

Visión general sobre redes ópticas

Ana María Cárdenas Soto*, Salvador Sales Maicas**

(Recibido el 19 de diciembre de 2001)

Resumen

El propósito de este artículo es proveer una visión general de las redes ópticas, haciendo especial énfasis en las redes DWDM (multiplexación por división de longitud de onda densa) completamente ópticas por sus características de capacidad, transparencia, escalabilidad y modularidad. El presente artículo se desarrollará de la siguiente manera: en primer lugar se mostrarán las ventajas de las redes ópticas para transmisión de información, luego se tratarán algunos aspectos referentes a los servicios, las arquitecturas y topologías de las redes ópticas y finalmente se mostrarán algunas líneas de desarrollo en estas redes.

----- *Palabras clave:* Redes completamente ópticas, multiplexación por división de longitud de onda, encaminamiento y asignación de longitudes de onda, conmutación de circuitos, conmutación de paquetes, topologías, arquitecturas, MPλS.

Overview on optical networks

Abstract

This paper is intended to provide a general vision about optical networks, with special emphasis in all optical DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) networks for their capacity, transparency, scalability and modularity. This paper will be developed as follows: At the beginning some advantages of the optical networks to information transport will be exposed. After it some aspects referred the services, architectures and topologies of optical networks will be reviewed. Finally some development lines in this networks will be presented.

----- *Key words:* Completely optical networks, multiplexation by wave length division, directing and wave lengths assignation, network commutation, packet commutation, topology, architecture, MPλS.

* Estudiante Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia.

** Profesor Titular. Universidad Politécnica de Valencia.

Introducción

El mercado de las telecomunicaciones es un mercado fundamentalmente dinámico, caracterizado por su constante crecimiento y evolución, en el que las necesidades de los usuarios o fuerzas del mercado definen sus tendencias, más que las normas de regulación. El crecimiento en el número de usuarios de Internet, el uso cada vez más masivo de cuentas de correo, tanto personales como corporativas, el nacimiento constante de sitios web, la llegada del e-commerce, e-business, todo tipo de transacciones electrónicas y el advenimiento de nuevos tipos de tráfico tales como video, sonido y telefonía sobre IP, han planteado una necesidad sentida: sistemas de transmisión de altísima velocidad para interconectar países, ciudades, compañías e incluso, en un futuro muy cercano, viviendas. La figura 1 muestra el incremento de tráfico por cada nodo en Internet en millones de bits al mes. Datos suministrados en [28] establecen que desde 1969 a 1982 el tráfico de Internet se duplicó cada veintiún meses. Entre 1983 y 1997, con la transición a TCP/IP, el tráfico se duplicó cada nueve meses. En 1998 la tasa se incrementó para duplicarse cada seis meses. En [29] el dato dice que el tráfico de Internet se duplica cada 100 días.

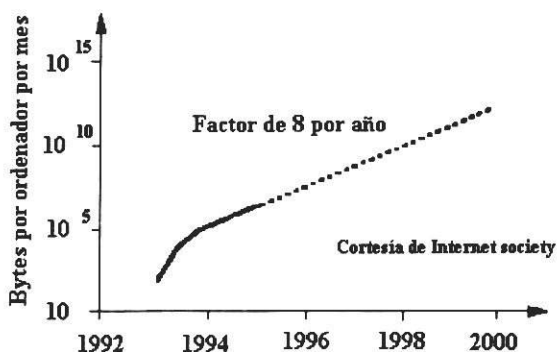


Figura 1 Demanda de ancho de banda en Internet [27]

La fibra óptica ha sido el medio de mayor capacidad de transmisión de los existentes con velocidades que comercialmente en la actualidad alcanzan los 10 Gbps, mediante multiplexores eléctricos por división de tiempo ETDM (conocidos también como TDM), sobre una única longitud de onda, pero incluso esta velocidad que hasta hace unos años podía considerarse como astronómica, hoy se ha quedado corta para los requerimientos de la interconexión que está exigiendo sistemas de transmisión de información a mayor velocidad, a mayores distancias, con buena confiabilidad y sin aumentar excesivamente costos. Las redes ópticas, aquellas en las que el medio de transmisión dominante es la fibra óptica, constituyen una de las alternativas para brindar soluciones para transmisión de alta capacidad, ofrecer dispositivos rápidos de conmutación y también convertirse en una solución de último kilómetro (*local loop*) hasta el cliente final. En su forma básica punto a punto ilustrada en la figura 2a, dichas redes están conformadas, además de la fibra óptica, por un transmisor y un receptor. Adicionales a estos elementos básicos, hay una serie de componentes ópticos con funciones específicas que posibilitan la conformación de redes ópticas más complejas, como es el caso de una red DWDM que se muestra en la figura 2b, cuyo objetivo principal es incrementar su capacidad, su confiabilidad y cobertura. Entre ellos se pueden mencionar amplificadores, filtros y acopladores ópticos, multiplexores y demultiplexores ópticos, conmutadores y encaminadores ópticos [1]-[5].

Ventajas que se ofrecen por las redes ópticas

Las redes ópticas se constituyen en una de las alternativas más importantes para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda, pero además proporcionan transparencia a protocolos, alta confiabilidad de conexión y operación y mantenimiento simple [6-8]. Estos aspectos se tratarán a continuación:

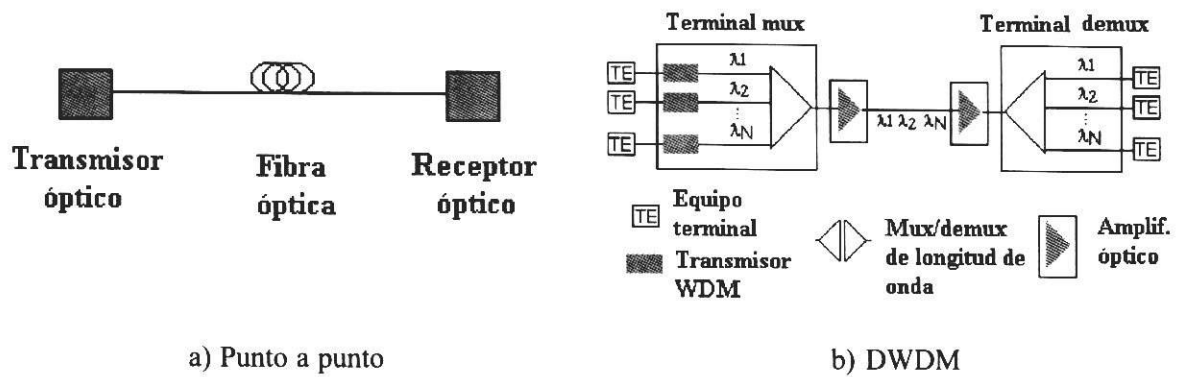


Figura 2 Sistemas ópticos de transmisión

En lo que se refiere al *ancho de banda*, los progresos en la tecnología DWDM y el procesamiento de señales en el dominio óptico, han mejorado dramáticamente las capacidades de la red, así como el rango y calidad de servicios que se entregan a los clientes. Baste mencionar que en una sola de las fibras ópticas que conforman un cable, el potencial de ancho de banda en la región de 1,5 μm , es de cerca de 25.000 GHz, cerca de 1.000 veces el espectro total de RF disponible. Otra característica inherente a las redes ópticas, específicamente las de segunda generación, es el *grado de transparencia*, es decir, la flexibilidad de transportar información extremo a extremo independiente de la tasa de datos y del formato en que se transmite, dado que no es más que una conexión de fibra entre puntos extremos a alta velocidad sin realizarse un procesamiento particular. La característica de *confiabilidad* puede ser vista bajo dos aspectos: una baja tasa de bit de error y una alta disponibilidad. Las redes ópticas pueden mantener *bajas tasas de bit de error* con sólo hacer un manejo adecuado de los presupuestos de potencia de la red, esto es posible debido a la amplia disponibilidad de ancho de banda en las redes ópticas, en las que se puede conseguir mejor desempeño obviando la codificación (compresión) de la fuente, y la necesidad de codificar el canal usando formatos de modulación sofisticados; éstos normalmente conllevan grandes restricciones de alcance en longitud, como es el caso de las redes de cobre DSL. Bajo el punto de vista

de *alta disponibilidad*, se puede decir que las redes ópticas son muy simples estructuralmente, no hacen uso de memoria o dispositivos lógicos en el enlace, y en general utilizan muchas componentes pasivas, de alta confiabilidad. Finalmente, con el avance en el procesamiento de señales en el dominio óptico, se espera una *simplificación de los sistemas de administración de la red* debido al decrecimiento del número de entidades por controlar.

Tipos de redes ópticas

Las redes ópticas se pueden clasificar de manera general en dos tipos: *redes opacas* y *completamente ópticas* [6]. En las redes opacas el procesamiento de los datos se hace en el dominio eléctrico en tanto que en las redes completamente ópticas dicho procesamiento se realiza en el dominio óptico.

Redes ópticas opacas

Las redes ópticas opacas son la primera generación de redes ópticas [8], las cuales realizan una sustitución del medio físico para transmisión de información, es decir, cambiando los cables de cobre por cables de fibra óptica mediante conexiones punto a punto. Dicha sustitución obedece a que las fibras ópticas ofrecen más ancho de banda y son menos susceptibles a varias clases de interferencias electromagnéticas. Sin embargo, en esta primera generación de redes

ópticas, el procesamiento y conmutación de los bits se hace de manera electrónica, lo cual implica que en los nodos que conforman la red, se deba realizar una conversión óptica-electrónica-óptica. Como consecuencia de esta conversión, la red pierde transparencia a la tasa de bits y aun a la sintaxis del patrón de bits. Como ejemplo se tienen las redes SONET (synchronous optical network) y las redes SDH (synchronous digital hierarchy), ampliamente instaladas por operadores de telecomunicaciones, y las redes HFC (híbrido fibra coaxial) empleadas por los operadores de televisión por cable.

El incremento de la capacidad de ancho de banda sobre las redes ópticas opacas existentes, en especial cuando resulta ser costoso tender nuevas fibras, se puede lograr mediante dos alternativas [8]: La primera alternativa es *incrementar la tasa de bit de transmisión*, mediante multiplexores eléctricos por división de tiempo (ETDM) más rápidos. En sistemas ETDM, las señales que conforman subcanales de datos de baja velocidad son multiplexadas por una señal de más alta velocidad en el dominio del tiempo obtenida mediante circuitos electrónicos. Esta señal se convierte en señal óptica mediante un modulador óptico. Hoy la tasa de transmisión ofrecida comercialmente está en los 10 Gbps, equivalente a un OC-192/STM-64 en redes SONET/SDH, y en prueba está la de 40 Gbps.

Sin embargo, cada vez es más difícil aumentar la velocidad de los circuitos electrónicos. Para lograr velocidades más altas, se están desarrollando dispositivos para multiplexación y demultiplexación de división de tiempo en el dominio óptico (OTDM). En OTDM, pulsos ópticos con ancho de unos pocos pico-segundos y alta tasa de repetición se generan mediante láseres tipo modo-cerrojo (mode-locked), luego estos pulsos se multiplexan por una señal óptica de más alta velocidad. Un esquema de este tipo de multiplexación se muestra en la figura 3. En la actualidad se ofrecen sistemas que entregan 160 Gbps, como resultado de combinar 4 flujos de 40 Gbps. Experimentos de laboratorio han demostrado la multiplexación/demultiplexación OTDM alcanzando tasas de transmisión de 1,28 Tbps (reportado en ECOC 2000, European Conference on Optical Communication 2000), como resultado de combinar 128 flujos de 10 Gbps cada uno. Sin embargo, sostener tan altas tasas de bits sobre la fibra a largas distancias es difícil [8], debido a las distintas dispersiones que presenta la fibra que causan ensanchamiento del pulso, en especial la del modo de polarización, PMD.

Una segunda alternativa para incrementar la capacidad de la red es mediante la *multiplexación por división de longitud de onda, DWDM*. La multiplexación por división en longitud de onda densa (DWDM), o simplemente

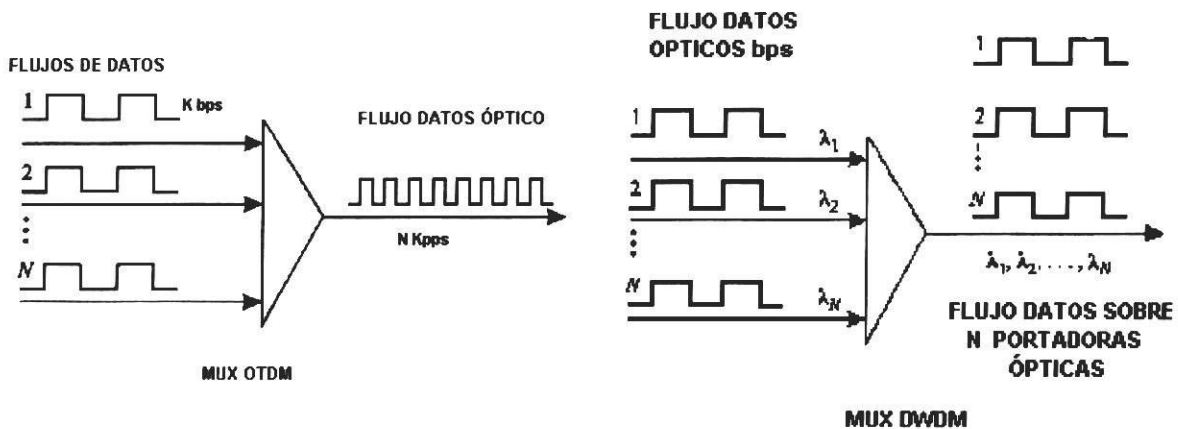


Figura 3 Multiplexación OTDM y DWDM

multiplexación en longitud de onda (WDM), consiste en la transmisión de dos o más flujos de información simultáneos sobre una misma fibra a través del uso de varias longitudes de onda, tal como se ilustra en la figura 3. Las longitudes de onda se colocan lo suficientemente separadas unas de otras con el fin de que no interfieran entre sí. Comercialmente se están implementando sistemas de 32 portadoras ópticas transportando tasas de 10 Gbps, entregando así una capacidad de 320 Gbps. La tendencia actual es a combinar ambas tecnologías: DWDM para proveer la manera de incrementar la capacidad mediante el uso de múltiples canales sobre diferentes longitudes de onda, y OTDM para incrementar la tasa de bits sobre cada canal [8]. Utilizando ambas técnicas se han obtenido capacidades de transmisión de más de 10 Tbps sobre una única fibra (reportada en OFC, Fiber Optics Conference, 2001), al multiplexar canales de 40 Gbps cada uno, sobre 273 portadoras ópticas.

Redes completamente ópticas

En las redes ópticas de primera generación, la electrónica del nodo no sólo debe procesar la información que le concierne sino procesar todos los datos que deben pasar a través del nodo hacia el resto de nodos de la red. Dado que las tasas de datos se han hecho cada vez más altas, la electrónica requerida para procesar y conmutar los datos hacia otros nodos, por tanto, se ha vuelto más compleja y difícil. Si los datos que no deben ser procesados por el nodo pudieran encaminarse en el dominio óptico, la electrónica del nodo se reduciría significativamente. Este es el objetivo de la *segunda generación de redes ópticas*, en la cual se incorporan algunas funciones de conmutación y encaminamiento de manera óptica. Tales redes son llamadas *All Optical Networks (AON) o redes completamente ópticas*. Los desarrollos actuales tanto en redes OTDM como DWDM, se están haciendo bajo este paradigma. Más detalles de este tipo de redes se abordará en lo sucesivo de este artículo, y se remite a [9-11].

Servicios ofrecidos por las redes completamente ópticas

Hay tres servicios potenciales que las redes completamente ópticas podrían ofrecer a las capas más altas de la red, según se analiza en [9].

El servicio de enlace de luz o lightpath

Un *enlace de luz* es una conexión entre dos nodos en la red, y se establece mediante la asignación de una longitud de onda dedicada sobre cada camino de fibra que conforma el enlace entre los nodos. La capacidad completa del ancho de banda proporcionado por la longitud de onda se pone disponible para las capas más altas, así como la posibilidad de que el enlace de luz pueda establecerse o quitarse bajo demanda de dichas capas. Este es un servicio similar al de *conmutación de circuitos* provisto en la red telefónica y aplicado en redes DWDM. También pueden proveerse enlaces de luz permanentes, los cuales se establecen en el momento de la implementación de la red.

Servicios de circuito virtual

Mediante este servicio se ofrece una conexión de conmutación de circuitos entre dos nodos, pero el ancho de banda ofrecido sobre la conexión puede ser más pequeño que el ancho de banda disponible sobre el enlace o la longitud de onda. Por ejemplo un usuario puede requerir transmitir sólo a 1 Mbps, sobre un enlace cuya capacidad total es de 10 Gbps. Esto implica que la red debe incorporar alguna clase de TDM para combinar múltiples circuitos virtuales sobre una longitud de onda de una red DWDM o sobre la tasa de transmisión de bit en el caso de enlaces OTDM. La forma de multiplexar puede ser fija o estadística. La multiplexación fija proporciona una cantidad garantizada de ancho de banda a cada circuito virtual. El ancho de banda de todos los circuitos virtuales debe equiparar el ancho de banda del enlace. La multiplexación estadística intenta usar el ancho de banda de manera más

eficiente, dado que algunos circuitos virtuales pueden estar vacíos en un instante de tiempo. Con esto se posibilita atender un número mayor de circuitos virtuales. La multiplexación estadística se implementa mediante el fraccionamiento de datos de cada circuito en paquetes más pequeños, y la multiplexación y conmutación de paquetes provenientes de diferentes circuitos virtuales sobre un enlace. Estas dos técnicas de multiplexación se ilustran en la figura 4. La red provee servicios sobre la base del mejor esfuerzo. Este servicio es similar a lo que se conoce como *conmutación de paquetes*.

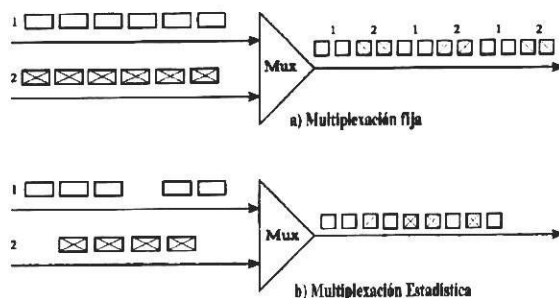


Figura 4 Técnicas de multiplexación fija y estadística

Servicio de datagrama

Permite que paquetes cortos o mensajes de información sean transmitidos entre nodos de la red, sin información de control de establecimiento de conexiones explícitas. El protocolo IP, por ejemplo, es un protocolo que provee solamente servicios datagrama. La segunda generación de redes ópticas ha comenzado por ofrecer el servicio de enlace de luz de circuito conmutado debido a que en el estado de arte actual, la tecnología permite proveerlo de manera competitiva. En cuanto a los servicios de conmutación de paquetes y datagrama, en la práctica ciertas funciones, como el procesamiento del encabezamiento, el control de la conmutación y el almacenamiento de datos que debe realizar el nodo para la conmutación de los paquetes, aún se siguen haciendo en el dominio electrónico.

Para hacer posible la prestación de los servicios de conmutación de paquetes y datagrama en el dominio óptico, está en desarrollo la extensión a redes completamente ópticas del concepto MPLS (multiprotocolo label switching) en lo que se constituye como MPλS (multiprotocolo lambda switching), lo cual posibilita la conmutación de paquetes de forma más rápida [6, 12, 13]. Bajo el *protocolo MPLS*, aplicado a las redes IP, los paquetes de datos son identificados mediante una marca, la cual se utiliza para conmutar los paquetes dentro de la red. El uso de marcas hace que no sea necesario que se procese todo el paquete completo en los nodos intermedios, por lo que los paquetes experimentan menos retardo. En el caso de MPλS, son las longitudes de onda las que actúan como marcas y se utilizan para encaminar los paquetes a través de la red óptica. Una señal entrante se dirige al puerto de salida apropiado basado en la longitud de onda de la señal.

En cuanto al desarrollo de dispositivos para la prestación de los servicios de conmutación de paquetes y datagrama [13], es necesario desarrollar *conmutadores* con tiempos de conmutación de nanosegundos para manejo de paquetes de multigigabits por segundo. También está muy avanzado el desarrollo de *convertidores de longitud de onda* requeridos para la implementación de MPIS y para resolver situaciones de contención de paquetes. Igualmente se están desarrollando *buffers ópticos*. Existen investigaciones en sus comienzos de RAM ópticas, pero mientras son una realidad, deberá emplearse líneas de retardo ópticas como solución disponible a la contención de paquetes.

Arquitecturas de redes DWDM —completamente ópticas

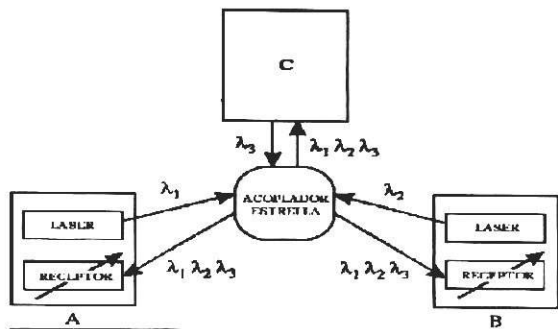
Para el caso específico de redes DWDM completamente ópticas, su arquitectura de red puede clasificarse en dos amplias categorías: difusión y selección (comúnmente conocidas como broadcast and select, B&S) y encaminamiento de longitud de onda (Wavelength Routing, WR)

[9-14], ilustradas en la figura 5. Esta última arquitectura, por lo menos en lo que se prevé para redes de transporte, será la que un futuro prevalecerá [15].

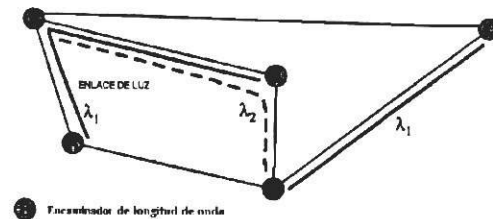
Arquitectura difusión y selección B&S

En la arquitectura B&S [9-11, 14], cada nodo de la red transmite en una longitud de onda diferente. Las señales provenientes de los nodos son difundidas entre todos los nodos mediante un dispositivo ubicado en medio de la red, llamado acoplador de estrella óptica. El acoplador combina las señales de todos los nodos y entrega una fracción de potencia a cada puerto de salida. En principio, dependiendo del grado de flexibilidad, se podrá disponer de sintonía de longitud de onda en los transmisores, en los receptores o en ambos al mismo tiempo. En las aplicaciones comerciales, lo usual es encontrar los transmisores fijados en una longitud de onda y el empleo de filtros sintonizables para que el receptor seleccione la longitud de onda deseada. En este caso en particular, a través de un protocolo de acceso al medio apropiado, un nodo fuente podrá comunicarse con un nodo destino, mediante la sintonía del receptor de destino a la longitud de onda a la cual transmite el nodo fuente. Esta es una forma de red simple, pasiva y fácil de operar y mantener, usada en redes de área local (LAN) y área

metropolitana (MAN). Sin embargo, esta arquitectura presenta dos inconvenientes, que hacen que la red pierda las características de modularidad y escalabilidad ante su progresivo crecimiento. En primer lugar el número de nodos que pueden conectarse es limitado debido a que las longitudes de onda no pueden ser reutilizadas en la red (puede haber cuando más una transmisión simultánea sobre una longitud de onda determinada), lo cual significa que podrán conectarse tantos nodos como longitudes disponibles se tengan en la fibra, y aunque el potencial de ancho de banda de la fibra es muy grande, existen limitaciones en cuanto a la interferencia entre canales ópticos dentro de la fibra y en cuanto al filtrado de las distintas longitudes de onda, cuya tecnología actual está aún en desarrollo y no se alcanzan a contar en total con más de una centena de longitudes de onda disponibles en el sistema. Un segundo inconveniente se refiere a la utilización óptima de la potencia transmitida, ya que la potencia de un nodo se dividirá entre todos los nodos receptores de la red, así sea uno solo el destinatario final. Entre más grande se vaya haciendo la red, una fracción más pequeña de potencia alcanzará a los nodos de recepción. Hay que tener en cuenta otros inconvenientes que se presentan conforme la red se vuelve más grande. Es el caso del protocolo para acceso al medio, que se vuelve más complejo dado que surgen problemas de sincronización, retardos de tiem-



a) Difusión y selección



b) Encaminamiento por longitud de onda

Figura 5 Arquitectura de redes DWDM completamente ópticas

po, sobre-señalización de control y complejidad del procesamiento. De otro lado, la supervivencia de la red en caso de falla se vuelve crítica debido a que no hay caminos alternos. Más aún, hay puntos de la red que se vuelven críticos como el acoplador de estrella que, de fallar, afecta la red entera. A pesar de estos inconvenientes, tomando en cuenta algunas de las ventajas de esta arquitectura para interconexión de un número limitado de nodos, se conforman subredes B&S como bloques básicos de redes más grandes.

Redes con encaminamiento de longitud de onda

Una manera de proveer la escalabilidad a las redes ópticas, sin crecer el número de longitudes de onda, que en principio aún presenta limitaciones tecnológicas, es la de poder reutilizar las longitudes de onda en muchos lugares de la red al mismo tiempo. En la arquitectura encaminamiento de longitud de onda, explicada en [9-11, 16-18], como su nombre lo indica, los nodos de la red tienen la capacidad de encaminar diferentes longitudes de onda de un puerto de entrada a diferentes puertos de salida, posibilitando así establecer enlaces de luz simultáneos empleando la misma longitud de onda en la red, esto es, la capacidad de reutilizarlas espacialmente. Esta arquitectura también hace

mejor uso de la potencia transmitida a lo largo del enlace de conexión establecido, ya que cada nodo canaliza la energía hacia el receptor destino, en lugar de esparcirla por toda la red. En cada nodo intermedio existente entre los nodos extremos, la luz que entra a un puerto en una longitud de onda dada, sale encaminada hacia un solo puerto, acción que es realizada mediante una componente completamente óptica denominada encaminador de longitud de onda, sobre la cual se basa la topología de estas redes. Esta componente puede ser fija o dinámica, y puede poseer o no la capacidad de hacer conversión o cambio de longitud de onda. Los encaminadores fijos o estáticos poseen un patrón de encaminamiento estático, es decir, la asignación de longitudes de onda entrada/salida no puede reconfigurarse en el tiempo. Pueden ser construidos mediante el empleo de multiplexores y demultiplexores ópticos, tal como se observa en la figura 6a. En el caso de los encaminadores dinámicos dicha asignación puede cambiar en el tiempo, mediante la adición de un conmutador óptico, según se ilustra en la figura 6b. Los encaminadores estáticos proporcionan una flexibilidad insuficiente para el cambio inevitable en el patrón de tráfico. En cuanto a los encaminadores con capacidad de conversión de longitud de onda, se puede decir que de momento son difíciles de construir y parece

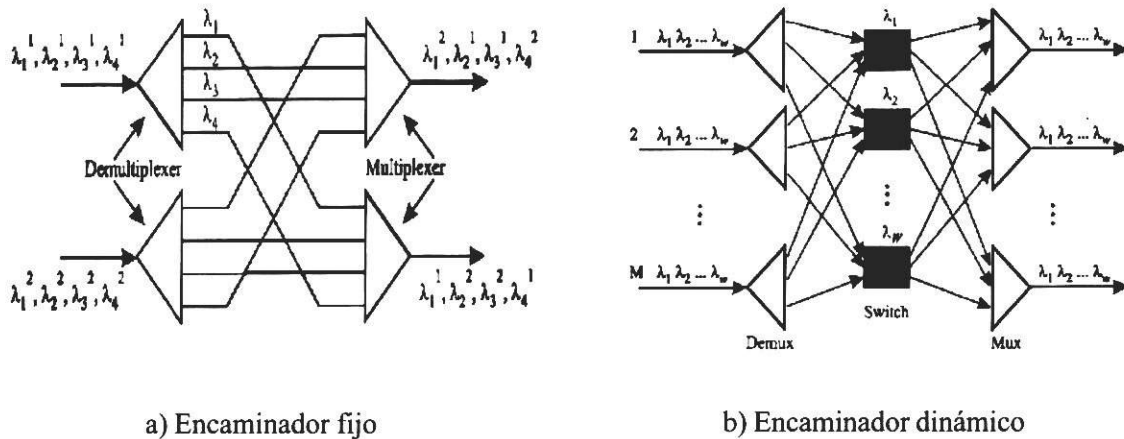


Figura 6 Tipos de encaminadores para redes con encaminamiento de longitud de onda

ser que cuando sean de uso comercial su costo será alto. Por estas razones el énfasis normal se hace sobre encaminadores dinámicos sin conversión de longitud de onda. Con este tipo de encaminador, dado que no se cuenta con la posibilidad de cambiar una longitud de onda por otra, se debe establecer la misma longitud de onda en cada camino del enlace, lo que se conoce como restricción de continuidad de longitud de onda. Con el fin de establecer la conexión del enlace de luz entre usuarios terminales, se necesita coordinar como establecer todos los caminos a lo largo del enlace, lo cual puede realizarse mediante un controlador centralizado o mediante la acción coordinada de controladores distribuidos, localizados en cada encaminador. En este último caso se dedica una longitud de onda para el intercambio de información de control y gestión entre los controladores.

distinguir entre dos tipos de topologías, la física y la virtual o lógica. La primera de ellas hace referencia a la manera como están conectados físicamente los nodos entre sí mediante enlaces de fibra, en tanto que la segunda hace referencia a la forma como las capas de la red más alta ven dicha topología, donde el camino óptico o *enlace de luz* es la conexión entre dos nodos. La figura 7 ilustra este concepto. Ambas topologías son interdependientes. Mientras el objetivo del diseño de la topología virtual es establecer los enlaces ajustados a las necesidades de las capas más altas, el objetivo del diseño de la capa física es el uso de la infraestructura de la manera más cercana posible al óptimo, lo que en general se plantea como un problema de *asignación de caminos y de longitudes de onda* para satisfacer los requerimientos de conexión que conforman la topología virtual.

Topologías de red

Las características topológicas en la red de fibra, estudiadas en [9-11, 14, 18,19], desempeñan un papel fundamental en aspectos clave del desempeño de la red, tales como calidad de la señal, eficiencia espectral, conectividad, máxima transferencia de datos y supervivencia. Hay que

Topologías para redes broadcast and select

Las dos topologías más comunes de redes B&S son estrella y bus (*single-folded bus*, como se conoce en la literatura), mostrados en las figuras 8a y 8b. Ambas topologías utilizan acopladores ópticos. Un acoplador es un término que se

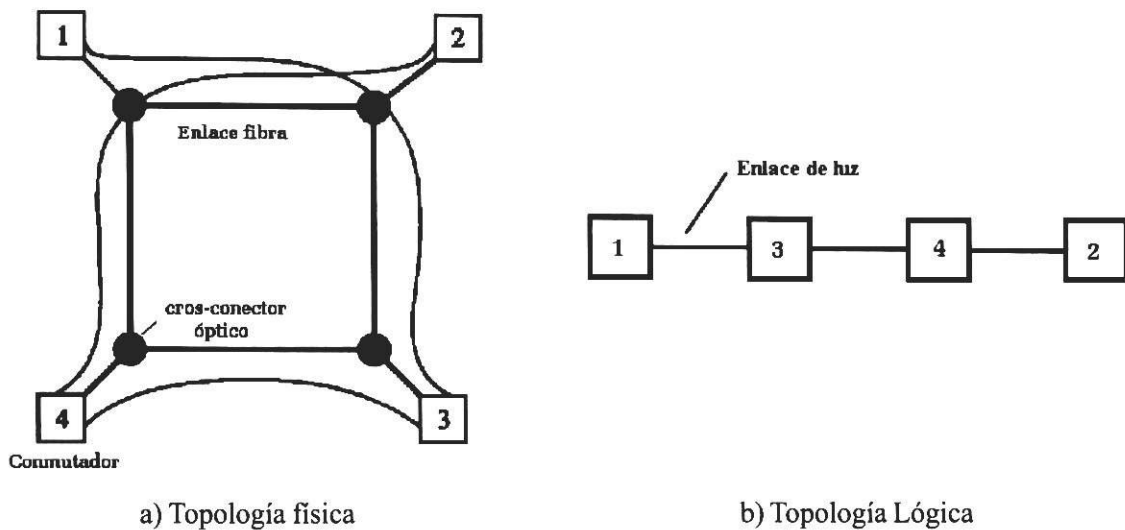


Figura 7 Topologías física y lógica de una red óptica

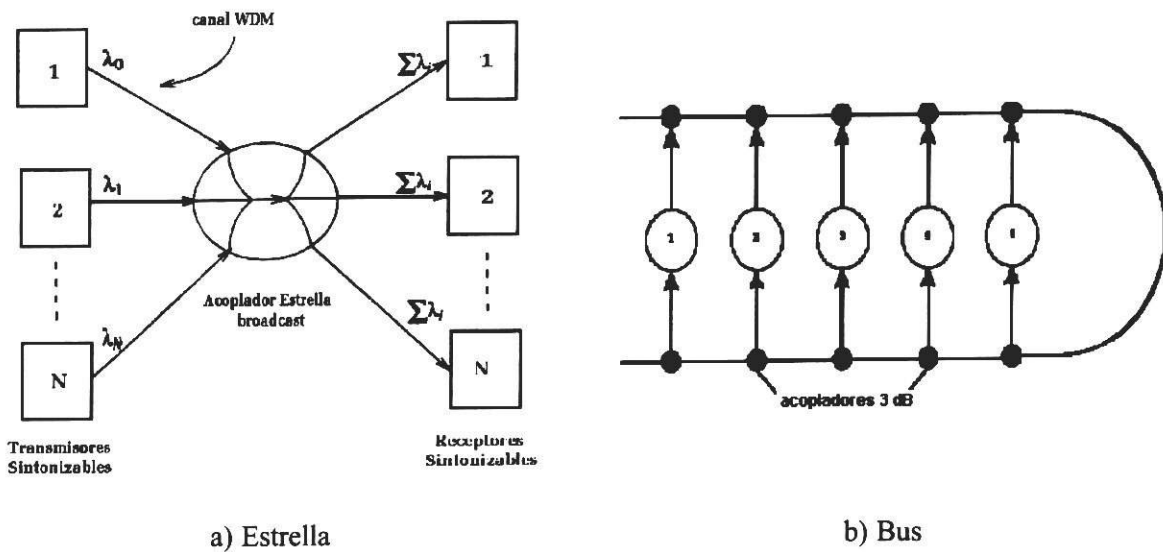


Figura 8 Topologías Broadcast and select

utiliza para abarcar todos los dispositivos que combinan las señales ópticas que provienen de sus múltiples puertos de entrada y los divisores que dividen una señal óptica de entrada en cantidades iguales entre sus puertos de salida. En la topología bus el nodo envía información a través de un acoplador y recibe la información proveniente de los nodos a través de otro acoplador. Ambas topologías difieren en el número de acopladores utilizados. Es importante notar que la señal pasa a través de un promedio de n acopladores en el caso de la topología bus ($2n - 1$ en el peor caso), mientras que pasa sólo a través de $\log_2 n$ acopladores en la topología estrella. Este factor tiene un papel significativo en la determinación del presupuesto de pérdidas de potencia en la red y, en consecuencia, en su desempeño y costos.

Topologías de redes con encaminamiento de longitud de onda

Para propósitos de diseño de topologías físicas y evaluación de desempeño, en general se trabaja con redes que tengan alta simetría, es decir, que sean regulares. Dentro de las topologías regula-

res se pueden mencionar las estructuras shuffleNet, Kautz, De Bruijn, Hypercube y Torus. Si bien estas topologías reflejan arquitecturas de redes ópticas de computadores, no reflejan la realidad de la industria de las telecomunicaciones, la cual no implementa arquitecturas regulares masivas por razones prácticas: las redes necesariamente reflejan las irregularidades de la geografía, la falta de uniformidad del agrupamiento de los usuarios y del tráfico, la jerarquía de servicios y el crecimiento dinámico de su área de cubrimiento. Adicionalmente, las tecnologías multilongitud de onda se espera evolucionen incorporando las redes de fibra existentes en su mayoría poco simétricas.

En este orden de ideas, dentro de las topologías más comunes de una red de *encaminamiento de longitud de onda*, se encuentran las topologías *malla arbitraria*, *anillo* y *árbol*, que se muestran en la figura 9. La topología *malla arbitraria* consta de nodos que utilizan crosconectores de longitud de onda interconectados mediante enlaces de fibra. La red provee enlaces de luz entre pares de nodos. Un enlace de luz se establece ubicando una longitud de onda sobre cada enlace en el camino entre dos nodos.

No puede asignarse la misma longitud de onda a dos enlaces de luz. Esta topología es muy empleada en redes WAN. La topología *anillo* provee dos caminos separados entre cualquier par de nodos, dichos caminos no tienen ningún nodo o enlace en común excepto los nodos fuente y destino. Esta característica le permite ser tolerante a fallas. Hay diversos tipos de topologías anillo que difieren en dos aspectos: la direccionalidad del tráfico y el mecanismo de protección utilizado. Esta topología es muy apropiada en entornos LAN y MAN. En la topología básica en *árbol*, cada lado o rama consta de dos enlaces opuestos de fibra direccionados, es decir, con un sentido específico de propagación, dado que en el estado de arte actual los amplificadores ópticos actúan en un solo sentido. La potencia de la señal óptica se divide mediante acopladores, con el objetivo de que una fracción alcance el destino final.

Algunas combinaciones de mallas y anillos se han considerado e implementado, por ejemplo; la conexión en malla de varios anillos o la conexión en anillo de varios anillos.

Igualmente, se han estudiado en la literatura las topologías de redes multidimensionales [10, 18]. Debido a la estructura multidimensional, estas redes tienen un alto grado de conectividad. Sin embargo, este tipo de topologías no tiene real-

mente una implementación práctica, por lo menos en redes WAN y MAN.

El problema de encaminamiento y asignación de longitudes de onda para redes con encaminamiento por longitud de onda

El problema RWA (Routing and Wavelength Assignment) o de *asignación de caminos y de longitudes de onda* sobre cada camino, estudiado en [12, 16-19], tiene como objetivo minimizar la cantidad de recursos de red y asegurar que dos enlaces de luz no compartan la misma longitud de onda sobre la misma fibra. El tratamiento del problema RWA, se hace en dos partes: se resuelve el problema de establecer los caminos y por separado se resuelve el problema de asignar las longitudes de onda. Para resolver el problema RWA, considerando la optimización de ciertos recursos de la red, se han desarrollado diversos algoritmos, muchos de ellos complejos bajo el punto de vista computacional, por lo que es común que se basen en la heurística.

Bajo el punto de vista del tráfico, este problema se encara de dos maneras: RWA estático y RWA dinámico. En el primer caso, dado que el tráfico es relativamente estático y predeterminado, el conjunto de conexiones se conoce por adelantado, de manera que se establecen los enlaces de

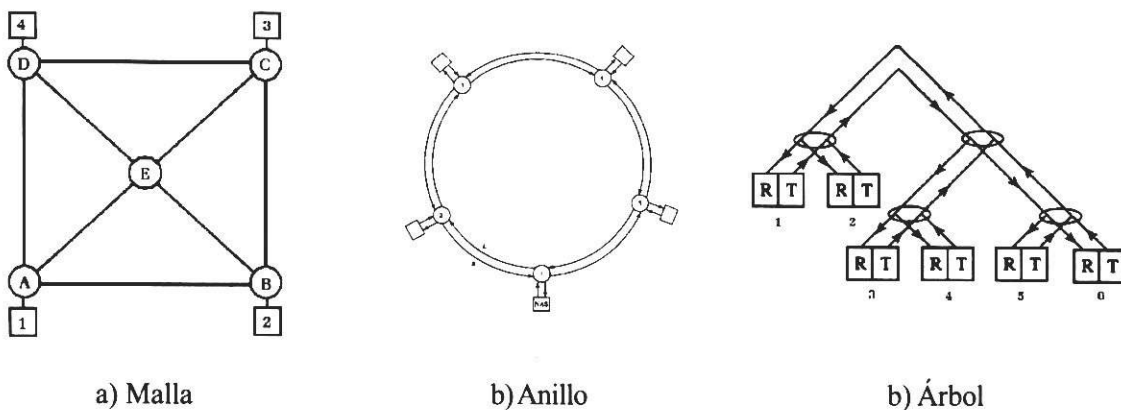


Figura 9 Topología de redes con encaminamiento por longitud de onda

luz con anticipación y permanecen fijos en el tiempo. En el segundo caso, el tráfico es dinámico, así que los requerimientos de conexión igualmente llegan a la red dinámicamente y permanecen por algún tiempo antes de la desconexión; por ello cobra igual relevancia el establecimiento de la conexión y la desconexión.

El problema RWA estático

Para la *asignación de caminos*, los algoritmos desarrollados tienen como objetivo minimizar el número de longitudes de onda que se requieren para establecer un conjunto fijo de enlaces de luz. Una primera heurística [20] se enfoca en restringir el espacio de búsqueda a un conjunto de enlaces a través de los cuales un enlace de luz puede establecer la conexión fuente-destino. Otras heurísticas consideran sólo caminos alternos de salto más corto entre fuente y destino, y escoge uno de ellos de acuerdo con una política predefinida. En unos casos [21] se escoge una ruta alterna que minimice la carga del enlace más cargado que pertenece al camino más corto original. En otros algoritmos [22] la política es la de minimizar el número de fibras, incluyendo dentro del conjunto de caminos por escoger, algunos caminos que no necesariamente son los de salto más corto. Este es un proceso que se hace anticipadamente, fuera de línea.

Cuando el volumen de tráfico es grande, el objetivo de minimizar el número de longitudes de onda puede conducir a que el algoritmo arroje como resultado un número de longitudes de onda irrealizable en la práctica [18]. Por ello, algunos algoritmos, contando con un número fijo de longitudes de onda, tienen como objetivo maximizar el tráfico transportado [16] que es equivalente al llamado *multicommodity flow problem* que maximiza el flujo a través de una red [23]. En esta misma línea, se han propuesto algoritmos que minimizan el número de fibras necesarias para transportar un tráfico dado [24].

La *asignación de longitudes de onda* por su parte se puede formular como un problema denominado *Graph Coloring* (*coloreado de un*

grafo). Un *grafo* es un conjunto de vértices y aristas. Las aristas son líneas que unen los vértices. Para el caso de redes los nodos son equivalentes a los vértices y los enlaces son equivalentes a las aristas. El problema *Graph Coloring* involucra típicamente la ordenación de las longitudes de onda disponibles en la red. La misma longitud de onda se asigna a tantos enlaces de luz como sea posible antes de continuar con la longitud de onda siguiente [25]. Los enlaces de luz pueden ordenarse por longitud, tal que las longitudes de onda se asignen primero a los enlaces de luz más largos. Igualmente es un procedimiento que se hace fuera de línea.

El problema RWA dinámico

Los objetivos de los algoritmos para resolver el problema RWA dinámico son escoger el camino y la longitud de onda que haga máxima la probabilidad de establecer una conexión, mientras que al mismo tiempo se intenta minimizar el bloqueo para conexiones futuras. La selección del camino y la longitud de onda se hace en línea.

Para la *asignación de caminos* hay tres enfoques principales [16], tomando en cuenta en cada uno de ellos que debe estar disponible la misma longitud de onda en cada tramo del trayecto; si no, el requerimiento de conexión se bloqueará. Un primer enfoque es asignar siempre el mismo camino, *fijo predeterminado*, para cada par fuente-destino. Aunque es muy simple de implementar y no se maneja información de control, la probabilidad de bloqueo es alta, dado que no se tiene información del estado de la carga en los enlaces de la red.

Un segundo enfoque es asignar caminos de forma *adaptativa basándose en información global* del estado de la red. El estado de la red se determina por el conjunto de todas las conexiones que en el momento estén en progreso. La asignación de caminos puede hacerse de forma *centralizada*, en cuyo caso un administrador central mantiene la información de estado generalizado de la red y se responsabiliza de asignar los caminos de acuerdo con dicha información, o

de forma *distribuida* en cuyo caso cada nodo de la red debe mantener el estado actualizado de la red, tal como las longitudes de onda disponibles. Cada vez que el estado cambie, debe informarse esta situación a cada nodo, mediante mensajes tipo *broadcast*. Dado que esto implica un gran sobreflujo de información de control, hay una alternativa y es que cada nodo mantenga una tabla de encaminamiento que le indique, para cada destino, sobre cada longitud de onda, cuál es el próximo salto y cuál es la distancia. Cada vez que ocurra un cambio de estado en el nodo, debe informarlo a sus nodos vecinos. Estos algoritmos basados en información global, aunque deben manejar mucha información de control, en general hacen óptima la decisión de encaminamiento. Son muy apropiados para redes en las cuales los enlaces de luz son relativamente estables con el tiempo.

Un tercer enfoque es asignar caminos de forma *adaptativa basándose en información local*. Esta alternativa hace que las decisiones de asignación de caminos sean más rápidas, ante requerimientos de conexión dinámicos en el tiempo. La asignación de un camino se determina por la disponibilidad de longitud de onda a lo largo de los distintos caminos alternos. Es posible que se conozca esta disponibilidad en todo el trayecto o sólo en los primeros k saltos. En este caso se escoge el camino que ofrezca más longitudes de onda disponibles, aunque sin garantía de que una longitud de onda esté disponible en todo el trayecto, por lo que puede resultar un bloqueo del requerimiento de conexión.

Por su parte la *asignación de longitudes de onda* de forma dinámica se hace empleando métodos heurísticos [16, 18, 19]. En este caso el algoritmo cuenta con un número de longitudes de onda establecidas, e intenta minimizar el bloqueo de la conexión. Hay varias heurísticas propuestas, las cuales pueden implementarse como algoritmos de ejecución en línea, los que pueden combinarse con alguno de los diferentes algoritmos de encaminamiento. Hay cuatro enfoques principales de asignación de longitudes de onda. La *heurística aleatoria* primero de-

termina el estado de la red en cuanto a las longitudes de onda que están disponibles sobre el camino designado, asignando aleatoriamente alguna de ellas. La *heurística First Fit* enumera todas las longitudes de onda, asignando en primera instancia las longitudes de onda de menor numeración. A diferencia de la *heurística aleatoria*, no se requiere información global del estado de la red. La *heurística de la longitud de onda más usada y menos usada*, tiene dos objetivos diferentes, y requiere de información global del estado de la red. Cuando se utiliza el criterio de selección de la *longitud de onda más usada* se intenta proveer la máxima reutilización de longitudes de onda. Cuando el criterio de selección es la *longitud de onda menos usada*, se intenta repartir la carga de la red de manera uniforme sobre todas las longitudes de onda. La *heurística anticipada* o *MAX SUM* asume que el conjunto de requerimientos de conexión (matriz de tráfico) se conoce anticipadamente y que el camino de una conexión se preselecciona. Estas condiciones son posibles cuando el tráfico es estable en un cierto período de tiempo. El algoritmo intenta escoger una longitud de onda que minimice el número de enlaces de luz futuros que serán bloqueados por establecerse esta conexión.

La topología física de la red influye en el desempeño de los algoritmos de asignación de caminos y longitudes de onda [18]. Por ejemplo para la topología en anillo, utilizando encaminamiento fijo, se ha mostrado que el algoritmo de *la longitud de onda más usada* se desempeña mejor, en cuanto a probabilidad de bloqueo, que el algoritmo *first fit*. Sin embargo, cuando la topología es en malla el desempeño es muy similar. El algoritmo *MAX SUM* presenta mejor desempeño que todos los algoritmos descritos (longitud de onda más usada, first fit, aleatorio) tanto en topología malla como anillo.

Áreas de desarrollo en redes ópticas

Según lo expresado en [6], existen varios frentes de trabajo de gran importancia para la evolu-

ción y penetración de las redes ópticas en los distintos ámbitos de aplicación.

Una necesidad apremiante en los desarrollos de tecnologías ópticas aplicadas a las telecomunicaciones es el incremento de canales DWDM, es la optimización de su ocupación de ancho de banda y el incremento de su capacidad en tasa de bit tan agresivamente como sea posible. Esto no sólo es necesario para atender la demanda actual sino para atender una demanda futura por ancho de banda en la red de acceso, cuando se haga necesario que la fibra reemplace el cobre en la última milla.

Otro tema de trabajo actual es la implementación de conversores ópticos completamente ópticos, dado que es una componente necesaria para proporcionar flexibilidad a la red, tolerancia a fallas y la implementación de conmutación de paquetes. Aunque se tiene distintos modelos tecnológicos para su implementación, el punto de enfoque es la reducción de los costos de esta componente.

Un tercer punto de atención concierne a la operación de la red completamente óptica, dada la gran cantidad de información que es enviada a través de una fibra. La idea en desarrollo es intentar interrumpir el enlace de luz para tratar de mirar los bits, mediante el desvío de un 1 ó 2% de la señal mediante la instrumentación apropiada para así poder estar al tanto del desempeño de la red.

Otra área clave va dirigida a la estandarización y su adopción. Aunque ya hay un estándar para la grilla de longitudes de onda DWDM, no se ha alcanzado un acuerdo en el número de canales por implementar por parte de los fabricantes, ni en la ubicación del canal de supervisión en la región cercana a los 1.510 nm. Aunque en estos aspectos tecnológicos la estandarización aún no es clara, parece tener mejor progreso la estandarización de los mecanismos de control para uso de MPLS por la capa IP y la derivación MPLS por la capa óptica [26]. El éxito de esta

estandarización no sólo significa que la capa óptica interactuará bien con la capa IP, sino que se podrá llevar a cabo la expansión y protección de anillos, restauración de red, alquiler de longitudes de onda, entre otros servicios. En esta dirección, el Internet Engineering Task Force está trabajando en el protocolo GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching). La visión del GMPLS ayuda a proveer una arquitectura del plano de control común para establecer el intercambio de las marcas de la entrada por el de salida correspondiente para cualquier tipo de nodo. Para los encaminadores IP las marcas designan principalmente los puertos de entrada y salida. En el caso de TDM, designan las ranuras de tiempo de entrada y salida. Cuando se trata de conmutación puramente espacial, designan los puertos de entrada y salida. Para las redes ópticas las marcas designan los puertos de entrada y salida, y la longitud de onda o banda de longitudes de onda del conmutador óptico. Así, GMPLS es un marco de trabajo que promete unificar el control de paquetes, circuitos, longitudes de onda y puertos.

Finalmente hay una insistencia constante en la reducción de costos. Sobre el comportamiento de costos, se puede decir que la tecnología óptica no ha seguido el comportamiento descrito por la ley de Moore para la integración de circuitos electrónicos. Con este objetivo, se está trabajando afanosamente en dos campos: en el uso de la litografía en la tecnología de guíasondas planas, y en el desarrollo de la fibra en sí misma, su microposicionamiento, empalme y acoplamiento.

Referencias

1. Govind P Agrawal. *Fiber Optic Communication Systems*. New York: Wiley Interscience Publication. 1999. p. 544.
2. Charles Brackett. "Dense Wavelength Division Multiplexing Networks: Principles and Applications". En *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*. New York. Vol. 8. No. 6. Agosto, 1990. pp. 948-964.
3. Paul Green. *Fiber Optic Network*. New Jersey: Prentice-Hall. 1993. p. 514.

4. John M Senior. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. New York: Prentice-Hall. 1992. p. 922.
5. Joseph C Palais. *Fiber Optic Communications*. 4ª. ed. New Jersey: Prentice-Hall International. 1998. p. 342.
6. Paul Green. "Progress in Optical Networking". En *IEEE Communication Magazine*. Vol. 39. No. 1. Enero, 2001. pp. 54-61.
7. Paul Green. "Optical Networking Upgrade". En *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 14. No. 5. Junio, 1996. pp. 764-779.
8. S Kawanishi *et al.* "3 Tbit/s (160 Gbit/s x 19 channel) Transmission by Optical TDM and WDM". En *IEEE, Laser and Electro-Optics Society Newsletter*. Vol. 13. No. 5. Octubre, 1999.
9. Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan. *Optical networks. A practical perspective*. Ed. Morgan Kaufmann Publishers. Primera edición. 1998. p. 632.
10. Thomas E. Stern *et al.* *Multiwavelength Optical Networks: A layered approach*. Ed. Addison-Wesley. Primera edición. 1999. p. 766.
11. Biswanath Mukherjee. *Optical Communications Networks*. Ed. McGraw-Hill. Primera edición. 1997. p. 576.
12. H. Zang *et al.* "Dynamic Lightpath Establishment in Wavelength-Routed WDM Networks". En *IEEE Communications Magazine*, vol. 39. No. 9. Septiembre, 2001. pp. 100-108.
13. Shun Yao *et al.* "All-Optical Packet Switching for Metropolitan Area Networks: Opportunities and Challenges". En *IEEE Communications Magazine*. Marzo, 2001. pp. 142-148.
14. John M. Senior *et al.* "Developments in Wavelength Division Multiple Access Networking". En *IEEE Communications Magazine*. Diciembre, 1998. pp. 28-36.
15. Andrzej Jajszczyk. "What Is the Future of Telecommunications Networking". En *IEEE Communications Magazine*. Junio, 1999. pp. 12-20.
16. Rajiv Ramaswami *et al.* "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks". En *IEEE/ACM Transactions on Networking*. Vol. 3. No. 5. Octubre, 1995. pp. 489-500.
17. D. Banerjee *et al.* "Wavelength-Routed Optical Networks: Linear Formulation, Resource Budgeting Tradeoffs, and a Reconfiguration Study". En *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 34. No. 7. Octubre, 2000.
18. Ezhan Karazan *et al.* "Performance of WDM Transport Networks". En *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Vol. 16, No. 7. Septiembre, 1998. pp. 1.081-1.096.
19. Hui Zang, *et al.* "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approach for Wavelength-Routed Optical WDM Networks". En *Optical Networks Magazine*, Vol. 1. No. 1. Enero, 2000.
20. D. Banerjee *et al.* "A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks". En *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 14. No. 5. 1996. pp. 903-908.
21. S. Baroni *et al.* "Wavelength Requirements in Arbitrary Connected Wavelength-Routed Optical Networks". En *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*. Vol. 15. No. 2. 1997. pp. 242-251.
22. M. Alanyali *et al.* "Provisioning Algorithms for WDM Optical Networks". En *IEEE/ACM Transactions on Networking*. Vol. 7. No. 5. 1999. pp. 767-778.
23. R.K. Ahuja *et al.* *Network Flows*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 1993.
24. N. Nagatsu *et al.* "Optical path cross-connect system scale evaluation using path accommodation design for restricted wavelength multiplexing". En *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 14. No. 5. 1996. pp. 893-902.
25. I. Chlamtac *et al.* "Lightpath Communications: A Novel Approach to High Bandwidth Optical WANs". En *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 40. No. 7. 1992. pp. 1.171-1.182.
26. N. Ghani. "Lambda Labeling: A Framework for IP-Over-WDM". En *Optical Networks Magazine*. Vol. 1. No. 2. 2000. pp. 45-58.
27. <http://www.research.ibm.com/WDM/motive/reason.html>.
28. <http://www.ziplink.net/~Iroberts/IEEEGrowthTrends/IEEEComputer12-99.htm>.
29. Leer, Anne. *La visión de los líderes en la era digital*. Apartado de Gilhooly, Denis. p. 47. Prentice-Hall. 2001.