

# Modelo de asignación de longitudes de ondas en redes WDM teniendo en cuenta dispersión residual y tráficos Unicast/Multicast con QoS

## Wavelength allocation strategies in WDM networks analyzing residual dispersion and Unicast/Multicast traffic with QoS

Javier E. Sierra, PhD.<sup>1</sup> y Yezid Donoso, PhD.<sup>2</sup>

1. Docente, Grupo de Investigación GIDATI, Universidad Pontificia Bolivariana.
2. Docente, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad de los Andes.  
javier.sierra@upb.edu.co; ydonoso@uniandes.edu.co

Recibido para revisión 28 de Agosto de 2009, aceptado 23 de Octubre de 2009, versión final 15 de Diciembre de 2009

**Resumen**—El tráfico de Internet está en constante crecimiento y con él las aplicaciones del tipo unicast/multicast con diferentes requerimientos de Calidad de Servicio (QoS). Esto es motivo para que las Redes de Transporte Ópticas (RTO) deban continuar su evolución hacia redes completamente ópticas (sin conversiones Óptico-Electrónico-Óptico: OEO). *S/G Light-tree* es una arquitectura de los nodos de las redes RTO que permite el optimo enrutamiento y/o manejo de tráficos unicast/multicast empleando el concepto de *Traffic Grooming* (granularidad de tráfico) en un ambiente óptico. Las técnicas de grooming así como los algoritmos de asignación y enrutamiento propuestos hasta el momento, no tienen en cuenta los fenómenos que se pueden prestar en la fibra óptica, los cuales atenúan o alteran las diferentes longitudes de onda en los sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). La dispersión cromática es un fenómeno que deforma los pulsos transmitidos en una fibra óptica y el efecto depende de la longitud de onda empleada en la transmisión. En éste artículo, se propone un modelo de asignación de longitudes de ondas que tiene en cuenta la dispersión residual en redes WDM que soportan traffic grooming y tráficos unicast/multicast con requerimientos de QoS.

**Palabras Clave**—Dispersión cromática, Traffic Grooming, Optimización, Enrutamiento, Asignación, QoS, Heurísticas, NP-completo.

**Abstract**—Internet traffic demands are constantly increasing and a considerable amount is expected to be of multicast type with Quality of Service (QoS) requirements. Optical Transport Networks (RTO) must be prepared in terms of better resource utilization, for accommodating unicast and multicast traffic together. *S/G Light-tree* allows grooming unicast and multicast traffic together in a light-tree, hence reducing bandwidth wastage. *S/G Light-tree* allows a node to optically drop part of the multiplexed traffic in a wavelength without incurring on OEO conversions. The algorithms for grooming, assignment and routing of wavelengths proposed so far, do not take into account the phenomena which may be provided in the optical fiber, which

mitigate or alter the different wavelengths in the WDM networks. Chromatic dispersion is a major limiting factor in ultrahigh-speed optical transmission and may occur in all types of optical fibers. It originates from the finite spectral width of the optical source and causes broadening of each transmitted mode. In this paper, we propose a model of allocation of wavelengths, which takes into account the residual dispersion in WDM networks that carry traffic grooming and traffic unicast/multicast with QoS requirements.

**Keywords**—Chromatic Dispersion, Traffic Grooming, Optimization, Routing, Assignment, QoS, Heuristics, NP-complete.

### I. INTRODUCCIÓN

Las Redes de Transporte Óptico (RTO) emplean Wavelength Division Multiplexing (WDM) como tecnología para transportar gran cantidad de información. WDM permite la multiplexación de diferentes longitudes de onda en la misma fibra, cada una transportando velocidades alrededor de los 10 Gbps, pudiendo alcanzar velocidades del orden de los Terabits por segundo en una sola fibra. Traffic Grooming (TG) [1] ha sido concebido para mejorar la utilización del ancho de banda de las redes de transporte. TG permite la multiplexación de tráfico de baja velocidad en una misma longitud de onda y ha sido ampliamente estudiado para el soporte de tráfico Unicast [2][3][4].

El tráfico de tipo multicast está en constante crecimiento (ejemplo HDTV, videoconferencia, IPTV, juegos interactivos, otros) [5]. Para el soporte de Multicast Traffic Grooming se ha propuesto el concepto de light-tree, donde el transporte de tráfico punto-multipunto se realiza en un medio completamente óptico (sin conversiones Óptico-Electrónico-Óptico OEO). Esta forma de transmisión es lo que se denomina transparente y es

posible hacerla empleando optical cross-connect (OXC). La arquitectura para el soporte de light-tree es propuesta en [6]. Sin embargo, cuando se multiplexa conjuntamente tráfico unicast y multicast, el light-tree consume mayor ancho de banda al enrutar sesiones unicast hacia destinos no deseados, esto para evitar las conversiones OEO, las cuales son muy costosas desde el punto de vista de transparencia en la transmisión de información (bits) [7][8].

Con el fin de optimizar la utilización de recursos (maximizar ancho de banda disponible, minimizar número de longitudes de ondas, otros) en una red de transporte óptica y hacerlo en un medio completamente óptico, Sierra et al. proponen la arquitectura Stop and Go (S/G) Light-tree [9]. S/G Light-tree permite conjuntamente, el óptimo enrutamiento de sesiones unicast y multicast. S/G Light-tree requiere de componentes adicionales a los empleados en un clásico light-tree. Los principales componentes son los Sistemas de Detección (DS) y permiten la detección, eliminación y adición de tráfico (sesiones) en un medio completamente óptico. La arquitectura S/G Light-tree adiciona algunas pérdidas de potencia debido al uso de los sistemas de detección, por lo cual es imprescindible tener en cuenta el medio físico de transmisión al aplicar algoritmos de enrutamiento y asignación de longitudes de ondas.

La dispersión cromática es un fenómeno lineal que se presenta en la fibra óptica, la cual produce un ensanchamiento en los pulsos transmitidos. El ensanchamiento producido depende en gran medida de la longitud de onda y es relevante en enlaces a grandes distancias (redes de transporte). Actualmente, la mayoría de los algoritmos de enrutamiento y asignación de longitudes de ondas propuestos, no consideran las pérdidas que se pueden presentar en la fibra óptica, el motivo principal es la complejidad de los algoritmos ya que estos son del tipo NP-Completo [5]. En este artículo se propone un modelo de asignación de longitudes de ondas que tiene en cuenta el medio físico (dispersión residual en la fibra óptica) así como clases de servicios en los diferentes tipos de tráfico que emplean la red. Al emplear las clases de servicio para la asignación se logra bajar la complejidad de los algoritmos, ya que se controla la cantidad de búsqueda sobre el número de longitudes de ondas. Desde el conocimiento de los autores, es la primera vez que se propone este modelo de asignación para redes WDM que soportan traffic grooming y la arquitectura S/G Light-tree.

A continuación se indica la organización del artículo. En la sección 2 se introducen los conceptos sobre traffic grooming en las redes ópticas WDM. En la sección 3 se describen algunos fenómenos presentes en la fibra óptica y cuales son sus implicaciones en la asignación de longitudes de onda. Luego, en la sección 4 se describe el modelo de grooming, enrutamiento y asignación propuesto que tiene en cuenta la dispersión cromática así como tipos de clases de servicio. Finalmente, se muestran resultados obtenidos con el modelo, conclusiones y trabajos futuros.

## II. WDM Y TRAFFIC GROOMING

Como se mencionó anteriormente, la tendencia mundial es hacia el incremento del tráfico de Internet y de nuevas aplicaciones del tipo multicast [5][10][11]. Aplicaciones como broadcast HDTV, movie broadcasts, live auctions y educación interactiva a distancia requieren multidifusión (multicast) de información de una fuente a muchos destinos y se están volviendo cada vez más populares. Aunque los requerimientos de ancho de banda de éstas están incrementándose, aún no llegan a alcanzar los soportados por una longitud de onda. Por lo cual al asignar una conexión de 10 Gbps a la transmisión de una sesión multicast de alrededor 20 Mbps (HDTV), se estaría haciendo una muy pobre utilización del ancho de banda disponible; por lo tanto hay que buscar una eficiente utilización del ancho de banda y un alto *throughput* de la red. Además de esto, la implementación de una longitud de onda en estos momentos es muy costosa, convirtiéndose en crítica la asignación de ellas a un enlace. De aquí nace la alternativa de agregar opciones de Traffic Grooming a la red WDM.

Traffic Grooming es la capacidad que se le da a una red WDM de combinar varios tráficos de baja velocidad (orden de los Mbps o pocos Gbps, ejemplo: OC-1, OC-3) en uno de alta velocidad (OC-192 u otro mayor). Para realizar TG es necesario que los nodos posean algunas características especiales, más aún si se requiere para tráfico del tipo multicast.

El problema de diseñar redes que eficientemente soporten TG no es trivial y la solución puede ser de gran impacto en el costo de la red. En el caso de diseñar para tráfico unicast, el problema de TG se divide en dos problemas: primero en buscar las rutas óptimas y segundo realizar el grooming [12]. Usualmente se emplea el algoritmo de *Dijkstra* para encontrar la ruta con menor costo de un par fuente destino. Autores han demostrado que TG para tráfico unicast es NP-completo. El caso cuando se tiene tráfico multicast, el cual se compone de varios tráficos unicast es por lo tanto también NP-completo. En la literatura se encuentra que hay dos formas principales de resolver el problema de traffic grooming: la primera por *Integer Linear Program*(ILP) y la segunda por métodos heurísticos. Además de esto han demostrado que resolver el problema por ILP aplica para cuando se tiene una red con pocos nodos, es decir no es escalable; es ahí donde entran los algoritmos heurísticos, los cuales dan aproximaciones a las soluciones exactas pero disminuyen en gran medida el tiempo de ejecución.

### A. Traffic Grooming

Con el fin de explicar el funcionamiento del concepto de traffic grooming, considere la topología de red mostrada en la Figura 1, en la cual se desea establecer una sesión multicast del nodo fuente *F* al conjunto de nodos destino *B, C y D*, ésta sesión se denota por  $\langle F \rangle^*/\{B, C, D\}$ . La conexión es punto-multipunto y puede ser establecida empleando light-trees, con el nodo *F* como raíz. Para que se pueda generar la sesión multicast, es necesario

que todos los nodos sean equipados con conmutadores ópticos y con derivadores (*splitters*) ópticos. Sin embargo en este caso los derivadores ópticos solo se necesitarían en el nodo *B*, para que replique la señal entrante y produzca 3 copias (para nodos *C*, *D* y una copia para si mismo). Dependiendo de las características de los nodos se puede emplear conversión de longitudes de onda o no. Hasta el momento la sesión multicast ocupa un canal o longitud de onda.

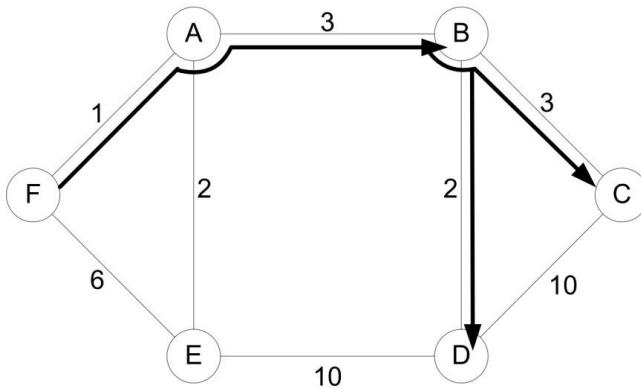


Figura 1. Topología de red con 6 nodos. Light-tree en línea azul es la sesión multicast

El costo del transporte de tráfico entre nodos adyacentes puede estar dado por la longitud de la fibra, el costo de los amplificadores/regeneradores; esto es el peso de cada enlace entre un par de nodos. Los pesos de cada enlace aparecen en la Figura 1. Para minimizar el costo de la red es necesario encontrar los mejores caminos, los cuales al sumarlos den el menor costo de red (función objetivo: minimizar costo de la red). En el ejemplo mencionado, el costo de enrutar la sesión es de 9 unidades; sin embargo el costo puede ser mayor si se selecciona la ruta *F-E*, *E-D*, *D-C* y *D-B* (costo 28 unidades). Éste problema ha sido estudiado por muchos investigadores y es llamado *minimum-cost Steiner tree* [5][13][6]. El problema de buscar un Steiner minimum tree (SMT) en un grafo es NP-completo.

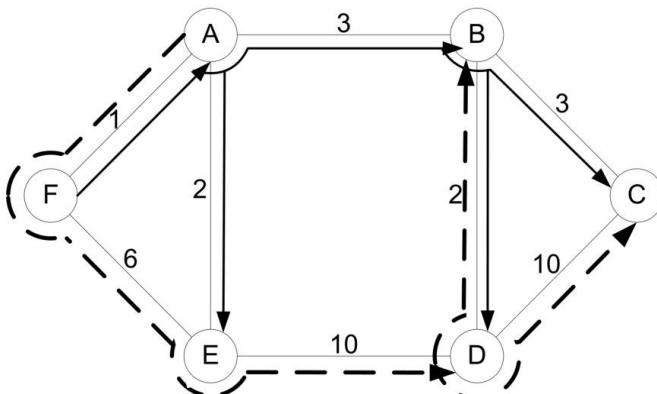


Figura 2. Topología de red con 6 nodos. Segunda configuración

En las actuales redes es importante minimizar el costo de la asignación de rutas a sesiones multicast, ya que con los incrementos del tráfico multicast sino se hace, las inversiones en equipos serían muchas. Es por esto que es necesario compartir los canales. Un ejemplo donde se aplicaría es en la difusión de HDTV. Para esto considere ahora dos sesiones multicast:  $S1 = \{F\} \rightarrow \{A, B, C, D, E\}$  y  $S2 = \{A\} \rightarrow \{B, C, D\}$  cada una con capacidad requerida igual a la mitad de un canal, para establecerlas en una red con un solo canal como se muestra en la Figura 2.

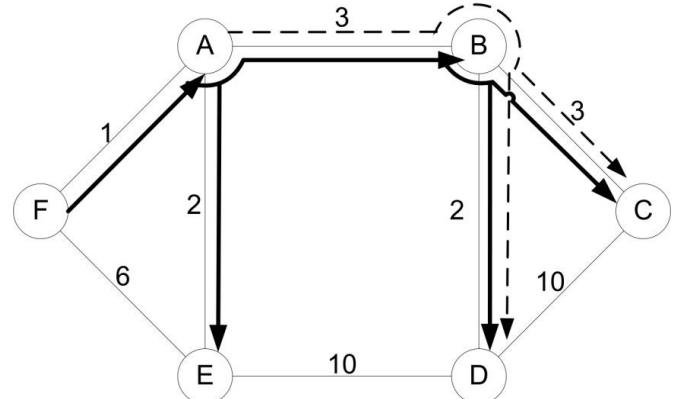


Figura 3. Topología de red con 6 nodos. Aplicando multicast traffic grooming

Sin multicast traffic grooming se tendría:  $S1$  con un costo de 11 unidades y  $S2$  de 29, para un total de 40 unidades, además del empleo de mayor cantidad de equipos transmisores. Con un algoritmo eficiente de enrutamiento y a asignación se podrían establecer las conexiones con un peso total de 11 como se muestra en la Figura 3. Se observa que los enlaces *A-B*, *B-D* y *B-C* comparten el mismo canal. En el caso de tener muchas más sesiones multicast se observarían mayores beneficios del multicast traffic grooming. Dependiendo de los algoritmos que se empleen, de las características de cada nodo y de diferentes restricciones así serán los resultados.

#### B. Arquitectura empleada S/G Light-tree

La arquitectura *Stop and Go (S/G) Light-tree* es mostrada en la Figura 4. En ella se observan principalmente: dos conmutadores ópticos (OSW1 y OSW2), multiplexadores y demultiplexadores (Mux y Demux), transmisores (Tx) y receptores (Rx), Splitter and Amplifier Bank (SAB) y el Detection System (DS). FSK demod, Contention Resolution, Bit Pattern Interpreter, Idle detection y delay lines forman parte del DS.

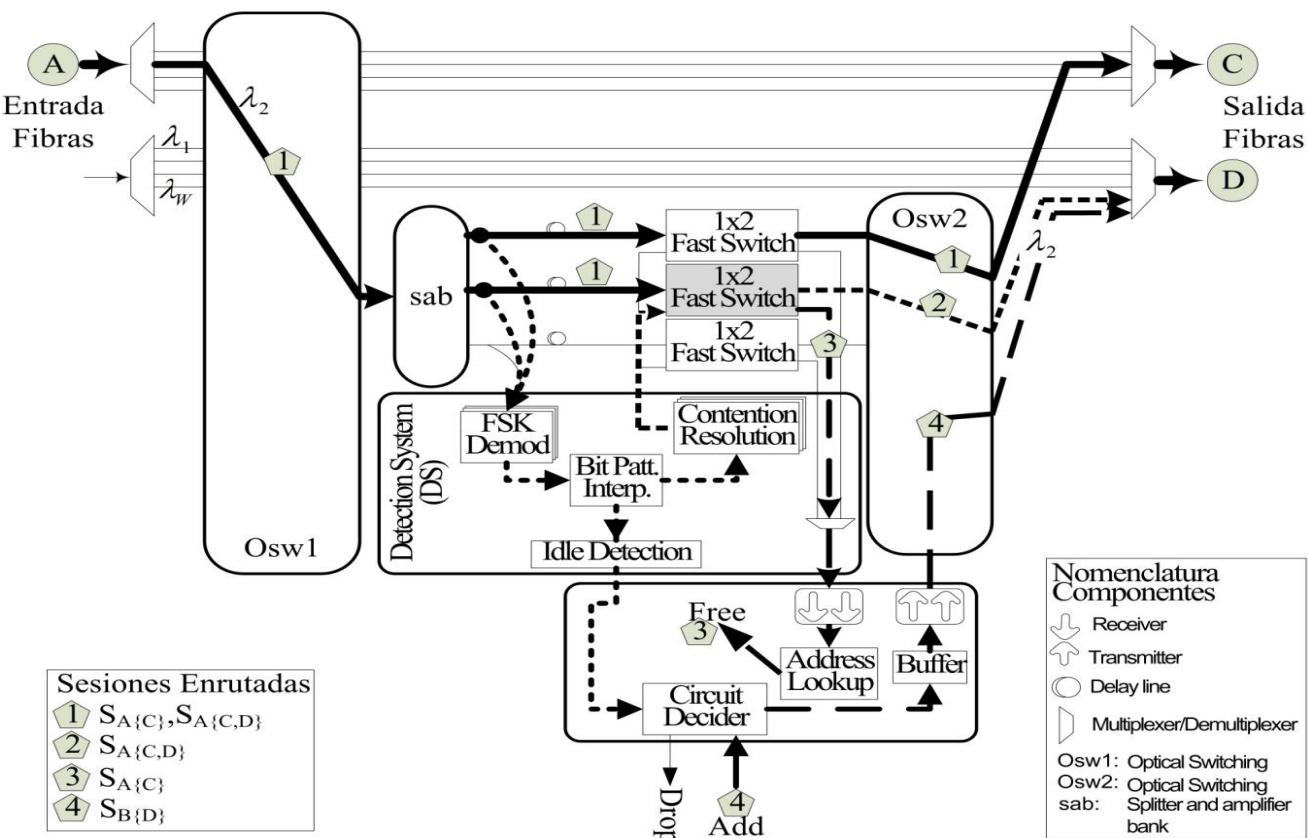


Figura 4. Arquitectura S/G Light-tree. Ejemplo Nodo B.

Tabla 1. Ejemplo, Sesiones Unicast/Multicast

Sesión	Tráfico	Fuente	Destino(s)
$S_{A\{C\}}$	Unicast	A	C
$S_{A\{C,D\}}$	Multicast	A	C,D
$S_{B\{D\}}$	Unicast	B	D

$S_{X,Y}$ , donde X representa nodo fuente y Y nodo o nodos destino

Se empleará un ejemplo para explicar su funcionamiento. Considere una topología física con 4 nodos: A, B, C y D (Figura 5), en la que el nodo B posee la arquitectura S/G Light-tree. Tres sesiones requieren ser enrutadas como se muestra en la Tabla 1. Cada sesión requiere  $\frac{1}{4}$  de la capacidad de una longitud de onda. Considere además que se poseen 2 longitudes de onda.

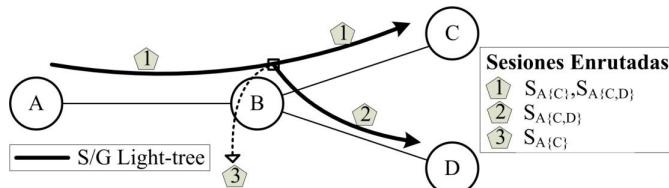


Figura 5. Ejemplo. Topología física y enrute de sesiones S1, S2 y S3 empleando S/G Light-tree

Con un algoritmo de enruteamiento eficiente, es posible enrutar las 3 sesiones como se muestra en la Figura 5. Inicialmente se tienen multiplexadas (haciendo grooming) las sesiones  $S_{A\{C\}}$  y  $S_{A\{C,D\}}$  desde el nodo A hasta el nodo B. Al pasar el tráfico por el nodo B, el cual posee la arquitectura S/G como se ha mencionado anteriormente, el tráfico es demultiplexado a sus respectivas longitudes de onda (en este caso  $\lambda_2$ ), como se muestra en la Figura 4. El OSW1 del nodo B se encarga de comutar al respectivo puerto, por ser multicast, comuta el tráfico de  $\lambda_2$  hacia el SAB que duplica el tráfico (una copia irá hacia C y otra hacia D). Luego del SAB se encuentran los DS. Los DS obtienen un poco de la potencia de la señal para leer la etiqueta de los paquetes y detectar si se debe eliminar tráfico de ese camino. En este caso, el DS detecta que en la rama (2) se debe eliminar el tráfico  $S_{A\{C\}}$  pues no debe llegar al destino D. Por el contrario el tráfico  $S_{A\{C,D\}}$  pasa de modo transparente hacia el OSW2, el cual comuta la longitud de onda a su respectivo puerto de salida (interfaz hacia nodo D). Además de esto la arquitectura permite adicionar en  $\lambda_2$  la sesión  $S_{B\{D\}}$ . Todo esto se realiza en un medio completamente óptico (no hay conversiones OEO). Mayor explicación del funcionamiento de la arquitectura está disponible en [9].

### III. DISPERSIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS Y SU IMPLICACIÓN EN REDES WDM

La mayoría de los algoritmos de grooming, enrutamiento y asignación de longitudes de onda (GRWA) trabajan con la suposición de que todas las longitudes de onda en el medio óptico poseen las mismas características de transmisión de bits, sin ningún error de bits [14][15]. Sin embargo, la fibra óptica presenta algunos fenómenos que afecta indiscutiblemente la calidad de transmisión de los light-trees. Los fenómenos que se pueden presentar en la fibra se dividen en dos:

- Lineales: Estos fenómenos son independientes de la señal y afectan cada longitud de onda independientemente, entre ellos se encuentran: amplificación espontánea, emisión espontánea (ASE), *polarization mode dispersion* (PMD), dispersión cromática.
- No lineales: Estos fenómenos generan no solo dispersión en cada canal sino también crosstalk entre canales. Algunos fenómenos de este tipo: *Four-wave mixing* (FWM), *Selfphase modulation* (SPM), *Cross-phase modulation* (XPM), *Stimulated Raman scattering*(SRS).

Algunos trabajos actuales estudian PMD, ASE, FWM aplicados a los algoritmos de enrutamiento y asignación de longitudes de onda (sin considerar grooming), teniendo en cuenta el efecto de la potencia, frecuencia, el conjunto de longitudes de onda y la longitud de la conexión [16]. El análisis propuesto en éste artículo tendrá en cuenta la dispersión cromática residual por ser pertinente en comparación con las otros fenómenos para la asignación de longitudes de onda en redes de transporte que emplean la fibra óptica; además es un criterio óptimo para la asignación de longitudes de onda, sobre todo a velocidades superiores a 10 Gbps [17].

#### C. Algunas Definiciones

A continuación se indicarán algunas definiciones y/o parámetros empleados en el artículo:

- Se definen 3 Clases de Servicio (CoS) para los diferentes tráficos o sesiones que emplearán la red de transporte. Las CoS son: prioridad Alta (*CoS\_A*), prioridad Media (*CoS\_M*) y prioridad Baja (*CoS\_B*). La CoS de cada tráfico que cursará por la red depende del tipo de protocolo o de tráfico, por ejemplo, si es un tráfico del tipo video requerirá un mejor trato en la red, por lo cual su prioridad será alta (*CoS\_A*). En el caso, por ejemplo de una sesión de datos la prioridad será baja (*CoS\_B*). Más adelante se indicará como se está haciendo esta asignación.
- Se define  $\Lambda$  como el conjunto de longitudes de onda disponibles para asignar. En donde  $\Lambda = \lambda_\alpha, \lambda_\beta, \lambda_\gamma$ .  $\lambda_\alpha$  es el subconjunto de longitudes de onda con baja dispersión,  $\lambda_\beta$  el subconjunto de longitudes de onda con media

dispersión  $\lambda_\gamma$ , el subconjunto de longitudes de onda con alta dispersión.

#### D. Modelo de Asignación de longitudes de onda teniendo en cuenta Dispersión Cromática

El modelo se basa en la Residual Dispersion (RD), la cual se define como la dispersión total en la transmisión en una fibra óptica teniendo en cuenta fibras de compensación. El modelo tiene en cuenta una sección normalizada (Figura 6) que contiene los siguientes elementos:

- *Single Mode Fiber* (SMF): fibra óptica diseñada para transportar un solo rayo de luz. Puede contener diferentes longitudes de onda. Es empleada en DWDM.
- *Dispersion Compensating Fiber* (DCF): controlan la dispersión cromática. Funciona evitando el excesivo ensanchamiento temporal de los pulsos de luz y la distorsión de la señal. Compensan la distorsión acumulada en la SMF.
- Longitud de SMF ( $L_{SMF}$ )
- Longitud de DCF ( $L_{DCF}$ )
- Amplificadores EDFA

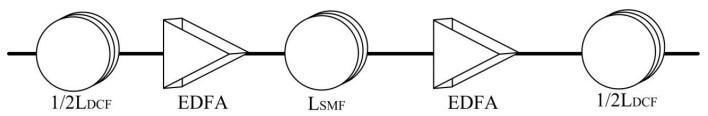


Figura 6. Sección Normalizada

Con el modelo se pretende encontrar el porcentaje de longitudes de ondas con baja ( $\lambda_\alpha$ ), media ( $\lambda_\beta$ ) y alta dispersión ( $\lambda_\gamma$ ), comparando el valor de RD con un umbral. El modelo se define a continuación:

ENTRADAS:

- $B$ : Factor de compensación (Dispersion Slope) [ps/nm<sup>2</sup>km].
- $\Lambda$ : Conjunto de longitudes de onda disponibles para asignar.  $\Lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_w$ . Donde  $w$  es el número de longitudes de onda.
- $\lambda_{ref}$ : Longitud de onda de referencia [nm]. Depende del ancho de banda de los canales. Los parámetros están disponibles en la Rec G.694.1.
- *Threshold*: Umbral de aceptación. [ps/nm]. *Threshold*= $\pm$  1000ps/nm para velocidades de 10 Gbps.

- $D_{SMF}$ : Coeficiente de dispersión en la SMF para la longitud de onda de referencia [ps/nm.Km].
- $D_{DCF}$ : Coeficiente de dispersión en la DCF para la longitud de onda de referencia [ps/nm.Km].
- $L_{SMF}$ : Longitud de SMF [km].
- $L_{DCF}$ : Longitud de DCF [km].

#### SALIDAS

$$\Delta\lambda_w = \lambda_w - \lambda_{ref} \quad (1)$$

$$\Delta D_w = \Delta\lambda_w \times B \quad (2)$$

$$D_w = D_{\lambda ref} + \Delta D_w \quad (3)$$

Las ecuaciones anteriores ayudan a obtener los parámetros de RD:

$$RD_w = D_w(DMS) \times L_{SMF} + D_w(DCF) \times L_{DCF} \quad \forall w \quad (4)$$

Como se mencionó el parámetro RD será el empleado para la asignación de las longitudes de onda. La propuesta busca que se asigne las longitudes de onda con menor RD a las sesiones con mayor prioridad (*CoS\_A*). A continuación se describe como fue el proceso para obtener el algoritmo de asignación.

Considere una red de prueba como la NSFnet (14 nodos, 21 enlaces bidireccionales), la cual tiene una longitud promedio de enlaces  $d=1299km$ . Al realizar diferentes pruebas se encontró que para un espaciamiento de 25 GHz y  $w=64$  ( $w$ : número de longitudes de ondas), los más bajos valores para RD se encuentran en aproximadamente el 15% de las primeras longitudes de onda disponibles para asignar. Para determinarlo se empleó la función de costo propuesta en [16] ( $Umbral=1000$ , otros parámetros fueron tomados de [17]):

$$d_{ij} \times RD_w \leq Umbral \quad (5)$$

Teniendo en cuenta los análisis realizados, se propone el siguiente modelo de asignación de longitudes de onda:

- Las sesiones con *CoS\_A* tendrán la más alta probabilidad de que se les asigne una longitud de onda con menor valor de RD (dentro 15% de las primeras longitudes de onda). Las sesiones con *CoS\_B* tendrán una probabilidad de acceder a una longitud de onda de la ventana intermedia de RD (del 15% al 75%) y por último, se dispondrá que las sesiones con *CoS\_C* tengan alta probabilidad de acceder a las longitudes de onda con más alto valor de RD (último 25%). En la Figura 7 se muestra la función de asignación de longitudes de onda.

---

```

function x=funcionlambda(CoS,w)
Sea x el subconjunto de longitudes de onda  $\lambda_x, \lambda_y$  o  $\lambda_z$ 
1 | if CoS = CoS_A
2 |     x=nlambdas-ceil(.25*nlambdas*rand)+1;
3 | elseif CoS = CoS_M
4 |     x=nlambdas-ceil(0.85*nlambdas*rand)+1;
5 | elseif CoS = CoS_B
6 |     x=nlambdas-ceil(nlambdas*rand)+1;
7 | End

```

---

Figura 7. Función definir longitudes de onda para determinada CoS

#### IV. MODELO DE ASIGNACIÓN PROPUESTO

##### A. Especificaciones del problema

La red WDM es modelada por un grafo dirigido conectado  $G(V,E)$  donde  $V$  es el conjunto de nodos de la red con  $N=|V|$  nodos.  $E$  es el conjunto de enlaces de la red. A cada enlace físico entre los nodos  $m$  y  $n$  se le asocia un peso  $L_{mn}$ , el cual puede representar el costo de la longitud de la fibra, el número de transceivers, el número de sistemas de detección u otro. El costo total de enrutar las sesiones unicast/multicast en la topología física esta dado por la ecuación 6:

$$Costo\ Total = \sum_k \sum_w \sum_N L_{mn} \cdot f_i \cdot \chi_{mn}^{iw} \quad (6)$$

En donde:

- $N$ : Número de nodos en la red.
- $w$ : Máximo número de longitudes de onda por fibra.
- $bw_i$ : Ancho de banda requerido por la sesión unicast/multicast  $i$ .
- $C_w$ : Capacidad de cada canal o longitud de onda. Por ejemplo,  $C_w = OC-192$  o  $OC-48$ .
- $f_i$ : Fracción de la capacidad de una longitud de onda empleada por la sesión  $i$ .  $f_i = \frac{bw_i}{C_w}$ .

- $k$ : grupo de sesiones unicast o multicast.
- $\chi_{mn}^{iw}$ : Variable booleana, la cual es igual a uno si el enlace entre los nodos  $m$  y  $n$  es ocupado por la sesión  $i$  en la longitud de onda  $w$ . Si no  $\chi_{mn}^{iw} = 0$ .

Se consideran  $k$  sesiones unicast/multicast denotadas por

$r_i(s_i, D_i, \Delta_i) | i=1,2,\dots,k$ . Cada sesión  $r_i$  esta compuesto por un nodo fuente  $s_i$ , nodo o conjunto de nodos destino  $D_i$  y un parámetro de clase de servicio asociado  $\Delta_i = \{CoS_A, CoS_M, CoS_B\}$ .  $\Delta_i$  se determinará por un modelo presentado en la siguiente subsección.

Sea  $T_i(s_i, D_i, \Delta_i, \lambda_i)$  el árbol de enrutamiento para la sesión  $r_i$  en la longitud de onda  $\lambda_i$ . Cuando  $r_i$  es del tipo multicast, el mensaje de la fuente  $s_i$  a  $D_i$  a lo largo del árbol  $T_i$  es dividido (split) en diferentes nodos para enrutar por las diferentes ramas del árbol hasta llagar a todos los nodos de  $D_i$ . La arquitectura S/G Light-tree permite este funcionamiento. Respecto al grado del nodo se supone en el artículo que es ilimitada (banco de splitter de la arquitectura S/G ilimitada). Además no se consideran las conversiones de longitudes de ondas, es decir la sesión ocupa la misma longitud de onda en todo el árbol. Las conversiones de longitudes de onda en un medio completamente óptico son costosas y aún están en fase de desarrollo.

El objetivo del algoritmo de grooming, enrutamiento y asignación es minimizar el costo del árbol teniendo en cuenta las dispersiones presentes en las longitudes de onda. Es decir, en la red se tiene un conjunto  $\Lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots = \{\lambda_\alpha, \lambda_\beta, \lambda_\gamma\}$  de longitudes de ondas de las cuales:  $\lambda_\alpha$  es el conjunto de longitudes de onda de baja dispersión,  $\lambda_\beta$  es el conjunto de longitudes de onda de media dispersión y  $\lambda_\gamma$  el conjunto de longitudes de onda de alta dispersión. Según lo obtenido  $\lambda_\alpha$  es el primer 15%,  $\lambda_\beta$  del 15 al 75% y  $\lambda_\gamma$  el último 25% de las longitudes de ondas aproximadamente. La longitud de onda que se asigne a determinada  $r_i$  dependerá de la clase de servicio  $\Delta_i$  requerida para esa sesión.

$$\text{Minimizar} \sum_{i \in k} \sum_{w \in W} \sum_{(m,n) \in N} L_{mn} \cdot f_i \cdot \chi_{mn}^{iw} \quad (7)$$

El problema de enrutamiento unicast/multicast es básicamente un *minimum Steiner Tree problem*[6], el cual es NP-hard. En el artículo se plantea una heurística para encontrar el árbol de enrutamiento teniendo en cuenta QoS (por medio de la CoS) y las dispersiones en el conjunto de longitudes de onda. Otra característica de la heurística es que trata de mantener mayor capacidad disponible en las longitudes de ondas con baja dispersión para que las sesiones  $r_i$  con  $\Delta_i = CoS_A$  tengan mayor probabilidad de poder acceder a este recurso.

### B. Modelamiento llegada y duración de sesiones

Con el fin de obtener resultados lo más cercano a la realidad, se optó por obtener un modelo de llegada de sesiones a la red de transporte óptica así como la duración de estas. Se emplearon *traces* de datos disponibles en ACM SIGCOMM [18], los cuales contienen tráfico cursado en la red de transporte con duración de 30 días entre el *Lawrence Berkeley Laboratory, California* y el resto del mundo. Los datos poseen información sobre el tiempo, duración, protocolo, bytes transmitidos y otros. Los datos fueron procesados y analizados con el fin de obtener el modelo que servirá luego para modelar correctamente la asignación y enrutamiento de sesiones en la red de transporte óptica WDM.

Teniendo en cuenta las CoS, la duración promedio de cada sesión de igual forma fue modelada. Los tiempos de duración promedio también fueron analizados y validados para ser representados por una función exponencial, obteniendo los siguientes medias:  $\mu_A = 229.8$ ,  $\mu_B = 183.06$ , y  $\mu_C = 177.06$  segundos.

### C. Heurística propuesta

Ha sido demostrado que el traffic grooming es un problema NP-Completo [19] y se han propuesto diferentes técnicas para el óptimo enrutamiento de la información. La programación lineal entera (ILP por su sigla en inglés) ha sido empleada para modelar las diferentes redes que emplean traffic grooming. Sin embargo, al ser traffic grooming un problema NP-Completo, las técnicas ILP no son escalables y por lo tanto sólo se pueden aplicar a redes pequeñas (poca cantidad de nodos, 8 aprox.). Es allí donde se pueden emplear las aproximaciones heurísticas, las cuales tratan de optimizar recursos de las redes como el número de longitudes de onda, equipos, throughput, otros; y tienen tiempos de ejecución considerables.

En este artículo se emplea una heurística on-line que se encarga del óptimo enrutamiento, asignación de longitudes de onda y del grooming, teniendo en cuenta calidad de servicio de las diferentes sesiones así como los efectos de la dispersión en las longitudes de ondas disponibles para asignar.

La heurística tiene como objetivo asignar probabilísticamente las longitudes de onda con menor dispersión a las sesiones que tengan mayor prioridad. El algoritmo se denomina *Grooming-QoS* y se muestra en la Figura 8. El algoritmo emplea la función *AsignaciónyGrooming* la cual se muestra en la Figura 9. Los parámetros de entrada del algoritmo son los siguientes:

- $N$  es el número de nodos en la red.
- $X$ : conjunto de sesiones,  $k = |X|$  es el número de sesiones.  $k = 1, 2, \dots, i$ .
- Conjunto  $\Lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots = \{\lambda_\alpha, \lambda_\beta, \lambda_\gamma\}$  de longitudes de

ondas de las cuales:  $\lambda_{\alpha}$  es el conjunto de longitudes de onda de baja dispersión,  $\lambda_{\beta}$  es el conjunto de longitudes de onda de media dispersión y  $\lambda_{\gamma}$  el conjunto de longitudes de onda de alta dispersión.  $W=|\Lambda|$  es el número de longitudes disponibles.

- $T_i(s_i, D_i, \Delta_i, \lambda_i)$  es el árbol de enrutamiento para la sesión  $r_i$  en la longitud de onda  $\lambda_i$ .
- Clase de servicio (CoS) asociado  $\Delta_i = \{Cos\_A, Cos\_M, Cos\_B\}$
- $P_{mn}$ : topología física, donde  $= = 1$  indica que hay un enlace directo de fibra óptica entre los nodos  $y$ . Si no hay enlace de fibra entre los nodos  $y$ , entonces  $=0$ .
- A cada enlace entre los nodos  $m$  y  $n$  es asociado un peso  $L_{mn}$ .
- $C$ : capacidad de cada longitud de onda. En este artículo se asume  $C=OC-48$ .
- $s_i$ : nodo fuente para la sesión  $i$ .
- $D_i$ : conjunto de nodos destino para cada sesión.  $D_i$  incluye

función Asignación y Grooming(Δ)

$\lambda_{\text{Lambda}} = \text{Determinar Conjunto de longitudes en la que se puede asignar } r_i, \text{ con } bw$ ; Ancho de banda requerido para cada sesión.

If  $\lambda_{\text{Lambda}} \in \lambda_{\alpha}$

```

    T = AsignaciónyGrooming(n, s, D, bw, lambda, T);
    If No pudo asignar
        | Bloqueo
    end

    Elseif  $\lambda_{\text{Lambda}} \in \lambda_{\beta}$ 
        T = AsignaciónyGrooming(n, s, D, bw, lambda, T);
        If No pudo asignar
            | Bloqueo
        end

    If  $\lambda_{\text{Lambda}} \in \lambda_{\gamma}$ 
        T = AsignaciónyGrooming(n, s, D, bw, lambda, T);
        If No pudo asignar
            | Bloqueo
        end
    end

```

Figura 8. Algoritmo GroomingQoS

Función AsignaciónyGrooming( $n, s, D, bw, \Lambda, \Delta$ );

```

1   t = numero de longitudes disponibles para asignar
2   While Asigno==falso && t > 0
3       T_temporal = Busqueda de árbol en conjunto de lambdas disponibles (emplea steiner
               minimun tree)
4       If hay capacidad disponibles para todo el árbol  $bw \leq cap$  disponible
5           Genera el árbol de enrutamiento en determinado lambda
6           Disminuye capacidad disponible en lambda:  $cap$  disponible -  $bw$ 
7           T = T_temporal
8           Asigno=verdadero
9       Else
10          | Asigno=falso
11      End
12      t--;

```

Figura 9. Función Asignación y Grooming

El algoritmo GroomingQoS inicialmente con la información de la sesión  $r_i$  determina la clase de servicio ( $\Delta$ ) y el conjunto de longitudes ( $\lambda \in \Delta$ ) en la que puede ser enrutada la sesión (incluyendo el grooming). Con esta información se procede a aplicar el algoritmo de enrutamiento, asignación y grooming que se muestra en la figura 10. El algoritmo de asignación y grooming se basa en el conocido *minimum steiner tree* para determinar el árbol de enrutamiento. Una vez se determina el árbol de enrutamiento (en este caso el temporal) se comprueba que la longitud de onda que se está comprobando tenga capacidad disponible para que la sesión pueda acceder a ese recurso. En caso de que haya capacidad disponible se asigna esa longitud de onda a la sesión y se incluye en  $T$ . En caso de que no sea posible asignar esa longitud de onda se prueba en la siguiente, hasta encontrar capacidad disponible o hasta que las longitudes de onda se agoten. En caso de que no sea posible asignar ninguna longitud de onda, se procede a eliminar esa sesión y se marca como tráfico bloqueado. La ventaja del algoritmo es que al emplear la CoS se disminuyen los ciclos de búsqueda cuando se busca que longitud de onda se puede asignar.

## V.RESULTADOS OBTENIDOS

Con el fin de determinar el desempeño del algoritmo propuesto se empleo el software de simulación en eventos discretos Network Simulator 2 (NS2), en donde se emuló el sistema WDM con las diferentes fuentes y parámetros de calidad de servicio. Las simulaciones son realizadas usando la red de transporte NSFnet, en la cual la topología física consiste en 14 nodos con 21 enlaces bidireccionales.

El modelo de asignación propuesto es comparado con el caso cuando se le da el mismo trato a las diferentes sesiones (sin importar su QoS). En el artículo se comparan la probabilidad de bloqueo (blocking), la capacidad disponible de cada longitud de onda y el número de banco de splitters (BS) máximo requeridos de la arquitectura S/G Light-tree para enrutar eficientemente las sesiones unicast/multicast. La sección más costosa de la arquitectura está dada por estos componentes, en [19] se encuentra un análisis detallado al respecto. El análisis se hace teniendo en cuenta los siguientes parámetros de simulación:

- Número de longitudes de ondas: 10
- Capacidad longitudes de onda: OC-12
- Ancho de banda posible:  $bw = \{OC-1, OC-3, OC-12\}$ ; generados con una distribución uniforme

$$OC - 1:OC - 3:OC - 12 = 1:1:1.$$

- Número máximo de sesiones: 10000
- Grupo de longitudes de onda con baja dispersión  $\lambda_\alpha = [1:2]$ .
- Grupo de longitudes de onda con baja dispersión  $\lambda_\beta = [3:7]$ .
- Grupo de longitudes de onda con alta dispersión  $\lambda_\gamma = [8:10]$ .
- La tasa de llegada de sesiones ( $\lambda$ ) así como la de duración ( $\mu$ ) de estas fueron modeladas como se indicó en la sección anterior. Sin embargo para determinar la probabilidad de bloqueo la duración de la sesión se dejó fija. La carga en Erlangs es definida como  $Load(Erlang) = bw \times \lambda/\mu$ .

En la Figura 10 se muestra una gráfica de carga en Erlangs vs Probabilidad de bloqueo para los tráficos con *CoS\_A*, *CoS\_M* y *CoS\_B* en los casos cuando se emplea el modelo propuesto (GroomingQoS) y sin el. Se observa que para tráficos con prioridad alta (*CoS\_A*) la probabilidad de bloqueo es mucho menor comparado con los otros tráficos (mejora alrededor de 14%). Los tráficos presentan una probabilidad de bloqueo muy parecida (62% aprox.) cuando no se tiene en cuenta la prioridad para la asignación. Sin embargo, es notorio que con el modelo propuesto, es posible que los tráficos con prioridad Alta y Media tengan una menor probabilidad de bloqueo. El tráfico con prioridad Baja en el modelo no recibe buen servicio al pasar de 70% al 75% de probabilidad de bloqueo.

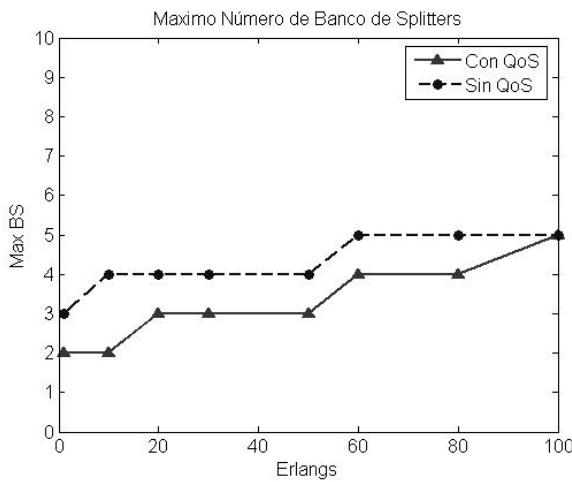


Figura 10. Probabilidad de Bloqueo

Respecto a la capacidad disponible en las longitudes de onda, se observa en la Figura 11 que con el modelo las longitudes de onda de baja dispersión, mantienen mayor capacidad disponible, mejorando en un 14%. Esto posibilita que las sesiones con requerimientos de calidad de servicio puedan acceder con mayor facilidad al recurso.

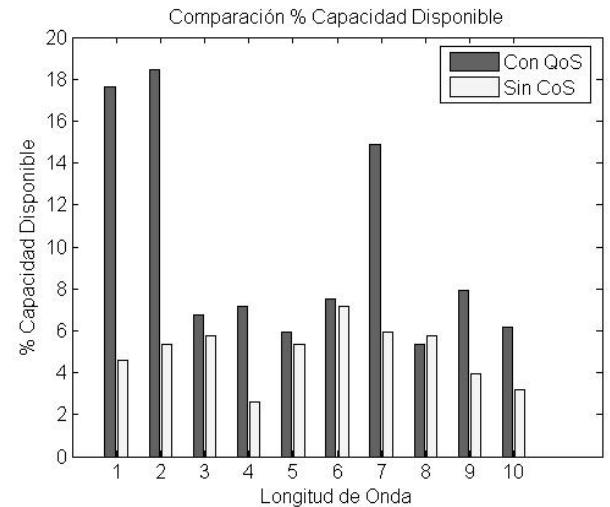


Figura 11. Porcentaje Capacidad Disponible

El número de Banco de Splitter (BS) empleando el modelo presenta una leve mejora como se observa en la Figura 12. En promedio se requiere un BS menos comparado con el caso cuando no se asigna teniendo en cuenta la calidad de servicio.

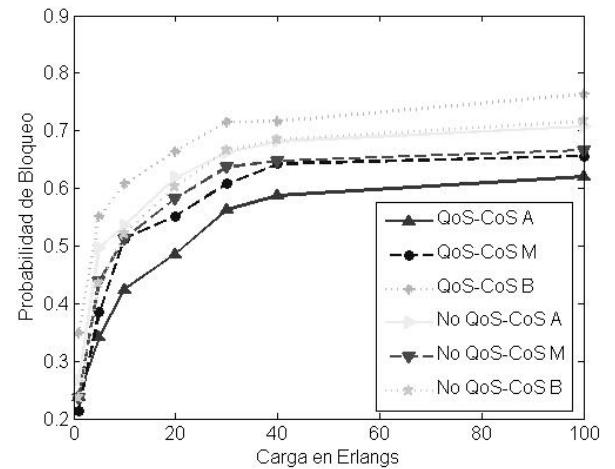


Figura 12. Máximo Número de Banco de Splitters

## VI. CONCLUSIONES

En éste artículo se propone un modelo de asignación, enrutamiento y grooming que tiene en cuenta fenómenos presentes en la fibra óptica así como parámetros de calidad de servicio en los tráficos del tipo unicast y multicast.

El modelo de enrutamiento, asignación y grooming que tiene en cuenta las dispersiones de la fibra así como parámetros de calidad de servicio (QoS) mejora notablemente la probabilidad de bloqueo para tráficos con media y alta prioridad. Además el modelo permite mantener mayor capacidad disponible en las longitudes de onda con baja dispersión, lo que permitirá que los tráficos con altos requerimientos de calidad puedan tener mayor probabilidad de acceder a buenos recursos.

El modelo de asignación mejora el uso de la arquitectura S/G Light-tree al minimizar la cantidad de banco de splitter necesarios para enrutar los diferentes tráficos unicast/multicast.

Como trabajo futuro se tiene planeado incluir en el modelo predicción de tráfico, con el fin de garantizar con mayor certeza los recursos óptimos a los tráficos que lo requieran.

## REFERENCIAS

- [1] F. Solano, L. Caro, J. de Oliveira, R. Fabregat, and J. Marzo, 2007. “G+: Enhanced traffic grooming in wdm mesh networks using lighttours,” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 25, no. 5, pp. 1034–1047.
- [2] L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, 1999. “Light trees: optical multicasting for improved performance in wavelength routed networks,” Communications Magazine, IEEE, vol. 37, no. 2, pp. 67–73.
- [3] O. Gerstel, R. Ramaswami, and G. Sasaki, 2000. “Cost-effective traffic grooming in wdm rings,” Networking, IEEE/ACM Transactions on, vol. 8, no. 5, pp. 618–630.
- [4] J.-C. Bermond, D. Coudert, X. Munoz, and I. Sau, 2006. “Traffic grooming in bidirectional wdm ring networks,” in Transparent Optical Networks, 2006 International Conference on, vol. 3, pp. 19–22.
- [5] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe, and B. Mukherjee, 2006. “Optimal multicasting of multiple light-trees of different bandwidth granularities in a wdm mesh network with sparse splitting capabilities,” Networking, IEEE/ACM Transactions on, vol. 14, no. 5, pp. 1104–1117.
- [6] A. Khalil, A. Hadjantonis, C. Assi, A. Shami, G. Ellinas, and M. Ali, 2006. “Dynamic provisioning of low-speed unicast/multicast traffic demands in mesh-based wdm optical networks,” Lightwave Technology, Journal of, vol. 24, no. 2, pp. 681–693.
- [7] J. E. Sierra, L. F. Caro, F. Solano, R. Fabregat, and Y. Donoso, 2008. “S/g light-tree: Multicast grooming architecture for improved resource allocation,” in Optical Network Design and Modeling, 2008. ONDM 2008. International Conference on, pp. 1–6.
- [8] J. E. Sierra, L. F. Caro, F. Solano, J. Marzo, R. Fabregat, and Y. Donoso, 2008. “Dynamic unicast/multicast traffic grooming using s/g light-tree in wdm networks,” in SPECTS 2008. International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems. Proceedings IEEE.
- [9] J. E. Sierra, L. F. Caro, F. Solano, J. L. Marzo, R. Fabregat, and Y. Donoso, 2008. “All-optical unicast/multicast routing in wdm networks,” in Global Telecommunications Conference, 2008. GLOBECOM ’08. Optical Networks and Systems Symposium, pp. 1–6.
- [10] A. Kamat, 2006. “Algorithms for multicast traffic grooming in wdm mesh networks,” Communications Magazine, IEEE, vol. 44, no. 11, pp. 96–105.
- [11] I. Ferrel, A. Mettler, E. Miller, and R. Libeskind-Hadas, 2006. “Virtual topologies for multicasting with multiple originators in wdm networks,” Networking, IEEE/ACM Transactions on, vol. 14, no. 1, pp. 183–190.
- [12] K. Zhu and B. Mukherjee, 2002. “Traffic grooming in an optical wdm mesh network,” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 20, no. 1, pp. 122–133.
- [13] R. Ul-Mustafa and A. Kamal, 2006. “Design and provisioning of wdm networks with multicast traffic grooming,” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 24, no. 4, pp. –53.
- [14] A. Billah, B. Wang, and A. Awwal, 2003. “Multicast traffic grooming in wdm optical mesh networks,” in Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM ’03. IEEE, vol. 5, pp. 2755–2760.
- [15] N. Bouabdallah and G. Pujolle, 2006. “A practical traffic grooming scheme in all-optical networks,” in Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference, p. 3pp.
- [16] M. Ali Ezzahdi, S. Al Zahr, M. Koubaa, N. Puech, and M. Gagnaire, 2006. “Lerp: a quality of transmission dependent heuristic for routing and wavelength assignment in hybrid wdm networks,” in Computer Communications and Networks, 2006. ICCCN 2006. Proceedings. 15th International Conference on, 2006, pp. 125–136.
- [17] N. Zulkifli, C. Okonkwo, and K. Guild, 2006. “Dispersion optimised impairment constraint based routing and wavelength assignment algorithms for all-optical networks,” in Proc. International Conference on Transparent Optical Networks, vol. 3, pp. 177–180.
- [18] ACM, “Traces in the internet traffic archive,” 2000. [Online]. Available: <http://ita.ee.lbl.gov/html/traces.html>
- [19] S. Huang, R. Dutta, and G. Rouskas, 2006. “Traffic grooming in path, star, and tree networks: complexity, bounds, and algorithms,” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 24, no. 4, pp. –82.

**Javier Sierra** (javier.sierra@upb.edu.co). Recibió su título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (año 2003) y su grado PhD en Ingeniería área Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana en el año 2009. El trabaja para el grupo de investigación GIDATI en donde dirige la línea de investigación sistemas de transmisión. El es el director de la facultad en Ingeniería Informática y Telecomunicaciones y coordina el doctorado en Ingeniería área Telecomunicaciones. Ha realizado publicaciones a nivel nacional e internacional (IEEE, ACM). Entre sus temas de interés se encuentra las redes ópticas, las redes inalámbricas, simulación y optimización de sistemas de telecomunicaciones.

**Yezid Donoso** (ydonoso@uniandes.edu.co) degree in System and Computer Engineering from the Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 1996. MSc degree in System and Computer Engineering from the Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 1998. D.E.A. in Information Technology from Girona University, University, Girona, Spain, 2002. Ph.D. in Information Technology from Girona University, Girona, Spain, 2005. Currently professor and researcher at the System and Computer Engineering department and the COMIT Communication and Information Technology research group at the Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Senior Member IEEE. DVP (Distinguished Visitor Professor) in Computer Society IEEE. He is the author of the books entitled “Multi-Objective Optimization in Computer Networks” (CRC Press, 2007) and “Network Design for IP Convergence” (CRC Press 2008).