



IP sobre WDM

El aumento exponencial del número de usuarios de Internet, así como el desarrollo de aplicaciones cada vez más avanzadas y con mayores requerimientos de ancho de banda, ha convertido a IP en el protocolo de transferencia de datos dominante. Este protocolo concebido inicialmente para transportar únicamente servicios de datos, ha visto además ampliada su definición para soportar todo tipo de servicios.

Para hacer frente a esta enorme demanda de tráfico IP, han tenido lugar varios esfuerzos cuyo resultado ha sido la aparición de routers de tránsito de alto rendimiento, también denominados gigarouters. Estos nuevos routers, a diferencia de los convencionales, realizan muchas de sus funciones (como la búsqueda en tablas de encaminamiento, el procesamiento de cabeceras, el cálculo de códigos de redundancia cíclica, etc.) en circuitos integrados de aplicación específica en hardware, en vez de en software controlado por una unidad central de procesos. El número, el tipo y la velocidad de las interfaces de sus tarjetas de línea se han visto así considerablemente incrementadas: OC-192/STM-64 (10 Gbps), OC-48/STM-16 (2,5 Gbps), OC-12/STM-4 (622

Mbps), OC-3/STM-1 (155 Mbps), Fast Gigabit Ethernet (1,25 Gbps), Fast Ethernet (100 Mbps), etc. Por otro lado, también se han introducido mejoras en software como avanzados algoritmos para la optimización del proceso de búsqueda en las tablas de encaminamiento o el protocolo MPLS para una rápida conmutación por etiqueta.

Por otro lado, este incremento en las necesidades de ancho de banda ha supuesto un rápido desarrollo de WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), tecnología que ofrece en la actualidad la posibilidad de transportar hasta 160 canales de 10 Gbps sobre una única fibra óptica. En efecto, la red de transporte está en estos momentos pasando por un periodo de transición, evolucionando desde las tradicionales redes ATM y SONET/SDH basadas en la multiplexación en el tiempo, con WDM utilizado estrictamente para incrementar la capa-

El tráfico IP ha sido tradicionalmente transportado sobre redes ATM y SONET/SDH antes de llegar a la red WDM. La aparición de routers de tránsito IP de alto rendimiento, el desarrollo del protocolo IP y la madurez de la tecnología WDM han posibilitado el transporte de IP directamente sobre WDM, reduciendo los costes y la complejidad de una red tan heterogénea. El reto está ahora en encontrar la solución más eficiente para integrar IP y WDM.

de la fibra óptica, hacia una red fotónica basada en la multiplexación en frecuencia óptica, realizando no sólo el transporte sino también la multiplexación, encaminamiento, supervisión y protección en la capa óptica. Las ventajas de una red totalmen-

te óptica son, entre otras, una menor complejidad, una mayor transparencia respecto de las señales transportadas, un mayor ancho de banda y mayores distancias de transmisión.

De este modo, teniendo en cuenta que IP se convertirá en la base de todos los servicios de telecomunicaciones y WDM en la tecnología de transporte más utilizada, ha habido un interés creciente en la integración de IP sobre las redes fotónicas. Esta integración pasa por conseguir un plano de control común que permita una administración de la red más sencilla y una provisión más rápida y sencilla del ancho de banda ofrecido por WDM para el

tráfico IP, y encontrar un mecanismo eficiente para el transporte de los paquetes IP sobre WDM. En este artículo nos centraremos en los mecanismos de transporte de IP sobre WDM, para lo cual es necesario añadir un protocolo de nivel de enlace, ya que IP está asociado al nivel de red y WDM al nivel físico. Este nivel tendrá la misión de entramar el paquete, incluir la funcionalidad necesaria para establecer enlaces entre dos nodos, realizar una codificación de línea eficiente que impida las pérdidas de sincronismo, detectar errores de bit, etc.

Evolución de la red óptica

La gran mayoría de las redes de las operadoras de telecomunicaciones han sido construidas utilizando un modelo de capas. En este modelo, las conexiones entre dispositivos en una capa son proporcionadas por circuitos lógicos en la capa de nivel inferior. Cada capa ha sido tradicionalmente gestionada de forma independiente, cada una de ellas con sus propios requerimientos, problemas y características operacionales únicas. Este modelo ha servido para conseguir una mayor flexibilidad, ofrecer un mayor número de servicios y utilizar más eficientemente los recursos.

No obstante, la convergencia de las tecnologías de red hacia IP ha planteado la idea de simplificar este modelo en capas, reduciendo su número. De este modo, aunque podría reducirse en ciertos casos la flexibilidad de la red se reduce también mucho su coste y complejidad. En efecto, el desarrollo de IP y de WDM, que han ido progresivamente adquiriendo funcionalidad inherente a otras capas, ha supuesto que la transición a un modelo de giga

routers IP conectados directamente sobre sistemas WDM sea una elección factible para algunas redes de transporte. No obstante, no es probable que sea la única opción, ya que las redes SONET/SDH y ATM están ampliamente desarrolladas e implantadas, y proporcionan varias características y servicios útiles.

Seguidamente, presentaremos algunos de los métodos disponibles o propuestos para transportar paquetes IP sobre la red WDM, teniendo presente que estos métodos no son los únicos, pero sí los más utilizados o los que más interés están suscitando. En este análisis será especialmente importante, además de la conveniencia para el transporte sobre la capa

óptica, la eficiencia en ancho de banda. Dicha eficiencia del enlace de transmisión se verá afectada por cómo se hace la correspondencia de los paquetes IP en la capa WDM y por la longitud de dichos paquetes. Como el tamaño de la mayoría de los paquetes IP que atraviesan actualmente Internet es menor de 500 bytes, en los análisis realizados se considerará un tamaño de paquete de 350 bytes.

► **IP sobre ATM sobre SONET/SDH sobre WDM.** En la red de transporte de datos han existido típicamente cuatro capas: IP sobre ATM sobre SONET/SDH sobre WDM. Esta arquitectura puede estar constituida por giga-routers IP con interfaces ATM (que utilizan típicamente SONET/SDH como medio físico) conectados directamente a la red WDM, o como ocurre tradicionalmente, a través de conmutadores ATM conectados a ADM SONET/SDH.

El modo de transferencia asíncrono o ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) estandarizado por el ITU-T es una tecnología de nivel de enlace de conmutación rápida de pequeñas celdas o paquetes de longitud fija de 53 bytes, diseñada para transportar cualquier tipo de tráfico (voz, datos, imágenes o multimedia) en fun-

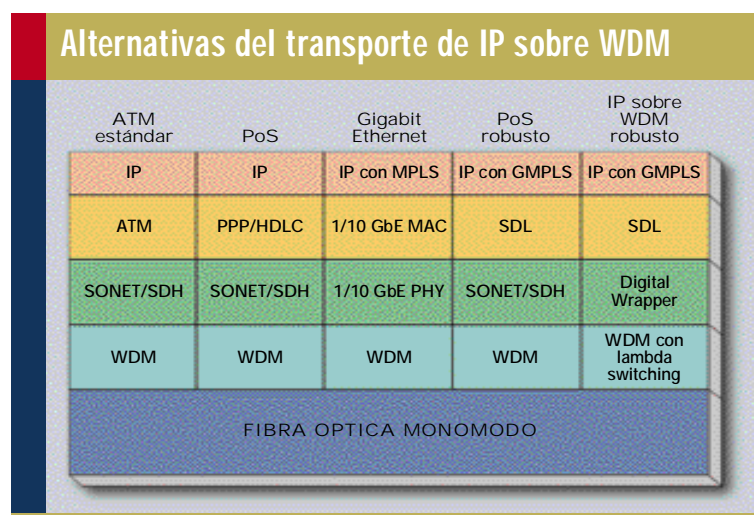
cionada por el ITU-T para todo el mundo y compatible en parte con SONET, son tecnologías de transmisión por fibra óptica diseñadas principalmente para la transmisión de voz. Estas tecnologías de nivel físico son ampliamente utilizadas, teniendo como principales características su alta estandarización mundial, su flexibilidad, sus potentes mecanismos de protección y administración, la posibilidad de monitorización de errores y de calidad del servicio, y su compatibilidad con las tecnologías de transporte predecesoras, como la jerarquía digital pliesiónica o PDH (*Plesiocronous Digital Hierarchy*).

Estos estándares definen interfaces de tráfico denominadas STM-N (*Synchronous Transport Module*) para el caso de SDH, partiendo de STM-1 (155 Mbps). Los restantes STM-N se obtienen mediante el entrelazado de bytes de varias señales STM-1. En la actualidad se encuentran disponibles comercialmente los valores de STM-4 (622 Mbps), STM-16 (2,5 Gbps), STM-64 (10 Gbps) y, en un futuro próximo, STM-256 (40 Gbps). SONET/SDH apuesta por arquitecturas en anillo, constituidas por multiplexores de extracción e inserción de señales o ADM (*Add and Drop Multiplexers*). Los anillos permiten conseguir redes muy flexibles, pudiendo extraer señales tributarias del tráfico agregado en cualquiera de los ADM, además de ofrecer potentes mecanismos de protección y restauración.

Existen varios métodos para transportar IP sobre ATM, pero el clásico consiste en segmentar los paquetes IP en celdas ATM. Estas celdas ATM son generalmente transportadas en tramas SONET/SDH, aunque se podrían transportar directamente sobre WDM.

Esta arquitectura, no obstante, presenta varios problemas: altas inversiones en infraestructura, gran dificultad para ser escalada, complejidad en el mantenimiento y gestión de la red, y alta sobrecarga en el transporte de datos debido a las cabeceras con información de control de cada una de las capas.

► **IP sobre SONET/SDH sobre WDM.** La tecnología SONET/SDH estaba inicialmente optimizada para el transporte de tráfico de voz, pero la aparición del estándar PoS (*Packet Over SONET*), estandarizado por IETF, la ha convertido también en una alternativa muy eficiente para el tráfico de datos. El esquema de una red de este tipo puede ser el de giga-routers IP que simplemente utilizan el formato de trama SONET/SDH para entramar los paquetes IP encapsulados para su transmisión directa sobre WDM. También es posible



ción de la calidad de servicio o QoS (*Quality of Service*) demandada por los usuarios finales. ATM proporciona un ancho de banda escalable que va desde los 2 Mbps a los 10 Gbps; y debido a su naturaleza asíncrona, es más eficiente que las tecnologías síncronas, tales como la multiplexación por división en el tiempo o TDM (*Time Division Multiplexing*) en la que se basa SONET/SDH. Las redes ATM están constituidas por conmutadores con arquitecturas malladas.

La red óptica síncrona o SONET (*Synchronous Optical Network*) estandarizada por el ANSI para Norteamérica, y la jerarquía digital síncrona o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) estandar-

transportar el paquete IP entramado mediante SONET/SDH sobre una red de ADM SONET/SDH junto a otro tipo de tráfico, que utilizará luego enlaces WDM.

En efecto, PoS proporciona un método para optimizar el transporte de paquetes de datos en tramas SONET/SDH. Para ello, primero es necesario que los paquetes IP sean encapsulados en el nivel de enlace mediante PPP (*Point-to-Point Protocol*), siguiendo un entramado tipo HDLC (*High-level Data Link Control*).

La sobrecarga promedio de PoS es únicamente de un 6%, bastante inferior a la de IP sobre ATM sobre SONET/SDH, que es de un 22%, originada por la alta sobrecarga que implica ATM, principalmente para paquetes pequeños. PoS permite, además, continuar utilizando la excelente funcionalidad de conmutación de protección y de monitorización y supervisión de SONET/SDH. El problema de eliminar ATM es que se pierde flexibilidad en el manejo del ancho de banda del enlace virtual. En efecto, ATM permite además de crear circuitos virtuales permanentes con un ancho de banda fijo desde el sistema de gestión, establecer circuitos virtuales con un ancho de banda arbitrario dinámicamente, pudiendo utilizar también multiplexación estadística para permitir a ciertos servicios acceder al ancho de banda extra para pequeñas ráfagas. Esta limitación sería resuelta con la introducción de GMPLS.

► **IP sobre Gigabit Ethernet sobre WDM.**

El estándar IEEE 802.3z o Gigabit Ethernet puede ser utilizado para extender las ampliamente implementadas redes locales Ethernet y Fast Ethernet a redes mucho más extensas y de mayor capacidad, utilizando tarjetas de línea Gigabit Ethernet en los gigarouters IP, con un coste alrededor de 5 veces menor que el de las tarjetas de línea SONET/SDH para una capacidad similar. Por esta razón, Gigabit Ethernet puede ser un mecanismo interesante para el transporte de IP en anillos WDM metropolitanos o incluso de mayores distancias. Es más, los puertos 10 Gigabit Ethernet estarán disponibles comercialmente en un futuro próximo.

Gigabit Ethernet es una opción aún más atractiva cuando se complementa con MPLS. El protocolo MPLS (*MultiProtocol Label Switching*) es un estándar de IETF que permite integrar en IP el modo de conmutación rápido por etiquetas utilizado por ATM, además de proporcionar ingeniería del tráfico, cursar tráfico con distintas QoS, proteger ciertas rutas, crear redes privadas virtuales o VPN (*Virtual Private*

Networks), etc. Es decir, MPLS permite de una manera más sencilla y escalable ofrecer prácticamente la misma funcionalidad de ATM en IP y además está diseñado para operar sobre cualquier tecnología de nivel de enlace (ATM, Frame Relay y Ethernet).

Las ventajas que ofrece este método de transporte de IP sobre WDM son bajo coste, sencillez y alta escalabilidad; su principal desventaja es la poca eficiencia que presenta en el transporte de datos. La sobrecarga de Gigabit Ethernet es de un 28%, originada fundamentalmente en la codificación de línea 8B/10B para el transporte óptico (la velocidad de línea es

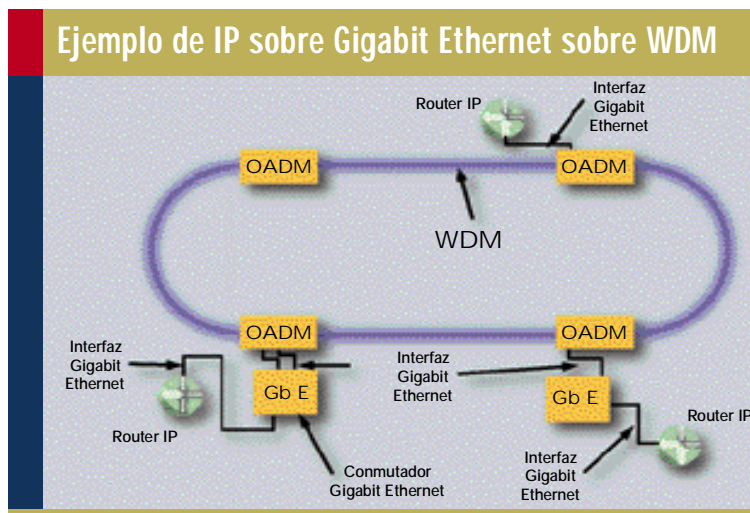
ahora desempeña la capa SONET/SDH, creando una red óptica flexible, de alta capacidad y eficiencia y con una gestión del ancho de banda totalmente óptica.

En esta arquitectura aparece SDL (*Simplified Data Link*) como un nuevo protocolo de nivel de enlace propuesto por Lucent Technologies para la sustitución de HDLC, pudiendo ser utilizado sobre SONET/SDH o directamente sobre WDM. Mediante SDL se consigue una sobrecarga de únicamente el 3%. Por otro lado, los Digital Wrappers, estandarizados en la G.709 del ITU-T y en proceso de implementación, se encargarían de añadir bytes de sobrecarga que soporten la gestión y control del canal óptico, aprovechando la necesidad de regeneración electro óptica en los puntos de entrada y salida de los sistemas WDM para adaptar las longitudes de onda y posibilitar su multiplexación.

La utilización de Digital Wrappers proporcionará una funcionalidad y fiabilidad semejante a la trama SONET/SDH, con la ventaja de ser totalmente transparente al tipo de interfaces utilizadas en los gigarouters que interconectan (es compatible con ATM, ESCON, Fibre Channel, SONET/SDH, etc.). Además, está más adaptado a la problemática de la capa óptica, ofreciendo nuevas mejoras, como por ejemplo, el uso de FEC (*Forward Error Correction*), que puede mejorar significativamente la tasa de errores de bit de la señal óptica minimizando la necesidad de puntos de regeneración.

Por otro lado, para mejorar el aprovechamiento del ancho de banda óptico y la funcionalidad de este esquema es necesario un protocolo que realice la misma misión que cumple MPLS en la arquitectura de IP sobre Gigabit Ethernet sobre WDM. Este protocolo es GMPLS (*Generalized MultiProtocol Label Switching*), evolución de MPLS y en proceso de estandarización por el IETF. GMPLS soporta no sólo dispositivos de conmutación de paquetes, sino también de

conmutación en el tiempo, en longitud de onda y de fibras ópticas. De esta forma, ofrece un panel de control único e integrado y extiende la disponibilidad de recursos y gestión del ancho de banda a lo largo de todas las capas de la red, ofreciendo así una rápida provisión de servicios de cualquier tipo, en cualquier momento, con cualquier calidad de servicio, con cualquier grado de disponibilidad y con cualquier destino.



por lo tanto de 1,25 Gbps en vez de 1 Gbps), necesaria para mantener el sincronismo.

IP sobre WDM robusto

Evidentemente, la única forma de eliminar todas las limitaciones asociadas a estas arquitecturas es transportar IP directamente sobre la capa WDM con la mayor eficiencia posible, para lo cual es necesario que IP y WDM adopten la funcionalidad inherente a otras capas; en concreto, los gigarouters IP tendrían una nueva tarjeta de línea que utilizaría SDL y Digital Wrappers para el transporte óptico sobre sistemas WDM dotados de una mayor flexibilidad que los actuales.

Para conocer en detalle las posibilidades y tecnologías asociadas al transporte de IP sobre WDM, consultar ► www.cis.ohio-state.edu/~jain/refs/opt_refs.htm

En efecto, WDM está pasando de ser una tecnología muy estática empleada únicamente en redes punto a punto, a ser utilizada en redes en anillo muy flexibles. Durante los próximos años aparecerán los primeros R-OADM (*Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexers*) capaces de extraer e insertar longitudes de onda de la fibra dinámicamente según la configuración realizada desde el sistema de gestión. Combinados con los OXC (*Optical Cross-Connects*), que permiten conmutar dinámicamente las longitudes de onda desde fibras de entrada a fibras de salida, la capa WDM estará en condiciones de realizar las mismas funciones que

conmutación en el tiempo, en longitud de onda y de fibras ópticas. De esta forma, ofrece un

panel de control único e integrado y extiende la disponibilidad de recursos y gestión del ancho de banda a lo largo de todas las capas de la red, ofreciendo así una rápida provisión de servicios de cualquier tipo, en cualquier momento, con cualquier calidad de servicio, con cualquier grado de disponibilidad y con cualquier destino.

RAMÓN JESÚS MILLÁN TEJEDOR

Ingeniero Superior de Telecomunicaciones, especialista universitario en Gestión de Sistemas de Información y en Integración y Soporte de Redes Ópticas