

Resumen

El gran crecimiento y expansión de Internet en los últimos años, con el consecuente incremento de usuarios y tráfico, ha hecho que aumente la necesidad de ancho de banda en las redes de telecomunicación actuales. Esta demanda se debe en gran medida a la popularización de Internet y a la explosión de nuevos servicios que de ello se deriva y que exigen a la red mayor eficiencia, en términos de optimización de recursos y prestaciones. Es de esperar que en un futuro inmediato esta tendencia continúe, sobre todo a la vista del fuerte incremento del tráfico de datos frente al tráfico de voz.

Inicialmente, estas necesidades se han atendido integrando la tecnología WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) a las actuales arquitecturas multi-capas sin la necesidad de reemplazar las funcionalidades redundantes e ineficaces de esta arquitectura. Por esta razón, el desafío de la futura generación de redes de telecomunicación apunta a pasar de la simple transmisión de señales ópticas de gran capacidad a efectivamente conmutar y gestionar esta cantidad de datos en el dominio óptico. Estas funcionalidades, actualmente realizadas por componentes eléctricos, son las que actualmente causan un cuello de botella en la escalabilidad y crecimiento de Internet.

Por otro lado, se espera que las futuras redes transporten servicios heterogéneos que incluyen tanto transferencia de datos como transmisión de aplicaciones multimedia e interactivas. Cada servicio por lo tanto necesita un requerimiento y tratamiento particular (por ejemplo garantizar un límite en el retraso extremo-extremo o en el ancho de banda). En este entorno, proporcionar calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) resulta ser un factor obligatorio.

Definitivamente, las redes ópticas con soporte a la QoS son el principal objetivo de la próxima generación de redes de telecomunicación. La primera etapa de esta migración prevee pasar de los actuales sistemas punto a punto hacia interconexiones basadas en redes de conmutación de circuitos ópticos ASON. Esta solución es capaz de proporcionar conexiones ópticas bajo demanda de manera rápida y flexible a través de un plano de control basado en el paradigma GMPLS.

No obstante la introducción de la gestión automática de los recursos, ASON hace un uso relativamente estático de las longitudes de onda, no aprovechando todo el potencial que la tecnología óptica puede ofrecer con una explotación más dinámica de los recursos. Con el objetivo de optimizar los recursos disponibles de manera automática, la implementación de la técnica de conmutación de paquetes directamente en las redes de transporte pretende ser una solución válida que aproveche la multiplexación estadística directamente en el dominio óptico para proporcionar mayor fiabilidad y alta velocidad y bajas interferencias electromagnéticas. En esta dirección, se están desarrollando dos nuevos enfoques llamados conmutación de ráfagas ópticas (*Optical Burst Switching*, OBS) y conmutación de paquetes ópticos (*Optical Packet Switching*, OPS). Ambas soluciones son igualmente atractivas y permiten eliminar el cuello de botella entre la transmisión óptica y la conmutación.

Esta tesis se centra en redes OPS que pretende ser una solución a largo plazo en cuanto requiere conmutadores de alta velocidad y componentes ópticos avanzados como los conversores sintonizables de longitud de onda y regeneradores completamente

ópticos. Siendo OPS una tecnología basada en la multiplexación estadística, dos o más paquetes pueden contender el mismo recurso lo que obliga la implementación de algoritmos de resolución de contenciones. En la conmutación de paquetes eléctricos, se usa tanto el dominio espacial, enviando unos paquetes hacia otros puertos de salidas, como el dominio temporal enviando los paquetes a las colas eléctricas. En OPS el uso del dominio temporal es muy limitado debido a la falta de memorias RAM ópticas que impone el uso de fibras de retrasos (*Fiber Delay Lines*, FDLs). Las FDLs son muy costosas, su uso muy engorroso, solo pueden proporcionar retrasos discretos y por lo tanto su uso debe limitarse a unas pocas decenas. Por otro lado, el uso de enlaces WDM y conversores de longitud de onda permite explotar el dominio de la frecuencia para resolver las contenciones.

En este ámbito el objetivo de esta tesis es el desarrollo de nuevos mecanismos para proporcionar QoS en redes OPS tanto en entorno metropolitano como de rea extendida.

Por lo que concierne el entorno metropolitano, las redes son generalmente *bufferless*, en el sentido que una vez transmitida la informacin a la red, esa se queda en el dominio óptico sin encontrar ninguna cola en el camino hasta alcanzar su destino. Para evitar contenciones, protocolos de acceso al medio compartido (*Medium Access Control*, MAC) son necesarios y pueden integrarse con mecanismos para proporcionar QoS.

De este concepto se pueden diseñar varias arquitecturas distintas. En esta tesis nos concentramos en dos arquitecturas basadas en topologas compuestas, llamadas respectivamente redes multi-PON y redes multi-anillos. Ambas han sido desarrolladas en el proyecto de investigacin DAVID financiado por la Unión Europea dentro del quinto programa marco. Nuestras contribuciones abarcan varios aspectos. Antes de todos se han identificado los requerimientos de las futuras redes metropolitanas basadas en OPS, con particular atención en determinar los servicios necesarios de acuerdo con lo que se ha diseñado en la anterior generación eléctrica de redes metropolitanas. Luego para ambas redes se ha seguido el mismo procedimiento. La primera etapa ha sido la evaluación de prestaciones a través de simulaciones con el objetivo de identificar los puntos débiles. Se ha luego pasado a la fase de optimización tanto de la arquitectura de las redes como de los mecanismos que gobiernan su funcionamiento y se han verificado las mejoras. Finalmente se han propuesto mecanismos para proporcionar QoS según los requerimientos definidos anteriormente y se ha hecho un estudio de coste/prestaciones comparando las dos arquitecturas con otras actualmente en comercio como SDH, RPR y Ethernet.

Por lo que concierne el entorno de área extendida, se ha considerado una red de conmutación de paquetes ópticos orientado a la conexión donde los nodos tienen limitadas capacidad de encolamiento. En este contexto, se han tratado dos problemáticas: el establecimiento de las conexiones virtuales ópticas (*Optical Virtual Circuit*, OVC) configurando propiamente las tablas de expedición (*forwarding table*) en los nodos y la provisión de QoS.

Para el primer punto, a la llegada de una petición de establecimiento de una nueva OVC, cada nodo debe asignar un puerto y una longitud de onda de salida a esta OVC. En el entorno OPS, esta tarea es diferente respecto al *clásico* problema

RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) presente en las redes de conmutación de circuitos en cuanto en este caso las longitudes de onda están compartidas entre varios OVCs. Mientras la elección del puerto de salida depende de los algoritmos de routing, la elección de la longitud de onda se puede decidir localmente en cada nodo según diferentes políticas llamadas *OVC-to-wavelength setup assignment* (OWSA). En esta parte de la tesis se ha estudiado en detalle este problema y se han propuesto diferentes estrategias. En particular se ha demostrado que una buena política de asignación de longitud de onda incrementa notablemente la prestación de un conmutador OPS. Se ha usado la idea de agrupar, siempre que se pueda, los flujos de tráfico que entran en el conmutador por el mismo puerto y misma longitud de onda de manera de disminuir lo máximo posible la probabilidad de contención entre paquetes.

Por lo que concierne proporcionar QoS, el estado del arte indica que hasta el momento se ha siempre seguido la misma técnica basada en: 1) diseñar un algoritmo de resolución de contenciones que minimice la probabilidad de pérdidas de paquetes (*Packet Loss Rate*, PLR) y luego 2) aplicar un mecanismo de reserva de recursos capaz de diferenciar la PLR entre dos o más clases de tráfico. Considerando que el entorno de estudio es orientado a la conexión, se ha propuesto un enfoque diferente basado en el esquema aplicado en redes ATM donde se definen diferentes categorías de servicio, cada una con su propio tratamiento dentro de la red. En particular se han definido 3 categorías de servicio para entorno OPS y se han desarrollado 3 algoritmos de resolución de contenciones, cada uno pensado para proporcionar el servicio requerido. Con esta técnica, además de controlar la PLR, también se pueden considerar el retraso y la complejidad computacional como métricas QoS.

El trabajo presentado en esta tesis es parte de las actividades de investigación del grupo de Sistemas de Comunicación de Banda Ancha del Centre de Comunicacions Avanades de Banda Ancha (CCABA) de la Universitat Politècnica de Catalunya. En particular, el trabajo ha hecho parte de tres proyectos de investigación. Dos de ellos financiados por la Unión Europea: el proyecto IST-1999-11742 DAVID (Data And Voice Integration over DWDM) y la acción COST 266 (Advanced Broadband for Photonic Infrastructure). El último financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCyT): el proyecto TRIPODE (FEDER-TIC2002-04344-C02-02).

Finalmente, cabe subrayar que este trabajo se seguirá desarrollado dentro de un nuevo proyecto de investigación financiado por la Unión Europea: el proyecto integrado FP6-506760 NOBEL (Next generation Optical network for Broadband European Leadership).

