

# Requerimientos de QoS en la Asignación Óptima de Lightpath Un enfoque multiobjetivo basado en MOEAs.

**Carlos Núñez, Norihiko Isawa**

Investigación Informática, Universidad Nacional de Itapúa  
Campus Universitario Encarnación, Paraguay  
{cnunez, norihiko}@uni.edu.py

## Abstract

The intense traffic originated by applications in high performance networks forces the adoption of optical fibers transmission systems. Communications in optical networks along with wavelength-division multiplexing (WDM) technology, has contributed to increase available bandwidth. Suitable selections of lightpaths are expected with the utilization of Algorithms designed specifically for Routing and Wavelength Assignment (RWA). From the perspective of Quality of Service (QoS) in an all-optical network, the need for survivability and protection under eventually failure of a link could be expressed as a restoration path and a dedicated or shared path, according to the QoS of the request. This paper presents a version of Evolutionary Algorithms based on the Strength Pareto Evolutionary Algorithm – SPEA, and the Elitist Non-dominate Sorting Genetic Algorithm II – NSGA-II, for the optimal assignation of lightpath in survivable WDM networks. These two algorithms simultaneously minimized the wavelength conversion and the hop count for a set of given demand, considering QoS and wavelength constraint. Experiments carried out indicate the performance level of the proposed algorithms under different environmental situations, from low resources load to very high resources utilization.

**Keywords:** Computer networks, Optical Networks, Routing and Wavelength Assignment, Quality of Service, MultiObjective Optimization.

## Resumen

El intenso tráfico generado por aplicaciones en redes de alto desempeño, hace que la utilización de fibras ópticas (FO) sea un imperativo. La transmisión en redes de FO con la multiplexación por división de longitud de onda ha contribuido al aumento de la capacidad de ancho de banda utilizable. Se espera además un óptimo desempeño con la selección de *lightpath* mediante algoritmos especializados en las tareas de enrutamiento y Asignación de longitudes de onda (*Routing and Wavelength Assignment* – RWA). Desde el punto de vista de la Calidad de Servicio (QoS) en redes ópticas se introducen algunas formas de recuperación y/o protección ante caídas eventuales en los enlaces, por medio de asignación de *lightpaths* alternativos a los ya existentes, los cuales pueden ser compartidos o dedicados dependiendo del QoS. Se propone una solución basada en Algoritmos Evolutivos MultiObjetivos (*MultiObjective Evolutionary Algorithms* – MOEAs), específicamente el SPEA y el NSGA-II para la asignación óptima de *lightpaths* con requerimientos de QoS en redes WDM con capacidad de recuperación, y minimizar el número de conversiones de longitudes de onda (*wavelength conversion*) y la cantidad de saltos en forma simultánea (*hop count*) con requerimientos de QoS. Resultados experimentales muestran el desempeño de los algoritmos en situaciones con diversos grados de complejidad, desde poca carga hasta el límite de utilización extrema de recursos.

**Palabras Claves:** Redes de computadoras, Redes Ópticas, Enrutamiento y Asignación de Longitud de Ondas, Calidad de Servicio, Algoritmos Evolutivos, Optimización Multiobjetiva.

## 1 INTRODUCCIÓN

El tráfico intenso y creciente en las redes de comunicaciones actuales, como Internet 2, exige más recursos para satisfacer las necesidades de transmisión de información. Este objetivo puede alcanzarse con la utilización de WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) en redes de fibras ópticas, dividiendo el ancho de banda en porciones más pequeñas superando el problema de cuello de botella electrónico (*electronic bottleneck*) [1]. De esta forma, múltiples flujos de datos pueden ser transmitidos en forma simultánea sobre una misma fibra óptica. El enrutamiento en canales ópticos y el soporte de conmutación proveen una amplia gama de señales con las que se puede transmitir a velocidades del orden de los 40 Gbps [2]. Redes puramente ópticas que utilizan WDM y *Wavelength Routing* son soluciones totalmente viables para distintos tipos de redes como las de áreas extensas y de áreas metropolitanas. Una conexión de un nodo a otro en cualquiera de estas redes a través de una longitud de onda particular, es denominada *lightpath*, y se cuenta con algoritmos apropiados de enrutamiento y asignación de longitudes de ondas (*Routing and Wavelength Assignment – RWA*) [2]. En ausencia de convertidores de longitudes de onda, la misma debe ser mantenida a lo largo de todo el *lightpath*, regla conocida como restricción de continuidad [3]. La probabilidad de no satisfacer una demanda, en estas circunstancias, resulta más crítica que en las redes que utilizan convertidores de longitudes de onda.

En problemas de RWA, se presentan generalmente dos escenarios típicos. 1) *Asignación estática*: cuando todos los *lightpaths* son definidos por adelantado[3]; 2) *Asignación dinámica*: cuando los *lightpaths* son creados bajo demanda, y al finalizar se liberan todos los recursos (canales WDM), quedando éstos disponibles para futuras conexiones. A efectos de proveer supervivencia a las conexiones (*survivability*), se han propuesto recientemente varios paradigmas ampliamente estudiados y bien definidos, tanto para asignación dinámica como estática, como ser: 1) esquemas basados en protección [5, 6 y 7] donde, dos caminos (o *lightpath*) se crean para el mismo par origen-destino, siendo estos disjuntos y uno de ellos es utilizado como backup, y 2) esquemas basados en restauración [8 y 9] donde, un nuevo camino se calcula en tiempo real cuando se detecta una falla en el *lightpath* actual (primario). En el esquema basado en protección se pueden distinguir también dos enfoques: a) configuraciones dedicadas (*dedicated path*), donde el camino alternativo no puede ser utilizado por otra demanda y b) configuración compartida (*shared path*), donde los recursos reservados en caso de fallas pueden compartirse utilizando algún esquema de prioridades. Zhong y Jaeke propusieron aplicar el concepto de esquemas de protección para lograr múltiples niveles de Calidad de Servicio (QoS), donde un *lightpath* alternativo es asignado como backup dedicado o compartido según los requerimientos[4]. Dicho trabajo realiza una optimización mono-objetiva del número de saltos con niveles de QoS. En contrapartida, este trabajo propone la utilización de Algoritmos Evolutivos MultiObjetivos (*MultiObjective Evolutionary Algorithms – MOEAs*), basadas en población de soluciones, exitosamente utilizadas en varios problemas de la vida real, como el enrutamiento tradicional [10] entre otros. Consecuentemente, este trabajo implementa dos reconocidos algoritmos evolutivos multiobjetivo de segunda generación, el *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA) y el *Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II) para el problema de asignación de *lightpath* bajo requerimientos de QoS en redes WDM. Esta propuesta minimiza en forma simultánea, el número de saltos y el número de conversiones de longitudes de onda de un conjunto conocido de solicitudes unicast, bajo restricciones impuestas por los múltiples niveles de QoS.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente forma: en la Sección 2 se delimitan los conceptos básicos de calidad de servicio o QoS, mientras que la definición formal del problema de optimización multiobjetivo se presenta en la Sección 3. En la Sección 4 se da la formulación del

problema. En la Sección 5 se expone el enfoque de resolución basado en MOEAs, mientras que en la Sección 6 se sintetiza al ambiente experimental y los resultados. Finalmente en la Sección 7 se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

## 2 CALIDAD DE SERVICIO EN REDES ÓPTICAS

QoS, en términos de Ingeniería de Tráfico, se refiere a la capacidad de proveer diferentes prioridades a diferentes tipos de usuarios o flujos de datos, o garantizar un cierto nivel de rendimiento a un flujo, en concordancia con los requerimientos de cada aplicación. En una red de computadoras, QoS puede representar mecanismos avanzados para influir en la probabilidad de proveer el nivel solicitado de rendimiento. Según Tanenbaum [11], los parámetros principales determinan la QoS de cada flujo son : confiabilidad, retardo, fluctuación y ancho de banda.

En redes ópticas WDM, la asignación de un *lightpath* bajo las restricciones de utilización de longitudes de onda (*wavelength constraint*) minimiza la problemática de retardo y la fluctuación originada por congestión. Normalmente, las redes ópticas WDM son propensas a catastróficas caídas de enlaces, debido a altos volúmenes de tráfico, por razones que incluyen las fallas de fibras ópticas (que comúnmente ocurren cada 4 días en redes de gran porte [2]), transmisores, receptores, conversores entre otros. Una falla de enlace es descubierta fácilmente cuando los nodos detectan la ausencia de algún haz de luz sobre el enlace. Un algoritmo de administración de redes es invocado para notificar del evento y entonces se llevan a cabo los procedimientos necesarios para la recuperación de la comunicación.

Así, la habilidad de reconfigurar y re-establecer la comunicación al momento de la falla debe ser aprovisionada al momento de establecer una conexión [2]. Teniendo en cuenta que la caída de alguna conexión puede deberse a varias causas, los tipos de fallas se clasifican en: 1) fallas de un solo enlace (*single-link failure*) o 2) fallas de múltiples enlaces (*multi-link failure*). En este trabajo, para el cálculo del camino alternativo (o de backup) se considera que la probabilidad de caída de múltiples enlaces es despreciable.

Por otra parte, la provisión de un *lightpath* alternativo dedicado obliga a tener recursos extras asignados a una demanda de alta prioridad. Estos recursos son costosos en extremo por lo que es indispensable también considerar esquemas compartidos para aplicaciones menos críticas. En ese sentido, Zhong y Jaeke [4] proponen un esquema híbrido en el que se ofrecen protección dedicada, compartida y una modalidad sin protección según la calidad de servicio QoS, requerida por la aplicación en cuestión. Un esquema de protección para transmisiones unicast, semejante al propuesto por Zhong y Jaeke [4], es utilizado en este trabajo. Básicamente se define tres tipos de QoS:

- **ORO**: La calidad más alta representada en la jerarquía. Una solicitud al ser procesada, obtiene un camino principal y otro alternativo, cuyos componentes son disjuntos. Ambos *lightpaths* son exclusivos y corresponden al esquema de protección dedicada.
- **PLATA**: Similar a la categoría ORO. Durante el proceso de atención a la solicitud se asignan dos caminos disjuntos entre ellos, uno como primario y el otro como camino alternativo. A diferencia de la clase ORO, su camino alternativo puede ser utilizado para crear nuevas conexiones primarias para otras solicitudes de menor calidad. Esto pone en práctica al esquema de protección compartida.
- **BRONCE**: La de menor calidad dentro de la jerarquía. Las solicitudes con este tipo serán atendidas solamente con un camino principal (sin camino alternativo o de backup, *best effort*).

Es importante destacar, que si una respuesta de calidad Bronce utiliza algún componente del *lightpath* secundario de otra solicitud de calidad Plata, la caída del primario de ésta última solicitud fuerza a interrumpir la transmisión de la solicitud Bronce, por ser esta última de menor prioridad.

### 3 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

La optimización multiobjetivo [15] consiste en hallar soluciones que optimicen  $k$  objetivos posiblemente conflictivos entre sí y puede ser formulado como el problema de encontrar un vector de decisión  $\mathbf{x}$  en el espacio de decisión  $\mathbf{X}$  que satisfaga  $m$  restricciones y optimice un vector de objetivos  $\mathbf{y}$  en el espacio objetivo  $\mathbf{Y}$ , conforme se expresa a continuación:

$$\begin{aligned} &\text{Optimizar } \mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})]^T \in \mathbf{Y} \\ &\text{Sujeto a } \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \geq 0, \quad i = 1, \dots, m. \\ &\text{donde } \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{X}. \end{aligned} \quad (1)$$

Considerando varios objetivos a optimizar, no siempre es posible una tradicional comparación unidimensional que indique si una solución es mejor que otra. En consecuencia se utiliza el conocido concepto de dominancia Pareto [15], en el que un vector objetivo  $\mathbf{y}_1$  domina a otro  $\mathbf{y}_2$  ( $\mathbf{y}_1 \succ \mathbf{y}_2$ ) si y solo si  $\mathbf{y}_1$  no es peor que  $\mathbf{y}_2$  en ningún objetivo y es estrictamente mejor que  $\mathbf{y}_2$  en al menos un objetivo. Del mismo modo, podemos decir que una solución  $\mathbf{x}_1$  es mejor que otra  $\mathbf{x}_2$  si  $\mathbf{f}(\mathbf{x}_1) \succ \mathbf{f}(\mathbf{x}_2)$ , se dice entonces que  $\mathbf{x}_1$  es mejor que  $\mathbf{x}_2$  o que  $\mathbf{x}_1$  domina a  $\mathbf{x}_2$ . En el caso que ni  $\mathbf{x}_1$  domine a  $\mathbf{x}_2$  ( $\mathbf{x}_1 \not\succeq \mathbf{x}_2$ ) ni  $\mathbf{x}_2$  domine a  $\mathbf{x}_1$  ( $\mathbf{x}_2 \not\succeq \mathbf{x}_1$ ) se dice que las soluciones no son comparables, lo que se denota como ( $\mathbf{x}_1 \sim \mathbf{x}_2$ ).

Las características hasta ahora expuestas hacen que sea posible tener un conjunto de soluciones de compromiso, compuesto por todas las soluciones no dominadas del dominio. A este conjunto de soluciones óptimas se denomina conjunto Pareto ( $P_{true}$ ) y su respectiva imagen en el espacio objetivo se conoce como frente Pareto ( $Y_{true}$ ).

En el contexto de este trabajo se consideran solo problemas de minimización, sin que esto implique una pérdida de generalidad en la formulación matemática.

### 4 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Para este trabajo, una red de comunicaciones ópticas es modelada como un grafo  $G = (V, E, C)$ , donde  $V$  es el conjunto de nodos,  $E$  es el conjunto de enlaces y  $C$  es el conjunto de longitudes de onda disponibles en cada enlace óptico perteneciente a  $E$ . Sea:

- $(i, j) \in E$  enlace óptico desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ ; donde  $i, j \in V$ ;
- $(i, j, \lambda)$  canal óptico desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ , con longitud de onda  $\lambda$ , donde  $i, j \in V$  y  $\lambda \in C$ ;
- $c_{ij}$  número máximo de longitudes de onda disponibles en el enlace  $(i, j)$ ;
- $Q$  conjunto de calidades de servicio ofrecidos por la red, en este trabajo  $Q = \{\text{Oro, Plata, Bronce}\}$ ;
- $u = (f, d, q)$  solicitud unicast  $u$  con nodo fuente  $f$  y nodo destino  $d$ , donde  $f, d \in V$  y  $q \in Q$ ;
- $p_u$  *lightpath* primario correspondiente a la solicitud unicast  $u$ ;
- $b_u$  *lightpath* alternativo o *backup* correspondiente a la solicitud unicast  $u$ ;
- $s_u = (p_u, b_u)$  respuesta a solicitud  $u$ , con *lightpath* primario y alternativo atendiendo al requerimiento  $q_u \in Q$ ;

- $U$  conjunto de solicitudes unicast, con  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{|U|}\}$ , donde  $|\cdot|$  indica cardinalidad de un conjunto;
- $u_{ij}^\lambda$  longitud de onda ( $\lambda$ ) asignada a la solicitud unicast  $u$  en el enlace  $(i, j)$ ;
- $S_U$  solución atendiendo al conjunto de solicitudes unicast  $U$ , i.e.  $S_U = \{s_{u1}, s_{u2}, s_{u3}, \dots, s_{u|U|}\}$ .

Utilizando las definiciones anteriores, el RWA bajo requerimientos de QoS puede ser tratado como un problema multi-objetivo (*Multi-Objective Problem - MOP*) que busca la mejor solución  $S_U$  que simultáneamente minimice las siguientes funciones objetivos:

1- *Número total de saltos:*

$$y_1 = \sum_{u \in U} \left( \sum_{(i,j) \in s_u} \phi_{ij} \right) \quad \text{donde: } \phi_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } (i, j) \in s_u \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

2- *Número de conversiones de longitud de onda:*

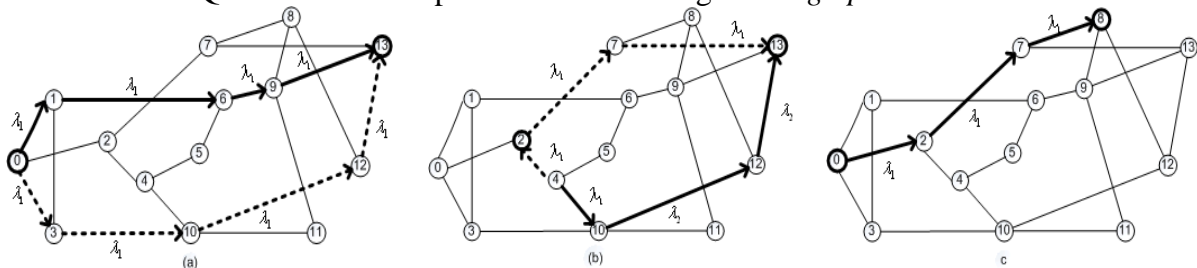
$$y_2 = \sum_{u \in U} \left( \sum_{i \in V} \varphi_{ij} \right) \quad \text{donde: } \varphi_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si en el nodo } i \in V \text{ se conmuta } \lambda \text{ para la solicitud } u \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

**Bajo las siguientes restricciones:**

- Dada la solicitud  $u = (f, d, q)$  tal que  $q \in \{\text{Oro, Plata}\}$ , se tiene que: Si un enlace óptico  $(i, j) \in p_u \rightarrow (i, j) \notin b_u$  y Si un nodo  $i \in p_u$  con  $i \neq f, d \rightarrow i \notin b_u$ , i.e. se trata de un esquema de protección a nivel de path, por lo que un enlace  $(i, j)$  del primario ya no puede ser usado para el backup.
- Dada la solicitud  $u = (f, d, \text{Oro})$ , se tiene que: Si un canal óptico  $(i, j, \lambda) \in \{p_u, b_u\} \rightarrow (i, j, \lambda) \notin S_U - \{p_u, b_u\}$ . i.e. se trata de un esquema dedicado de protección donde el uso del canal óptico  $(i, j, \lambda)$  inhabilita su uso posterior.
- Dada la solicitud  $u = (f, d, q)$  tal que  $q \in \{\text{Oro, Plata, Bronce}\}$ , se tiene que: Si un canal óptico  $(i, j, \lambda) \in p_u \rightarrow (i, j, \lambda) \notin S_U - \{p_u\}$ , i.e. se trata de una restricción en la utilización de un canal óptico  $(i, j, \lambda)$  que se utiliza en un *lightpath* primario. Se lo puede interpretar como una restricción en la re-utilización de una longitud de onda (*wavelength constraint*) ya asignada.

Para poder aclarar los conceptos presentados y denotar las características de la calidad de servicio en redes ópticas, el siguiente ejemplo expone un problema sencillo y una posible solución.

**Ejemplo 1.** Dada la red con la topología NSFnet [13] en la Figura 1, con 14 nodos y 42 enlaces, se solicita acomodar el siguiente conjunto de demandas unicast con sus requerimientos QoS respectivos  $U = \{u_1 = (0, 13, \text{Oro}), u_2 = (4, 13, \text{Plata}), u_3 = (0, 8, \text{Bronce})\}$ . En la Figura 1.a puede visualizarse la asignación del *lightpath* primario  $p_{u1}$  y alternativo  $b_{u1}$  disjuntos para la solicitud  $u_1$ . Los *lightpath* primario  $p_{u2}$  y alternativo  $b_{u2}$  disjuntos para la segunda solicitud  $u_2$  son presentadas en la Figura 1.b. La asignación para la solicitud  $u_3$  es esquematizada en la Figura 1.c, aquí los requerimientos de QoS son mínimos por tanto “no” se asigna un *lightpath* alternativo.



**Figura 1.** Asignación de *lightpath* para el Ejemplo 1. a) Path primario y secundario para la  $u_1$  con QoS Oro. b) Solicitud  $u_2$  con QoS Plata. c) Asignación  $u_3$  con requerimientos de baja QoS “no” se asignan *lightpath* alternativos o de backup.

Note que el *lightpath* alternativo  $b_{u_2}$  comparte el mismo canal óptico  $(2, 7, \lambda_1)$  con el *lightpath*  $p_{u_3}$ , dado que el requerimiento de calidad de servicio de  $u_2$  asume que su camino alternativo puede ser utilizado por otras demandas, mientras no exista alguna falla  $p_{u_2}$ . Esto implica que si el *lightpath*  $b_{u_2}$  es requerido por la solicitud  $u_2$ , la transmisión de datos de  $u_3$  se vera interrumpida. Para esta posible solución  $S_U$ , el correspondiente vector objetivo es  $\mathbf{y} = (y_1, y_2) = (17, 1)$ , i.e. son necesarios 17 enlaces ópticos y solo una conversión de longitud de onda en el nodo 10 para el *lightpath*  $b_{u_2}$ .

## 5 ALGORITMOS EVOLUTIVOS MULTI OBJETIVOS

Investigaciones realizadas sobre el principio de *survival of the fittest* (ley de supervivencia de los más aptos) observado en la naturaleza, dieron como resultado simulaciones computacionales que resultaron muy útiles para solucionar problemas complejos [14], dando origen a los Algoritmos Evolutivos (*Evolutionary Algorithms* – EAs). Los EAs han sido muy populares en tareas de búsqueda y de optimización en los últimos años, con un desarrollo constante de nuevos algoritmos. En particular, los Algoritmos Evolutivos MultiObjetivos (*MultiObjective Evolutionary Algorithms* – MOEAs) permiten resolver problemas de optimización multiobjetivos (MOP), encontrando un conjunto completo de soluciones *Pareto* en una sola ejecución [15], convirtiéndolos en un candidato natural para resolver el problema del enrutamiento óptico. En la literatura, se tienen trabajos que comparan el rendimiento de estos Algoritmos. En [16] se analiza el rendimiento de NSGA-II, SPEA-2 y CNSGA-II con elitismo controlado en diseño de sistemas de seguridad. En [22] el SPEA, SPEA-2, NSGA-II y CNSGA-II fueron comparados en el problema de enrutamiento multicast multiobjetivo, donde los resultados indican que no existe una clara superioridad de algún enfoque.

Es este trabajo fueron implementados el SPEA y el NSGA-II, enfoques evolutivos de significativa simplicidad pero de notable eficacia, como un primer acercamiento de los MOEAs al problema de asignación óptima de *lightpath* con características de QoS.

### 5.1 Strength Pareto Evolutionary Algorithm – SPEA

Este algoritmo fue introducido por el Zitzler y Thiele [18] en el año 1999. El SPEA utiliza un archivo que contiene las soluciones no dominadas encontradas (población externa de no dominados  $P_{nd}$ ). En cada generación, se copian los individuos no dominados de  $P$  a  $P_{nd}$  y se borra de ésta última las soluciones dominadas. Para cada individuo en el sistema externo, se computa un valor de fuerza (*strength*) que es proporcional al número de soluciones a las cuales cada individuo domina. Por otra parte, el *fitness* de cada miembro de la población actual  $P$  se computa según las fuerzas de todas las soluciones no dominadas externas que la dominen [18].

### 5.2 Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm – NSGA-II

El algoritmo NSGA-II fue propuesto por Deb et al. [19]. Se basa en la clasificación eficiente de individuos en varias capas o frentes ( $F_i$ ). La clasificación consiste en agrupar a todos los individuos no dominados en un frente, con un valor de *fitness* (o adaptabilidad) calculado a través de una distancia de *Crowding* [19]. Este valor es proporcional a la distancia de cada objetivo de los vecinos más próximos del mismo frente al que pertenece. Entonces el grupo de individuos clasificados es ignorado y otro frente de individuos no dominados es considerado. El proceso continúa hasta que se clasifican a todos los individuos en la población. En el proceso de selección de un individuo, se

considera un orden lexicográfico, donde se tiene primero en cuenta el índice del frente al cuál pertenece y luego la distancia de *Crowding*. Los Algoritmos 1 y 2 sintetizan el enfoque del SPEA y NSGA-II respectivamente

Algoritmo 1: SPEA	Algoritmo 2: NSGA-II
1: Inicializar población inicial P; t = 0	1: Inicializar una población inicial P
2: <b>mientras</b> criterio de parada no se cumpla <b>hacer</b>	2: Evaluar individuos de P y ordenar considerando dominancia
3: Evaluar individuos de P <sub>t</sub>	3: Aplicar operadores genéticos a P para obtener población Q; t = 0
4: Copiar los individuos no dominados de P <sub>t</sub> a P <sub>nd</sub>	4: <b>hacer</b>
5: Eliminar las soluciones de P <sub>nd</sub> que sean dominadas por otras soluciones de P <sub>nd</sub>	5: R = P <sub>t</sub> ∪ Q <sub>t</sub> /* P <sub>t</sub> representa la población P en la generación t
6: Calcular el fitness de cada uno de los individuos en P <sub>t</sub> así como en P <sub>nd</sub>	6: Ordenar R, considerando dominancia y obtener frentes F <sub>i</sub>
7: Si el número de soluciones almacenadas en P <sub>nd</sub> superan un máximo establecido N, reducir P <sub>nd</sub> por medio del clustering	7: l = 1
8: Seleccionar individuos del conjunto P <sub>t</sub> y P <sub>nd</sub> ( <i>mating pool</i> )	8: <b>mientras</b>  P <sub>t+1</sub>   < N /* N es el tamaño máximo de la población P y Q
9: Aplicar los operadores de cruzamiento y mutación al <i>mating pool</i> .	9: Calcular adaptabilidad de cada individuo en F <sub>i</sub>
10: Copiar nuevas soluciones del <i>mating pool</i> en P <sub>t+1</sub> ; t = t+1	10: P <sub>t+1</sub> = P <sub>t+1</sub> ∪ F <sub>i</sub>
11: <b>fin mientras</b> ; <b>imprimir</b> P <sub>nd</sub>	11: l = l + 1
	12: <b>fin mientras</b>
	13: Ordenar P <sub>t+1</sub> por dominancia
	14: Elegir los primeros N elementos de P <sub>t+1</sub> , para tener Q <sub>t+1</sub>
	15: t = t + 1
	16: <b>mientras</b> criterio de parada no sea alcanzado
	17: <b>imprimir</b> Q

### 5.3 Cromosoma y Operadores Evolutivos.

Los Algoritmos Evolutivos son enfoques de propósito general. Su funcionamiento y metodología de resolución son prácticamente independientes al problema de optimización a ser resuelto. Para poder aplicar un Algoritmo Evolutivo a un problema en particular es necesario definir 1) la estructura del cromosoma, que básicamente representa una solución potencial al problema considerado y 2) un operador de cruce acorde al cromosoma. En este trabajo fue utilizado como proceso de selección el torneo binario por ser simple pero de alta eficiencia [20]. No se utiliza un operador de mutación, debido a las características aleatorias del cruce implementado. Seguidamente, se muestra la representación del cromosoma como también la del operador de cruce para el problema en cuestión.

**Cromosoma.** El problema de asignación de *lightpath* con requerimientos de QoS es representado como un vector de *lightpaths* primarios y alternativos como puede notarse en la Figura 2.

El cromosoma representa básicamente, a una solución  $S_U = \{s_{u1}, s_{u2}, \dots, s_{uk}, \dots, s_{u|U|}\}$ , donde cada  $s_{uk} = (p_{uk}, b_{uk})$ . De la definición matemática se observa que  $p_{uk}$  y  $b_{uk}$  representan los *lightpaths* primario y alternativo respectivamente (Sección 4). En la Figura 2 es presentada también la estructura del  $p_{uk}$ , análoga a la estructura de  $b_{uk}$ .

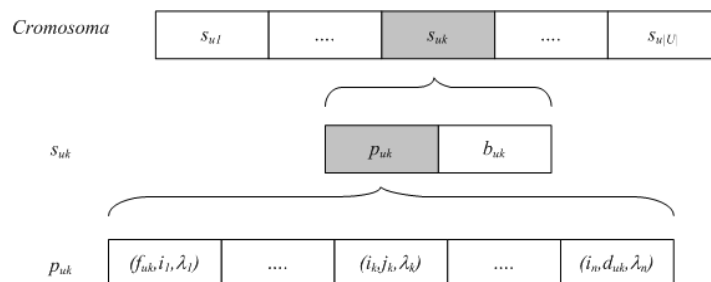
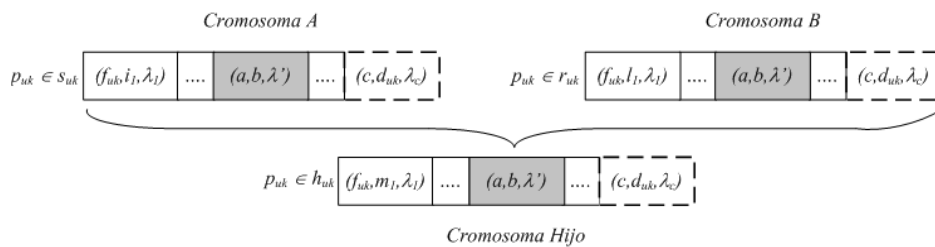


Figura 2. Relación de un cromosoma con los lightpath primarios y alternativos.

**Cruce.** En el cruce intervienen dos padres seleccionados a través del torneo binario, para obtener un solo individuo (hijo). El cruce es realizado a nivel de *lightpath*, solo en los caminos primarios para cada solicitud unicast del cromosoma. El cruce propuesto consiste en copiar todos los enlaces coincidentes directamente a la nueva solución, independientemente al tipo de longitud de onda. Finalmente, un algoritmo de enrutamiento estocástico basado en el “*Shortest Path Dijkstra (SPD)* [21]” asigna los restantes enlaces para completar el camino primario. Luego de obtener el camino primario, se procede a aplicar el SPD para obtener el camino alternativo. La asignación de longitudes de ondas es realizada mediante un algoritmo aleatorio que intenta evitar la conmutación de longitudes de ondas. En la Figura 3 es presentado un bosquejo del operador de cruce aplicado al  $k$ -ésimo *lightpath* primario  $p_{uk}$  de dos cromosomas padres (A y B).

Se observa que los enlaces  $(a, b)$  y  $(c, d_{uk})$  son utilizados por ambos padres, por tanto el cromosoma hijo en el  $k$ -ésimo *lightpath* hereda dichos caminos.



**Figura 3.** Operador de cruce aplicado a cada *lightpath* primario de los cromosomas padres.

## 6 AMBIENTE Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

El SPEA y el NSGA-II fueron implementados en una PC Intel Core 2 Duo de 1,87 GHz con 1 GB de RAM, compilador javac 1.5.0\_06 en un *Runtime Environment* versión 2.

Dos problemas de prueba fueron resueltos con el objeto de evaluar los métodos propuestos. Para cada uno fueron seleccionados varios conjuntos  $U$  de demandas unicast, con las mismas cantidades de longitudes de onda ( $\lambda$ ). Los parámetros utilizados fueron: 50 cromosomas para la población evolutiva con 500 generaciones como criterio de parada para cada corrida. Un conjunto de soluciones aproximadas al Frente Pareto Real fue calculado para cada conjunto unicast  $U$  usando el siguiente procedimiento:

1. Cada algoritmo fue ejecutado 10 veces.
2. Un conjunto de soluciones formado por todas las soluciones de las 10 corridas fue obtenido.
3. Las soluciones dominadas fueron eliminadas, y un conjunto aproximado al Frente Pareto llamado “ $Y_{known}$ ” fue creado.
4. Luego, cada una de las 10 corridas fue comparada con  $Y_{known}$  para obtener promedios de soluciones aportadas.

### 6.1. Problema de Prueba 1

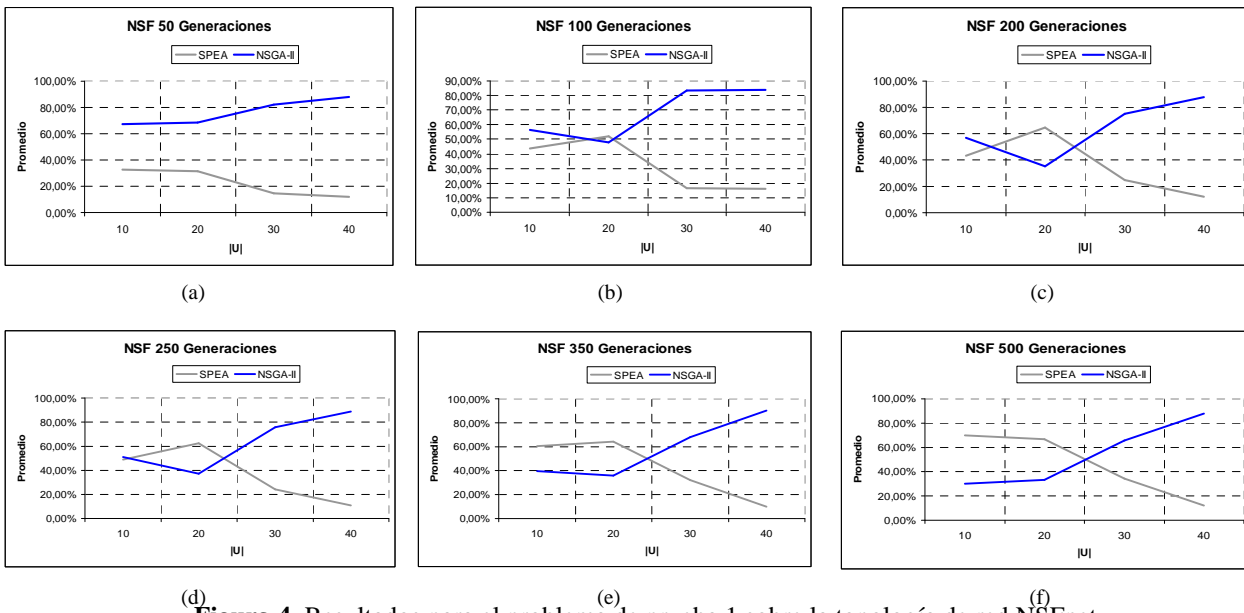
La topología NSFnet [13] con 14 nodos y 42 enlaces presentada en la Figura 1 fue utilizada en este primer problema. El conjunto de demandas unicast  $U$  utilizado es presentado en la Tabla 1. Note que la calidad de servicio ( $q$ ) de cada solicitud es especificada con números, donde Oro  $\equiv$  0, Plata  $\equiv$  1, Bronce  $\equiv$  2.



**Tabla 1.** Conjuntos de demandas unicast a ser acomodados en la NSFnet. La columna  $|U|$  indica la cantidad de solicitudes unicast para cada conjunto.

$ U $	$U$
10	(0,13,2) (12,3,2) (2,11,2) (10,7,2) (6,12,2) (2,12,1) (10,6,1) (0,12,1) (1,12,0) (7,11,0)
20	(1,12,2) (6,13,2) (3,11,2) (0,8,2) (4,11,2) (3,13,2) (1,13,2) (2,11,2) (8,6,2) (9,0,2) (5,13,2) (12,5,2) (7,5,1) (3,12,1) (12,4,1) (1,13,1) (1,13,0) (2,11,0) (6,13,0) (9,0,0)
30	(1,12,2) (6,13,2) (3,11,2) (0,8,2) (4,11,2) (3,13,2) (1,13,2) (2,11,2) (8,6,2) (9,0,2) (5,0,2) (12,5,2) (10,7,2) (2,9,2) (4,9,2) (5,13,2) (8,3,2) (10,8,2) (1,13,1) (3,12,1) (7,5,1) (10,0,1) (12,4,1) (4,3,1) (5,7,1) (1,13,0) (2,11,0) (6,13,0) (9,0,0) (7,12,0)
40	(1,12,2) (6,13,2) (3,11,2) (0,8,2) (4,11,2) (3,13,2) (1,13,2) (2,11,2) (8,6,2) (9,0,2) (5,0,2) (12,5,2) (10,7,2) (2,9,2) (4,9,2) (5,13,2) (8,3,2) (10,8,2) (8,12,2) (6,7,2) (0,4,2) (2,1,2) (5,8,2) (4,7,2) (1,13,1) (3,12,1) (7,5,1) (10,0,1) (12,4,1) (4,3,1) (5,7,1) (6,10,1) (2,9,1) (10,3,1) (1,13,0) (2,11,0) (6,13,0) (9,0,0) (7,12,0) (11,7,0)

En la Figura 4 se muestran los resultados de las comparaciones del promedio en 10 corridas con  $Y_{known}$ , con 500 generaciones divididas de a 50 para observar el desempeño a lo largo de las corridas. El SPEA tuvo mejor desempeño que el NSGA-II en todos los conjuntos de solicitudes donde la carga era baja ( $U=\{10,20\}$ ) a excepción de las corridas con cantidad de generaciones bajas (50, 100 y en parte de la generación 200, figuras 4.a, 4.b y 4.c), a partir de ( $U=\{20\}$ ) se observa un aumento en el desempeño del NSGA-II, al incrementar la cantidad de generaciones, como se ve en las figuras 4.d al 4.f.

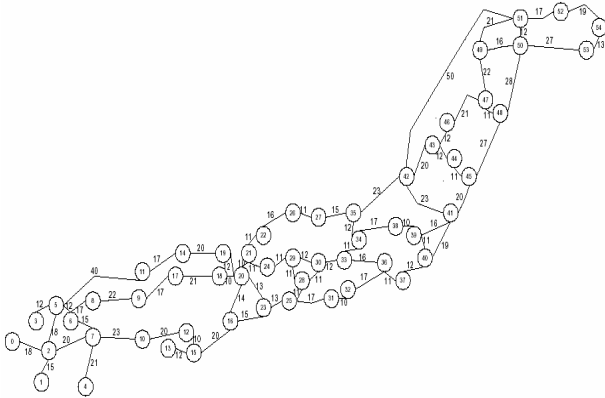


**Figura 4.** Resultados para el problema de prueba 1 sobre la topología de red NSFnet.

Los resultados arrojados por las pruebas del problema 1, indican que el SPEA es consistentemente mejor que el NSGA-II para todas las corridas llevadas a cabo donde la carga era baja, y las generaciones no superaban las 200. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en todas las generaciones, se verifica que aumentando la complejidad del problema la situación de dominancia se revierte, para la red NSF. Este resultado podría ser aún más contundente llevando cabo pruebas más complejas, como ser la utilización de una red cuya topología sea más densa. Teniendo en cuenta estos objetivos, se propone la utilización de la red NTTnet, como se presenta en la siguiente prueba.

**Problema de Prueba 2**

En el segundo problema fue utilizada la topología de prueba de la NTTnet [22]. NTTnet ya es de un tamaño considerable, con 55 nodos y 144 enlaces, conforme muestra la Figura 5. La Tabla 3 presenta los cuatro conjuntos de demandas unicast  $U$  con sus QoS.

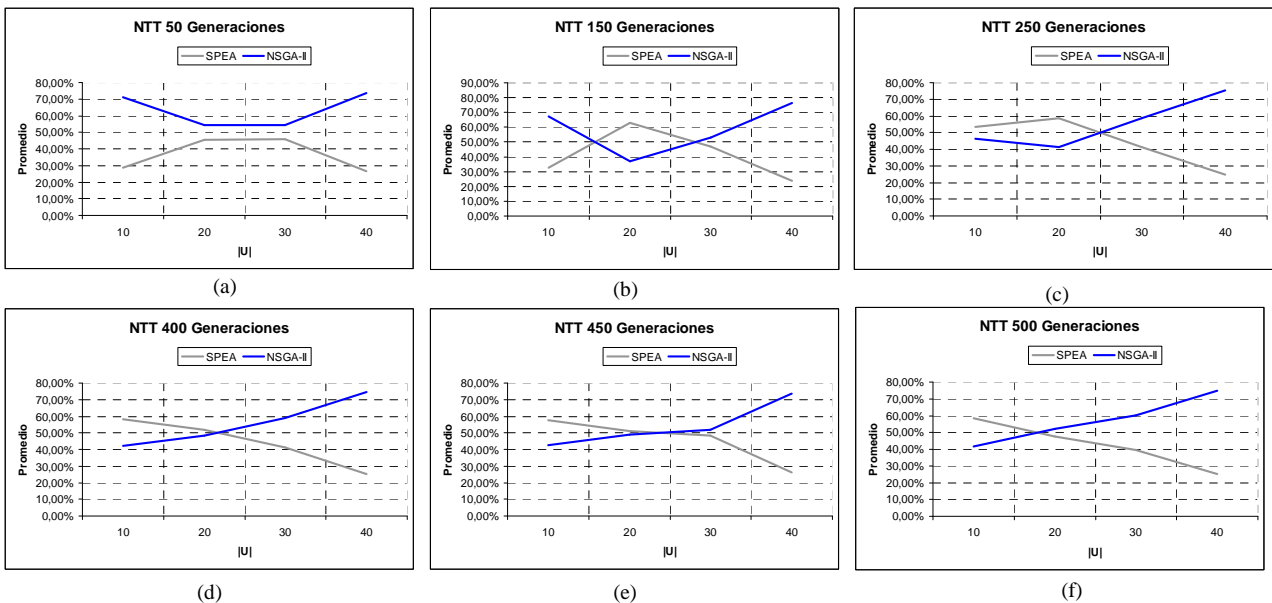


**Figura 5.** Topología de red NTTnet con 55 nodos y 144 enlaces.

$ U $	$U$
10	(14,37,2) (24,5,2) (12,19,2) (9,44,2) (13,37,2) (7,48,1) (5,46,1) (2,37,1) (8,41,0) (2,54,0)
20	(17,54,2) (23,51,2) (21,0,2) (5,41,2) (0,53,2) (7,33,2) (10,44,2) (11,48,2) (6,35,2) (19,48,2) (15,35,2) (24,47,2) (5,48,1) (7,34,1) (5,33,1) (10,37,1) (7,52,1) (7,52,0) (20,40,0) (20,54,0)
30	(2,14,2) (7,29,2) (10,30,2) (14,42,2) (54,30,2) (47,11,2) (47,17,2) (6,23,2) (0,54,2) (21,50,2) (5,31,1) (8,33,2) (13,48,2) (23,45,2) (10,37,2) (19,2,2) (5,28,2) (52,53,2) (5,38,2) (16,42,2) (11,1,2) (4,51,2) (6,35,1) (2,54,1) (9,34,1) (24,51,1) (52,20,1) (17,36,1) (7,41,0) (15,46,0)
40	(2,14,2) (7,29,2) (10,30,2) (14,42,2) (47,11,2) (6,23,2) (0,54,2) (13,48,2) (8,33,2) (23,45,2) (10,37,2) (19,2,2) (5,28,2) (52,53,2) (5,38,2) (16,42,2) (11,1,2) (4,51,2) (14,37,2) (12,19,2) (9,44,2) (13,37,2) (7,48,1) (5,46,1) (2,37,1) (6,35,1) (2,54,1) (9,34,1) (24,51,1) (5,31,1) (52,20,1) (17,36,1) (7,41,0) (15,46,0) (8,41,0) (2,54,0) (24,5,0) (21,50,0) (47,17,0) (54,30,0)

**Tabla 3.** Conjunto de demandas unicast  $U$  a ser comodadas en la red óptica NTTnet.

Los resultados correspondientes a los conjuntos unicast de la Tabla 3 son presentados en la figura 6 (a-f). Puede notarse que para conjuntos de solicitudes unicast con pocas solicitudes, el SPEA continua teniendo un desempeño notable con respecto al NSGA-II. Se puede observar un desempeño similar al del problema 1, donde el SPEA es mejor en situaciones donde la carga es baja, no así cuando se le exige con mayores solicitudes y generaciones a los algoritmos, demostrándose un mejoramiento notable en estos casos del algoritmo NSGA-II.



**Figura 6.** Resultados para el problema de prueba 2, sobre la topología de red NTTnet, correspondiente a los conjuntos de solicitudes unicast  $|U|=\{10,20,30,40\}$  agrupados en generaciones de a 50 hasta las 500, definidas como parámetro.

En los experimentos con conjuntos  $U$  mayores, el desempeño del NSGA-II es notablemente superior al del SPEA en todas las generaciones. Para el conjunto  $|U|=30$ , el NSGA-II logró un 60%

por sobre los 40% del SPEA (Figura 5). Para  $|U|=40$ , se verifica que el NSGA-II obtuvo un 70% de las soluciones mientras que el SPEA solo obtuvo el 25% teniendo en cuenta las 500 generaciones. Como primeras conclusiones se puede acotar que el desempeño del SPEA se va degradando conforme aumenta el número de solicitudes unicast, en las pruebas realizadas. Por otra parte, el NSGA-II tiene un desempeño complementario al SPEA. En efecto, el NSGA-II obtiene mejores rendimientos frente al SPEA a medida que aumenta la complejidad, como puede verificarse en las Figuras anteriores. Puede observarse que la curva formada para el SPEA se va degradando en su desempeño mientras que con el NSGA-II ocurre exactamente lo contrario. Se puede concluir entonces de estas pruebas que para escenarios de baja complejidad es recomendable la utilización del SPEA, mientras que el NSGA-II es muy promisorio para escenarios de mayor complejidad.

## 7. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo presenta un enfoque multiobjetivo basado en algoritmos evolutivos (MOEAs) para la resolución del problema de asignación óptima de *lightpath* bajo requerimientos de QoS. Tres niveles de QoS fueron definidos: Oro, Plata y Bronce. Para Oro, un *lightpath* alternativo y exclusivo al primario es asignado conforme el esquema de protección dedicada. En Plata, el *lightpath* alternativo asignado puede ser utilizado por otra solicitud de menor calidad, respondiendo al esquema de protección compartida. Para Bronce, no se asignan caminos alternativos, por lo que ante una eventual falla en el *lightpath* correspondiente, la transmisión de datos no será recuperada. El SPEA y el NSGA-II fueron los enfoques utilizados para acomodar un conjunto de demandas unicast, donde se busca minimizar simultáneamente el número de saltos y número de conmutaciones de longitudes de onda, bajo restricciones impuestas por los múltiples niveles de QoS. Así, un conjunto de soluciones de compromiso llamado Conjunto Pareto es calculado en una sola corrida. Este tipo de optimización tiene una especial ventaja sobre otros métodos, como el de suma ponderada u orden lexicográfico, debido a que no necesita restricciones o conocimientos *a priori*, evitando eliminar buenas soluciones.

Resultados experimentales sobre topologías de redes conocidas como NSF y la NTT con diferentes conjunto de demandas, muestran que bajo ciertas condiciones el SPEA presenta un mejor desempeño sobre el NSGA-II. A medida que la complejidad del escenario de prueba aumenta, el NSGA-II presenta un claro aumento en su desempeño. Se puede concluir en consecuencia que no existe un enfoque claramente superior para todos los escenarios de pruebas. La utilización del SPEA es recomendable para conjuntos pequeños de demandas unicast mientras que el NSGA-II se recomienda para escenarios de mayor complejidad.

Como trabajo futuro los autores proponen tratar el problema en cuestión con otros algoritmos multiobjetivos, utilizando otras funciones objetivos como el número de transmisores/receptores ópticos, considerando otros niveles de calidad de servicios a ser propuestos.

## REFERENCIAS

- [1] A. M. Hamad y A.Kamal. "A survey of Multicasting Protocols for Broadcast-and-Select Single-Hop Networks". *Network, IEEE*. Volumen 16, Edición 4, Julio-Agosto 2002, Páginas: 36 – 48.
- [2] A.K. Somani . *Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks*. Cambridge University Press, 2005. ISBN-I3 978-05II-I3754-9 eBook (NetLibrary).
- [3] E. Modiano y A. Narula-Tam. "Survivable routing of logical topologies in WDM Networks", INFOCOM 2001. Proceedings. IEEE, Volumen. 1, 2001, Páginas: 348-357.

- [4] S. Zhong y A. Jackel. "Optimal priority-based lightpath allocation for survivable WDM networks", ICCCN 2004. Proceedings. IEEE, 2004, Páginas: 17-22.
- [5] S. Ramamurthy y B. Mukherjee. "Survivable WDM Mesh Networks, Part I-Protection", Proceedings. IEEE INFOCOM'99, Páginas: 744-751, Marzo, 1999.
- [6] G. Ellinas, A.G. Hailemariam y T.E. Stern, "Protection cycles in Mesh WDM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Volumen 18, N° 10, Páginas: 1924-1937, Octubre 2000.
- [7] D. Stamatelakis y W.D Grover. "IP Layer Restoration and Network Planning Based on Virtual Protection Cycles", IEEE JSAC, Volumen 18, N° 10, Páginas: 1938-1949, Octubre 2000.
- [8] S. Ramamurthy y B. Mukherjee, "Survivable WDM Mesh Networks-II: Restoration". ICC'99. 1999 *IEEE International Conference on Communications*, Volumen 3, Páginas: 2023-2030, 1999.
- [9] R. R. Irashko, y W. D. Grover, "A highly Efficient Path-Restoration Protocol for Management of Optical Network Transport Integrity". *IEEE Selected Areas in Communications*, Volumen 18, N° 5, Mayo 2000, Páginas: 779-794.
- [10] K. Miettien. "Some methods for nonlinear multi-objetive optimization". En E. Zitzler, K. Deb, L. Thiele, C. A. Coello Coello, y D. Corne, editores, *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science No. 1993, 2001.
- [11] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks*, Prentice Hall, Cuarta Edición, 2003.
- [12] D. A. V. Veldhuizen y G. B. Lamont. "Multiobjective Evolutionary Algorithms: Analyzing the State-of-the-Art". *Evolutionary Computation*. Páginas: 125-147, 2000.
- [13] D. Pinto y B. Barán. "Solving Multiobjective Multicast Routing Problem with a new Ant Colony Optimization approach". *2nd IFIP/ACM Latin American Networking Conference 2005 - LANC'05*. Cali - Colombia. Octubre 2005.
- [14] D. B. Fogel, editor *Evolutionary Computation*. "The Fossil Record Selected Reading on the History of Evolutionary Algorithms". The institute of Electrical and Electric Engineers, New York.
- [15] D. Van Veldhuizen, "Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analysis, and New Innovations", PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering. Graduate School of Engineering. Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, Mayo 1999.
- [16] A. Dias y J. De Vasconcelos. "Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems". *IEE Transactions on Magnetics*, Volumen 38, N° 2, March 2002.
- [18] E. Zitzler, y L. Thiele, "Multiobjective Evolutionary Algorithms: A comparative Case Study and the Strength Pareto Approach", *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Volumen 3, N° 4, 1999, Páginas: 257-271.
- [19] K. Deb y T. Goel. "A Fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II". *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, 6(2): 182-197, 2002.
- [20] M. Chakraborty y U.K. Chakraborty. "An analysis of linear ranking and binary tournament selection in genetic algorithms". *IEEE Communications Society. Information, Communications and Signal Processing*, 1997. ICICS., Proceedings of 1997. Volume 1, Edición, 9-12 Septiembre 1997, Páginas: 407 – 411.
- [21] I. Chlamtac, A. Ganz y G. Karni. "Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WANs". *IEEE Transactions on Communications*. Volumen 40, N° 7, Páginas: 1171- 1182, July, 1992.
- [22] F. Talavera, J. Prieto, J. Crichigno y B. Barán. "Comparación de Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivos". *Congreso Argentino de Ciencias de la Computación - CACIC'2004*. Bs. Aires