

## **Evolución de las redes de datos: Hacia una plataforma de comunicaciones completamente óptica**

### **Data networking evolution: Toward an all-optical communications platform**

*Gustavo Puerto Leguizamón\**, *Beatriz Ortega*, *José Capmany*, *Karen Cardona Urrego*, *Carlos Suárez Fajardo*

Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia, Universidad Politécnica Valencia. Edificio 8G, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España

(Recibido el 14 de noviembre de 2007. Aceptado el 9 de mayo de 2008)

#### **Resumen**

Este artículo presenta una introducción a las redes de comunicaciones ópticas, para lo cual se describe la evolución que están experimentando dichas redes a fin de soportar las futuras demandas en el transporte de tráfico IP. Esta evolución se debe en gran parte al desarrollo de dispositivos que permiten el procesamiento de señales en el dominio óptico. De la misma forma se presenta un modelo de *router* de conmutación de paquetes ópticos basado en el paradigma de intercambio de etiqueta con capacidad de conmutación de paquetes IP a 10 Gb/s. Por otra parte, se ha incorporado en el *router* la capacidad de procesar paquetes de tamaño variable y se comprueba experimentalmente sus prestaciones.

----- *Palabras clave:* Redes ópticas, conmutación de paquetes ópticos, IP sobre WDM

#### **Abstract**

An introduction to optical networks in which the evolution undergone by such networks is presented in order to manage the future demand on the transport of IP traffic is described. This evolution has been boosted by the deployment of all optical devices featuring all optical processing capabilities. Similarly, an all optical packet router is presented based on the label swapping paradigm with the ability to route and forward IP packets at 10 Gb/s. The proposed router is able to process variable length packets and its performance is experimentally verified.

----- *Keywords:* Optical networks, optical packet switching, IP over WDM.

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: +34 +96 387 70 00 ext. 88276, fax: +34 +96 387 95 83, correo electrónico: gapuerto@dcom.upv.es (G. Puerto).

## Introducción

En la última década, el campo de las redes de comunicaciones ha experimentado un crecimiento exponencial en el tráfico de datos debido a la popularidad de *Internet*, a tal punto que en términos de volumen, el tráfico de datos ya ha superado con creces al tráfico de voz hoy en día. En el contexto de las redes de telecomunicación, esto conlleva un cambio previsible en el paradigma tecnológico que dará soporte a las futuras redes ópticas, evolucionando desde el actual, basado en conmutación de circuitos o canales ópticos hacia uno nuevo y más próximo al existente actualmente en el dominio eléctrico, el cual estará basado en la conmutación de paquetes IP (*Internet Protocol*) directamente en el dominio óptico. Además de la propia conmutación de los paquetes, la nueva plataforma basada en una única estructura de integración entre datos y voz debe ser capaz de proporcionar servicios de enrutamiento y gestión, sin necesidad de que la información se convierta en cada *router* a formato eléctrico.

En este contexto, el protocolo IP se está consolidando día a día en el papel de capa de integración para servicios múltiples ya que es transparente a diferentes tecnologías de capa de enlace y capa física ofreciendo una gran convergencia de servicios. Además, soporta una gran cantidad de aplicaciones emergentes tales como video por demanda, televisión interactiva y en general cualquier aplicación con transmisión de imágenes de alta resolución en tiempo real. Como resultado, estas aplicaciones multimedia y la cada vez más consolidada popularidad de abonados ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Live*) y de cable módem están causando un gran aumento de la demanda de ancho de banda no solamente en las redes de área extendida sino también en las redes de entorno metropolitano, poniendo a prueba los límites de la actual red de telecomunicaciones.

Esta explosión está conduciendo a una gran cantidad de nuevas oportunidades de desarrollo en las actuales redes de comunicaciones, ya que el usuario final demanda aplicaciones mejores y más rápidas, por lo tanto, hay una necesidad inmediata de

desarrollo de nuevas redes de alta capacidad que sean capaces de resistir estos requerimientos de ancho de banda para soportar los volúmenes crecientes del transporte de tráfico de *Internet* ya que previsiblemente el cuello de botella de los futuros sistemas de telecomunicación por fibra óptica no estará en la transmisión propiamente dicha, sino en el enrutamiento de las señales ópticas a través de los distintos nodos de la red.

## Redes ópticas

Las tecnologías de transmisión por fibra óptica han evolucionado en la última década debido a la creciente demanda de servicios de alta velocidad y gran ancho de banda. Este hecho está provocando cambios sustanciales en las arquitecturas de las redes ópticas principalmente por las grandes prestaciones alcanzadas por las soluciones WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) que han permitido un aumento espectacular en la capacidad de las redes ópticas de transporte. En particular, este desarrollo ha conducido a la definición de tres niveles en la escala evolutiva de las redes ópticas, en concreto, redes de primera, segunda y tercera generación.

### Redes ópticas de primera generación

La primera generación de redes ópticas se basa en enlaces WDM punto a punto en los cuales todo el tráfico proveniente de un enlace se extrae en cada nodo y se convierte del dominio óptico al dominio eléctrico con el fin de procesar la información de enrutamiento, a su vez, todo el tráfico de salida del nodo tiene que ser convertido nuevamente a formato óptico antes de ser enviado a través del correspondiente puerto de salida. El proceso de extraer y agregar la totalidad del tráfico en cada nodo de la red conlleva a la utilización de una cantidad significativa de costos de operación en términos de la complejidad de la estructura de conmutación y costes en la transmisión de los datos, particularmente si la mayor parte del tráfico en la red es de paso o *bypass*. En resumen, las redes ópticas de primera generación se caracterizan por utilizar la fibra óptica únicamente como medio de transmisión de alta capacidad. Como

resultado, todo el procesado, enrutamiento y conmutación se realiza en el dominio eléctrico. Por este motivo y a fin de minimizar los costes de operación en la red se introducen dispositivos de adición-extracción, los cuales permiten la extracción del tráfico correspondiente a cada nodo dejando pasar el resto del tráfico de la red, evitando el procesado innecesario de todo el tráfico en todos los nodos de la red. Este concepto conduce a la definición de las redes ópticas de segunda generación llamadas también redes de enrutamiento por longitud de onda o redes de conmutación de circuitos ópticos.

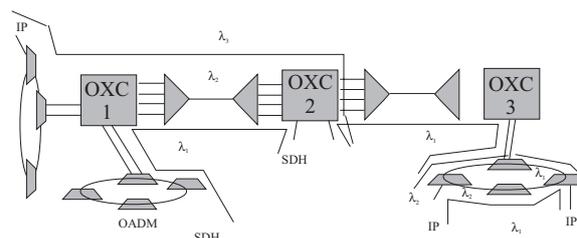
**Redes ópticas de segunda generación**

En redes ópticas de segunda generación se pretende realizar funciones adicionales en el dominio óptico además de la simple transmisión punto a punto [1]. En particular, se realizan tareas de enrutamiento, conmutación, además de ciertas funciones relacionadas con el control, gestión y protección de la red proveyendo al sistema de un considerable ahorro en equipos y procesado electrónico en los nodos. Por tanto, se introduce el concepto de capa óptica, cuyas prestaciones permiten realizar en el dominio óptico las funciones anteriormente descritas.

En este tipo de redes, los usuarios finales o capas cliente, tales como SDH, ATM o IP se comunican a través de canales WDM denominados caminos ópticos, los cuales poseen conexiones ópticas extremo a extremo donde la transmisión entre los nodos intermedios se realiza empleando una longitud de onda. En ausencia de conversores de longitud de onda, un camino óptico puede usar la misma longitud de onda en todos los enlaces de fibra que lo conforman o por el contrario tener una longitud de onda distinta para cada enlace, permitiendo tener varios caminos ópticos en un mismo enlace físico siempre que no compartan la misma longitud de onda.

Las redes ópticas de segunda generación están basadas en multiplexores de adición-extracción de longitud de onda completamente ópticos (OADM), terminales ópticos de línea (OLT) y

matrices de conmutación óptica (OXC) [2]. Un OADM solamente puede terminar ciertos canales seleccionados de la fibra de entrada y permite el paso de otras longitudes de onda sin necesidad de ningún procesamiento. En general, la cantidad de tráfico de paso en la red es significativamente mayor que la cantidad de tráfico que necesita ser extraída en un nodo específico. Por lo tanto, el hecho de usar un OADM y extraer exclusivamente las longitudes de onda cuyo destino final es el nodo actual y permitir el paso del resto de longitudes de onda, reduce significativamente los costos de operación de la red. Los OADM permiten la realización de conmutación de circuitos o conmutación de conexiones punto a punto en el dominio óptico, pero su mayor utilización y eficacia se encuentra en la formación de arquitecturas de anillos WDM ópticos para redes de área metropolitana. Los OLT se encargan de finalizar una conexión punto a punto para multiplexar o demultiplexar las longitudes de onda que conforman los caminos ópticos, de igual forma, los OLT se encargan de la adaptación de las señales de la capa cliente a la capa óptica y viceversa. Finalmente, los OXC pueden conmutar una longitud de onda desde cualquiera de sus puertos de entrada a cualquiera de sus puertos de salida. La conmutación puede incluir o no conversión de longitud de onda. En la figura 1 se muestra un esquema sencillo de una red de segunda generación, donde se muestran sus elementos hardware principales y donde así mismo se muestran diferentes caminos ópticos establecidos entre usuarios o clientes finales.



**Figura 1** Red óptica de segunda generación

En redes ópticas de segunda generación o redes de enrutamiento por longitud de onda, dado un conjunto de conexiones, el problema de estable-

cer un camino óptico se denomina problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda (RWA) [3]. Típicamente, las peticiones de conexión pueden ser de tipo estática y dinámica.

En el problema del establecimiento de caminos ópticos estáticos (SLE) el conjunto total de conexiones se conoce por adelantado, la solución al problema por lo tanto consiste en establecer caminos ópticos para esas conexiones, minimizando los recursos de red tales como el número de longitudes de onda o el número de fibras en la red. En el caso del establecimiento de caminos ópticos dinámico, cada conexión se establece con cada petición generada, posteriormente el camino óptico se libera después de una cantidad finita de tiempo. El objetivo del caso dinámico consiste en establecer caminos ópticos y asignar a cada uno una longitud de onda de manera que se minimice la cantidad de conexiones bloqueantes mientras se maximiza el número de conexiones que se puedan establecer en la red. Las conexiones en las redes de enrutamiento por longitud de onda se caracterizan por ser de tipo estático, generando una utilización relativamente pobre de la red debido a su infrecuente reconfiguración y uso dedicado de longitudes de onda, por lo tanto puede no ser capaz de acomodar la naturaleza altamente variable de tráfico a ráfagas de *Internet* de una manera eficiente. Por este motivo, el debate y a la vez el desafío de hoy en día se traduce en cómo suministrar los recursos de red, en particular la frecuencia en la provisión de caminos ópticos, la cual tiene un efecto directo en la gestión de la red y a su vez es totalmente dependiente de la técnica de conmutación óptica utilizada. Por tanto, se deben desarrollar arquitecturas de transporte que ofrezcan una rápida provisión de recursos de red y que operen adecuadamente bajo un comportamiento de tráfico a ráfagas a fin de cumplir con los requerimientos en la demanda de ancho de banda en entornos metropolitanos o de área extensa, estos precisamente son los retos que se plantean en las redes ópticas de tercera generación.

### **Redes ópticas de tercera generación**

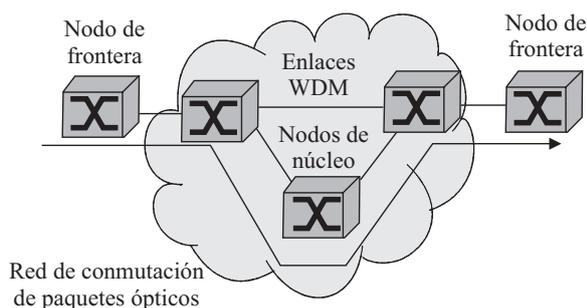
El rápido incremento del tráfico de datos sugiere que las tecnologías completamente ópticas capaces de conmutar a nivel de longitud de onda sean

atractivas para cumplir con las demandas de tráfico y ancho de banda de la siguiente generación de redes. En este sentido, la conmutación de ráfagas ópticas [4] y la conmutación de paquetes ópticos [5] son dos tecnologías prometedoras para el transporte de tráfico directamente sobre redes ópticas WDM.

En la conmutación de ráfagas ópticas los paquetes son concatenados dentro de unidades de transporte referidas como ráfagas, las cuales se enrutan a través de la red de una forma completamente óptica. Esta técnica se basa en una reserva previa de recursos que se realiza a partir de un paquete de control, el cual se envía antes que la ráfaga de datos; de esta forma los nodos de la red se configuran de acuerdo a la información contenida en el paquete de control. La conmutación de ráfagas ópticas permite un mejor aprovechamiento de los recursos y es más apropiada para el manejo del tráfico a ráfagas que las redes de conmutación de circuitos ópticos. Se considera la conmutación de ráfagas como un paso de evolución intermedio entre la conmutación de circuitos ópticos y la conmutación de paquetes ópticos.

La conmutación de paquetes ópticos genera una buena utilización de los recursos de red ya que fácilmente alcanza un alto grado de multiplexación estadística, es completamente compatible con técnicas de ingeniería de tráfico y ofrece una configuración dinámica de los recursos de red con una granularidad muy fina a nivel de paquete. Las redes de conmutación de paquetes ópticos se pueden clasificar en dos categorías, ranuradas o síncronas y no ranuradas o asíncronas [6]. En una red síncrona todos los paquetes deben ser alineados a la entrada del *router* para poder ser procesados, además los paquetes se caracterizan por tener un tamaño fijo y se ubican junto con su encabezado dentro de una ranura de tiempo fija y de tamaño superior al del paquete con el fin de proveer un tiempo de guarda entre paquetes. En una red asíncrona, los paquetes pueden tener el mismo tamaño o pueden tener diferentes tamaños y no necesitan ser alineados a la entrada del *router* para ser procesados. Este hecho incrementa las posibilidades de la existencia de colisiones

ya que el comportamiento de los paquetes es más impredecible y menos regulado ocasionando que en ciertos casos dos o más paquetes con la misma longitud de onda puedan estar compitiendo por el mismo puerto de salida en el mismo instante de tiempo. Por otro lado, las redes asíncronas son relativamente más fáciles y menos costosas de construir además de ser más robustas y más flexibles comparadas con las redes síncronas. Desde el punto de vista de red, en las redes ópticas de tercera generación la conmutación de paquetes ópticos convierte los paquetes IP a paquetes ópticos IP en la entrada de un *router* de frontera siguiendo una topología similar a la presentada en redes MPLS (*MultiProtocol Label Switching*). Desde ese momento la transmisión y el enrutamiento de los paquetes dentro de la red se realizarán en el dominio óptico, asignándose una longitud de onda a cada paquete y realizando el enrutamiento paquete por paquete con tiempos típicos de conmutación del orden de microsegundos. La figura 2 muestra el entorno de red para IP/WDM basado en conmutación de paquetes.



**Figura 2** Entorno de red óptica de tercera generación

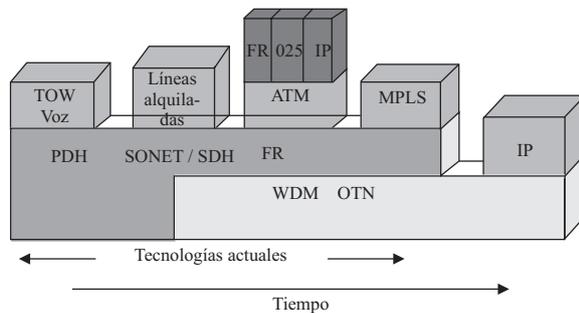
**Discusión sobre la necesidad de una nueva plataforma de transporte de datos**

En la actualidad la mayor parte de las redes de datos ópticas se sustentan en la transmisión de paquetes sobre jerarquías digitales síncronas o plesiócronas tal y como indica la figura 3. Estos sistemas de transmisión idealmente diseñados para el tráfico telefónico no son adecuados para la transmisión de datos, ya que la asignación de

ancho de banda no es flexible y la cantidad del mismo destinado a cabeceras e información para la configuración de protección es muy grande. Además, el encaminamiento de los datos debe hacerse previa demultiplexación de la señal, con lo que cada nodo de la red debe incorporar conversores opto-electrónicos y electro-ópticos que los hace costosos y poco eficaces.

Por otra parte la tecnología WDM permite una gran flexibilidad en cuanto a señalización, monitorización y restauración de red y parece razonable pensar que la evolución lógica de las redes será la de transmitir paquetes IP directamente sobre WDM. Por tanto, esta evolución plantea que las funciones de enrutamiento y conmutación deben realizarse directamente en el dominio óptico, dando lugar a redes transparentes o completamente ópticas, cuya ventaja principal sería la independencia del formato y la tasa binaria. Esto ya se ha conseguido en parte en varias redes de segunda generación basadas en WDM, donde la conmutación y el enrutamiento de señales se realizan en función de la longitud de onda de la señal óptica sin conversión previa al dominio eléctrico. No obstante, este tipo de conmutación, de naturaleza bastante lenta, sólo es válida para el establecimiento de circuitos o rutas de reconfiguración limitada (milisegundos, segundos, minutos, horas, meses, años), por lo que aunque este tipo de redes son un avance sustancial respecto a las redes actuales, el aprovechamiento del ancho de banda que se hace es todavía moderado, aunque mucho mayor que en las redes de primera generación. Así pues, la evolución tiende a la introducción de redes de transporte óptico que conllevaría la simplificación de la actual arquitectura de red IP/ ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*)/WDM hacia una arquitectura IP/WDM. Las funcionalidades de red proporcionadas por las capas eliminadas tienen que asumirse entonces entre la capa cliente (IP) y la capa de transporte (WDM). En este contexto, la tecnología *MultiProtocol Label Switching* (MPLS) aparece como un complemento excelente, capaz de proporcionar las funcionalidades de ingeniería de tráfico y calidad de servicio en la capa cliente, además de un esquema versátil de encaminamiento basado en etiquetas, las cuales

transportan la información de control asociado a cada paquete (destino, tamaño del paquete, prioridad, tiempo de vida, etc.) con el fin de incrementar las funcionalidades y eficiencia de la red [7].



**Figura 3** Evolución de las redes de datos ópticas, situación actual y evolución

Cada etiqueta sólo tiene significado local, es decir, que en cada nodo se debe re-escribir una nueva etiqueta con la información de encaminamiento del paquete óptico para el siguiente nodo. Siendo el protocolo IP por definición un protocolo basado en la conmutación de paquetes, parece evidente que realizar una conmutación óptica a nivel de paquete simplifica notablemente la gestión global de la red.

Por este motivo las técnicas para realizar la transmisión del tráfico IP en redes ópticas se están estudiando activamente, en particular, la investigación y el desarrollo en las técnicas de conmutación de paquetes ópticos para lograr la transmisión de paquetes por medio de procedimientos fotónicos está adquiriendo gran importancia debido a los potenciales beneficios en la velocidad de procesamiento, solidez de la implementación, consumo de potencia de los circuitos electrónicos, etc. Si bien un nodo de conmutación de paquetes ópticos tiene una configuración similar a un *router* convencional (la etiqueta incluye la información correspondiente al destino del paquete, de esta forma los nodos de conmutación de paquetes ópticos pueden colaborar entre sí para crear y actualizar de forma autónoma sus tablas de enrutamiento). Lo que hace interesante al nodo óptico es que el procesamiento de señales en el dominio óptico minimiza la carga de circui-

tos electrónicos, de hecho esta es una de las grandes características de la conmutación de paquetes ópticos, ya que la introducción de procesamiento óptico se traduce en una mejora significativa en la eficiencia de la transferencia de paquetes y el aprovechamiento del ancho de banda utilizado, al evitar los cuellos de botella que se generan con el procesamiento electrónico de paquetes a alta velocidad.

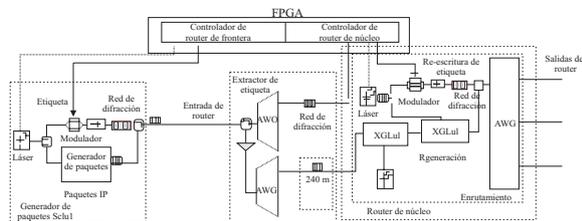
### ***Router de conmutación de paquetes para redes ópticas de tercera generación***

En este apartado se describen los bloques que conforman el router de conmutación de paquetes ópticos propuesto, el cual procesa etiquetas con la información de enrutamiento y que están codificadas en una subportadora óptica en la misma longitud de onda que transporta el paquete IP. Esta técnica de etiquetado se denomina etiquetado con multiplexación de subportadora (SCM) [8]. Los componentes básicos son:

- Extractor de etiqueta: debe extraer del paquete óptico la correspondiente etiqueta.
- Identificador de etiqueta óptica: el cual procesa la información de direccionamiento del paquete, además debe operar a una relativa velocidad alta y se debe poder implementar en circuitos de tamaño reducido a fin de ahorrar consumo de potencia.
- Búfer óptico: es un elemento indispensable para almacenar un paquete en el dominio óptico y evitar incoherencias en el sistema debido al procesamiento electrónico del encabezado.
- Conversores de longitud de onda: un proceso completamente óptico de conversión de longitud de onda en una red de conmutación de paquetes ópticos puede servir para evitar conflictos en el sistema y a la vez utilizar efectivamente las longitudes de onda a la vez que no depende de la tasa de transmisión de la señal ni de su formato.
- Re-escritura de etiqueta: proceso mediante el cual la nueva etiqueta generada se adhiere al paquete IP.

- Elementos de conmutación: permiten trazar la ruta de acuerdo con la información obtenida de las tablas de enrutamiento.

La figura 4 muestra el esquema propuesto del router para redes de tercera generación. En la figura 4 se representa además la arquitectura del generador de paquetes ópticos o nodo de frontera que se definió en la sección 2.3. Hoy en día existe un gran número de componentes que permiten procesar las señales directamente en el dominio óptico.



**Figura 4** Router de conmutación de paquetes ópticos

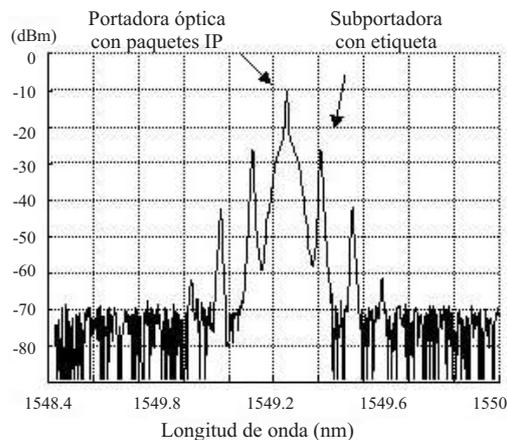
En el caso de la extracción de etiqueta, se pueden utilizar filtros ópticos tales como redes de difracción, interferómetros de *Sagnac* o filtros *Fabry-Perot* los cuales permiten extraer ópticamente la señal de la etiqueta codificada en SCM.

El identificador de etiqueta óptica es el único componente electrónico que posee el router, en general puede implementarse en cualquier tecnología de lógica programable, sin embargo las FPGA (Field Programmable Gate Array) se están consolidando como una tecnología versátil para permitir la implementación del controlador de un *router* óptico dadas sus características de fiabilidad, rapidez, flexibilidad y bajo costo. Los *búfer* o memorias ópticas parecen ser los más difíciles de implementar con la tecnología actualmente disponible. Las líneas de retardo son la única forma de almacenar señales ópticas hoy en día. Por consiguiente, la longitud de la línea de retardo viene de la relación directa entre la velocidad de la luz y el tiempo requerido de almacenamiento. Como resultado los tiempos de almacenamiento son de tipo discreto, ya que es difícil ampliar el tamaño de la línea de retardo para aumentar el tiempo de almacenamiento del paquete. En cuanto a los conversores de

longitud de onda, la mejor opción es utilizar amplificadores ópticos de semiconductor (SOA) ya sea en modulación de ganancia cruzada (XGM) o modulación de fase cruzada (XPM) [9]. Cada una de estas técnicas ofrece distintas prestaciones y el uso de ellas depende en gran parte de los requerimientos del sistema. Finalmente, los elementos de conmutación deben ofrecer un enrutamiento de paquetes transparente al formato y velocidad de la señal, en este contexto los AWG (Arrayed Waveguide Grating) ofrecen unas prestaciones inmejorables de conmutación, ya que son dispositivos pasivos con bajas pérdidas de inserción e insensibles a la polarización de la señal óptica. Una descripción más detallada sobre el funcionamiento del *router* se puede encontrar en [10].

**Prestaciones del router**

La figura 5 muestra el espectro óptico del paquete SCM, la portadora óptica transporta el paquete o conjunto de paquetes IP y la subportadora transporta la etiqueta. Este método de etiquetado permite la extracción de la etiqueta mediante el uso de filtros ópticos ya que las dos informaciones están separadas espectralmente.



**Figura 5** Espectro correspondiente al paquete codificado en SCM

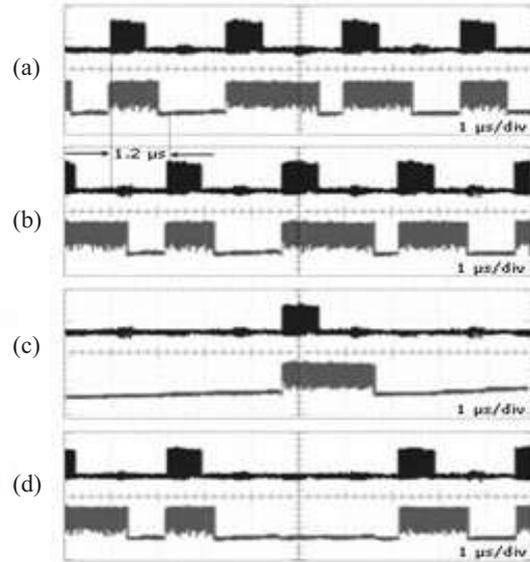
Una de las características más significativas del encaminamiento en IP es la longitud variable de los paquetes transportados. Por este motivo un nodo óptico con la habilidad de encaminar paquetes de longitud variable repercutirá en una

reducción de encabezamientos y procesado al flujo de datos al evitar complejas capas de adaptación y reensamblaje. Bajo este concepto, la multiplexación por subportadora permite superar ciertas limitaciones que se presentan en técnicas de codificación tales como el encapsulamiento serial, debido a la rigurosa sincronización que debe existir entre la etiqueta y señal de carga en redes síncronas o a los problemas de baja relación de extinción de la carga debido a codificaciones ortogonales. De este modo la codificación de etiquetas usando técnicas de subportadora es especialmente interesante ya que permite el diseño de redes de conmutación de paquetes ópticos asíncronas con encaminamiento de paquetes de longitud variable, lo cual es una gran aproximación a las características del protocolo IP.

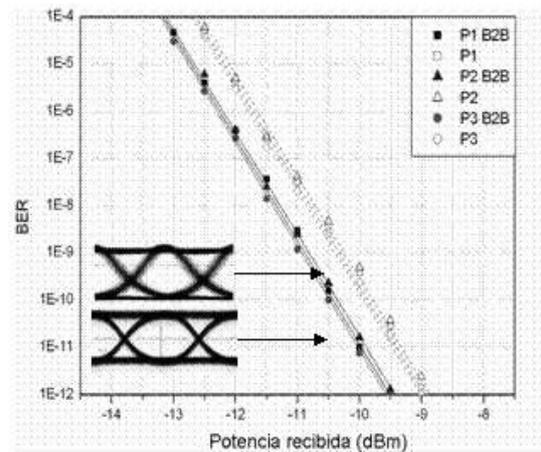
El enrutamiento de paquetes de tamaño variable es posible debido a la incorporación de dicha información en la etiqueta óptica. La información del tamaño del paquete se codifica en 4 bits, brindando la posibilidad de soportar hasta 16 tamaños diferentes de paquetes, no obstante el valor de 4 bits se puede ampliar a fin de permitir una mayor diversidad en el tamaño de los paquetes procesados. La figura 6 muestra dos escenarios de enrutamiento de paquetes de longitud variable. Las trazas superiores representan las etiquetas y las trazas inferiores representan la carga. Para la demostración se han programado 3 tamaños distintos de paquete ( $P1 = 1\mu s$ ,  $P2 = 1.5\mu s$  y  $P3 = 2\mu s$ ). La figura 6 (a) muestra la ráfaga de paquetes con sus correspondientes etiquetas en la entrada del nodo óptico.

La figura 6 (b) muestra la misma ráfaga de paquetes a la salida del nodo, en este caso todos los paquetes tienen la misma información de etiqueta, con lo cual todos los paquetes son extraídos por el mismo puerto de salida del nodo. Las figuras 6(c) y (d) muestran el enrutamiento de paquetes a través de distintos puertos de salida, en este caso el paquete de tamaño superior tiene asignada una etiqueta diferente a la de los demás. La figura 7 muestra los resultados de la tasa de *bits* erróneos (BER) para cada uno de los paquetes procesados y que a fin de permitir una comparación se miden a la salida del generador de paquetes (*Back to Back*) y a la salida del nodo.

Las penalizaciones observadas (alrededor de 0.5 dB) se deben a una limitación impuesta por el ancho de banda del convertidor de longitud de onda basado en XGM, como resultado la relación de extinción de la señal se disminuye causando dichas penalizaciones. Los diagramas de ojo mostrados en la figura 7, revelan una excelente calidad de señal con factores de calidad  $Q > 9$ .



**Figura 6** Escenarios de enrutamiento de paquetes. (a) Paquetes y etiquetas a la entrada del nodo, (b) Paquetes ópticos con la misma etiqueta saliendo por el mismo puerto de salida, (c) y (d) Paquetes con diferentes etiquetas se extraen por distintos puertos del nodo



**Figura 7** Medidas de BER para los paquetes de longitud variable

## Conclusiones

En este artículo se ha descrito de manera puntual la futura evolución de las redes de transporte óptico, así como su estado actual y se ha introducido una discusión sobre la necesidad de desarrollar una nueva plataforma que soporte los requerimientos actuales y futuros de la demanda de ancho de banda. Asimismo, se ha descrito el funcionamiento del *router* para redes ópticas de tercera generación que transporta paquetes IP a 10 Gb/s basado en el intercambio de etiquetas a 155 Mb/s. Se han demostrado sus prestaciones mediante medidas de calidad de señal a la salida del *router*, en los cuales se ha comprobado la correcta operación en términos de la separación de la carga y la etiqueta mediante procesamiento óptico. El procesamiento electrónico de la etiqueta se realiza en 1.2  $\mu$ s, este tiempo incluye la recepción y procesamiento de la información de enrutamiento en la FPGA. Basado en el resultado de este procesamiento, el estado del *router* se actualiza en términos de longitudes de onda y puertos de salida, las etapas de conversión de longitud de onda realizan regeneración 2R sobre cada paquete transmitido a 10 Gb/s, el uso de las dos etapas de conversión en cascada permite la asignación de cualquier longitud de onda de salida.

Asimismo el *router* ha trabajado independientemente con dos canales ofreciendo las mismas prestaciones a cada uno por separado. Por otro lado se han comprobado experimentalmente las prestaciones del nodo en el encaminamiento de paquetes de tamaño variable, el procesamiento de los paquetes se realiza a través de la lectura de la etiqueta la cual incorpora un campo que identifica el tamaño del paquete que se está procesando actualmente.

## Referencias

1. R.C. Alferness, H. Kogelnik, T. H. Wood. "The evolution of optical systems: Optics everywhere". *Bell Labs Technical Journal*. Vol. 5. 2000. pp. 188-202.
2. R. Ramaswami, K. Sivarajan. "Optical Networks: A practical perspective". *Morgan Kaufmann series in Networking*. 2002. pp. 14-16.
3. H. Zang, J. P. Jue, B. Mukherjee. "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks". *SPIE Optical Networks Magazine*. Vol. 1. 2000. pp. 47-60.
4. C. Qiao, M. Yoo. "Optical burst switching (OBS) - a new paradigm for an optical Internet". *Journal of High Speed Networks*. Vol. 8. 1999. pp. 69-84.
5. S. Yao, S. J. B. Yoo, B. Mukherjee, S. Dixit. "All-optical packet switching for metropolitan area networks: Opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*. 2001. Vol. 39. pp. 142-148.
6. S. Dixit. *IP Over WDM: Building the next generation optical Internet*. Wiley-Interscience. New Jersey. 2003. pp 157-162.
7. A. Jourdan, D. Chiaroni, E. Dotaro, G. J. Eilenberger, F. Masetti, M. Renaud. "The perspective of optical packet switching in IP dominant backbone and metropolitan networks". *IEEE Communications Magazine*. Vol. 39. 2001. pp. 136-141.
8. B. Meagher, G. K. Chang, G. Ellinas, Y. M. Lin, W. Xin, T. F. Chen, X. Yang, A. Chowdhury, J. Young, S. J. Yoo, C. Lee, M. Z. Iqbal, T. Robe, H. Dai, Y. J. Chen, W. I. Way, "Design and implementation of ultra-low latency optical label switching for packet-switched WDM networks". *J. Lightwave Technol.* Vol. 18. 2000. pp. 1978-1987.
9. D. J. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri, S. Humphries. "All-optical label swapping with wavelength conversion for WDM-IP networks with subcarrier multiplexed addressing". *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol. 11. 1999. pp. 1497-1499.
10. G. Puerto, B. Ortega, M. D. Manzanedo, A. Martínez, D. Pastor, J. Capmany, G. Kovacs. "Dimensioning of 10 Gbit/s all-optical packet switched networks based on optical label swapping routers with multistage 2R regeneration". *Opt. Express*. Vol. 14. 2006. pp. 10298-1030