización de longitudes de onda como también de potencia mínima de la señal óptica en nodos destinos. Este trabajo propone resolver el Problema del *Enrutamiento y Asignación de Longitudes de Onda Multicast* (MRWA) bajo *restricciones de capa óptica* mediante algoritmos de colonias de hormigas multi-objetivas (*Multiobjective Ant Colony Optimization* - MOACOs). Se propone optimizar simultáneamente el número total de saltos, la máxima cantidad de saltos fuente-destinos, el número de nodos *splitter* y el promedio de balanceo de los árboles multicast para un conjunto de demandas multicast conocido *a priori*. Las pruebas experimentales indican que los algoritmos MOACOs propuestos han demostrado ser enfoques promisorios al obtener mejores resultados que el obtenido con el *Multicast Open Shortes Path First – Least Used* (MOSPF-LU) sobre distintos conjuntos de demandas multicast en diferentes topologías de redes.

**Palabras Claves** — Redes Ópticas, Restricciones de Capa Óptica, Enrutamiento Multicast, Optimización Multiobjetivo y Colonia de Hormigas.

## 1 Introducción

El crecimiento del tráfico de Internet es debido al uso de aplicaciones que necesitan gran ancho de banda para cumplir con los requerimientos de calidad de servicio, tales como las aplicaciones multimedia entre otras 1. En ese contexto, las redes ópticas proveen una gran capacidad para hacer frente a estos requerimientos 2. Uno de los cruciales problemas en las redes ópticas es el enrutamiento multicast y la asignación de longitudes de onda (Multicast Routing and Wavelength Assignment - MRWA), en el cual se desea interconectar una fuente con múltiples destinos (light-tree). MRWA es un problema NP-Completo 5 y es uno de los problemas centrales de la Ingeniería de Tráfico 47. Por otra parte, las técnicas de optimización multi-objetivo por colonia de hormigas (Multi-objective Ant Colony Optimization - MOACO) han sido exitosamente aplicados a tráfico tanto unicast como multicast sobre redes convencionales como también en redes ópticas con capacidades de conversión de longitudes de onda 5-7. Sin embargo su aplicación propiamente al problema en cuestión aun no fue tratada, por lo que en este trabajo se propone la utilización por

primera vez de algoritmos MOACOs para su resolución con un enfoque de optimización multi-objetivo.

## 2 MRWA y Restricciones de Capa Óptica

El problema de MRWA en redes ópticas transparentes es posible gracias a un dispositivo conocido como *Multicast-Capable Optical Cross Connector* (MC-OXCs) [3]. Un MC-OXC o nodo *splitter* provee la capacidad de dirigir una señal entrante en múltiples salidas (*multi-hops*). Esta habilidad es lograda a costa de dividir la señal de luz (*splitting*) entrante  $S_{in}$  en  $n$  señales ópticas de salida  $S_{out}$  ( $n \geq 2$ ), donde  $S_{out} \propto S_{in}/n$ . Aunque existen amplificadores ópticos en los MC-OXCs, el problema de pérdida de potencia es parcialmente resuelto cuando es considerado sucesivas divisiones sobre el *light-tree*. Esta notable pérdida impone restricciones de potencia mínima de recepción en los nodos destinos del *light-tree*. Por otra parte las redes ópticas transparente típicamente carecen de capacidad de conversión de longitud de ondas, ocasionando un drástico aumento en la probabilidad de bloqueo de las solicitudes multicast [3].

Xin y Rouskas en [3] propusieron una heurística para el problema en cuestión como un problema de satisfacción de restricciones de potencia mínima y desviación estándar de potencia para una solicitud multicast. Siregar et al. proponen minimizar el número de nodos MC-OXCs con un simple Algoritmo Genético considerando varias solicitudes multicast [1]. Recientemente Arteta et al. trataron el problema de Enrutamiento y Asignación de Longitudes de Onda (*Routing Wavelength Assignment* - RWA) utilizando algoritmos MOACOs [7].

## 3 Nomenclatura

Para una mejor lectura del presente trabajo, a continuación se indica la siguiente nomenclatura, que será utilizada en lo que resta del trabajo:

- $G(V, E, C)$ : Topología de Red con  $V$  como conjunto de nodos,  $E$  como conjunto de enlaces y  $C$  conjunto de longitudes de ondas disponibles en los enlaces.
- $(i, j) \in E$ : Enlace óptico desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ ; donde  $i, j \in V$ ;
- $c_{i,j} \in C$ : Número de longitudes de onda disponibles en el enlace  $(i, j)$ ;
- $m=(s, D)$ : Solicitud multicast  $m$  con nodo fuente  $s$  y un conjunto de nodos destinos  $D$ ;
- $M$ : Conjunto de solicitudes multicast, donde  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{|M|}\}$ ;  $|\cdot|$  indica cardinalidad.
- $t_m$ : *Ligh-tree* de una solicitud multicast  $m$ ;
- $\lambda_{ij}^m$ : Longitud de onda  $\lambda$  asignada al *light-tree*  $m$  en el enlace  $(i, j)$ ;
- $l_d^m$ : *Ligh-path* de fuente  $s$  a un destino  $d$  del *light-tree*  $t_m$ , note que  $l_d^m \subset t_m$ ;
- $T_M$ : Solución multicast para un conjunto  $M$ , donde  $T_M = \{t_{m1}, t_{m2}, \dots, t_{m|M|}\}$ ;
- $S_0$ : Potencia de la señal transmitida desde un nodo fuente  $s \in t_m$ ;
- $S_d$ : Potencia de la señal entrante a un nodo destino  $d \in t_m$ ;
- $S_m$ : Potencia Promedio de señales entrantes en los nodos destinos de un *light-tree*  $t_m$ ;
- $\sigma_m$ : Balanceo del *light-tree*  $t_m$  o desviación estándar de las potencia de luz en los destinos.
- $P^*$ : Conjunto Pareto Óptimo.
- $F^*$ : Frente Pareto Óptimo.

### 4 Optimización Multi-objetivo

Un Problema de Optimización Multiobjetivo (*Multi-objective Optimization Problem - MOP*) generalmente consiste en un conjunto de  $n$  variables de decisión, un conjunto de  $k$  funciones objetivos y un conjunto de  $m$  restricciones. Las funciones objetivos y las restricciones son funciones de las variables de decisión. Por lo tanto, en un MOP generalmente se optimiza:

$$z = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)) \tag{1}$$

sujeto a

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)) \geq 0 \tag{2}$$

donde  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \subset \mathcal{R}^n$  es un vector de decisión,  $X$  denota el espacio de decisión de  $f(x)$ ,  $z = (z_1, z_2, \dots, z_k) \in Z \subset \mathcal{R}^k$  es un vector objetivo mientras que  $Z$  denota el espacio objetivo de  $f(x)$ . Un *Conjunto de Soluciones Factibles*  $\Omega \subset X$  es definido como un conjunto de vectores de decisión que satisfacen las restricciones dadas en (2). Sean dos soluciones  $u, v \in \Omega$ , se dice que  $u$  *domina* a  $v$  (denotado como  $u \succ v$ ) si  $u$  es mejor o igual que  $v$  en cada función objetivo y estrictamente mejor en al menos un objetivo. Así, se define el *Conjunto Pareto Óptimo* como  $P^* = \{u \in \Omega \mid v \not\succ u \forall v \in \Omega\}$  mientras que el espacio objetivo de  $P^*$  es conocido como *Frente Pareto Óptimo*, denotado como  $F^* = f(P^*)$ .

### 5 Formulación del Problema

Dado una topología de red  $G = \{V, E, C\}$  y un conjunto de solicitudes multicast  $M$ , el problema consiste en calcular un conjunto de *ligh-trees*  $T_M$  como un MOP, tal que minimicen simultáneamente las siguientes funciones objetivos:

1. *Cantidad total de saltos* (asociado al costo de la solución):

$$z_1 = \sum_{(i,j) \in E} \left( \sum_{t_m \in T_M} X_{ij}^{t_m} \right) \quad \text{donde: } X_{ij}^{t_m} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \in t_m \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \tag{3}$$

2. *Máxima cantidad de saltos de fuente-destinos* (asociado a la calidad del servicio):

$$z_2 = \max_{t_m \in T_M} \left\{ \max_{d \in D_m} \left\{ \sum_{(i,j) \in E} Y_{ij}^{t_m,d} \right\} \right\} \quad \text{donde: } Y_{ij}^{t_m,d} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \in t_m^d \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \tag{4}$$

3. *Cantidad de nodos splitter* (asociado al costo de la solución) <sup>1</sup>:

$$z_3 = \sum_{i \in V} \left( \left\lceil \frac{1}{|M|} \sum_{t_m \in T_M} Z_i^{t_m} \right\rceil \right) \quad \text{donde: } Z_i^{t_m} = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo } i \text{ divide la señal de } t_m \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \tag{5}$$

4. *Promedio del balanceo de los ligh-trees* (asociado a la calidad del servicio)

$$z_4 = \frac{1}{|M|} \sum_{t_m \in T_M} \sigma_m \tag{6}$$

Sujeta a las siguientes restricciones de capa óptica:

---

<sup>1</sup>  $\lceil \cdot \rceil$  indica techo de una variable real, i.e. si  $x \in \mathcal{R}$  entonces  $\lceil x \rceil$  es el menor entero mayor que  $x$ .

1. *Utilización de Longitud de Onda (UL)*: Dos *light-tree*  $t_{m1}$  y  $t_{m2}$  no pueden utilizar la misma longitud de onda  $\lambda$  en el mismo enlace  $(i, j)$ , i.e:

$$\lambda_{ij}^{t_{m1}} \neq \lambda_{ij}^{t_{m2}} \tag{7}$$

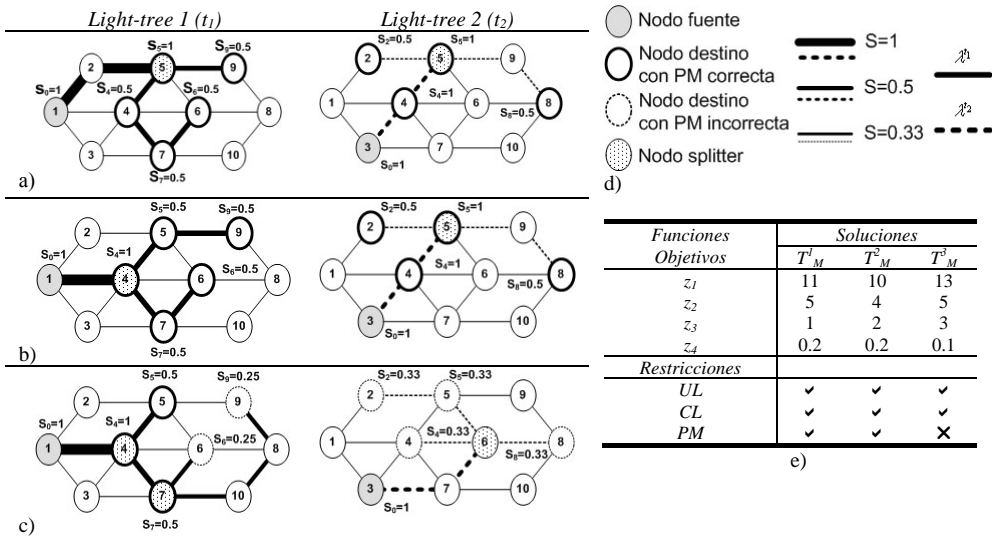
2. *Continuidad de Longitud de Onda (CL)*: Cada *light-tree*  $t_m$  debe utilizar la misma longitud de onda  $\lambda'$  en todos sus enlaces:

$$\lambda_{ij}^{t_m} = \lambda' \quad \forall (i, j) \in t_m \tag{8}$$

3. *Potencia Minima de Light-tree (PM)*: Cada nodo destino  $d \in t_m$  debe recibir una potencia  $S_d$  mayor o igual a  $S_{min}$  impuesta por la sensibilidad de los sensores ópticos, i.e.:

$$S_d \geq S_{min} \quad \forall d \in t_m \text{ y } \forall t_m \in T_M \tag{9}$$

*Ejemplo 1.* Considere la topología de red presentada en la Figura 1 y las siguientes solicitudes multicast  $m_1 = \{1, \{4-5-6-7-9\}\}$  y  $m_2 = \{3, \{2-4-5-8\}\}$ . Se impone como ejemplo una restricción de potencia  $S_{min} = 0.5 * S_0$ . En la Figura 1.a se muestra una posible solución  $T_M^1$ , mientras que en la Figura 1.b se observa una solución distinta  $T_M^2$ . En la Figura 1.c es expuesta una solución  $T_M^3$  en la que varios de los destinos reciben una potencia de luz inferior a la establecida. En la Figura 1.d se expone los símbolos utilizados en las Figuras 1.a al 1.c. Los cálculos asociados a las funciones objetivos y la verificación de las restricciones impuestas se presentan en la Figura 1.e.



**Figura 1.** Soluciones del *Ejemplo 1.* a) Solución  $T_M^1$ , b) solución  $T_M^2$  y c)  $T_M^3$ . d) Expone los símbolos utilizados en las soluciones. Las líneas negras de distintos grosores indican el nivel de potencia sobre los enlaces mientras que los tipos de líneas indican la longitud de onda asignada a los *light-tree*. e) Tabla de cálculos de las soluciones  $T_M^1$ ,  $T_M^2$  y  $T_M^3$ . La solución  $T_M^3$  no cumple con la restricción PM debido a que la mayoría de sus nodos destinos reciben una potencia de 0.25 y  $0.33 < 0.5$ . Por otra parte  $T_M^1$  presenta una mejor solución al considerar el número de nodos *splitter* mientras que  $T_M^2$  es mejor considerando el número total de saltos y máximo número de saltos.  $T_M^1$  y  $T_M^2$  son soluciones no comparables.

## 6 Optimización por Colonias de Hormigas

Los algoritmos de Optimización por Colonia de Hormigas (*Ant Colony Optimization*, ACO), son enfoques inspirados en el comportamiento natural de las colonias de hormigas 11. ACO ha sido exitosamente utilizado en la resolución de problemas combinatoriales, siendo sus elementos básicos: las hormigas artificiales y la matriz de feromonas ( $\tau$ ). La matriz de feromonas  $\tau$  es el medio indirecto que utilizan las hormigas para comunicarse, depositando y censando a la vez feromonas durante un recorrido en la construcción de una solución sobre un grafo de recorrido.

Por su parte, el *Multi-Objective Ant Colony Optimization* (MOACO) es una técnica basada en ACO para la resolución de MOPs 12-13. Diversos trabajos demostraron experimentalmente la eficiencia de los MOACOs en la resolución de MOPs 13. Por lo que en este trabajo se ha considerado la utilización de distintos algoritmos MOACO, representativos del estado del arte: el *Multiobjective Ant System* (MAS) 14, el *Bi-criterion Ant* (BIANT) 15, el *Pareto-Ant Colony Optimization* (PACO) 16, el *Multi-Objective Ant Colony System* (MOACS) 17, el *Multiobjective Max-Min Ant System* (M3AS) 5, el *Multiobjective Omicron ACO* (MOA) 18 y el *Multiple Objective Ant Q* (MOAQ) 19.

El siguiente Algoritmo 1 presenta una rutina genérica para los MOACOs, donde  $F_{\text{known}}$  representa un conjunto de soluciones  $T_M$  no dominadas.

---

### Algoritmo 1: MOACO

---

**Entrada:** Parámetros ACOs,  $M$ ,  $G(V, E, C)$

**Salida:**  $F_{\text{known}}$

---

```

1:  $\tau$  = Inicializar_Feromonas; /* $\tau$ es la matriz de feromonas
2: Mientras no sea el criterio de parada hacer
3:   Para cada hormiga de la colonia hacer
4:      $T_M$  = Ant_Multicast(Parámetros ACOs,  $\tau$ ,  $M$ ,  $G(V, E, C)$ );
5:     Evaluar Solucion( $T_M$ );
6:      $F_{\text{known}}$  = Actualizar_ $F_{\text{known}}$ ( $T_M$ );
7:   Fin desde
8:    $\tau$  = Actualizar_Feromonas( $F_{\text{known}}$ )
9: Fin mientras
10: Imprimir  $F_{\text{known}}$ ;

```

---

Todos los MOACOs implementados son métodos de optimización de propósito general. Para particularizarlo al MRWA cada hormiga artificial debe construir un conjunto de *light-tree* que constituye a su vez una solución  $T_M$ . En este contexto, la hormiga artificial es definida en este trabajo como *Ant-MRWA*.

Cada *Ant-MRWA* construye la solución  $T_M$  recorriendo un grafo llamado *Wavelength Graph* ( $WG$ ) 720. El  $WG$  es obtenido a partir del mapeo del grafo original  $G(V, E, C)$  donde el enlace existente entre un par de nodos es reemplazado por un conjunto de enlaces paralelos  $c_{i,j}$  entre los nodos  $i$  y  $j$ , i.e  $c_{i,j}=1 \forall (i, j) \in WG$ .

El Algoritmo 2 describe la implementación del *Ant-MRWA*. Es importante destacar que el esquema del *Ant-MRWA* puede ser utilizado por cualquier MOACO. La diferencia radica en la forma de seleccionar el enlace y la evaporación en línea que realizan algunos algoritmos.

**Algoritmo 2:** Ant-MRWA**Entrada:** Parámetros ACOs,  $\tau$ ,  $M$ ,  $G(V, E, C)$ **Salida:**  $T_M$ ;

---

```

1:  $T'_M = \emptyset$ ;
2:  $WG \leftarrow G$  /* Construcción del Wavelength Graph
3: Para cada Solicitud Multicast  $m \in M$  hacer
4:    $R = \emptyset$  y  $R = R \cup s$ ;
5:   Repetir hasta que ( $R \neq \emptyset$  o  $d_m$  son alcanzados) /*  $d_m$  son destinos
6:     Seleccionar nodo  $i$  de  $R$  y calcular su conjunto de vecinos  $N_i$  ;
7:     si ( $N_i = \emptyset$ ) entonces
8:        $R = R - i$ ; /* Nodo  $i$  no es factible como nodo de partida
9:     sino
10:      Asignar probabilidad  $p_{ij}$  para cada nodo de  $N_i$  ( $\tau$ );
11:      Seleccionar nodo  $j$  de  $N_i$  ;
12:       $t'_m = t'_m \cup (i, j)$ ;  $R = R \cup j$ ;
13:      Evaporación en línea ( $\tau$ ); /* MOACS, PACO, MOA, MAS
14:    fin si
15:  fin repetir
16:  si ( $R = \emptyset$ ) entonces
17:    Respuesta  $m$  no alcanzada, retornar Error;
18:  Sino
19:    Podar  $t'$ ; /* Eliminar enlaces no utilizados
20:     $T'_M = T'_M \cup t'_m$ ;
21:  fin si
22: fin para
23:  $T_M = \text{Mapear}(T'_M, WG, G)$ ;
24: return  $T_M$ ;
```

---

## 7 Heurísticas Clásicas

El *Multicast Open Shortes Path First* (MOSPF) es un enfoque que utiliza un algoritmo de enrutamiento clásico del camino mas corto desde el nodo origen  $s$  a todos sus destinos  $D$ , de una solicitud multicast  $\mathcal{M}$ . Para la asignación de las longitudes de onda, en [7] se ha demostrado experimentalmente que la mejor técnica es la asignación del menos utilizado (*Least-Used, LU*), por lo que el mismo se ha implementado en el presente trabajo. En el Algoritmo 3 se observa el esquema general donde se combinan el MOSPF y el LU para la resolución del problema en cuestión.

**Algoritmo 3:** MOSPF-LU**Entrada:**  $M, G(V, E, C)$ **Salida:**  $F_{\text{known}}$ ;

---

```

1: Inicializar_Parametros ();
2: Mientras no sea el criterio de parada hacer
3:   Ordenar randomicamente el conjunto  $M$ 
4:   Para cada Solicitud Multicast  $m \in M$  hacer
5:     Arbol = MOSPF( $m, G(V, E, C)$ ); /*se calcula el árbol multicast
6:      $t_m = \text{LU}(\text{Arbol})$ ; /*asignar longitud de onda si fuese posible
7:      $T_M = T_M \cup t_m$ ;
8:   fin para
9:   Evaluar_Solucion( $T_M$ )
10:   $F_{\text{known}} = \text{Actualizar}(F_{\text{known}}, T_M)$ 
11: Fin mientras
12: Imprimir  $F_{\text{known}}$ ;
```

---

## 8 Pruebas experimentales

A continuación se presenta el ambiente de las pruebas realizadas con el fin de verificar el desempeño de los algoritmos implementados. Para esto, se hicieron simulaciones en dos topologías de redes NSF de 14 nodos y 42 enlaces y GINA de 15 nodos y 44 enlaces 22, ver Figura 2. Los algoritmos fueron implementados en el lenguaje de programación C++; las pruebas de ejecución se realizaron sobre un computador Athlon de 2.0 MHZ, 512 Mbytes de memoria RAM y sistema operativo *Microsoft Windows XP*.

Se utilizaron 4 grupos multicast con 5, 10, 15 y 25 solicitudes para baja carga, media carga, alta carga y saturación respectivamente. El número de longitudes de ondas considerados fue de  $c_{i,j} = 20$ , además se utilizaron los siguientes parámetros ACO: colonias de 40 hormigas, influencia relativa entre feromonas y visibilidad 4, porcentaje de evaporación de feromonas 0.10 y probabilidad pseudos-aleatoria de 0.95.

*Diseño Experimental.* Se define el conjunto  $H = \{MAS, BIAN, PACO, MOACS, M3AS, MOAQ, MOA, MOSPF-LU\}$  de algoritmos implementados en la pruebas. Los siguientes pasos describen el esquema de las pruebas experimentales aplicadas a cada instancia: 1) Fueron realizadas 10 corridas para cada algoritmo  $h \in H$ , obteniéndose los siguientes Frentes Pareto  $F_h = \{F_{hk} \mid k=1,2,\dots,10\}$ . 2) Un conjunto Pareto Óptimo conocido  $F_{known}$  fue calculado mediante la eliminación de las soluciones dominadas del conjunto unión de todas las soluciones encontradas. 3) Cada Frente Pareto  $F_{hk}$  fue comparado con el Frente Pareto conocido  $F_{known}$ , obteniéndose un conjunto de figuras desempeño (DI, EX y SA). El criterio de parada para cada corrida fue de 600 segundos, adoptado experimentalmente. En resumen se realizaron 10 corridas \* 8 algoritmos \* 4 grupos multicast \* 2 Topologías; totalizando mas 106 horas de pruebas experimentales.

*Métricas utilizadas.* En todos los casos,  $F$  representa un Frente Pareto de soluciones, calculado por un algoritmo. La métrica de Distancia (DI) calcula el promedio de distancias entre cada punto de un Frente Pareto  $F$  calculado por un algoritmo y el punto más cercano al mismo correspondiente al Frente Pareto Óptimo  $F^*$ . Lógicamente, cuanto menor es la distancia mejor es el desempeño del algoritmo.

La Extensión (EX) indica la distancia entre las soluciones extremas de un Frente Pareto  $F$ . Cuanto mayor es la extensión, el algoritmo tiene mejores posibilidades de acercarse a toda la frontera de soluciones que conforman  $F^*$ .

Las Soluciones Aportadas (SA) muestra el porcentaje de soluciones aportadas al Frente Pareto Óptimo  $F^*$ . Un valor más alto idealmente indica mejor calidad del Frente Pareto calculado.

*Resultados Obtenidos.* Los resultados presentados se encuentran promediados y normalizados, de forma tal que el peor valor corresponde a cero (0) y el mejor valor corresponde a uno (1). En la Tabla 1 se presentan las 4 pruebas. Note que existen cuatro columnas donde la primera corresponde al número de destinos bloqueados (DB). Se puede constatar que no existe un algoritmo MOACO superior en las diversas pruebas. Sin embargo, todos los algoritmos MOACOs tuvieron en general un rendimiento superior al obtenido por el MOSFP-LU. En particular, cabe mencionar

que el MOSFP-LU si obtuvo buenos resultados las pruebas de media carga en lo que respecta a distancia (DI).

Para las pruebas en saturación todos los algoritmos presentaron bloqueos de algunos destinos multicast. Para la red GINA los algoritmos MOACOs obtuvieron bloqueos de entre 2 y 6 destinos, mientras que para la red NSF se bloquearon entre 1 y 5 destinos. Por su parte, el MOSPF-LU obtuvo un gran número de solicitudes bloqueadas llegando a 34 y 40 bloqueos en la red de GINA y NSF respectivamente. Note que las métricas no fueron calculadas para la red de GINA. Esto es debido a que la mejor corresponde al de menor numero de bloqueos DB = 2 (M3AS). Para la red de NSF fueron calculados las métricas con aquellos de menor e igual numero de bloqueos DB = 1 (MOACS, M3AS, PACO y MAS).

**Tabla 1.** Resultados experimentales

Algoritmos	Red GINA				Red NSF			
	DB	DI	EX	SA	DB	DI	EX	SA
Baja Carga - 5 solicitudes Multicast								
PACO	0	0,00	0,49	0,00	0	0,73	0,55	0,00
MOACS	0	0,04	1,00	0,18	0	0,82	0,86	1,00
M3AS	0	0,51	0,38	0,09	0	1,00	0,62	0,44
BIANT	0	0,42	0,31	0,00	0	0,46	0,76	0,11
MOA	0	1,00	0,39	1,00	0	0,83	0,77	0,33
MAS	0	0,61	0,39	0,09	0	0,00	1,00	0,00
MOAQ	0	0,66	0,45	0,27	0	0,83	0,77	0,44
MOSPF-LU	0	0,60	0,00	0,00	0	0,55	0,00	0,00
Media Carga - 10 solicitudes Multicast								
PACO	0	0,44	0,71	0,17	0	0,04	0,67	0,00
MOACS	0	0,49	0,90	0,17	0	1,00	0,85	1,00
M3AS	0	0,57	0,87	1,00	0	0,10	0,60	0,75
BIANT	0	0,27	0,73	0,00	0	0,00	1,00	0,00
MOA	0	0,86	0,87	0,83	0	0,23	0,78	0,25
MAS	0	0,00	1,00	0,00	0	0,30	0,78	0,00
MOAQ	0	0,65	0,81	0,83	0	0,13	0,86	0,50
MOSPF-LU	0	1,00	0,00	0,17	0	0,89	0,00	0,25
Alta Carga - 15 solicitudes Multicast								
PACO	0	0,96	0,67	0,75	0	0,11	0,36	0,00
MOACS	0	0,76	1,00	0,75	0	0,37	0,66	1,00
M3AS	0	0,92	0,80	0,75	0	0,00	1,00	0,00
BIANT	0	0,86	0,85	0,25	0	0,03	0,65	0,00
MOA	0	1,00	0,81	1,00	0	0,09	0,89	0,00
MAS	0	0,92	0,76	0,25	0	0,15	0,61	0,00
MOAQ	0	0,93	0,73	0,25	0	0,09	0,38	0,00
MOSPF-LU	0	0,00	0,00	0,00	0	1,00	0,00	1,00
Saturación - 25 solicitudes Multicast								
MOACS	3				1	1,00	0,00	1,00
M3AS	2				1	0,00	0,00	0,00
PACO	4				1	1,00	0,00	1,00
MAS	4				1	0,00	0,00	1,00
MOAQ	5				3			
MOA	6				5			
BIANT	5				4			
MOSPF-LU	34				40			

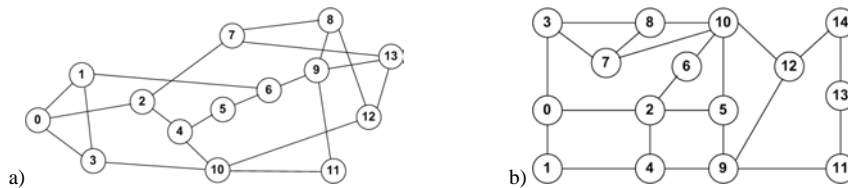
Para obtener una mejor apreciación sobre el desempeño global de los algoritmos la siguiente Tabla 2 expone los promedios sobre las distintas métricas considerando

baja, media y alta carga. No fue considerado las pruebas de saturación por presentarse bloqueos. Con base en dicho promedio fue calculado un ranking, ver Tabla 2.

**Tabla 2.** Promedios generales considerando baja, media y alta carga.

Algoritmos	DI	EX	SA	Ranking
PACO	0,47	0,49	0,27	0,41
MOACS	0,64	0,75	0,73	0,71
M3AS	0,44	0,61	0,43	0,50
BIANT	0,34	0,72	0,06	0,37
MOA	0,67	0,75	0,57	0,66
MAS	0,28	0,65	0,19	0,37
MOAQ	0,55	0,67	0,38	0,53
MOSPF-LU	0,67	0,00	0,24	0,30

Desde el punto de vista global se puede constatar la clara robustez del MOACS sobre los distintos ambientes de prueba. Considerando carga en Saturación, puede observarse que para las dos topologías el MOACS obtuvo resultados muy alentadores con bajos número de solicitudes bloqueadas. Finalmente los MOACOs en general muestran una superioridad notable sobre el desempeño obtenido por el MOSPF-LU, demostrando de esta forma sus altas cualidades en la resolución del problema en cuestión.



**Fig. 2.** Topologías de Redes. a) Red NSF con 14 nodos y 42 enlaces. b) Red GINA con 15 nodos y 44 enlaces.

## 9 Conclusiones

Este trabajo ha tratado por primera vez el complejo problema de Enrutamiento Multicast bajo restricciones de Capa Óptica utilizando el enfoque MOACO. Básicamente, los algoritmos MOACOs implementados han demostrados ser promisorio para el problema en cuestión al lograr mejores resultados sobre clásicos algoritmos MRWA del estado del arte el MOPSF-LU. Se ha propuesto una optimización simultánea de cuatro funciones objetivos: (a) la *cantidad total de saltos*, (b) la *máxima cantidad de saltos de fuente-destino*, (c) la *cantidad de nodos splitter* y (d) el *balanceo del light-tree* para un conjunto de solicitudes multicast conocido *a priori*.

Como trabajo futuro los autores realizarán más pruebas experimentales con grupos de demandas mayores sobre topologías de distintos tamaños. También se pretende considerar el problema de pérdida de potencia por propagación y el balanceo de carga sobre toda la red.

## Referencias

1. Siregar, J., Zhang, Y., Takagi, H.: Optical Multicast Routing Using Genetic Algorithm for WDM Optical Network. *IEICE Transactions on Communications*. Vol. E88-B, No. 1, Págs. 219-226 (2005)
2. Melian Batista, M.: Metaheuristic Optimization for WDM Network Planning. PhD thesis. Universidad de la Laguna, Tenerife, España, Septiembre (2003)
3. Xin, Y., Rouskas, G.: Multicast Routing Under Optical Layer Constraints. *IEEE INFOCOM 2004*, Págs. 2371-2742 (2004)
4. Saha, M., Sengupta, I.: A genetic algorithm based approach for static virtual topology design in optical networks. *IEEE Idicom 2005 Conference*, Chennai, India, Diciembre (2005)
5. Pinto, D., Barán, B.: Solving Multiobjective Multicast Routing Problem with a new Ant Colony Optimization approach. II IFIP/ACM Latin-American Networking Conference, LANC'05, Cali, Colombia, Octubre (2005)
6. Chlamtac, I., Ganz, A., Karni, G.: Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WANs. *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 40, No. 7, Págs. 1171-1182, Julio (1992)
7. Arteta, A., Barán, B., Pinto, D.: Routing and Wavelength Assignment over WDM Optical Networks. A Comparison between MOACOs and Classical approaches. III IFIP/ACM Latin-American Networking Conference, LANC'07, Octubre (2007)
8. Coello, C., Lamont, G., Van Veldhuizen, D.: *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Genetic and Evolutionary Computation Series, Editors: David E. Goldberg and John R. Koza. Second Edition, Springer (2007)
9. Zitzler, E., Deb, K., Thiele, L.: Comparison of multiobjective evolutionary algorithms. Empirical result. *Evolutionary Computation Journal* 8: 2, Págs. 173-195 (2000)
10. Van Veldhuizen, D. A.: *Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses, and New Innovations*. PhD thesis, Graduate School of Engineering of the Air Force Institute of Technology, Air University, Junio (1999)
11. Dorigo, M., Stützle, T.: The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications, and advances. In *handbook of Metaheuristics*, Glover F. and Kochenberger G., Edit. Noerwell, MA: Kluwer (2001)
12. Iredi, S., Merkle, D., Middendorf, M.: Bi-Criterion Optimization with Multi Colony Ant Algorithms. *Proc. First International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization (EMO'01)*, Lecture Notes in Computer Science, Págs. 359-372 (2001)
13. García-Martínez, C., Cordon, O., Herrera, F.: An Empirical Analysis of Multiple Objective Ant Colony Optimization Algorithms for the Bi-criteria TSP. *ANTS Workshop*, Págs. 61-72 (2004)
14. Paciello, J., Martínez, H., Barán, B.: Team Algorithms for Ant Colony based Multi-objective Problems. *Argentine Symposium on Artificial Intelligence ASAI 2006*, Mendoza, Argentina, Septiembre (2006)
15. Iredi, S., Merkle, D., Middendorf, M.: Bi-Criterion Optimization with Multi Colony Ant Algorithms. *Proc. First International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization (EMO'01)*, Lecture Notes in Computer Science, Págs. 359-372 (1993)
16. Doerner, K., Gutjahr, W., Hartl, R., Strauss, C.: Pareto Ant Colony Optimization: A Metaheuristic Approach to Multiobjective Portfolio Selection. *Proceedings of the 4th. Metaheuristics International Conference*. Porto, Págs. 243-248 (2002)
17. Schaerer, M., Barán, B.: A multiobjective Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows. *Proc. Twenty first IASTED International Conference on Applied Informatics*, Innsbruck, Austria, Págs. 97-102 (2003)
18. Gardel, P., Barán, B., Estigarríbia, H. Fernandez, U.: Applications of Omicrom ACO to Reactive Compensation Problem in Multiobjective context. *Congress Argentine of Computer Science CACIC 2005*, Concordia, Argentina (2005)
19. Mariano, C., Morales, E.: A Multiple Objective Ant-Q. An Algorithm for the Design of Water Distribution Irrigation Networks. *Technical Report HC-9904*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Mexico, Junio (1999)
20. Zang, H., Huang, R., Pan, J.: Methodologies on designing a hybrid shared-mesh protected WDM network with sparse wavelength conversion and regeneration. *Proc. of APOC 2002*, Shanghai, China, Págs. 188-196, 14-18, Octubre (2002)
21. Moy, J.: Multicast Extensions to OSPF. *Request for Comments: 1584*, Marzo (1994)
22. Prieto, J., Barán, B., Crichigno, J.: A Multitree Approach for Multicast Routing. II IFIP/ACM Latin-American Networking Conference, LANC'05, Cali, Colombia, Octubre (2005)