

## **Modelo de asignación predictivo de longitudes de ondas en redes WDM teniendo en cuenta dispersión residual y tráficos unicast/multicast con QoS**

### **A predictive algorithm for wavelength allocation in WDM networks analyzing residual dispersion and unicast/multicast traffic with QoS**

*Javier Sierra*<sup>1\*</sup>, *Yezid Donoso*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingenierías Informática y Telecomunicaciones. Grupo de Investigación GIDATI, Universidad Pontificia Bolivariana. Circular 1 N° 70-01 Medellín, Colombia

<sup>2</sup>Departamento de Sistemas y Computación. Grupo de Investigación COMIT, Universidad de los Andes. Carrera 1 N° 18A-10 Bogotá, Colombia

(Recibido el 26 de noviembre de 2008. Aceptado el 9 de mayo 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 (OTN) 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 *all-OTN* que permite el óptimo enrutamiento y/o manejo de tráficos unicast/multicast empleando el concepto de *Traffic Grooming* (TG, 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 presentar en la fibra óptica, los cuales atenúan o alteran las diferentes longitudes de onda en las redes 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 este artículo, se propone un modelo predictivo de asignación de longitudes de ondas basado en cadenas de Markov que tiene en cuenta la dispersión residual en redes WDM que soportan *traffic grooming* y tráficos unicast/multicast con requerimientos de QoS. Los resultados de las simulaciones realizadas

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: +57 + 4 + 415 90 95 ext 115, correo electrónico: javier.sierra@upb.edu.co (J. Sierra)

muestran que el modelo propuesto mejora la probabilidad de bloqueo de tráficos con requerimientos de QoS.

----- *Palabras clave:* Traffic grooming, unicast, multicast, QoS, WDM, OXC, light-tree, s/g light-tree, lightpath, conmutación óptica.

### 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 (OTN) 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 predictive 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:* Traffic grooming, unicast, multicast, QoS, WDM, OXC, light-tree, s/g light-tree, lightpath, optical switching.

### Introducción

Las Redes de Transporte Óptico (OTN, por su sigla en inglés) emplean *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) como tecnología para transportar gran cantidad de información. WDM permite la multiplexación de diferentes longitudes de ondas en la misma fibra, cada una transportando velocidades alrededor de los 10 Gbps y llegando a alcanzar velocidades del orden de los Terabits por segundo en una sola fibra. Traffic Grooming (TG) ha sido concebido para mejorar la utilización del ancho de banda de las redes de transporte [1]. TG 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. TG 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 la arquitectura multiplexa conjuntamente tráfico

*unicast* y *multicast*, el *light-tree* consume mayor ancho de banda al enrutar sesiones *unicast* hacia destinos no deseados, esto lo hace 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].

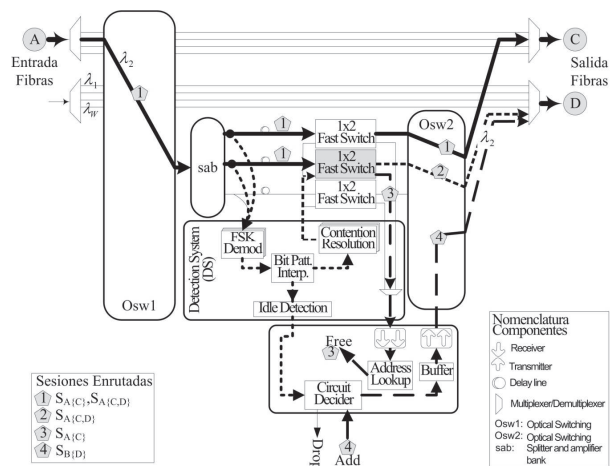
Con el fin de optimizar la utilización de recursos (maximizar ancho de banda disponible, minimizar número de longitudes de ondas, etc.) en una red de transporte óptica y hacerlo en un medio completamente óptico, Sierra et al. proponen la arquitectura *Stop and Go (S/G) Light-tree* [9]. *S/G Light-tree* permite el óptimo enrutamiento de sesiones *unicast* y *multicast* conjuntamente. *S/G Light-tree* requiere de componentes adicionales a los empleados en un clásico *light-tree*; entre ellos se encuentran los Sistemas de Detección (DS), los cuales 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. Uno de los motivos es la complejidad de los algoritmos ya que estos son del tipo NP-Completo [5]. En este artículo se propone un modelo predictivo basado en cadenas de Markov 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 el espacio de búsqueda sobre el número de longitudes de ondas.

En este artículo se detalla la arquitectura empleada, se describen algunos fenómenos que se producen en la fibra óptica y sus implicaciones en la asignación de longitudes de onda, se describe el modelo predictivo de enrutamiento, asignación y *grooming* propuesto que tiene en cuenta la dispersión cromática así como tipos de clases de servicio. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos con el modelo, las conclusiones y los trabajos futuros.

### Arquitectura empleada S/G Light-tree

La arquitectura *Stop and Go (S/G) Light-tree* se muestra en la figura 1. 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.



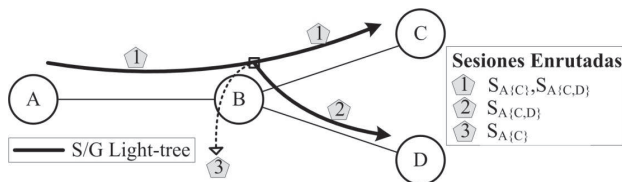
**Figura 1** Arquitectura S/G Light-tree. Ejemplo Nodo B de la figura 2

Se empleará un ejemplo para explicar su funcionamiento. Considere una topología física con 4 nodos: A, B, C y D (Figura 2), 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. Con un algoritmo

de enrutamiento eficiente, es posible enrutar las 3 sesiones como se muestran en la figura 2. 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 *Light-tree* 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 1. El *Osw1* del nodo  $B$  se encarga de conmutar al respectivo puerto, por ser *multicast*, conmuta 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 segunda duplicación 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 conmuta la longitud de onda a su respectivo puerto de salida (interfaz hacia nodo  $D$ ). Además de esto la arquitectura permite adicionar en la sesión  $S_{B\{D\}}$ . Todo esto se realiza en un medio completamente óptico (no hay conversiones OEO). Una explicación del funcionamiento de la arquitectura está disponible en [9].

**Tabla 1** Ejemplo, sesiones *unicast/multicast*.  $S_{X\{Y\}}$ , donde  $X$  representa nodo fuente y  $\{Y\}$  nodo o nodos destino

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



**Figura 2** Ejemplo. Topología física y enrutamiento de sesiones  $S_{A\{C\}}$ ,  $S_{A\{C,D\}}$  y  $S_{B\{D\}}$  empleando S/G *Light-tree*

### 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* [10, 11]. Sin embargo, la fibra óptica presenta algunos fenómenos que afectan 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), *Self-phase 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 [12]. El análisis propuesto en este artículo tendrá en cuenta la dispersión cromática residual por ser pertinente en comparación con los 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 [13].

### Definición de parámetros

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: 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  $\Lambda = \lambda_\alpha \cup \lambda_\beta \cup \lambda_\gamma$ .  $\lambda_\alpha$  es el subconjunto de longitudes de onda con baja dispersión,  $\lambda_\beta$  el subconjunto de longitudes de onda con media dispersión y  $\lambda_\gamma$  el subconjunto de longitudes de onda con alta dispersión.

### Modelo de asignación de longitudes de onda

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 [12]. El modelo tiene en cuenta una sección normalizada (Figura 3) 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

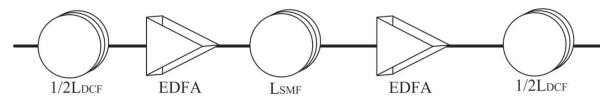


Figura 3 Sección normalizada

Con el modelo se pretende encontrar el porcentaje de longitudes de onda 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.  $\Lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_w$ . 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.
- *Threshold*: Umbral de aceptación. [ps/nm]. *Threshold* =  $\pm 1.000$  ps/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

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

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

$$D_w = D_{\lambda_{ref}} + \Delta D_w \quad \forall w \quad (3)$$

Las ecuaciones 1, 2 y 3 ayudan a obtener los parámetros de RD dados en la ecuación 4:

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



Como se mencionó el parámetro RD será el empleado para la asignación de las longitudes de onda. La propuesta busca que se asignen 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  $d=1.299$  km. Al realizar diferentes pruebas se encontró que para un espaciado 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 (como se muestra en la ecuación 5) se empleó la función de costo propuesta en [12] ( $Umbral=1.000$ ). Otros parámetros fueron tomados de [13]:

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

Teniendo en cuenta los análisis realizados se concluye que el primer 15% de las longitudes de onda poseen menor dispersión residual, el siguiente 60% mediana dispersión, mientras que el 25% restante posee alta dispersión. Estos parámetros serán empleados para la asignación.

## Modelo de Grooming

### Especificaciones del problema

La red WDM se modela mediante 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 está dado por la ecuación 6:

$$Costo\ Total = \sum_{i \in k} \sum_{w \in W} \sum_{(m,n) \in N} L_{mn} \cdot f_i \cdot \chi_{mn}^{iw} \quad (6)$$

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  $i$ .  $f_i = bw_i / C_w$ .
- $k$ : 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  $w$ . Sino  $\chi_{mn}^{iw} = 0$ .
- Se consideran  $k$  sesiones unicast/multicast denotadas por  $\{r_i(S_i, D_i, \Delta_i) \mid i = 1, 2, \dots, k\}$ . Cada sesión  $r_i$  está 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 el 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 llegar a todos los nodos de  $D_i$ . La arquitectura S/G *Light-tree* permite este funcionamiento. Respecto al grado del nodo se supone en este artículo que es ilimitada (banco de *splitter* de la arquitectura 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. Según lo obtenido en la sección 3:  $\lambda_a$  es el primer 15%,  $\lambda_b$  del 15 al 75% y  $\lambda_\gamma$  el último 25% de las longitudes de on-

das aproximadamente. La longitud de onda que se asigne a determinada  $r_i$  dependerá de la clase de servicio  $\Delta_i$  requerida para esa sesión. El objetivo principal está dado por la ecuación 7:

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

El problema de enrutamiento *unicast/multicast* es básicamente un *minimum Steiner Tree problem* [6], el cual es NP-hard. En este artículo se plantea una heurística predictiva 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  $\Delta_i = \text{Cos\_A}$  tengan mayor probabilidad de poder acceder a este recurso.

### Predicción usando cadenas de Markov

Las cadenas de Markov son una herramienta para analizar el comportamiento de algunos procesos estocásticos, los cuales evolucionan de forma no determinística a lo largo del tiempo en torno a un conjunto de estados. El uso de las cadenas de Markov para la predicción en diferentes sistemas ya ha sido comprobada y validada por su eficiencia en diferentes sistemas de telecomunicaciones [14, 15, 16]. En éste artículo se emplea para predecir cuál será la posible CoS que llegará con la próxima sesión (en un  $t+\Delta t$ ). La predicción ayudará a evitar que la capacidad disponible de las longitudes de onda con menor dispersión se agote rápidamente, manteniéndola disponible para sesiones o tráficos con mayor CoS.

En el modelo los estados se definen como la clase de servicio (CoS) de una determinada sesión. El modelo aplica para  $n$  tipos de CoS como muestra la figura 4. Para el caso estudiado en éste artículo, donde se definen 3 CoS se obtuvieron las probabilidades  $P_{xy}$  (en donde  $x,y$  son estados que definen la CoS) de transición teniendo en cuenta el *traces* de datos disponibles en ACM SIGCOMM [17]. A partir de estos datos se obtuvo la siguiente matrix de transición:

$$P_{xy} = \begin{bmatrix} 0,1009 & 0,3082 & 0,5910 \\ 0,1007 & 0,3089 & 0,5905 \\ 0,1009 & 0,3083 & 0,5908 \end{bmatrix}$$

La cadena de Markov con las probabilidades de transición será empleada para determinar cuál es el tipo de paquete (CoS) que llegará en la siguiente solicitud (sesión).

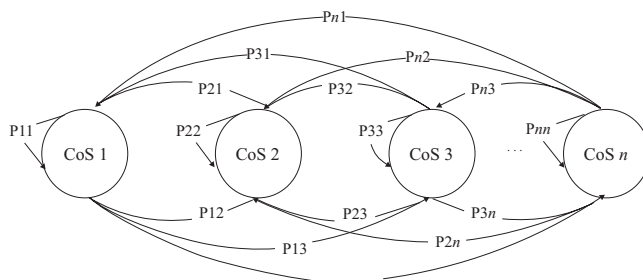


Figura 4 Diagrama cadenas de Markov para n CoS

### Heurística propuesta

En este artículo se propone una heurística *on-line* que se encarga del óptimo enrutamiento, asignación de longitudes de onda y del *grooming*, teniendo en cuenta la 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 o CoS. El algoritmo se denomina *PredictionTG-QoS* y se muestra en la figura 5. El algoritmo emplea la función *AsignaciónyGrooming* la cual se muestra en la figura 6. 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 longi-

tudes 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  $P_{mn} = P_{mm} = 1$  indica que hay un enlace directo de fibra óptica entre los nodos  $m$  y  $n$ . Si no hay enlace de fibra entre los nodos  $m$  y  $n$ , entonces  $P_{mn} = 0$ .
- 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 los nodos que reciben tráfico unicast y multicast.
- $bw_i$ : ancho de banda requerido para cada sesión.

**Función Prediction TG-QoS ( $n,s,D, bw, \Lambda$ )**

```

1  Lambda = Deteminar conjunto de longitudes en la que se puede
   asignar ( $\Lambda, \Delta$ ) teniendo en cuenta cadena de Markov
2  If Lambda  $\in \lambda_i$ 
3      T = AsignaciónyGrooming( $n,s,D, bw, lambda, T$ );
4      IfNo pudo asignar
5          Bloqueo
6      end
7  El seif Lambda  $\in \lambda_{ij}$ 
8      T = AsignaciónyGrooming( $n,s,D, bw, lambda, T$ );
9      IfNo pudo asignar
10         Bloqueo
11     end
12
13
14  If Lambda  $\in \lambda_i$ 
15      T = AsignaciónyGrooming( $n,s,D, bw, lambda, T$ );
16      If No pudo asignar
17         Bloqueo
18     end
19  end
    
```

**Figura 5** Algoritmo predictionTG-QoS

El algoritmo *PredictionTG-QoS* 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*) teniendo en cuenta la predicción realizada con la cadena de Markov. Con esta información se procede a aplicar el algoritmo de enrutamiento, asignación y *grooming* que se muestra en la figura 6. 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.

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

```

t = numero de longitudes disponibles para asignar
While Asigno ==falso && t > 0
4     Ttemporal = Busqueda de árbol en conjunto de lambdas disponibles(emplea
   steiner minimum tree)
5     If hay capacidad disponible para todo el árbol bw ≤ cap disponible
6         Genera el árbol de enrutamiento en determinado lambda
7         Disminuye capacidad disponible en lambda cap disponible - bw
8         T = Ttemporal
9         Asigno=verdadero
10    Else
11    Asigno=falso
12    End
13    t--;
14 End
    
```

**Figura 6** Función Asignación y *Grooming*

## Resultados obtenidos

Las simulaciones son realizadas usando la red de transporte NSFnet, en la cual la topología física consiste en 14 nodos con 21 enlaces bidireccionales. 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 éstas. Se emplearon *traces* de datos disponibles en ACM SIGCOMM



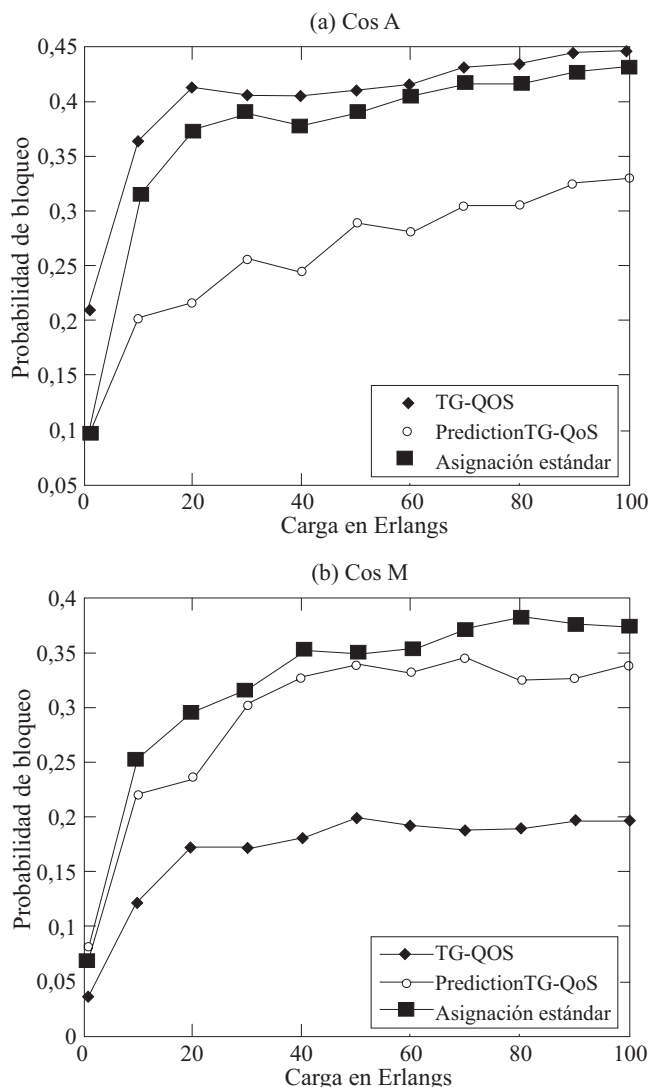
[17], los cuales contienen tráfico cursado en la red de transporte con duración de 30 días entre el *Lawrence Berkeley Laboratory* (California) y el resto del mundo. Los datos poseen información sobre el tiempo, duración, protocolo, *bytes* transmitidos, etc.

El modelo de asignación propuesto (*PredictionTG-QoS*) se compara con el caso cuando se le da el mismo trato a las diferentes sesiones (sin importar su QoS), llamado en este caso *Asignación Estándar* y cuando no se tiene en cuenta la QoS (*TG-QoS*). En el artículo se comparan la probabilidad de bloqueo (*blocking*) y la capacidad de ancho de banda disponible promedio de cada longitud de onda. El análisis se hace teniendo en cuenta los siguientes parámetros de simulación:

- Número de longitudes de ondas: 10
- Capacidad longitudes de onda: OC-48
- Ancho de banda posible:  $bw = \{OC-1, OC-3, OC-12, OC-48\}$ ; generados con una distribución uniforme OC-1 : OC-3 : OC-12 : OC-48 = 1:1:1:1
- Número máximo de sesiones: 10.000
- Grupo de longitudes de onda con baja dispersión  $\lambda_\alpha = [1:2]$ .
- Grupo de longitudes de onda con media dispersión  $\lambda_\beta = [3:7]$ .
- Grupo de longitudes de onda con alta dispersión  $\lambda_\gamma = [8:10]$ .
- La rata de llegada de sesiones ( $\lambda$ ) así como la de duración ( $\mu$ ) de estas fueron modeladas como  $\mu = 1$  y  $\lambda$  para variar la carga en *Erlangs*. La carga en *Erlangs* se define como  $Load(Erlang) = bw \times \lambda / \mu$ .

En la figura 7a se observa la probabilidad de bloqueo de enlace para las sesiones con CoS\_A. La heurística propuesta mejora en un 16% aprox. a la heurística TG-QoS y en un 11% aprox. cuando se realiza asignación estándar para diferente cargas de tráfico. Como se observa la asignación teniendo en cuenta sólo la QoS no mejora a la asignación estándar; sin embargo, todos los trá-

ficos son tratados de la misma forma llevando a que las sesiones con CoS\_A no se enruten por un medio con menor dispersión.



**Figura 7** Probabilidad de bloqueo para a) CoS\_A y b) CoS\_M

Cuando se tienen sesiones con CoS\_M (Figura 7b) se presenta un mejor comportamiento cuando se emplea TG-QoS. Sin embargo PredictionTG-QoS mejora a la asignación estándar. El motivo por el cual TG-QoS presenta un mejor comportamiento se debe a que el 60% de longitudes de onda disponibles son para asignar sólo al conjunto de tráficos con CoS\_M. Además la heurística

*PredictionTG-QoS* lo que busca es mejorar la QoS principalmente a las sesiones con CoS\_A dando posibilidad a cualquier tipo de tráfico que acceda a una longitud de onda con menor dispersión cromática. Es de notar que la probabilidad de bloqueo para CoS\_M se mantiene en el orden del 32% al igual que para las sesiones con CoS\_A.

Como se esperaba, el tráfico con CoS\_B es penalizado tanto por TG-QoS como por *PredictionTG-QoS* (Figura 8a). Es importante observar que *PredictionTG-QoS* sin embargo mantiene la probabilidad de bloqueo en más o menos el 40% para este tipo de tráfico, muy cerca de la obtenida para el tráfico CoS\_A y CoS\_M.

Respecto a la capacidad de ancho de banda disponible en cada longitud de onda (Figura 8b), la heurística *PredictionTG-QoS* en promedio mantiene mayor capacidad disponible cuando se compara con los otros dos algoritmos de asignación. Además, cumple con su principal objetivo: mantener las longitudes de onda con menor dispersión disponibles para tráficos con CoS\_A. Las longitudes de onda 3 a 7 son las que se mantienen con menor capacidad disponible debido a que el tráfico que más llega al sistema es de CoS\_M.

### Conclusiones

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

El modelo de asignación propuesto mejora notablemente la probabilidad de bloqueo para tráficos de alta prioridad, manteniéndola en un rango similar a los otros tipos de tráfico. 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.

Como trabajo futuro se pretende analizar e incluir fenómenos no lineales de la fibra al mode-

lo propuesto. Uno de los principales fenómenos que afecta a los sistemas DWDM en redes de transporte es FWM (*Four-Wave Mixing*) y debe ser tenido en cuenta para la asignación de longitudes de onda, más aún en sistemas que manejan tráfico *unicast* y *multicast* conjuntamente. Adicionalmente, se resolverá un modelo matemático que tenga en cuenta fenómenos físicos de la fibra.

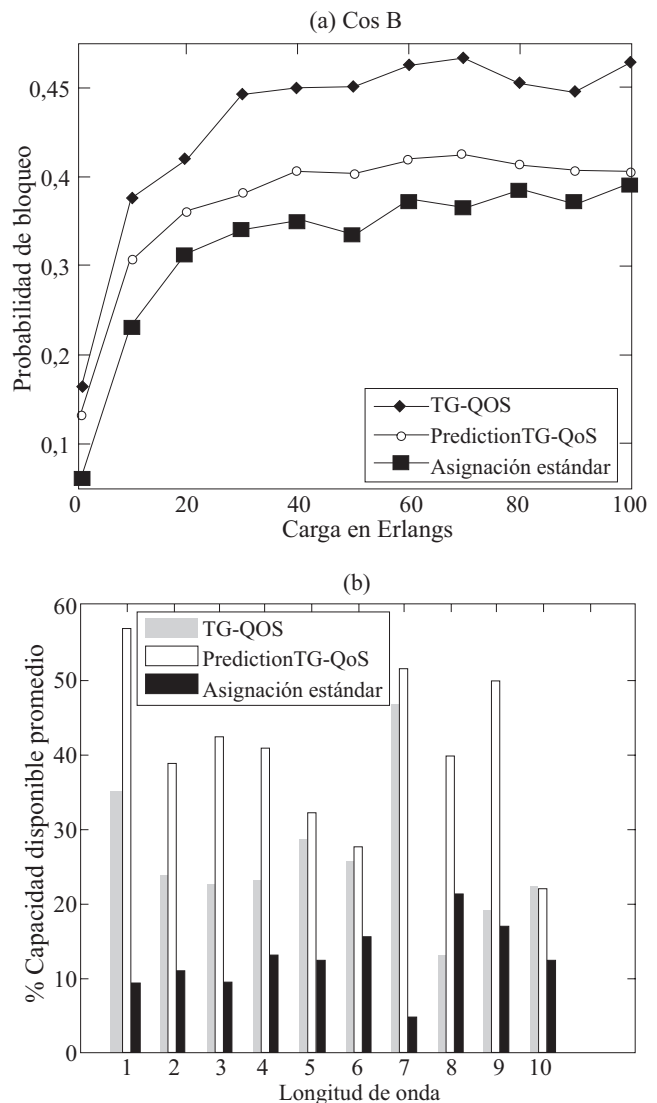


Figura 8 a) Probabilidad de bloqueo para CoS\_B y b) Capacidad disponible promedio para cada longitud de onda

## Referencias

1. F. Solano, L. Caro, J. de Oliveira, R. Fabregat, J. Marzo. "G+: Enhanced traffic grooming in wdm mesh networks using lighttrees". *IEEE Journal Selected Areas in Communications*. Vol. 25. 2007. pp. 1034-1047.
2. L. Sahasrabudde, B. Mukherjee. "Light trees: optical multicasting for improved performance in wavelength routed networks". *IEEE Communications Magazine*. Vol. 37. 1999. pp. 67-73.
3. O. Gerstel, R. Ramaswami, G. Sasaki. "Cost-effective traffic grooming in wdm rings". *IEEE/ACM Transactions Networking*. Vol. 8. 2000. pp. 618-630.
4. J. C. Bermond, D. Coudert, X. Munoz, I. Sau. "Traffic grooming in bidirectional wdm ring networks". *2006 International Conference Transparent Optical Networks*. Vol. 3. 2006. pp. 19-22.
5. N. Singhal, L. Sahasrabudde, B. Mukherjee. "Optimal multicasting of multiple light-trees of different bandwidth granularities in a wdm mesh network with sparse splitting capabilities". *IEEE/ACM Transactions Networking*. Vol. 14. 2006. pp. 1104-1117.
6. A. Khalil, A. Hadjiantonis, C. Assi, A. Shami, G. Ellinas, M. Ali. "Dynamic provisioning of low-speed unicast/multicast traffic demands in mesh-based wdm optical networks". *Journal Lightwave Technology*. Vol. 24. 2006. pp. 681-693.
7. J. E. Sierra, L. F. Caro, F. Solano, R. Fabregat, Y. Donoso. "S/g light-tree: Multicast grooming architecture for improved resource allocation". *International Conference Optical Network Design and Modeling, 2008. ONDM 2008*. 2008. pp. 1-6.
8. J. E. Sierra, L. F. Caro, F. Solano, J. Marzo, R. Fabregat, Y. Donoso. "Dynamic unicast/multicast traffic grooming using s/g light-tree in wdm networks". *SPECTS 2008. Proceedings IEEE. International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*. 2008. pp. 263-268.
9. J. E. Sierra, L. F. Caro, F. Solano, J. L. Marzo, R. Fabregat, Y. Donoso. "All-optical unicast/multicast routing in wdm networks." *Global Telecommunications Conference, 2008. GLOBECOM '08. Optical Networks and Systems Symposium*. 2008. pp. 1-6.
10. A. Billah, B. Wang, A. Awwal. "Multicast traffic grooming in wdm optical mesh networks". *Global Telecommunications Conference. IEEE GLOBECOM '03*. Vol. 5. 2003. pp. 2755-2760.
11. N. Bouabdallah, G. Pujolle. "A practical traffic grooming scheme in all-optical networks". *Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference*. 2006 pp. 1-3.
12. M. Ali Ezzahdi, S. Al Zahr, M. Koubaa, N. Puech, M. Gagnaire. "Lerp: a quality of transmission dependent heuristic for routing and wavelength assignment in hybrid wdm networks". *Computer Communications and Networks, 2006. ICCCN 2006. Proceedings. 15th International Conference*. 2006. pp. 125-136.
13. N. Zulkifli, C. Okonkwo, K. Guild. "Dispersion optimised impairment constraint based routing and wavelength assignment algorithms for all-optical networks". *Proc. International Conference on Transparent Optical Networks*. Vol. 3. 2006. pp. 177-180.
14. J. F. Hayes, T. V. J. G. Babu. *Modeling and Analysis of Telecommunications Networks*. John Wiley & Sons. Inc. New Jersey. 2004. pp. 52-60.
15. J. C. Chen, P. W. Dowd. *Performance analysis of WDM networks with wavelength conversion Proc. Fourth International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems MASCOTS '96*. 1996. pp. 145-150.
16. J. S. Vardakas, V. G. Vassilakis, M. D. Logothetis. "Loss models in traffic-groomed WDM all-optical networks". *Proc. 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing CNSDSP 2008*. 2008. 217-221.
17. ACM. "Traces in the internet traffic archive". 2000. <http://ita.ee.lbl.gov/html/traces.html>. Consultada el 20 de Noviembre de 2008.