

Técnicas de monitorización todo-ópticas para redes de conmutación de paquetes

Vilar Mateo, Ruth

Director: Ramos Pascual, Francisco

Autor: Vilar Mateo, Ruth, email: rutvima@ntc.upv.es

Director : Ramos Pascual, Francisco, email: framos@ntc.upv.es

Fecha de entrega: 06-09-07

Resumen —

El gran crecimiento de la demanda de servicios de telecomunicación en los últimos años ha forzado la necesidad de redes de nueva generación que incrementen la capacidad y las tasas de envío. El uso de *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) ofrece gran ancho de banda a un coste atractivo, pero estas redes sólo ofrecen granularidad a nivel de longitud de onda. Para redes que necesitan proporcionar gran variedad de servicios en un entorno dinámico, se requiere otra tecnología más flexible. La conmutación de paquetes ofrece la flexibilidad y eficiencia de ancho de banda requeridas para este escenario.

Actualmente las redes que están desplegadas se basan en tecnologías WDM. La migración de estas redes hasta las futuras redes de conmutación de paquetes de alta velocidad será gradual y se realizará en varias fases. En esta tesina se han estudiado y propuestos diferentes escenarios de migración que se basan en tecnologías híbridas que combinan distintas capacidades de conmutación.

De todos los caminos de migración definidos, la solución híbrida formada por una red mixta con una capa OCS y otra de AOPS parece que es la más realista y factible. Por tanto, se concluye que sería interesante instalar una arquitectura de red híbrida en la que se implementan una red todo-óptica de conmutación de paquetes y conmutadores ópticos OXCs en dos redes paralelas. Hasta obtener las redes todo-ópticas de conmutación de paquetes, las aplicaciones para esta red híbrida podrían ser servicios de gran ancho de banda y servicios en los que el usuario decidiera establecer caminos ópticos o enviar paquetes mediante longitudes de onda.

Las redes ópticas de conmutación de paquetes se convertirán en la solución para las futuras redes puesto que ofrecen gran capacidad y una alta velocidad, pero si ocurriese un fallo en la fibra conllevaría la pérdida de gran cantidad de datos. Por tanto, la fiabilidad de la red es un aspecto clave para este tipo de redes y las técnicas de monitorización óptica de prestaciones (OPM, *optical performance monitoring*) han suscitado gran interés en los últimos años.

OPM es una herramienta útil para los proveedores de servicios para garantizar a sus usuarios transmisiones con una calidad de la señal determinada. Especialmente en las redes ópticas dinámicas, los formatos de los datos y la tasa de bit deben ser transparentes lo que significa que un camino óptico es capaz de transmitir datos con diferentes formatos y tasas de bit y que las señales ópticas pueden seguir diferentes rutas y atravesar diferentes componentes. Entonces, cada señal óptica tiene su propia historia y calidad. De esta manera, para determinar la “salud” de las señales ópticas, es necesario monitorizar algunos parámetros de la capa física tales como la potencia óptica, la longitud de onda del canal, la relación señal-ruido óptica (OSNR), dispersión cromática, tasa de error de bit (BER), factor-Q, dispersión de polarización (PMD) y *jitter*. Estas técnicas de monitorización proporcionan la capacidad de extender la administración del fallo y la monitorización de la calidad de servicio (QoS) al dominio óptico. En esta tesina se hace un estudio de las aplicaciones y técnicas de OPM existentes en la literatura y se realiza una comparativa entre los distintos métodos, exponiendo sus principales ventajas e inconvenientes.

De entre los parámetros de capa física, esta tesina se centra en la monitorización de BER para determinar la calidad de la señal en las redes ópticas de conmutación de paquetes.

Las técnicas basadas en la medida de BER son las preferidas para la administración de los fallos puesto que ofrecen la misma métrica que la utilizada en los nodos de terminación de la red para analizar la calidad de servicio (QoS). Estas técnicas se basan en el análisis de la información estadística de la señal recibida para determinar la tasa de error por lo que requieren conversiones O/E en los nodos y sus tiempo de respuesta son muy lentos. Así, aunque proporcionan una estimación muy buena de la calidad de la señal, no son las técnicas más adecuadas para las futuras redes de conmutación de paquetes.

Para solventar esta limitación, en esta tesina se propone una técnica que monitoriza la calidad de la señal óptica mediante el uso de un correlador óptico con requerimientos de velocidad menores. Para ello, se inserta un campo de monitorización en la cabecera del paquete óptico el cual se procesa en cada uno de los nodos intermedios mediante un correlador óptico basado en redes de difracción de Bragg. La potencia del pulso de autocorrelación se muestrea y se define una variable estadística llamada P_{decision} que se compara con cierto umbral para decidir si un paquete se enruta o no de acuerdo a los requerimientos de calidad.

Además, se realiza un estudio para determinar los valores más apropiados de algunas variables que influyen en la P_{decision} tales como el número de bits del campo de monitorización y el umbral óptimo de modo que se estime de forma adecuada los valores reales de BER. En las simulaciones, se concluye que con un campo de monitorización de 12 bits y un umbral fijado a la mitad de la potencia de un ‘1’, los valores de BER y de la P_{decision} tienen el mismo orden de magnitud. Por otro lado, también se realiza un estudio de la eficiencia de tráfico que se obtiene con esta técnica. Pero como el porcentaje de descarte de los paquetes no es lo suficientemente eficiente, se introduce una modificación que consiste en replicar varias veces un campo de monitorización de longitud inferior, 2 bits. Con esta mejora, se obtiene una reducción de la carga de tráfico de la red de un 1%.

Abstract —

Due to the tremendous increment of the telecommunication service demand over the last years, it is necessary new networks to increase the bandwidth of them to match the increase in traffic. Nowadays, the wavelength-division multiplexing (WDM) increases the capacity of fiber links by multiplexing many signals at different wavelengths within a single fiber and offering high capacity with low cost. However, the granularity of a WDM light-path network is coarse (granularity of wavelength). For the future dynamically reconfigurable optical transport networks which offer different type of service in a dynamic scenario, other technology more flexible is needed. The optical packet switching (OPS) gives the flexibility and bandwidth efficiency required in these networks.

The current optical networks are based on WDM technology. The migration of these networks towards the future optical packet-switched networks will be gradual and it will perform in various steps. In this work, different migration scenarios based on hybrid technologies which combine different types of switching are proposed.

Among all migration scenarios, the hybrid solution that consists of a mixed network with an OCS layer and other AOPS layer seems the alternative most realistic and feasible. Therefore, it would be interesting to install a hybrid network architecture in which all-optical packet-switches and optical cross connects are installed in parallel networks. Awaiting a full all-optical burst/packet switched network, the applications for this hybrid form of AOB/PS and wavelength-switched networks, would be high bandwidth services and grid of which the customers could decide to set-up lightpaths or send wavelength routed bursts. This parallel hybrid network thus fits exactly in the migration roadmap that was derived from the workshop at NOC and the migration progress towards all-optical burst/packet-switching, LASAGNE, networks.

The advantages of optical networks are high capacity and transmission rates, but when a cable breaks, a lot of gigabits of data are lost. Therefore, the network feasibility is a vital issue for these types of networks and *optical performance monitoring* (OPM) has attracted great interest during the last years due to the progress in optical networking techniques.

Optical performance monitoring will be helpful for carriers to provide guaranteed quality of signal transmission to their users. Especially in dynamic transparent optical networks, data formats and bit rate will be transparent which means that a lightpath will be capable of carrying data with different formats and bit rate, and optical signals may traverse different paths and different optical components. Thus, each optical signal will have its own history and signal quality. To determine the health of optical signals in optical networks, it is necessary to monitor many parameters in physical layer such as optical power or channel wavelength, optical signal-to-noise ratio (OSNR), chromatic dispersion, Q-factor, Bit Error Rate (BER), PMD and time jitter. These advanced monitoring methods have the potential to extend fault management and quality-of-service (QoS) monitoring into the optical domain. In this work, the current OPM applications and techniques are studied and the role of OPM as an enabling technology for advances in high-speed and optically switched networks.

Among the physical layer monitoring parameters, this work focuses on BER monitoring to assess the signal quality in optical packet-switched networks.

The techniques based on BER estimation are the preferred one for fault management, as it is the same metric that is used at each network end-terminal for QoS. These methods are focus on the analysis of statistical information of the signal to determine the error rate and BER measurements require O/E conversions which limit the signal bit rate. Although BER methods give a good estimation of the signal quality, they are not appropriate for the future ultra high-speed transparent optical networks.

To overcome this limitation, a novel technique based on the use of optical pulse correlation with relaxed speed requirements is proposed. A specific data word (monitoring-field) inserted into the packet header is processed by means of an optical correlator based on fibre Bragg gratings. The pulse peak power at the output of this subsystem is then sampled and used as an statistical variable, P_{decision} , to assess the performance of the optical link. The proposed approach is verified in a typical optical packet-switched network, showing that it can be used in collaboration with optical switching devices to take real time decisions about routing or dropping optical packets according to their signal quality, thus contributing to a reduction in the network traffic load.

Moreover, an study about the correct values of different variables that affect to the P_{decision} such as the number of bits of the monitoring-field and the optimum threshold are carried out, concluding that with a 12-bits monitoring-field and a threshold fixed to the half power of one bit at high level, the P_{decision} and the BER have the same order of magnitude. Besides, the traffic efficiency is calculated and in order to increase it a modification of the monitoring-field is introduced. This modification consists of replicate a monitoring-field of 2 bits several times obtaining a reduction in network load around 1%.

ÍNDICE

I. Introducción	6
I.1. Motivaciones.....	6
I.2. Objetivos de la tesina.....	7
I.3. Estructura de la tesina.....	8
I.4. Publicaciones.....	9
II. Evolución de las redes de conmutación ópticas. Escenarios de migración	10
II.1. Redes ópticas de conmutación de paquetes.....	12
II.2. Escenarios de migración propuestos en el workshop organizado por el proyecto LASAGNE	14
II.3. Escenarios de migración propuestos en LASAGNE	16
II.4. Conclusiones de los escenarios de migración.....	20
III. Optical Performance Monitoring	22
III.1. Actuales tecnologías OPM para las redes de conmutación de circuitos	23
III.2. Técnicas OPM avanzadas para las redes ópticas dinámicamente reconfigurables	24
III.3. Comparativa entre las distintas técnicas OPM	26
IV. Monitorización de la calidad de las señales en redes de conmutación de paquetes	26
IV.1. Monitorización de la calidad de la señal a nivel de enlace.....	29
IV.2. Monitorización de la calidad de la señal a nivel de paquete.	30
IV.2.1. Definición del campo de monitorización.....	32
IV.2.2. Circuito de extracción del campo de monitorización.....	33
IV.2.3. Correlador óptico.....	34
IV.2.4. Resultados obtenidos.....	36
IV.2.5. Eficiencia de tráfico.....	40
IV.2.6. Mejora de la eficiencia de tráfico.....	41
IV.3. Conclusiones	41
V. Conclusiones y líneas futuras	42
V.1. Conclusiones	42
V.2. Líneas futuras.....	44

Agradecimientos	46
Referencias	46
Anexos (Publicaciones)	49
“Evolution towards an all-optical switched packet networks: the LASAGNE viewpoint”	42
“Técnicas de detección de fallo y monitorización de la señal en tiempo real en redes ópticas de conmutación de paquetes”	44
“Optical signal quality monitoring in packet-switched networks through optical correlation”	42
“Optical signal quality monitoring using fibre-Bragg-grating-based correlators in optical packet-switched networks”	42
“The design of an all-optical packet-switching network”	42
“Optical performance monitor for packet-switched networks based on optical delay interferometer”	42

I. INTRODUCCIÓN

I.1. MOTIVACIONES

El gran crecimiento de la demanda de servicios de telecomunicaciones en los últimos años ha forzado la necesidad de incrementar la capacidad de los nodos así como la capacidad del enlace para construir redes troncales capaces de manejar gran cantidad de tráfico de Internet. Mientras que el incremento de la capacidad del enlace se puede conseguir fácilmente con la asociación de fibras ópticas, el procesado electrónico de los sistemas actuales limita el incremento de la capacidad del nodo, limitación que motiva la introducción de la tecnología óptica para las redes de conmutación de paquetes.

El aumento de tráfico experimentado en los últimos años junto con el cambio del tipo de tráfico cursado provoca que las futuras redes ópticas necesiten alta escalabilidad, granularidad fina y gran capacidad. La tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) proporciona gran capacidad para la transmisión de datos, pero su granularidad es demasiado gruesa (granularidad a nivel de longitud de onda). Además, el procesado electrónico que se realiza en el interior de los nodos (acceso a las memorias que analizan la cabecera) supone un cuello de botella en la red por lo que el procesado de alta velocidad debe realizarse con tecnologías de procesado óptico. Las redes ópticas de conmutación de paquetes (OPS) ofrecen la escalabilidad, granularidad y flexibilidad requeridas para este tipo de escenarios. Por tanto, las redes OPS basadas en el procesado de una etiqueta óptica y *label swapping* suponen una solución que cumple con todas las premisas deseadas.

Las redes de conmutación de paquetes actuales transportan los paquetes en el dominio óptico, pero convierten la cabecera de los paquetes en el dominio electrónico para extraer la información de encaminamiento. Para las futuras redes es deseable realizar las funciones de la capa de encaminamiento independientemente de la longitud del paquete y de la tasa de bit del *payload*.

All-optical label swapping (AOLS) permite desarrollar este concepto usando etiquetas ópticas para encapsular los paquetes en la capa óptica. Hasta ahora el procesado de las etiquetas se hacía en el dominio eléctrico [1-2], pero el proyecto LASAGNE [3], en el que está encuadrada esta tesina, va un poco más allá proponiendo el procesado tanto del *payload* como el de la etiqueta en el dominio óptico. El proyecto LASAGNE investiga AOLS estudiando, proponiendo y validando el uso de puertas lógicas para implementar las funcionalidades requeridas en los nodos de la red.

Ya se ha dicho que las redes ópticas ofrecen gran capacidad y alta velocidad de transmisión por lo que un fallo en la fibra produce la pérdida de miles de conexiones con la consiguiente pérdida de gran cantidad de datos. Por tanto, la fiabilidad de la red es un aspecto clave en las futuras redes ópticas de conmutación de paquetes y la monitorización óptica de prestaciones (OPM) ha suscitado gran interés en los últimos años.

OPM es una herramienta útil para los proveedores de servicios para garantizar a sus usuarios transmisiones con una calidad de la señal determinada. Especialmente en las redes ópticas dinámicas, los formatos de los datos y la tasa de bit deben ser transparentes lo que significa que un camino óptico es capaz de transmitir datos con diferentes formatos y tasas de bit y que las señales ópticas pueden seguir diferentes rutas y atravesar diferentes componentes. Entonces, cada señal óptica tiene su propia historia y calidad. De esta manera, para determinar la “salud” de las señales ópticas, es necesario monitorizar algunos parámetros de la capa física tales como la potencia óptica [4-5], la longitud de onda del canal [6], la relación señal-ruido óptica (OSNR) [7-9], dispersión cromática [10-12], tasa de error de bit (BER) [13-14], factor-Q [15-16], dispersión de polarización (PMD) [17] y *jitter* [18].

De entre los parámetros de capa física, esta tesina se centra en la monitorización de BER para determinar la calidad de la señal en las redes ópticas de conmutación de paquetes.

Las técnicas basadas en la medida de BER son las preferidas para la administración de los fallos puesto que ofrecen la misma métrica que la utilizada en los nodos de terminación de la red para analizar la calidad de servicio (QoS). Estas técnicas se basan en el análisis de la información estadística de la señal recibida para determinar la tasa de error por lo que requieren conversiones O/E en los nodos y sus tiempo de respuesta son muy lentos. Así, aunque proporcionan una estimación muy buena de la calidad de la señal, no son las técnicas más adecuadas para las futuras redes de conmutación de paquetes.

Para solventar esta limitación, en esta tesina se propone una técnica que monitoriza la calidad de la señal óptica mediante el uso de un correlador óptico. Para ello, se introduce una palabra específica, campo de monitorización, dentro de la cabecera óptica la cual se procesa dentro de los nodos. El pulso de salida del correlador, pulso de autocorrelación, se muestrea y con la ayuda de una variable estadística, P_{decision} , se decide si el paquete se encamina o no de acuerdo a su calidad. Esta funcionalidad permite reducir la carga de la red. De hecho, en esta tesina se realiza un análisis de la eficiencia de tráfico de esta técnica.

A continuación, se exponen los principales objetivos tratados en esta tesina y finalmente, se explica cómo se han estructurado los diferentes apartados y se enumeran las publicaciones a las que ha dado lugar.

1.2. OBJETIVOS DE LA TESINA

El tema principal de esta tesina es la monitorización óptica de prestaciones (OPM, *optical performance monitoring*). Para ello, primero se hace un estudio sobre el estado del arte de las diferentes técnicas OPM presentes en la literatura para, posteriormente, desarrollar una nueva técnica de monitorización de la calidad de la señal para redes OPS, concretamente, para la red LASAGNE.

Pero, aparte de este aspecto, en esta tesina también se ha trabajado en la definición de escenarios de migración desde las redes actuales de conmutación de circuitos hacia las futuras redes de alta velocidad.

Los principales objetivos tratados han sido los siguientes:

- **Definición de escenarios de migración hacia redes ópticas de conmutación de paquetes.**

Como el camino que hay que recorrer hasta el despliegue de las redes ópticas de conmutación de paquetes es muy largo, hay que definir escenarios de migración factibles y realistas teniendo en cuenta la tecnología disponible. Para ello, se definen varias tecnologías híbridas para buscar la solución más adecuada.

- **Estudio del estado del arte de las técnicas de OPM.**

Antes de proponer una técnica de monitorización de la calidad para las redes de conmutación de paquetes, hay que realizar un estudio de las técnicas existentes de modo que se decida el parámetro de la capa física a medir, en este caso, el BER, y se diseñe un mecanismo que solvete las limitaciones de las técnicas estudiadas.

- **Propuesta de una nueva técnica para la monitorización de la calidad de la señal.**

Dentro de este objetivo, se propone una técnica que alivia los requerimientos de velocidad que limitan la utilidad de las técnicas actuales basadas en la estimación de BER. Para ello, se debe definir un campo que se introduce en la cabecera, campo de monitorización, que contiene información útil para la medida de la calidad de la señal. Además, se define una variable estadística, $P_{\text{decisión}}$, y se hace un estudio sobre varias variables que afectan a la fiabilidad de la medida.

- **Diseñar un sistema que además de monitorizar la calidad permita tomar decisiones de encaminamiento en tiempo real**

Al obtener la medida en tiempo real, los nodos intermedios disponen de información para encaminar el paquete en función de su calidad. Este aspecto es muy importante porque permite reaccionar rápidamente ante cambios ocurridos en la red.

- **Estudio de la eficiencia de tráfico de la técnica propuesta.**

Como la técnica además de monitorizar la calidad del paquete, toma decisiones de encaminamiento en tiempo real, se puede reducir la carga de la red al descartar los paquetes que no cumplen con los requerimientos de calidad. Por tanto, hay que evaluar esa eficiencia de tráfico.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESINA

La tesina se estructura en los siguientes capítulos:

El capítulo 1 da una introducción acerca de las motivaciones que han conducido a trabajar en este campo y resume los principales objetivos tratados.

El capítulo 2 se centra en la definición de escenarios de migración desde las actuales redes de conmutación de circuitos hacia las futuras redes ópticas de conmutación de paquetes. Se exponen los escenarios de migración discutidos durante un workshop organizado dentro del proyecto LASAGNE y los propios escenarios definidos en el mencionado proyecto. Al final del capítulo, se detalla la solución más apropiada que consiste en una red híbrida OCS y OPS.

El capítulo 3 pone de manifiesto la necesidad de técnicas de monitorización óptica de prestaciones avanzadas para las redes de nueva generación. Se analizan los distintos parámetros de la capa física que se utilizan para la medida de la calidad de la señal y se hace un repaso sobre las distintas técnicas de monitorización presentes en la literatura.

El capítulo 4 introduce la técnica de monitorización propuesta en esta tesina. Al principio del capítulo se explica porqué se elige el parámetro de BER para estimar la calidad y se presenta la arquitectura del sistema de monitorización propuesto que solventa las limitaciones de las técnicas de BER existentes. Una vez explicado el principio de funcionamiento del método, se define el campo de monitorización y la variable estadística, variables que afectan a la fiabilidad de la medida. Por ello, se hace un estudio de ambas variables para conseguir estimaciones fiables. Por último, se analiza la eficiencia de tráfico que proporciona esta técnica y se introduce una ligera modificación con el objetivo de mejorar la reducción de la carga de tráfico obtenida antes.

Finalmente, el capítulo 5 resume las principales conclusiones y las posibles líneas futuras de investigación en el marco de la temática de esta tesina.

1.4. PUBLICACIONES

El trabajo realizado en esta tesina ha dado lugar a las siguientes publicaciones:

- R. Van Caenegem, D. Roccato and R. Vilar, “Evolution towards an all-optical switched packet networks: the LASAGNE viewpoint”, 11th European Conference on networks and Optical Communications, Berlín 2006. (ISBN: 3-923613-40)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Técnicas de detección de fallo y monitorización de la señal en tiempo real en redes ópticas de conmutación de paquetes”, Telecom I+D, Madrid 2006. (ISBN: 84-690-4355-4)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Optical signal quality monitoring in packet-switched networks through optical correlation”, 12th European Conference on networks and Optical Communications, Estocolmo 2007. (ISBN: 978-91-633-0869-7)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Optical signal quality monitoring using fibre-Bragg-grating-based correlators in optical packet-switched networks”, ECOC 2007

- R. Van Caenegem, D. Roccatto and R. Vilar, “The design of an all-optical packet-switching network”, IEEE Communication Magazine (Aceptado, pero pendiente de publicarse)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Martí, “Optical performance monitor for packet-switched networks based on optical delay interferometer”, Conference BroadBand Europe, Dec. 2007 (Pendiente de confirmación)

II. EVOLUCIÓN DE LAS REDES DE CONMUTACIÓN ÓPTICAS. ESCENARIOS DE MIGRACIÓN.

El tremendo crecimiento de Internet y del *World Wide Web* en la última década, en términos de número de usuarios y de ancho de banda por usuario, ha supuesto un aumento del tráfico en las redes de telecomunicaciones. En los Estados Unidos, el crecimiento del tráfico de Internet se ha estimado en un 100% por año y esta misma tendencia se observa en el resto del mundo [19]. Además, el significativo cambio del tipo de tráfico cursado en las redes (de la voz a los datos) y el despliegue de nuevos servicios como video bajo demanda, video-teleconferencia, servicios multimedia, etc, también han contribuido al incremento de tráfico en las redes de banda ancha. Por tanto, estas nuevas necesidades exigen redes de alta capacidad y fiables para poder hacer frente a los futuros requerimientos de ancho de banda.

Las tecnologías de transmisión y conmutación ópticas basadas en la multiplexación por división en longitud de onda (WDM, *Wavelength-division-multiplexing*) fueron desplegadas a finales de la década de los 90s para acomodar el crecimiento exponencial de las demandas de capacidad. Esta primera fase se centró en el incremento de la capacidad del enlace punto a punto.

Dado que la tecnología de transmisión WDM punto a punto está muy madura y la tecnología de conmutación óptica continúa evolucionando a un buen ritmo, el resultado ha sido la creación de redes ópticas opacas. Recientemente, han emergido dos tendencias en el diseño y despliegue de las redes WDM. La primera tendencia es incrementar la transparencia de la red de modo que se eliminen los cuellos de botella debido a las conversiones opto-electrónicas. La segunda tendencia consiste en conseguir redes ópticas reconfigurables de modo que el ancho de banda se administre en tiempo real entre usuarios finales para gestionar los cambios dinámicos en las demandas de tráfico. Estas tendencias reflejan la visión de una futura red en la que la tecnología de conmutación óptica juega el papel principal.

La migración de las funciones de conmutación del dominio electrónico al dominio óptico será gradual y se realizará en varias fases. La primera fase consiste en redes de encaminamiento de longitud de onda que ofrecen servicios de conmutación de circuitos con una granularidad de longitud de onda. Debido a la naturaleza de la conmutación de circuitos, estas redes se pueden implementar con tecnologías de conmutación ópticas disponibles comercialmente, tales como

cross-connects (OXC), las cuales tienen tiempos de configuración del orden de milisegundos. Aunque el encaminamiento de longitud de onda representa un paso muy importante para llegar al *networking* óptico, transparente y reconfigurable, los circuitos ópticos son ineficientes puesto que no realizan multiplexación estadística del tráfico y además, no se comportan bien con la filosofía de conmutación de paquetes de Internet.

La siguiente fase en la evolución de la conmutación se centra en la conmutación óptica de ráfagas (OBS, *Optical Burst Switching*) [20-21]. Como este paradigma de conmutación minimiza las necesidades de procesamiento de la cabecera y el *buffering* en los nodos intermedios, OBS se ha convertido en una solución prometedora para soportar una granularidad de conmutación más fina en el dominio óptico. Como la unidad de transmisión y conmutación es la ráfaga (agregación de un flujo de paquetes ópticos), OBS es más eficiente que la conmutación de circuitos cuando el volumen de tráfico no consume toda una longitud de onda. La tecnología OBS está todavía en estado de investigación y experimentación, pero se espera que sea una realidad en los próximos años.

En último término, la conmutación de paquetes (OPS, *Optical Packet Switching*) [22-24] promete una transmisión y conmutación con la granularidad más fina mejorando la eficiencia de tráfico y es una solución especialmente atractiva desde el punto de vista del tipo de tráfico que predomina en las redes (tráfico IP).

Las ventajas de OPS y OBS frente a OCS se centran en la mayor utilización de la red y en el soporte de servicios con tráfico basado en ráfagas. Además, el beneficio de usar conmutadores todo-ópticos en OPS y OBS redundará en la reducción de los requerimientos de potencia y tamaño.

La Fig 1 muestra la evolución de las redes ópticas desde las primeras redes WDM punto a punto hasta redes en las que se permite la conmutación a nivel de ráfaga y paquetes mediante los routers OPS/OBS.

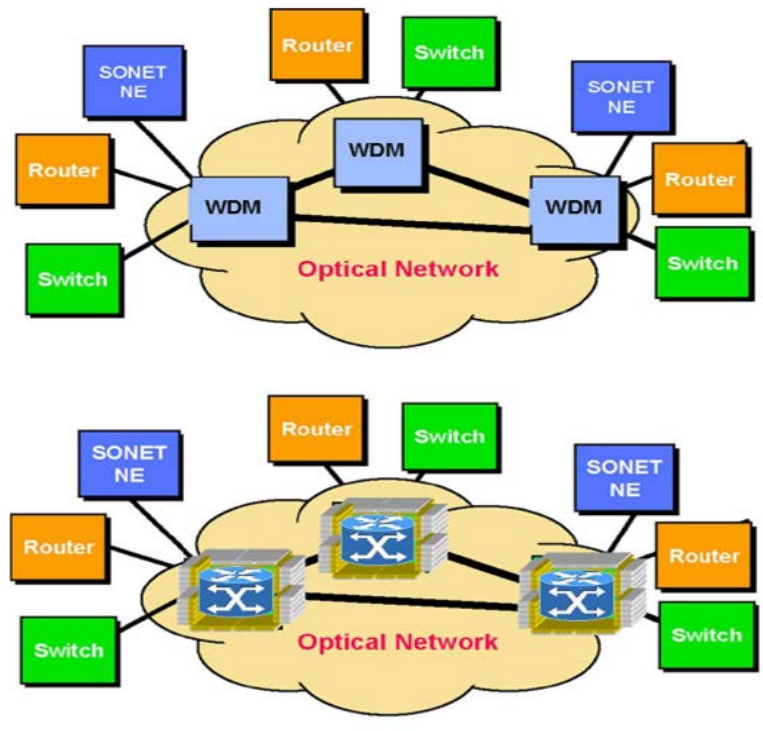


Fig 1. a) Red óptica WDM punto a punto; b) Red óptica con nodos OPS/OBS

Esta tesina se centra en la tecnología de conmutación óptica de paquetes puesto que es éste el escenario sobre el que se desarrolla el proyecto LASAGNE, proyecto en el que se encuadra este trabajo.

II.1. REDES ÓPTICAS DE CONMUTACIÓN DE PAQUETES

Las redes ópticas de conmutación de paquetes ofrecen la flexibilidad y eficiencia requeridas para las futuras redes ópticas además de permitir el encaminamiento de paquetes simultáneamente con el establecimiento de los caminos ópticos. Así, OPS es el puente entre la capa *Internet/Multiprotocol Label Switching (IP/MPLS)* y la capa WDM ofreciendo alta velocidad de datos, transparencia al formato de datos y configurabilidad.

La Fig 2 ilustra una red óptica de conmutación de paquetes. Un paquete óptico está formado por una cabecera y un *payload*. La cabecera contiene información de encaminamiento y otra información de control. El *payload* son los datos que se quieren transmitir. La cabecera tiene que ser procesada en cada nodo de conmutación para poder encaminar el paquete correctamente.

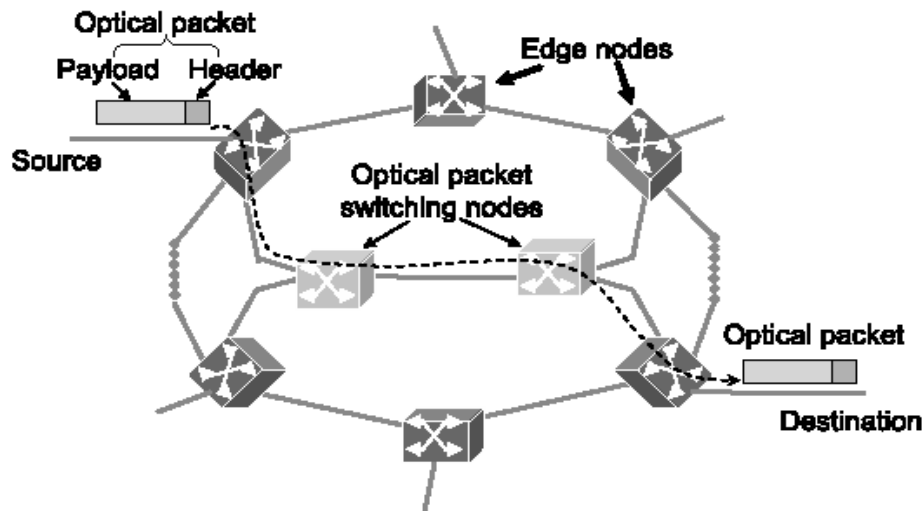


Fig 2. Red óptica de conmutación de paquetes

Los paquetes ópticos se transmiten a su destino a través de la red OPS. En la Fig 2 el paquete óptico se transmite a lo largo del camino marcado con línea discontinua. Al contrario que en la conmutación de circuitos, la conmutación de paquetes no necesita establecer una conexión antes de realizar la transmisión ya que el paquete se envía salto a salto en base a la información de encaminamiento presente en su cabecera. El acceso a la red OPS se realiza a través de los nodos situados en los bordes de la red (*edge nodes*). Los nodos de conmutación de paquetes deben incorporar un número de funcionalidades, algunas de las cuales se realizan en el dominio electrónico mientras que otras procesan la señal en el dominio óptico.

Actualmente, hay un gran número de propuestas y demostradores de redes ópticas de conmutación de paquetes [25-27] en donde la conmutación se realiza en el dominio óptico mientras que la electrónica juega un importante papel a la hora de realizar el procesado de la cabecera y los controles de la conmutación y el *buffering*. Por tanto, hasta la fecha, el procesado de la cabecera se ha hecho electrónicamente, pero para proporcionar completa transparencia y velocidades de encaminamiento más altas es necesario ampliar esta funcionalidad al dominio óptico. Dentro de este escenario se encuadra el proyecto LASAGNE.

El escenario de actuación del proyecto LASAGNE consiste en una red todo-óptica de conmutación de paquetes en la que la “inteligencia requerida” para leer las etiquetas y para el reenvío de los paquetes se implementan en la capa óptica del nodo y es ahí donde reside la principal diferencia con respecto a otros proyectos paralelos en el campo de la conmutación de paquetes y las ventajas de esta solución son que se evita realizar costosas conversiones O/E/O y que se consiguen altos grados de transparencia en la red [28].

Como esta solución es a muy largo plazo, es necesario definir unos escenarios de migración que permitan pasar de las soluciones actuales basadas en conmutación de circuitos a una solución basada en conmutación de paquetes, y finalmente, a un escenario todo óptico.

A continuación, se exponen los escenarios de migración propuestos en el proyecto LASAGNE y los propuestos durante un *workshop* organizado por el proyecto LASAGNE en el Instituto de *Fraunhofer for Telecommunications Heinrich-Hertz* (Berlín, julio de 2006).

II.2. ESCENARIOS DE MIGRACIÓN PROPUESTOS EN EL WORKSHOP ORGANIZADO POR EL PROYECTO LASAGNE

El *workshop* organizado dentro del proyecto LASAGNE estuvo centrado en la migración de servicios y aplicaciones y en las estrategias y tecnologías de migración para llegar a las futuras redes de alta velocidad.

El resumen general de este *workshop* es que las actuales topologías y arquitecturas no son suficientes para soportar las nuevas aplicaciones y servicios desarrollados. Los servicios intensivos en ancho de banda (p. ej. video y aplicaciones de TV) conducen a un crecimiento significativo del volumen de tráfico. Junto con los exigentes requerimientos de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*), este crecimiento del ancho de banda insiste en la reforma de las actuales arquitecturas de red. El problema es que no están muy claro cuáles son los requerimientos finales: no se sabe si el usuario demandará tráfico *unicast* o bien, la mayoría de los nuevos servicios consistirán en conexiones *multicast* o *broadcast*. Debido a la naturaleza dinámica de los nuevos servicios, es probable que se necesite organizar la demanda de ancho de banda, disminuir el sobredimensionado de las redes actuales y, por tanto, mejorar la funcionalidad de la red.

Estas nuevas arquitecturas deben proporcionar un acceso fácil y deben ser escalables, flexibles y centradas en el usuario. Esto significa que el modelo de red debe adaptarse a las nuevas aplicaciones. La solución final propuesta utilizará unos routers híbridos OCS/OBS/OPS, nodos de conmutación óptica activos y protocolos avanzados para proporcionar una infraestructura de red óptica orientada a la conexión para migrar hacia aplicaciones intensivas en ancho de banda. En estas redes se necesitará alguna interfaz en los nodos periféricos que trasladen los requerimientos de los servicios individuales en parámetros conocidos y usados por la red.

El camino que hay que seguir hasta llegar a estas nuevas redes es costoso por lo que se deben definir arquitecturas de red híbridas que faciliten esta migración. Durante este *workshop* se propusieron diferentes estrategias de migración. A continuación se resumen sus principales características:

- **G. 709 Frame Switching** [29]:
 - Aproximación opto-electrónica para conmutación de circuitos y ráfagas en el mismo nodo
 - Reducción del procesado para tráfico de paquetes

- Nueva funcionalidad de capa 2: conmutación transparente del tráfico, protección, restauración y QoS
- Buena escalabilidad hacia las futuras redes de alta velocidad
- **WR-OBS (Wavelength Routed – Optical Burst Switching) [30]:**
 - Encaminamiento de ráfagas basado en la longitud de onda
 - Control centralizado del nodo empleando un algoritmo de reserva ‘two-way’
- **APSON (Adaptive Path Switched Optical Network):**
 - Combinación de la conmutación de longitudes de onda con encaminamiento de ráfagas
 - Control centralizado del nodo empleando un algoritmo de reserva ‘two-way’
 - Se mantienen establecidos los caminos después de transmitir la ráfaga; se pueden enviar paquetes entre ráfagas
- **ORION (Overspill Routing in Optical Networks) [31]:**
 - Combinación de la conmutación de circuitos y paquetes
 - Los paquetes se envían sobre los circuitos ópticos establecidos
 - La sobrecarga de un circuito se evita insertando los paquetes en otro circuito.

La Fig 3 ilustra el estado y la evolución de las estrategias de migración. La parte superior de las barras muestra la fecha del despliegue, la parte intermedia el estado del producto y la parte inferior, el estado de la investigación y los demostradores en los laboratorios. Las dos barras de la izquierda no son realmente escenarios híbridos, pero pueden verse como escenarios de migración; estos informan sobre la provisión de los caminos ópticos estáticos y dinámicos en la red.

De la figura se puede esperar que la introducción del establecimiento de los caminos ópticos dinámicos se produzca en el año 2008. Este es el primer paso en la dirección hacia la provisión de servicios dinámicos. Desde luego, se deben realizar más investigaciones acerca de las arquitecturas de red totalmente flexibles mencionadas anteriormente. Estas propuestas sólo son escenarios de migración intermedios.

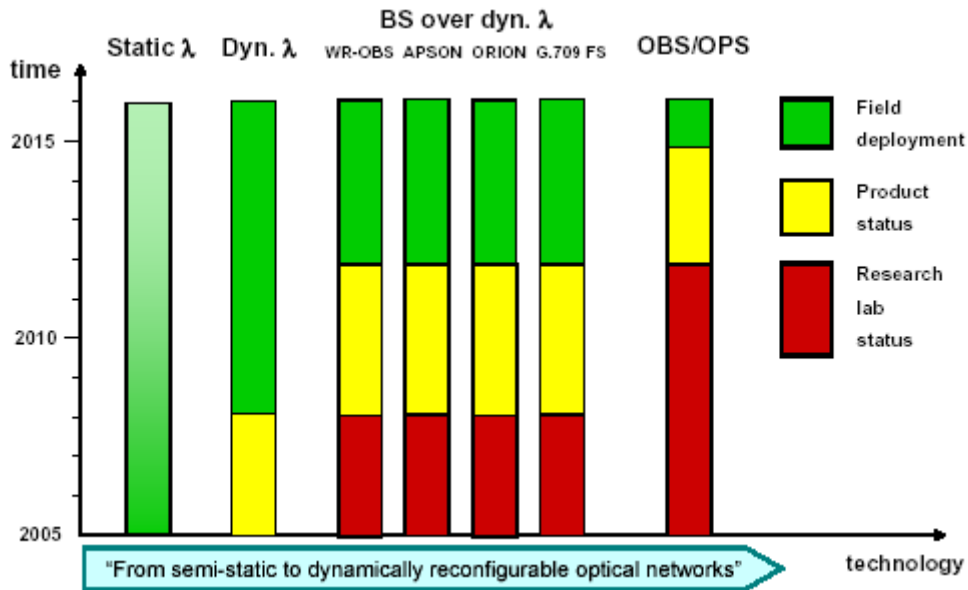


Fig 3. Evolución de las estrategias de migración. Fuente: LASAGNE workshop, NOC 2006

Además, la Fig 3 espera la misma evolución de los diferentes escenarios híbridos y se considera que se podrán desplegar a partir de 2012. Finalmente, se espera con cierto optimismo que el despliegue de las redes OBS/OPS se consiga como pronto en 2015.

II.3. ESCENARIOS DE MIGRACIÓN PROPUESTOS EN LASAGNE

Como se ha comentado anteriormente, el escenario de actuación del proyecto LASAGNE es una red óptica de conmutación de paquetes en la que tanto el procesamiento de los paquetes como el de las etiquetas se realizan en el dominio óptico. Pero, a pesar de los esfuerzos realizados dentro del campo del networking todo-óptico y los progresos hechos hacia el diseño adecuado de un router todo-óptico, conseguir una red todo-óptica se considera todavía algo lejano. Por tanto, el primer paso que hay que dar es definir un camino de migración desde las actuales tecnologías de networking hacia una red de conmutación de paquetes todo-óptica. Qué estrategias de migración deben seguirse o cómo serán las redes futuras dependerá de los requerimientos exigidos por los servicios de usuario, las técnicas de *disaster recovery*, etc. Por esta razón, en el proyecto LASAGNE se definieron varios escenarios de migración utilizando soluciones híbridas OCS/OPS [32].

A continuación se explican en detalle los caminos de migración que fueron estudiados.

- **Nodo a Nodo:** La migración desde las redes existentes actualmente hacia las redes todo-ópticas de conmutación de paquete que sigue esta estrategia implica el reemplazo gradual de los nodos originales por los nodos todo-ópticos. Ambos nodos coexisten y la red intermedia se considera una red óptica híbrida con varias tecnologías en paralelo. Dentro de esta estrategia, se pueden distinguir dos escenarios:

- La introducción de nodos OPS en una red OCS. Esta red está formada por dos tipos de nodos: conmutadores ópticos (OXC, *Optical Cross-Connects*) y nodos OPS con una habilidad OXC subyacente. Sustituir un único conmutador óptico en la red OCS por un nodo OPS no tiene sentido puesto que se necesitaría ensamblar un paquete óptico y volverlo a desensamblar. Por esta razón, en este escenario se considera que un conjunto de nodos OPS se dispersan por la red. Por tanto, se tiene una red que maneja longitudes de onda y paquetes simultáneamente por lo que se incrementa la granularidad. Como en este tipo de red se transportan diferentes tipos de tráfico (SDH/SONET, IP, paquetes,...), para garantizar la migración, los nodos OPS deben ser capaces de conmutar transparentemente el tráfico que no es de paquetes. Esto significa que hay un nodo OPS con capacidad de OXC de modo que cuando llega un paquete, el nodo utiliza la etiqueta entrante para enrutarlo, mientras que cuando no es tráfico de paquetes, se usa la longitud de onda de entrada. Además, se necesita una interfaz para que se envíen los paquetes, al nodo OPS y el otro tipo de tráfico, al OXC. Una manera de conseguirlo es utilizar las longitudes de onda para diferenciar los diferentes tráficos, es decir, cada longitud de onda está asociada a un tipo de tráfico determinado (Fig 4).

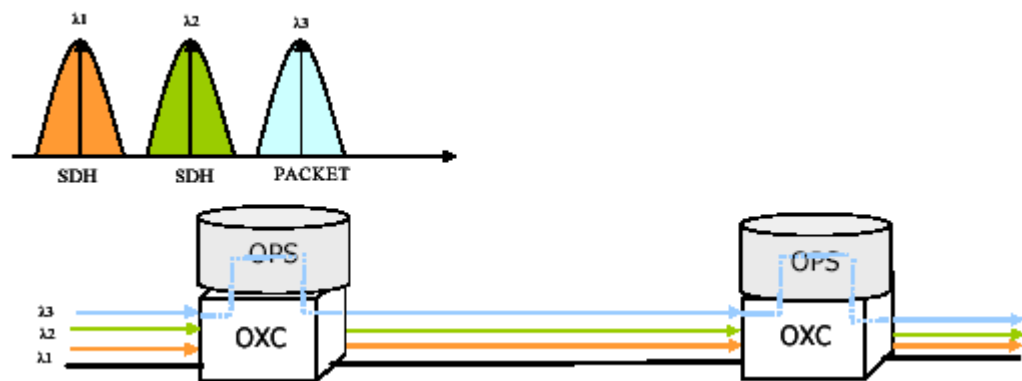


Fig 4. Funcionalidad de un nodo OPS con un OXC subyacente

- Estrategia basada en la introducción de los nodos de LASAGNE: En una red de conmutación de paquetes se introducen los nodos diseñados en LASAGNE. La única diferencia entre los dos tipos de nodos es que los nodos de LASAGNE realizan el procesamiento de la etiqueta en el dominio óptico, pero la filosofía es la misma.
- **Basado en la introducción de islas de otro tipo de nodos:** Este escenario es una extensión de la estrategia de migración anterior. En este caso, se introducen múltiples nodos, que forman una sub-red, en la arquitectura de red existente. Al igual que antes, se distinguen dos escenarios:

- Isla basada en nodos OPS: Este escenario está formado por una red OCS con conmutadores ópticos en la que se introduce una sub-red de nodos OPS. Para garantizar la migración hacia las redes de conmutación de paquetes, hay que añadir hardware adicional en los nodos periféricos para formar la interfaz correcta con la red OCS. De esta manera, en los nodos periféricos de la red de conmutación de paquetes el tráfico de datos debe ensamblarse en el *payload* de los paquetes ópticos. Además, hay que definir un proceso de mapeado en el que una longitud de onda se asocia a una etiqueta y viceversa (Fig 5). Dentro de la red OPS, la etiqueta se usa para obtener la etiqueta y longitud de onda de salida adecuada para alcanzar el destino deseado.

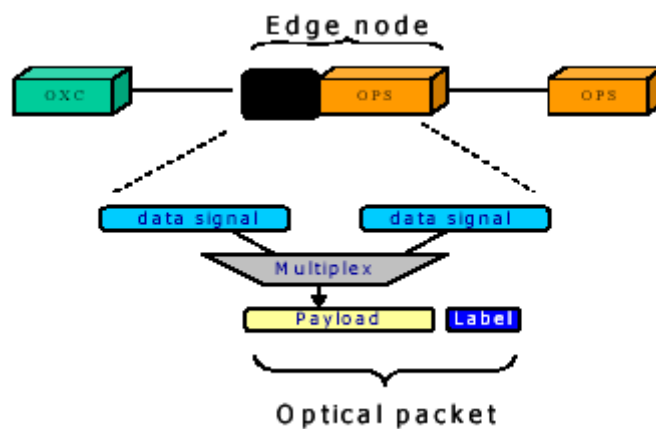


Fig 5. Proceso de mapeado en los nodos periféricos

- Isla basada en los nodos de LASAGNE: Este escenario está formado por una red de conmutación de paquetes en la que se ha introducido una sub-red con nodos de LASAGNE. La única diferencia entre los nodos OPS y los nodos de LASAGNE es la forma de procesar la etiqueta.
- **Red híbrida con tecnología OCS y OPS/All-optical OPS:** Este escenario de migración está basado en dos capas de red y forma una red óptica híbrida cliente-servidor. La capa de circuitos óptica original todavía existe pero a la arquitectura de red se le añade una capa de paquetes óptica. Los nodos de conmutación de paquetes están conectados usando circuitos WDM proporcionados por la capa de circuitos. Incluso si la red OPS/AOPS puede llevar cualquier tipo de tráfico, la conexión del equipo cliente con los nodos periféricos OPS/AOPS necesita cierto tiempo para evolucionar y definir la política de migración. Durante esta fase de transición, algunos clientes pueden usar la red OPS mientras que otros todavía están conectados a través de red de circuitos (Fig 6).

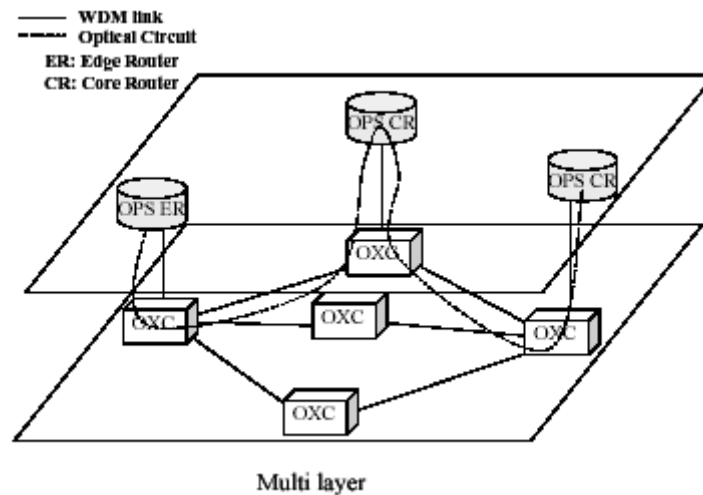


Fig 6. Escenario de migración mixto (OCS/OPS)

- **ORION** [31]: Es una arquitectura de red híbrida en la que OPS y OCS usan simultáneamente las mismas longitudes de onda. Con esta filosofía se mejora el uso de la capacidad de la fibra disponible y la pérdida de paquetes. Esta arquitectura se basa en una red WDM de conmutación de longitud de onda en la que se han establecidos varios caminos ópticos. En una red de conmutación de circuitos convencional, cada camino óptico pasa transparentemente por los nodos de la red. El problema básico ocurre en el siguiente escenario: cuando se consume completamente la capacidad de un camino óptico y hay temporalmente una sobrecarga de la conexión, otra longitud de onda no podría ser usada para llevar este tráfico. Las redes WDM de conmutación de longitud de onda no pueden solucionar este tipo de situación ya que exigirían una reconfiguración de la red. Sin embargo, ORION permite utilizar la capacidad que no está siendo utilizada en otras longitudes de onda para transmitir la sobrecarga de tráfico de una conexión conmutando al modo '*overspill*' el cual esencialmente significa que la red opera como una red punto a punto. Esto es, consiste en hacer uso de los periodos vacíos en los circuitos WDM para insertar paquetes ópticos. Este es un ejemplo de una red óptica con multitecnología integrada, OPS y OCS, que hace uso de las mismas longitudes de onda (Fig 7).

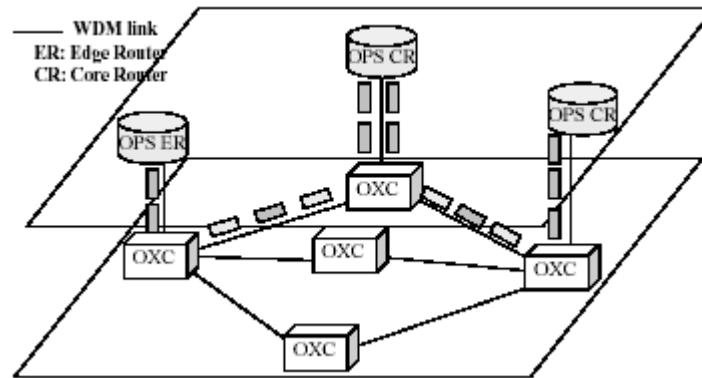


Fig 7. ORION

II.4. CONCLUSIONES DE LOS ESCENARIOS DE MIGRACIÓN

El objetivo principal de esta sección es definir los escenarios de migración desde las redes actuales hacia las redes todo-ópticas de conmutación de paquetes. De los distintos escenarios propuestos la solución híbrida formada por una red mixta con una capa OCS y otra de AOPS parece que es la más realista y factible. Por tanto, sería interesante instalar una arquitectura de red híbrida en la que se implementan una red todo-óptica de conmutación de paquetes y conmutadores ópticos OXC en dos redes paralelas.

Un nodo periférico inteligente emplea las dos tecnologías de red individualmente o conjuntamente para satisfacer los requerimientos de los usuarios de la mejor manera posible. Las redes ópticas virtuales (VON, *Virtual Optical Networks*) y las redes ópticas multiservicio polimórficas (PMON, *Polymorphic multi-service optical networks*) son posibles ejemplos de esta clase de redes híbridas [33-35]. En estas redes se combinan los servicios de transporte de conmutación de longitud de onda con servicios dinámicos de conmutación de paquetes. Los nodos periféricos eligen una tecnología de red basada en los requerimientos explícitos de los usuarios, en las características del tráfico, en la duración del flujo o en requerimientos de calidad de servicio.

La Fig 8 ilustra la arquitectura de red híbrida con los nodos periféricos seleccionando la red de transporte entre las dos redes ópticas mencionadas. Aquí, el tráfico IP puede ser transportado mediante un paquete óptico, o bien, en una trama continua dentro de un circuito óptico. Los recursos para la transmisión y la conmutación pueden ser dedicados o compartidos entre las diferentes tecnologías. En ambos casos, la asignación de recursos puede ser estática o dinámica.

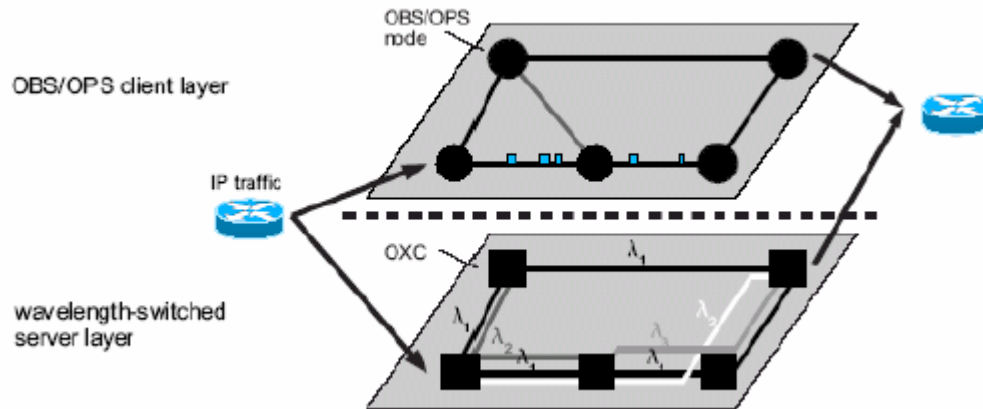


Fig 8. Red todo-óptica híbrida

En esta figura se utilizan recursos dedicados para la conmutación y el transporte. Alternativamente, los recursos para la transmisión pueden compartirse mientras que se mantiene independiente la conmutación, o bien, tanto los recursos para la transmisión como para la conmutación pueden estar completamente compartidos.

Mientras que la compartición de recursos mejora su utilización debido a la multiplexación estadística, el equipamiento de la conmutación y de la transmisión debe cumplir los requerimientos de la tecnología más exigente. Por ejemplo, un conmutador integrado para la conmutación híbrida de AOPS y OCS requiere una tecnología de conmutación más rápida, una lógica de control más sofisticada y una interfaz de AOPS a pesar de que los servicios de conmutación de longitud de onda pueden ser implementados con una tecnología menos compleja y menos costosa. Por tanto, hay un *trade-off* entre la compartición de recursos y la complejidad de la implementación.

En definitiva, el escenario de migración propuesto será una red híbrida formada por una pequeña red AOPS y una red de conmutación de longitud de onda más grande. La optimización del transporte de tráfico se consigue en las capas superiores de la red. La instalación de ingeniería de tráfico y agregación permite producir menos tráfico de tipo ráfaga y minimizar las fluctuaciones lo que facilita la asignación de las longitudes de onda y del ancho de banda reduciendo el tamaño de la red AOPS y entonces mejorando su escalabilidad y su operación.

Hasta obtener las redes todo-ópticas de conmutación de paquetes, las aplicaciones para esta red híbrida podrían ser servicios de gran ancho de banda y servicios en los que el usuario decidiera establecer caminos ópticos o enviar paquetes mediante longitudes de onda. Así, este tipo de red híbrida casa perfectamente con las conclusiones extraídas del *workshop* sobre escenarios de migración.

El estudio de los escenarios de migración ha dado lugar a las siguientes **publicaciones**:

- R. Van Caenegem, D. Roccatto and R. Vilar, “Evolution towards an all-optical switched packet networks: the LASAGNE viewpoint”, 11th European Conference on networks and Optical Communications, Berlín 2006. (ISBN: 3-923613-40)
- R. Van Caenegem, D. Roccatto and R. Vilar, “The design of an all-optical packet-switching network”, Optical Communication Magazine (Aceptado, pero pendiente de publicarse)

III. OPTICAL PERFORMANCE MONITORING

A comienzos de la década de los 90s, los sistemas de transmisión óptica se convirtieron en la solución idónea para permitir el rápido crecimiento del tráfico de datos en la red troncal. Además de aumentar la capacidad de la red, las redes ópticas proporcionaban altas velocidades de transmisión y reducían el coste, pero a costa de aumentar la complejidad de la administración de la red por lo que la monitorización óptica de prestaciones (OPM, *optical performance monitoring*) suscitó un especial interés y se comenzaron los trabajos de investigación en este campo [36-37].

Las redes ópticas incrementan la transparencia y las tasas de bit, pero requieren técnicas de monitorización más avanzadas. OPM es un potente mecanismo que consigue mejorar el control de la transmisión y la administración de los fallos en la capa física. Además, las nuevas funcionalidades de la capa física óptica tales como la reconfiguración dinámica y la restauración a nivel de enlace también introducen un nivel de complejidad adicional que exige la definición de soluciones de monitorización avanzadas. Por tanto, OPM es una tecnología necesaria para la futura generación de redes ópticas.

En la literatura se encuentran múltiples definiciones de OPM, pero en esta tesina se adopta una definición general: “es la monitorización de la calidad de la señal en la capa física, esto es, determinar la calidad de la señal en el dominio óptico” [38-39]. Estas medidas de OPM pueden además utilizarse como métodos para administrar el tráfico mediante la toma de decisiones de enrutamiento en función de la calidad de la señal obtenida y en función de determinados criterios de QoS.

A principios de los 90s, las técnicas para medir el espectro óptico todavía no estaban disponibles por lo que los métodos basados en tonos piloto fueron los primeros en utilizarse. La monitorización electrónica tiene la ventaja de que los parámetros que hay que monitorizar están bien definidos. Debido a que OPM realiza una monitorización en la capa física hay una fuerte dependencia de la red física. Por tanto, OPM está limitado por la tecnología de monitorización óptica disponible.

Una vez disponibles los dispositivos que permiten obtener el espectro óptico, la calidad de la señal se monitoriza con la medida de ciertos parámetros tales como la potencia de cada canal óptico [4-5], la potencia agregada, la longitud de onda de cada canal [6] y la OSNR espectral.

Pero ante las necesidades de las futuras redes ópticas dinámicamente reconfigurables es necesario utilizar técnicas OPM avanzadas en las que se monitorizan otros parámetros de calidad tales como:

- **OSNR (Optical signal-to-noise ratio)** [7-9]: Los sistemas de comunicaciones ópticas permiten transmitir la información a grandes distancias. Para ello, necesitan el uso de los amplificadores ópticos, dispositivos que amplifican la señal pero añaden ruido ASE que degrada la señal óptica. La definición de la OSNR es la relación entre la potencia media de la señal y la potencia de ruido ASE dentro del canal óptico.
- **Q factor/BER** [13-16]: Este parámetro es el más usado para la administración del fallo. De hecho, también se usa en las redes electrónicas. Es interesante destacar que como se mide en cada nodo de terminación es sensible a las mismas degradaciones que afectan al QoS. El factor Q se obtiene ajustando el umbral de decisión del receptor a un nivel óptimo de modo que se contabilizan los errores. Debido a la fuerte correlación entre el Q-factor y el BER, esta medida es muy utilizada para la medida de la calidad de la señal.
- **Dispersión cromática (CD, Chromatic dispersion)** [10-12]: La dispersión cromática es un efecto debido a la dependencia del índice de refracción de la fibra óptica con la frecuencia y es uno de los principales parámetros que limitan la calidad de los sistemas de fibra óptica.
- **Dispersión del modo de polarización (PMD, Polarization mode dispersion)** [17]: PMD es una limitación en los sistemas de comunicaciones ópticas debida a la fibra óptica. Se basa en el hecho de que la misma componente espectral de los datos ópticos se divide en dos estados de polarización ortogonales. Los efectos son variación temporal y dependencia con la temperatura y empeora al aumentar la tasa de bit.
- **Jitter** [18]: El *jitter* temporal es difícil de monitorizar y compensar. Los fallos de *jitter* se asocian comúnmente con el transmisor y se pueden monitorizar aquí. La medida de BER es sensible a este parámetro y puede usarse para identificar la fuente de *jitter*.

Una vez detallados los principales parámetros que miden la calidad de la señal óptica, en los siguientes apartados se exponen los diferentes tipos de equipamiento de monitorización existentes en el mercado y se explican las técnicas de OPM avanzadas adecuadas para las futuras redes ópticas dinámicamente reconfigurables.

III.1. ACTUALES TECNOLOGÍAS OPM PARA LAS REDES DE CONMUTACIÓN DE CIRCUITOS

En esta sección, se ofrece un resumen de los dispositivos de monitorización disponibles en el mercado que permiten la monitorización en la banda C y/o L. Actualmente, existen dos técnicas diferentes de monitorización:

- **Analizadores del espectro óptico (OSA):** Se basa en el análisis de la señal detectada [40]. Se utiliza un dispositivo sintonizable en longitud de onda para resolver la potencia de cada canal, la longitud de onda y el ruido. La principal limitación es que asume que las potencias de ruido en ambos lados del canal son las mismas que el ruido dentro del canal, cosa que no es cierta debido al solape con los canales vecinos.
- **Polarization nulling:** Este método soluciona algunas de las limitaciones del OSA [41]. Se asume que la señal óptica está completamente polarizada mientras que las componentes del ruido no lo están. Así, el ruido óptico puede ser medido mediante el grado de polarización (DOP).

La tabla siguiente enumera los principales parámetros y características de los diferentes dispositivos OPM disponibles en el mercado:

Param./ Compañía	JDS Uniphase	BAYSPEC	Optoplex Corporation	AXSUN Techn.	Princeton Lighthwave	Teralink Commun.
Producto	OCM	OCPM-50G-S	OPM	Omx	OCM-SR	Argos 401L
Monitoriz.	1. Pot canal 2.OSNR 3. λ	1. Pot. canal 2. OSNR 3. λ	1. Pot. canal 2. OSNR 3. λ	1. Pot. canal 2. OSNR 3. λ	1. Pot. canal 2. OSNR 3. λ	1. Pot. canal 2. OSNR 3. λ
Tiempo Adquisición [ms]	<20	<50	300	500-1000	<200	600-1000
Técnica	OSA	OSA	OSA	OSA	OSA	Polar. nulling

Tabla 1. Comparación entre varios dispositivos OPM disponibles comercialmente

Como se ve en la Tabla 1, el tiempo de adquisición (por encima de 20 ms) no es adecuado para las redes ópticas de nueva generación por lo que se requieren nuevas técnicas OPM.

III.2. TÉCNICAS OPM AVANZADAS PARA LAS REDES ÓPTICAS DINÁMICAMENTE RECONFIGURABLES

Las redes ópticas dinámicamente reconfigurables exigen mejorar las técnicas OPM existentes en la actualidad para poder controlar la transmisión en tiempo real y facilitar las operaciones de administración de la red. Estas técnicas se pueden agrupar en tres categorías:

- **Análisis del espectro de RF:** Estas técnicas de monitorización basadas en el análisis del espectro de RF son muy atractivas comparadas con otras debido a su rápida respuesta, del orden de sub-ms. Dentro de este método se puede distinguir entre:
 - **Tonos piloto:** Se basa en la superposición de tonos de RF sobre la señal de datos para monitorizar la calidad de la señal óptica. Debido a que son tonos simples y de baja frecuencia son fáciles de generar y se procesan con electrónica convencional. Los tonos piloto no llevan datos pero sufren las mismas degradaciones que la señal. La amplitud del tono es una medida

directa de la potencia óptica en el canal. En un sistema WDM, se puede atribuir un tono a cada canal. La potencia agregada de la señal óptica WDM aparece en el espectro de potencia RF del mismo modo que en el espectro óptico. Además, el ruido entre tonos es proporcional al ruido óptico [42-44].

Adicionalmente, mediante el análisis de los tonos RF también se pueden monitorizar la dispersión cromática y la PMD.

Estas técnicas presentan ciertas limitaciones: requieren una modificación del transmisor y la modulación cruzada de ganancia (XGM) y el *scattering estimulado de Raman* (SRS) crean tonos fantasma y deterioran la medida.

- **Tonos de reloj:** Las técnicas de reloj RF están basados en los mismos conceptos que los tonos pilotos de RF; no añaden tonos sino que la frecuencia monitorizada se corresponde con la tasa de bit. Las técnicas de detección de potencia se usan para monitorizar la dispersión cromática y la PMD y las basadas en la detección de la fase sirven para monitorizar únicamente la dispersión cromática. La medida de la OSNR también es posible. La principal diferencia y ventaja con la anterior es que no requiere la modificación del receptor [45].
- **Métodos de muestreo:** Exploran la información estadística de la señal óptica derivada del histograma y el BER del canal de transmisión, además de medir parámetros de degradación de la señal tales como la dispersión cromática, la PMD y el crosstalk. Se pueden dividir en dos categorías: síncronos y asíncronos. La última tiene la ventaja de realizar el muestreo sin necesidad de la recuperación del reloj, pero pierde fiabilidad. El muestreo síncrono es el más parecido a la medida de BER [46].
La principal limitación de estas técnicas es el tiempo de adquisición, del orden de segundos, siendo inadecuado para las redes ópticas dinámicamente reconfigurables. Se puede detectar la degradación de una señal óptica evaluando la amplitud del histograma puesto que la forma depende de cada fuente de degradación.
- **Coefficientes eléctricos de ecualización para OPM:** En esta técnica se utilizan unos coeficientes obtenidos de un ecualizador eléctrico situado en el receptor para identificar y cuantificar las distorsiones y realizar la monitorización de la red sin equipamiento óptico adicional. Comparando los coeficientes de un ecualizador eléctrico adaptativo con un vector de coeficientes pre-computado, es posible identificar y cuantificar las degradaciones más comunes de un enlace óptico [47].
La principal limitación es que sólo se puede aplicar para sistemas cuya tasa binaria sea inferior a 10 Gb/s debido a la tecnología disponible de ecualizadores electrónicos.

III.3. COMPARATIVA ENTRE LAS DISTINTAS TÉCNICAS OPM

Como se ha presentado en las secciones previas, los métodos de monitorización de la calidad de señal óptica disponibles comercialmente se basan en técnicas OPM que miden parámetros tales como la potencia del canal óptico, potencia de la señal WDM, longitud de onda del canal y la OSNR, parámetros típicos de la capa OCM/WDM. Sin embargo, las nuevas técnicas miden otro tipo de parámetros de la señal ya que su escenario de actuación se centra en las futuras redes de nueva generación las cuales necesitan técnicas que tengan tiempos de respuesta más rápidos (Tabla 2).

Parámetros para la capa OCM/WDM	Parámetros de calidad de la señal avanzados
Potencia agregada de señal WDM Potencia del canal Longitud de onda del canal OSNR espectral	OSNR en banda Q-factor/BER Dispersión cromática PMD jitter

Tabla 2. Parámetros OPM

A continuación se resumen en la Tabla 3 las principales ventajas y limitaciones de las técnicas de monitorización tanto de las existentes comercialmente como de las nuevas.

Parámetros	Técnicas OPM actuales	Técnicas OPM avanzadas			
		Tonos RF	Tonos de reloj	Muestreo	Ecualizador eléctrico
Monitorización	OSNR Pot. Canal λ	CD PMD OSNR Pot. canal	CD PMD OSNR Pot. canal	CD PMD OSNR Crosstalk	CD PMD
Principal Ventaja	Disponibilidad comercialmente	Tiempo de respuesta rápido (sub-ms)	Tiempo de respuesta rápido (sub-ms)	Estimación del BER	Potencialmente barato
Principal limitación	Tiempo de respuesta bajo (> 20 ms)	Requiere modificación del transmisor	Potencialmente caro	Tiempo de respuesta muy bajo (> 1s)	- Limitado a 10 Gb/s - Requiere modificación transmisor

Tabla 3. Comparación entre las técnicas de monitorización existentes en el mercado con las requeridas en las futuras redes ópticas dinámicamente reconfigurables.

IV. MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA SEÑAL EN REDES DE CONMUTACIÓN DE PAQUETES

El despliegue de las redes ópticas estuvo propiciado por el desorbitado incremento del tráfico en las redes troncales debido a la necesidad de sistemas que proporcionaran gran ancho de banda, alta capacidad de tráfico de datos y transparencia. Como se vio en el capítulo 2, dedicado a la evolución de las redes ópticas, las exigencias de capacidad marcadas por el predominio del tráfico

de Internet, derivan en la propuesta de las redes ópticas de conmutación de paquetes como la solución más eficiente para soportar este tipo de tráfico.

En el capítulo anterior se ha presentado el estado del arte de las técnicas de monitorización óptica de prestaciones existentes tanto comercialmente como en la literatura. Se ha visto que en las redes actuales de conmutación de circuitos se usan ciertas técnicas de OPM para medir los parámetros de la capa física WDM que no son suficientes para los nuevos requerimientos de las redes ópticas de alta velocidad. Por eso, se han definido otras técnicas más avanzadas que se centran en tratar parámetros tales como la OSNR, PMD, BER, Q-factor, etc.

El escenario de actuación en el que se centra esta tesina, las redes ópticas de conmutación de paquetes, también trae consigo nuevos retos para la monitorización de la calidad de la señal y su posterior tratamiento puesto que un fallo supone una gran pérdida de información. Por esta razón, la monitorización de la señal se ha convertido en un aspecto crucial que añade una nueva dimensión al requerir tecnologías que administren el fallo directamente en la capa física de modo que se obtengan soluciones en tiempo real. Este asunto es muy interesante ya que permite que los caminos ópticos se establezcan basados en ciertos criterios de calidad y teniendo en cuenta las degradaciones impuestas por la fibra óptica.

Entre los parámetros nombrados anteriormente, el más usado es el BER ya que se basa en la misma métrica que se usa en los nodos de terminación de red para el QoS. Por tanto, esta tesina se centra en la medida de BER para obtener la calidad de la señal.

El BER es un factor importante para estimar la calidad de los sistemas ópticos incluyendo las redes de conmutación de paquetes. Al contrario que en la conmutación de circuitos, la conmutación de paquetes no necesita establecer una conexión antes de proceder a la transmisión. Los paquetes ópticos se envían salto a salto basados en la información contenida en la cabecera y en las tablas de encaminamiento de los nodos intermedios. Por tanto, en OPS, los paquetes atraviesan distintos nodos de conmutación y tramos de fibra.

Las razones de la importancia de la monitorización de la calidad a nivel de paquete son las siguientes:

- En OPS, los paquetes que se originan en diversas fuentes y atraviesan diferentes enlaces ópticos pueden degradarse de manera diferente
- La monitorización del BER es útil para tomar decisiones en cuanto al encaminamiento del paquete en función de su calidad. Se pueden dar dos escenarios: 1) el paquete tiene una medida de BER aceptable, entonces, el nodo encamina el paquete hacia el siguiente nodo; 2) el paquete llega muy degradado y la medida de BER no supera el umbral establecido por lo que dicho paquete se descarta.

La Fig 9 muestra cómo la calidad de la señal cambia paquete a paquete. En la figura se transmiten tres paquetes, cada uno de los cuales sigue una ruta diferente. Los paquetes 2 y 3 se

generan en la misma fuente, mientras que el 1, se origina en otra. Los tres paquetes pasan diversos nodos intermedios hasta llegar al mismo nodo destino, nodo X. En la parte inferior de la figura se observa cómo varía el nivel de señal y de ruido recibido dependiendo de la ruta seguida.

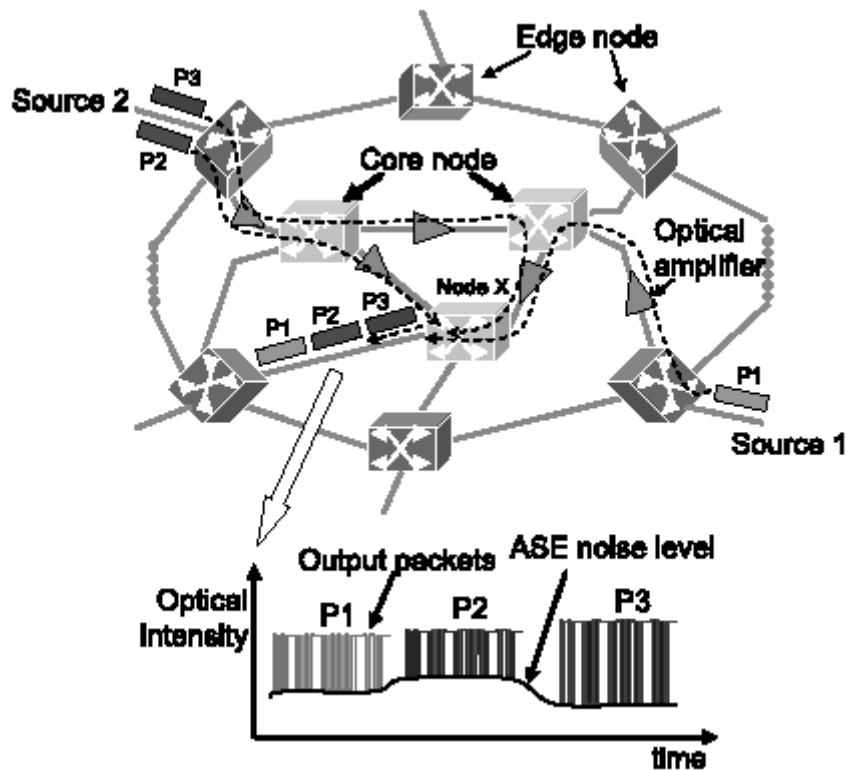


Fig 9. Paquetes con diferentes calidades en una red OPS

En el capítulo 3 se ha mencionado que existen técnicas de muestreo que obtienen el Q-factor/BER de una señal. Estas técnicas se basan en el análisis de la información estadística de la señal recibida para determinar la tasa de error. Se define un modelo matemático para describir la relación entre el BER y la función densidad de probabilidad que consiste en calcular la diferencia entre los valores medios de la señal a nivel alto ('1') y a nivel bajo ('0') dividido por la suma de las desviaciones estándar de las distribuciones de ruido de cada uno. Este método requiere una operación síncrona y ello conlleva una serie de desventajas resueltas con la utilización del muestreo asíncrono.

Aunque las medidas de BER proporcionan una estimación muy buena de la calidad de la señal y son una manera efectiva de administrar el fallo, requieren realizar conversiones O/E en los nodos para extraer la estadística de las señales lo que provoca que los tiempos de respuesta sean muy lentos (del orden de 1s) y que sólo permitan tasas de bit inferiores a 40 Gb/s [48-49].

Las futuras redes que necesitan proporcionar gran variedad de servicios en un entorno dinámico necesitan técnicas que puedan obtener la medida en tiempo real y que trabajen a altas velocidades por lo que los métodos que monitorizan el BER comentados arriba no son los más adecuados para las nuevas necesidades.

Para solventar estas limitaciones, en esta tesina se propone una nueva técnica basada en el uso de la correlación óptica para estimar la calidad de la señal en el dominio óptico con requerimientos de velocidad menores dentro de una red óptica de conmutación de paquetes, concretamente, dentro de la red LASAGNE. Para ello, se inserta un campo específico en la cabecera del paquete el cual es procesado en los nodos usando un correlador óptico basado en redes de difracción de Bragg [50]. Así, la potencia de pico del pulso de salida de la correlación se muestrea y con el uso de una variable estadística se obtiene la monitorización de la calidad del paquete óptico.

Esta técnica también puede usarse en colaboración con otros dispositivos de conmutación ópticos para tomar decisiones en tiempo real acerca del encaminamiento o descarte de los paquetes en función de la calidad estimada. Esto es un aspecto muy interesante para las futuras redes ópticas dinámicas puesto que exigen tiempos de respuesta bajos para poder reaccionar rápidamente a los cambios que se puedan producir en la red.

A continuación, se proponen dos métodos para monitorizar la calidad de la señal en tiempo real dentro de la red LASAGNE. La diferencia principal entre ambos es la granularidad de la medida. En el primero, se mide la calidad a nivel de enlace óptico, mientras que el segundo mide la calidad a nivel de paquete. Como las futuras redes de conmutación de paquetes operan en un entorno dinámico y requieren flexibilidad y eficiencia de ancho de banda, la granularidad a nivel de paquete es más adecuada para este escenario de actuación. Por tanto, esta tesina se centra en el estudio de la monitorización de la calidad de la señal óptica a nivel de paquete (segundo método).

IV.1. MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA SEÑAL A NIVEL DE ENLACE

El primer método está basado en el envío de una señal de test sobre una longitud de onda de supervisión, Fig 10 [51]. Dicha longitud de onda de supervisión se reserva en cada enlace óptico entre dos nodos adyacentes de forma que en caso de ruptura de la fibra, el fallo se localiza inmediatamente.

Para realizar la monitorización, se añade un bloque (*failure detector*) dentro del nodo de LASAGNE. La explicación del diseño del nodo queda fuera del estudio de esta tesina [52].

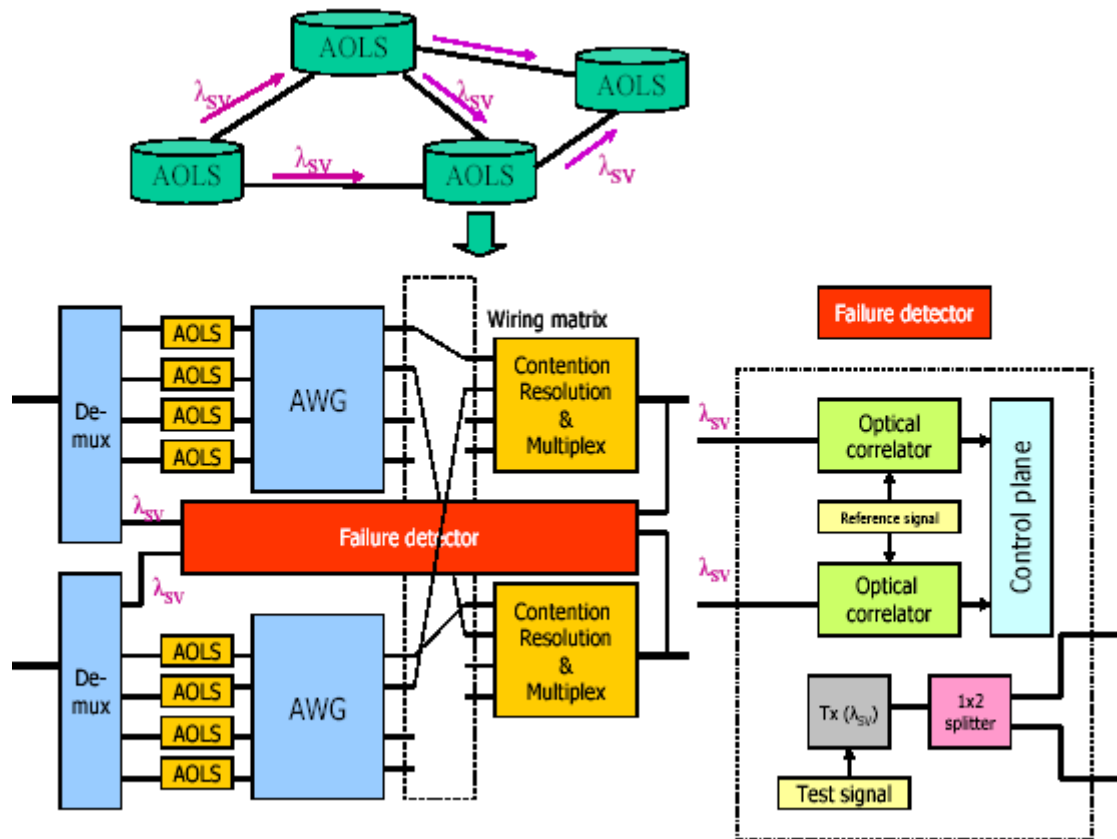


Fig 10. Diseño del nodo de LASAGNE para monitorizar la calidad del enlace óptico

Este método monitoriza la calidad del enlace mediante el uso de la correlación óptica. El procedimiento es el siguiente: se envía una señal de test de unos pocos bits, p. ej. señal de 4 bits, y se somete a las degradaciones que el enlace puede imponer. Una vez el nodo destino recibe esta señal, la correla con una versión sin degradar de la señal de test. Si las dos señales son iguales, en determinado instante de muestreo, aparecerá un pico máximo de autocorrelación. Así, cuánto más parecidas sean estas dos señales, significa que el enlace ha impuesto menos degradación y, por tanto, la calidad es mejor.

Esta solución es muy atractiva ya que con la información instantánea de calidad de servicio disponible en todos los nodos de la red, los caminos ópticos pueden establecerse en base a la calidad del enlace, permitiendo a los proveedores de servicio asegurar ciertos niveles de calidad en los servicios ofrecidos.

IV.2. MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LA SEÑAL A NIVEL DE PAQUETE

El segundo método mide la calidad de la señal, pero al contrario que el método anterior, lo hace paquete a paquete [53-54]. Para ello, se introduce un campo específico (campo de monitorización) dentro de la cabecera del paquete que se procesa en cada nodo de la red. Este sistema de monitorización está formado por un circuito de extracción del campo de monitorización, un

correlador óptico, un *sampler* óptico, un fotorreceptor y un detector de umbral. El sistema se muestra en la Fig 11.

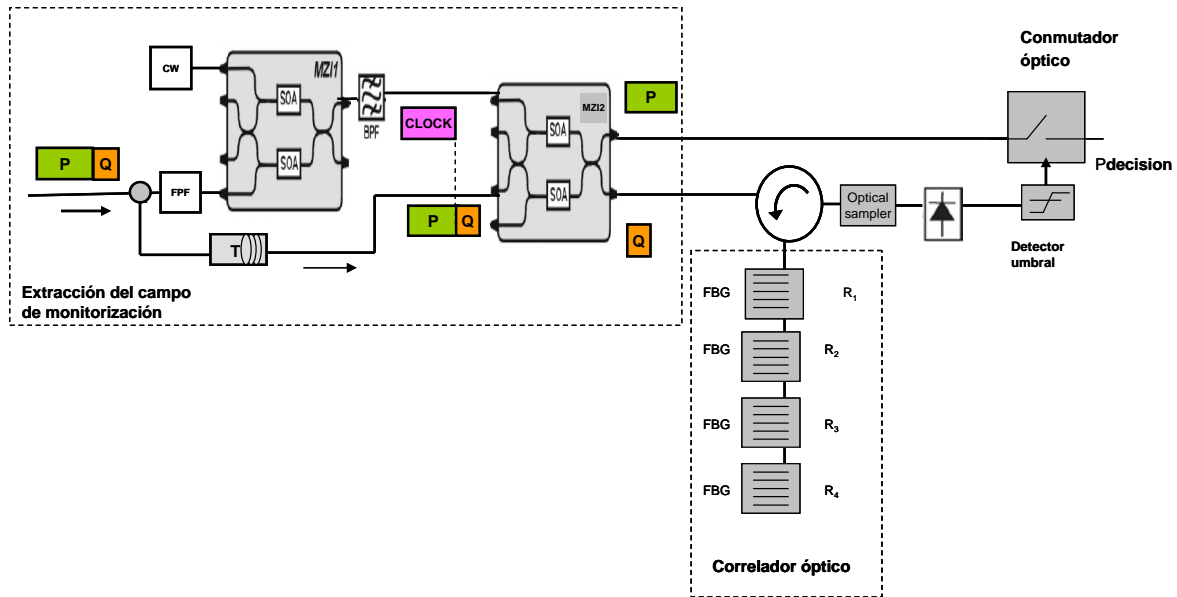


Fig 11. Arquitectura del sistema de monitorización de la calidad

Principio de funcionamiento:

Cuando el paquete llega al nodo, se extrae el campo de monitorización ($Q=[1\ 1\ 1\ \dots]$) mediante el circuito de separación del campo de monitorización del *payload*. Este subsistema ha sido demostrado en el proyecto LASAGNE. Una vez extraído el campo con información útil para la monitorización, se estima la calidad mediante el uso de un correlador óptico basado en redes de difracción de Bragg. El correlador está configurado para compararse con una señal de referencia comprendida por N bits a nivel alto. El pulso de salida de la correlación tiene una amplitud máxima de $N \cdot P_1$ cuando ambas señales son iguales. Como ejemplo, la Fig 12 muestra la señal de salida del correlador cuando el campo de monitorización está compuesto por 4 bits a '1' ($Q=[1\ 1\ 1\ 1]$).

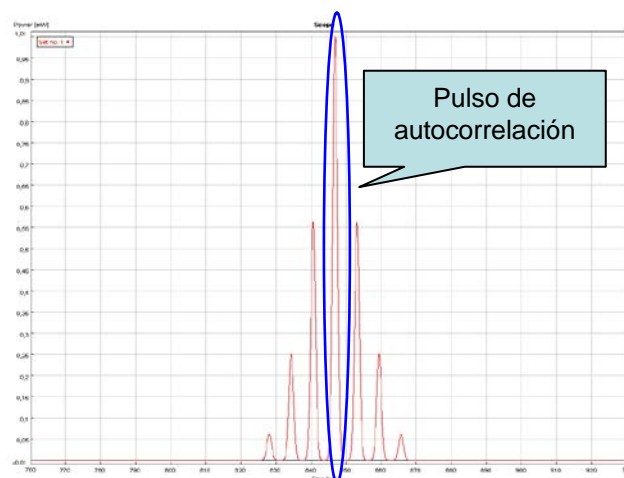


Fig 12. Salida de correlación correspondiente a un campo de monitorización de 4 bits a '1' (10 ps/div)

El pico de la autocorrelación, $N \cdot P_1$, se muestrea en el tiempo óptimo (T_s), se fotodetecta y se compara con un valor umbral de manera que se decide encaminar el paquete o no dependiendo de esta comparación. Por tanto, este esquema mide la calidad de la señal en el dominio óptico con requerimientos de velocidad menores ya que la correlación sólo se muestrea una vez por paquete.

A continuación, se define el campo de monitorización y se explican en más detalle el bloque de extracción del campo de monitorización y el correlador óptico.

IV.2.1. Definición del campo de monitorización

El formato del paquete óptico en cualquier red de conmutación de paquetes está formado por una cabecera y un *payload*. En esta técnica se añade un campo con información útil para la monitorización (Q). Dicho campo está formado por N bits con una potencia de pico de P_1 .

Además, para la definición de este campo se deben tener en cuenta ciertos requerimientos impuestos por el circuito de separación del campo de monitorización y el *payload*. Estos requerimientos son los siguientes:

- **Campo preámbulo (T_p):** necesario para la correcta sincronización
- **Bandas de guarda campo monitorización/*payload* (T_r):** para prevenir la conmutación óptica con bits erróneos por fallos en la recuperación de reloj (*rise time*). Según el esquema del circuito de extracción, el tiempo de subida es igual a 3 bits a 40 Gb/s.
- ***Payload*:** el tipo de tráfico está definido de modo que hay un máximo número de ceros consecutivos que dependen de la tolerancia del reloj. Este tráfico se caracteriza por las secuencias PRBS.
- **Espaciado entre paquetes (T_e):** la suma del tamaño de la etiqueta y el tiempo de bajada del reloj (T_f) definen el mínimo espaciado permitido entre paquetes.

El tiempo de recuperación del reloj impacta en la banda de guarda impuesta dentro del paquete mientras que la tolerancia del reloj define la longitud del tiempo de bajada y el máximo número de ceros consecutivos. La caída exponencial de la señal de reloj recuperado impone el mínimo espaciado entre paquetes.

La Fig 13 muestra el formato del paquete que se usa en esta técnica para estimar la calidad de la señal óptica.

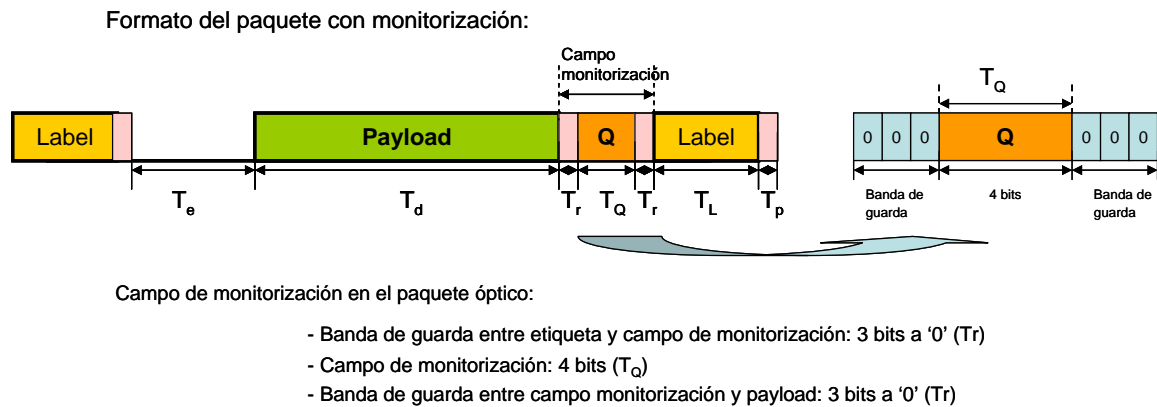


Fig 13. Formato del paquete con el campo de monitorización Q

IV.2.2. Circuito de extracción del campo de monitorización

Cuando el paquete óptico llega al nodo, se extrae la información de dicho campo de monitorización. Para ello se debe diseñar un bloque que se encargue de dicha función. Este bloque se basa en el circuito de separación de la etiqueta y el *payload* diseñado para LASAGNE [53]. Este circuito de extracción está formado por dos bloques funcionales: circuito de recuperación del reloj del paquete y el propio bloque de extracción que utiliza la salida del anterior para realizar su tarea. El circuito de recuperación de reloj consiste en un filtro Fabry-Perot y una puerta todo-óptica que actúa como limitador de potencia. El filtro Fabry-Perot debido a su bajo factor Q tiene una respuesta al impulso que decae exponencialmente rápidamente lo que permite el procesamiento independiente de los paquetes. Aprovechando el efecto del filtro, los paquetes de entrada se transforman en paquetes de reloj con una fuerte modulación en intensidad y con una duración similar a la de los paquetes de entrada. Esta señal generada se pasa por una puerta óptica limitadora de potencia (SOA-MZI). La combinación de estos dos elementos permite recuperar el reloj de los paquetes con tiempos de bajada y subida pequeños (3 bits a 40 Gb/s). El subsistema responsable de separar el campo de monitorización del *payload* se basa en el subsistema anterior y una puerta óptica SOA-MZI de alta velocidad adicional. La adecuada interconexión entre estos dos subsistemas proporciona la funcionalidad de separación requerida con mínimas penalizaciones de bandas de guarda.

Los paquetes de entrada se dividen en dos partes: uno que entra en el subsistema de recuperación del reloj de paquetes y otro que se dirige a la segunda puerta SOA-MZI. La señal del reloj de paquetes extraída dura lo mismo que el paquete de entrada y se usa como señal de control del segundo SOA-MZI. Para la separación del campo de monitorización, esta puerta se configura para actuar como una puerta AND entre el paquete de entrada y una versión retardada del reloj recuperado. Para realizar la separación de forma correcta, el paquete original y el reloj del paquete deben estar retardados temporalmente una cantidad igual a la longitud del campo de monitorización más el tiempo de subida requerido para la adquisición del reloj. De este modo, sólo

los bits del *payload* caen en la ventana de conmutación del reloj recuperado y, por tanto, son conmutados a la salida de la puerta óptica.

Como se ha comentado anteriormente, este subsistema de extracción del campo Q se ha demostrado en el proyecto LASAGNE [3]. La Fig 14 ilustra las señales que se obtienen en distintas partes del subsistema. Cuando llegan los paquetes de entrada (a) entran en el bloque que extrae la señal de reloj (b). Con el reloj recuperado y una puerta SOA-MZI, se consigue obtener por una salida el campo de monitorización (c) y por la otra, el *payload* (d).

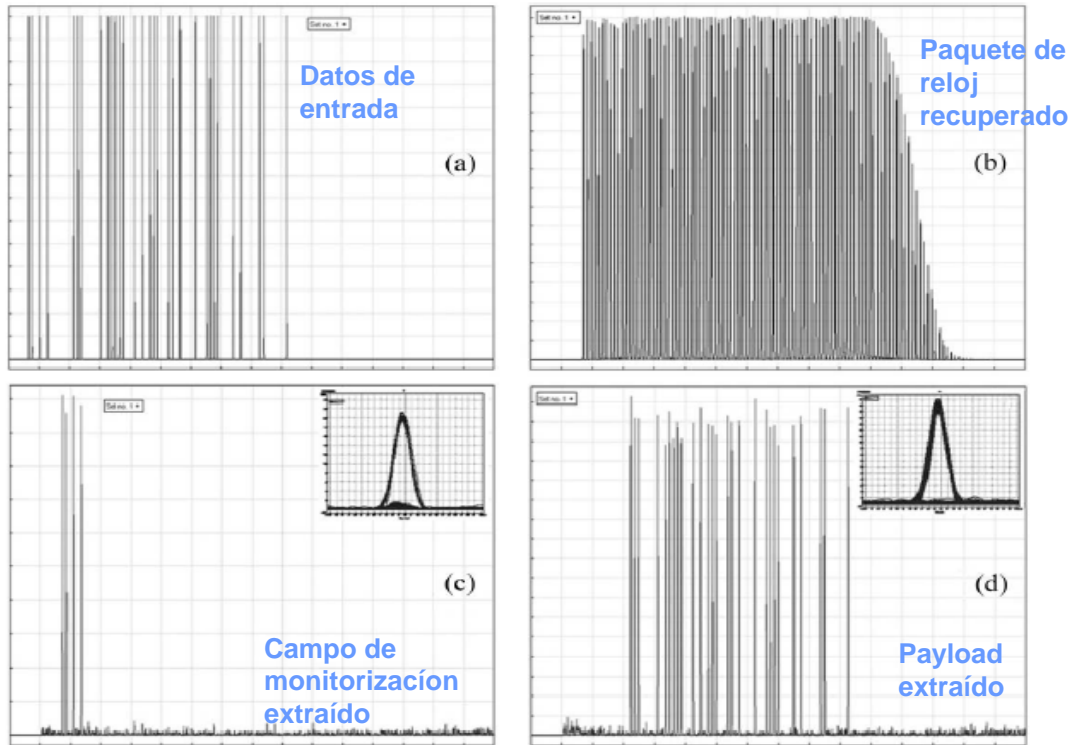


Fig 14. Resultados experimentales del bloque de extracción del campo Q

IV.2.3. Correlador óptico

La correlación es una importante función de procesamiento de señal [55]. La función

$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)r(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

es una medida del grado de similitud de las señales $r(t)$ y $s(t)$. La correlación puede implementarse en un sistema discreto:

$$c(t) = \sum_{k=0}^{n-1} s(k\tau)r(t-k\tau) \quad (2)$$

donde n es el número de bits de la secuencia de correlación, τ es el periodo de bit, $s(k\tau)$ representa la señal de referencia como los k pesos que multiplican cada una de las señales recibidas retardadas y $r(t-k\tau)$ es la señal recibida retardada k bits. Cuanto mayor sea n , la resolución de la

correlación es mayor. Notar que para una señal de entrada de L bits y una señal de referencia de n bits, la duración de la correlación es de $L+n-1$ y para obtener el pico de la autocorrelación hay que muestrear en el centro de este periodo.

La Fig 15 muestra cómo se realiza la correlación para tres señales de entrada cuando se correla con una señal de referencia compuesta por 4 bits a nivel alto, '1 1 1 1'. Como se comentó anteriormente, el pico de la autocorrelación de mayor amplitud corresponde al caso en que la señal de entrada y la de referencia son iguales ($N \cdot P_1$).

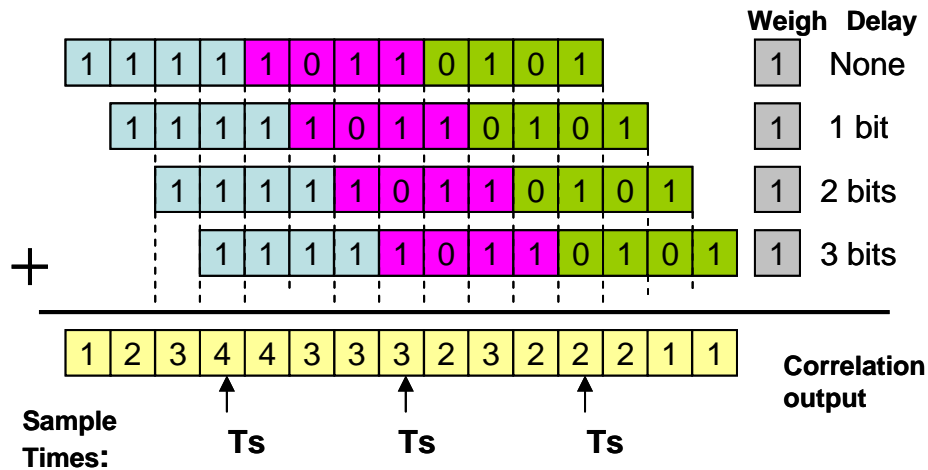


Fig 15. Las señales son retardadas y ponderadas para obtener la salida de la correlación

Usando la correlación óptica se puede monitorizar la calidad de la señal con alta fiabilidad y en tiempo real. Cuando una señal se envía por la fibra óptica sufre una serie de degradaciones tales como atenuación, ruido, dispersión, etc. Como la forma y amplitud de la señal cambia, se reduce la capacidad de distinguir los unos de los ceros en el receptor. El grado de degradación se mide mediante la correlación puesto que la amplitud y forma de la señal de salida muestran este efecto. La Fig 16 ilustra los diferentes efectos que se producen en la señal de salida cuando se degrada la señal con distintos valores de atenuación, ruido y dispersión. Así, debido a la atenuación, la altura del pico de la correlación se reduce linealmente con el porcentaje de atenuación. El efecto de la dispersión produce una reducción de la amplitud e interferencia entre símbolos. Por último, el ruido produce una variación en el pico y ligeras variaciones en la forma de la señal de salida.

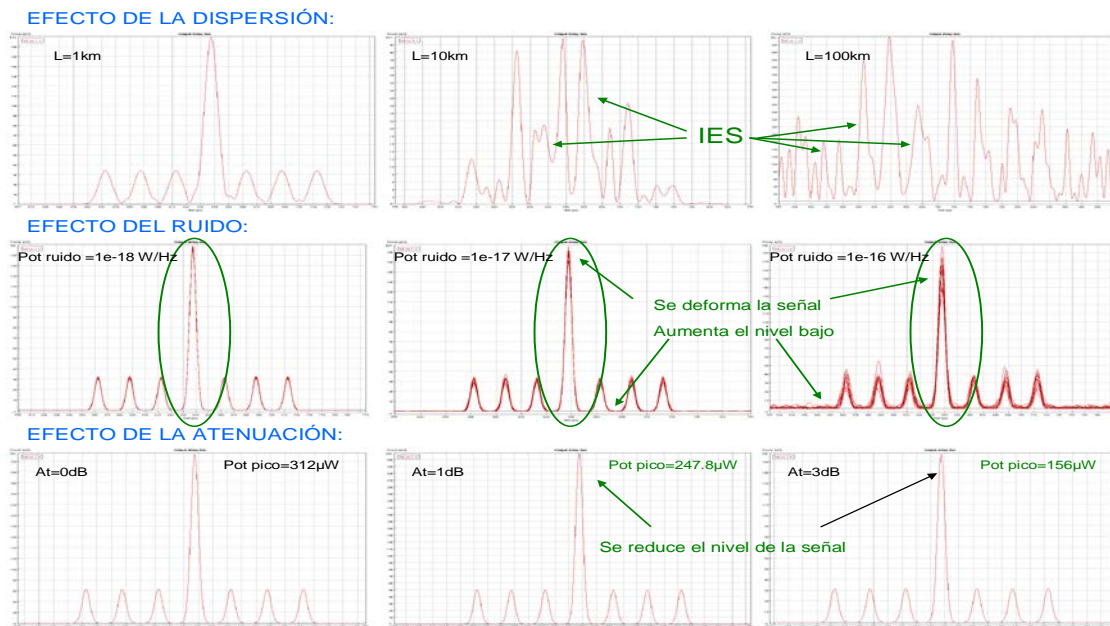


Fig 16. Efectos de la degradación de la fibra óptica en la señal recibida

Una vez definido el campo de monitorización, presentado la arquitectura de este sistema de monitorización y explicados en más detalles algunos de sus bloques, se presentan los principales resultados de esta técnica.

IV.2.4. Resultados obtenidos

Como se ha comentado anteriormente, las técnicas tradicionales basadas en la estimación del BER no son apropiadas para las futuras redes ópticas de alta velocidad. Por encima de 40 Gb/s, la correcta evaluación del BER requiere demultiplexar. Para aliviar las exigencias de velocidad, la técnica propuesta sólo mide el pulso de salida del correlador óptico de modo que el circuito de decisión sólo necesita funcionar a la tasa del paquete. La Fig 17 muestra los valores de BER en función de la OSNR para una red típica.

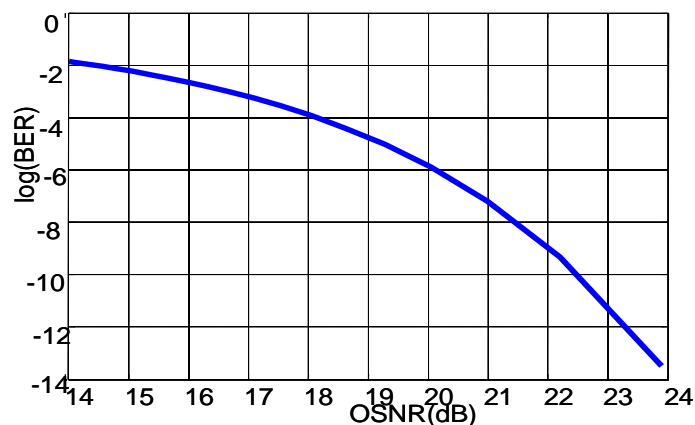


Fig 17. Valores de BER en función de la OSNR

Para estimar la calidad de la señal óptica, el método define una variable estadística llamada probabilidad de decisión, $P_{decision}$, que se basa en la misma filosofía que el factor Q. Así la probabilidad de decisión, que permite determinar si la calidad de la señal es suficiente, se basa en la probabilidad de que la señal recibida esté o no por encima del umbral fijado (Fig 18).

$$P_{decision} = Prob(P_1' < P_{umbral}) = 0,5 * erfc\left(\frac{G * (I_1 - I_{umbral})}{\sqrt{2} * \sigma_1'}\right)$$

donde P_1' es la potencia del pico de la autocorrelación, P_{umbral} es la potencia del umbral fijado.

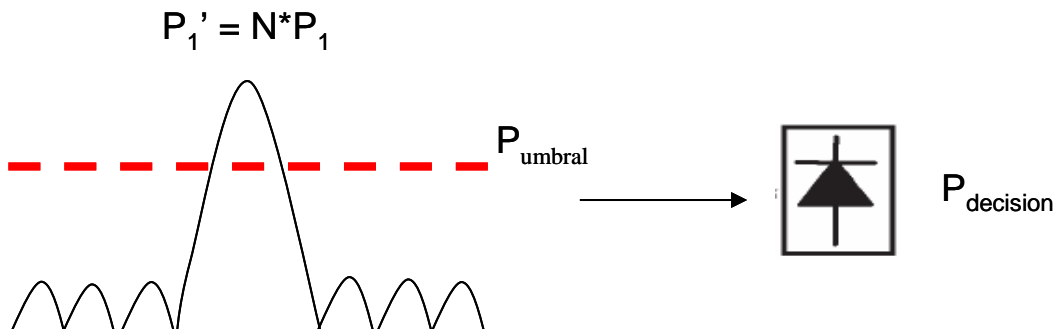


Fig 18. Definición de la $P_{decision}$

Una vez detectada la señal, se deben calcular las fotocorrientes del pulso de la autocorrelación (I_1) y del umbral (I_{umbral}) y la potencia de ruido de la fotocorriente asociada al pulso de autocorrelación teniendo en cuenta las fuentes de ruido shot, batido señal-ASE, y batido ASE-ASE (el ruido térmico se desprecia). Notar que como la amplitud del pulso de autocorrelación depende del número de bits del campo de monitorización, esta dependencia también hay que considerarla al pasar del dominio óptico al eléctrico.

$$I_1 = P_1' * \left(\frac{e * \eta}{h * \nu}\right) = N * P_1 * \left(\frac{e * \eta}{h * \nu}\right)$$

$$I_{umbral} = P_{umbral} * \left(\frac{e * \eta}{h * \nu}\right)$$

La potencia de ruido de la fotocorriente del pulso de autocorrelación (σ_1') depende del número de bits al realizar la correlación y de la potencia de ruido de la fotocorriente asociado a un '1' (σ_1):

$$\sigma_1' = \sqrt{N} * \sigma_1$$

donde σ_1 tiene contribuciones de varias fuentes de ruido:

$$\text{Ruido shot: } \sigma_{shot}^2 = 2e\eta(GI_S + m_i I_N)Be$$

$$\text{Batido señal-ASE: } \sigma_{S-ASE}^2 = \frac{4\eta^2 I_S \ln Be G}{Bo}$$

$$\text{Batido ASE-ASE: } \sigma_{ASE-ASE}^2 = 2m_i \eta^2 \ln^2 \frac{Be}{Bo^2} \left(Bo - \frac{Be}{2}\right)$$

$$\sigma_1^2 = 2e\eta(GI_s + m_t I_N)Be + \frac{4\eta^2 I_s I_N Be G}{Bo} + 2m_t \eta^2 I_n^2 \frac{Be}{Bo^2} (Bo - \frac{Be}{2})$$

La Tabla 4 resume las variables que aparecen en estas fórmulas.

Variables	Concepto
e	Carga del electrón
η	Eficiencia cuántica
G	Ganancia óptica
I_s	Intensidad óptica de señal
I_n	Intensidad óptica de ruido
m_t	Contribución de polarización de ruido ASE
Be	Ancho de banda eléctrico
Bo	Ancho de banda óptico
h	Constante de planck
ν	Frecuencia óptica

Tabla 4. Variables para el cálculo del BER

La probabilidad de decisión depende del nivel de umbral definido. En este trabajo se consideran tres umbrales ($T=P_{\text{umbral}}$):

- $T_1 = 0.5 * N * P_1$
- $T_2 = 0.5 * P_1$
- $T_3 = 0.25 * P_1$

para determinar cuál de todos es el que mejor estima el valor real de BER.

Para determinar la fiabilidad del sistema, el sistema se ha simulado con paquetes de 160 Gb/s de potencia de pico de $2.5 \mu\text{W}$. El correlador óptico está basado en redes de difracción de Bragg de diferentes valores de reflectividad. Los paquetes de entrada se transmiten a una longitud de onda de 1553 nm y se fotodetectan con un ancho de banda eléctrico de 40 GHz después de la demultiplexación óptica.

Los resultados de las simulaciones se muestran en la Fig 19 y la Fig 20 para distintos valores de umbral y para diferente número de bits del campo de monitorización.

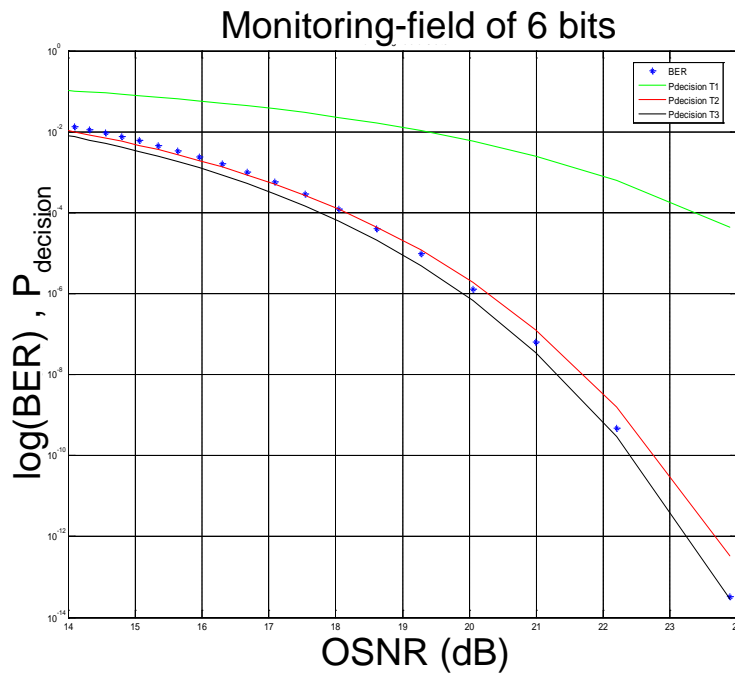


Fig 19. Valores de BER y P_{decision} para un campo de monitorización de 6-bits y para distintos valores de umbral

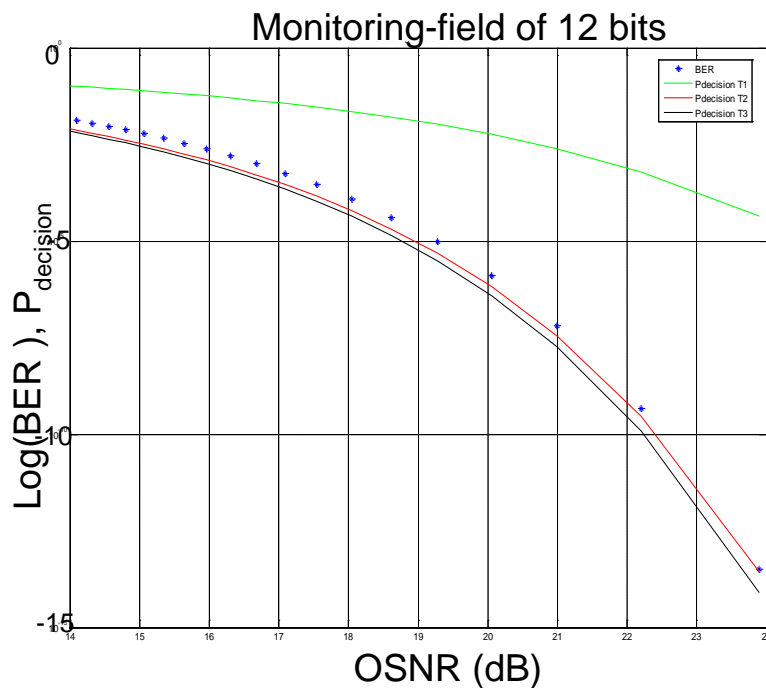


Fig 20. Valores de BER y P_{decision} para un campo de monitorización de 6-bits y para distintos valores de umbral

Como se puede observar, para un campo de monitorización de 12 bits y el umbral T_2 , los valores de la probabilidad de decisión y los de BER tienen el mismo orden de magnitud. De aquí, se desprende que cuantos más bits tenga el campo de monitorización, la estimación del BER es más fiable.

Por tanto, teniendo en cuenta esta variable de decisión estadística, es posible descartar paquetes en los nodos intermedios que no cumplen los requerimientos de calidad. La tasa de descarte de los paquetes es dependiente del umbral elegido y éste puede ajustarse tras varias iteraciones.

IV.2.5. Eficiencia de tráfico

El mecanismo de monitorización propuesto da información de la calidad de la señal en tiempo real mediante el uso de la correlación óptica. Con esta información disponible en todos los nodos de la red, los paquetes ópticos son encaminados o descartados de acuerdo los requerimientos de calidad. Para decidir qué paquetes deben ser descartados, se define una variable estadística llamada probabilidad de decisión, $P_{decision}$. Junto con esta variable, se debe tener en cuenta la función densidad de probabilidad (pdf) o el histograma del BER para computar el porcentaje de paquetes descartados.

La función densidad de probabilidad del BER de una red típica que está sometida a ciertas degradaciones tales como ruido, jitter, PMD y dispersión, sigue una distribución maxwelliana. La Fig 21 muestra la frecuencia relativa de los valores de BER.

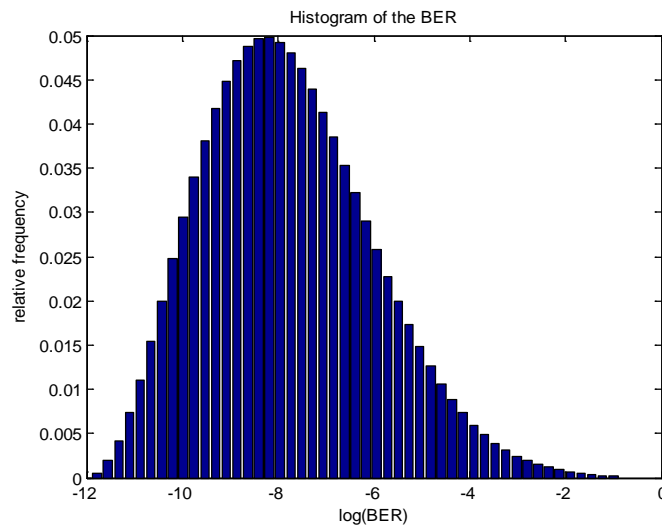


Fig 21. Valores del histograma de BER de una red típica

Una vez definida la probabilidad de decisión y el histograma del BER, el porcentaje de paquetes descartados, $P_{droppings}$, se define de la siguiente manera:

$$P_{dropping} = \sum_i P_i * P_{decision} \quad (3)$$

donde P_i identifica los valores del histograma y $P_{decision}$ son los valores de la variable estadística correspondiente a los diferentes valores de BER. Además, se define la probabilidad de error definida como la probabilidad de paquetes descartados que tienen una calidad aceptable ($BER \leq 10^{-9}$).

$$P_{error} = \sum_{i \leq -9} P_i * P_{decision,i} \quad (4)$$

Para los resultados simulados y el histograma, se obtienen los siguientes valores:

$$P_{dropping}(\%) = 0.15$$

$$P_{error} = 2.078 \cdot 10^{-11}$$

IV.2.6. Mejora de la eficiencia de tráfico

Como se ha visto en el apartado anterior, con la técnica de monitorización propuesta se consigue una reducción de la carga de tráfico del orden de 10^{-3} la cual no es demasiado eficiente. Por esta razón, se propone una modificación del mecanismo anterior de manera que se mejore el porcentaje de paquetes descartados.

La modificación se basa en la definición de un nuevo campo de monitorización que se replica varias veces con lo que se consiguen varias medidas de calidad del mismo paquete y tratando estos datos, se obtiene un incremento de la eficiencia de tráfico. De esta manera, la nueva definición del campo de monitorización consiste en un campo de monitorización de 2 bits replicado 5 veces.



Con este nuevo campo de monitorización, se obtienen los siguientes resultados:

$$P_{dropping}(\%) = 1$$

$$P_{error} = 10^{-9}$$

A pesar de que se había visto que con un campo de monitorización de más bits, se obtiene mejores estimaciones de BER, con un campo de monitorización de 2 bits y replicándolo se consigue todavía un error aceptable ($<10^{-9}$) y esta medida ayuda a obtener una reducción de tráfico del 1% que en el escenario de las redes ópticas de gran capacidad es un buen resultado.

IV.3. CONCLUSIONES

El escenario de actuación en el que se centra esta tesina, las redes ópticas de conmutación de paquetes, trae consigo nuevos retos para la monitorización de la calidad de la señal y su posterior tratamiento puesto que un fallo supone una gran pérdida de información. Por tanto, para las futuras redes de alta velocidad se necesitan definir nuevas técnicas de OPM que tengan tiempos de respuesta rápidos.

A lo largo de este capítulo, se ha presentado una nueva técnica de monitorización de la calidad basada en el uso de la correlación óptica con requerimientos de velocidad menores. Para ello, se define un campo de monitorización dentro de la cabecera óptica el cual se procesa en los nodos intermedios de la red, permitiéndoles descartar paquetes con bajas prestaciones de acuerdo a la calidad medida a través de una variable estadística, $P_{decision}$, definida en esta técnica. Gracias a los

resultados de simulación, se ha observado que con un campo de monitorización de 12 bits y un valor adecuado del umbral, se obtiene una buena correlación entre los valores de la probabilidad de decisión y los valores reales de BER.

Finalmente, se ha llevado a cabo un estudio de la eficiencia de tráfico proporcionada por este método y se ha propuesto una mejora para llegar a una reducción de la carga de tráfico del 1%.

La propuesta de una nueva técnica de monitorización de la calidad de la señal óptica ha dado lugar a las siguientes publicaciones:

- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Técnicas de detección de fallo y monitorización de la señal en tiempo real en redes ópticas de conmutación de paquetes”, Telecom I+D, Madrid 2006. (ISBN: 84-690-4355-4)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Optical signal quality monitoring in packet-switched networks through optical correlation”, 12th European Conference on networks and Optical Communications, Estocolmo 2007. (ISBN: 978-91-633-0869-7)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Optical signal quality monitoring using fibre-Bragg-grating-based correlators in optical packet-switched networks”, ECOC 2007

V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

V.1. CONCLUSIONES

El gran crecimiento de la demanda de servicios de telecomunicación en los últimos años ha forzado la necesidad de redes de nueva generación que incrementen la capacidad y las tasas de envío. El uso de *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) ofrece gran ancho de banda a un coste atractivo, pero estas redes sólo ofrecen granularidad a nivel de longitud de onda. Para redes que necesitan proporcionar gran variedad de servicios en un entorno dinámico, se requiere otra tecnología más flexible. La conmutación de paquetes ofrece la flexibilidad y eficiencia de ancho de banda requeridas para este escenario.

Actualmente las redes que están desplegadas se basan en tecnologías WDM. Hay un largo camino hasta conseguir llegar hasta las futuras redes de conmutación de paquetes de alta velocidad por lo que es necesario definir unos escenarios de migración. Este punto es uno de los principales aspectos tratados en esta tesina. Por un lado, se han presentado los escenarios de migración discutidos en un workshop organizado dentro del proyecto LASAGNE realizado en el Instituto de *Fraunhofer for Telecommunications Heinrich-Hertz* y, por otro lado, se han definido los escenarios de migración propuestos dentro del proyecto LASAGNE.

Los escenarios propuestos en el workshop son los siguientes:

- G. 709 Frame witching
- WR-OBS

- APSON
- ORION

Los escenarios propuestos en el proyecto LASAGNE son:

- Nodo a nodo. Se pueden distinguir dos escenarios:
 - Introducción de nodos OPS en una red OCS
 - Introducción de nodos de LASAGNE en una red OPS
- Basada en islas. Se pueden distinguir también dos escenarios:
 - Isla basada en nodos OPS
 - Isla basada en nodos LASAGNE
- Red híbrida con tecnología OCS y OPS/All-Optical OPS
- ORION

De todos los caminos de migración definidos, la solución híbrida formada por una red mixta con una capa OCS y otra de AOPS parece que es la más realista y factible. Por tanto, sería interesante instalar una arquitectura de red híbrida en la que se implementan una red todo-óptica de conmutación de paquetes y conmutadores ópticos OXCs en dos redes paralelas. Hasta obtener las redes todo-ópticas de conmutación de paquetes, las aplicaciones para esta red híbrida podrían ser servicios de gran ancho de banda y servicios en los que el usuario decidiera establecer caminos ópticos o enviar paquetes mediante longitudes de onda.

Como se ha comentado a lo largo de esta tesina, las redes ópticas ofrecen gran capacidad y una alta velocidad de transmisión por lo que cuando ocurre un fallo en la fibra, se interrumpen miles de conexiones perdiendo miles de Gigabits de datos. Por tanto, la fiabilidad de la red es un aspecto clave en las futuras redes ópticas de conmutación de paquetes y las técnicas de monitorización de la calidad de la señal han suscitado gran interés en los últimos años.

En el capítulo 3 se ha hecho un análisis del estado del arte de las diferentes técnicas existentes en la literatura. En primer lugar, esta sección se centra en los mecanismos de OPM existentes en las redes actuales WDM y de los parámetros utilizados para determinar la calidad de la transmisión. En segundo lugar, debido a los nuevos requerimientos de las futuras redes ópticas tales como el tiempo de respuesta y la reconfiguración dinámica, es necesario definir nuevos métodos más avanzados que obtengan los resultados directamente de la capa óptica. Finalmente, se realiza una comparativa entre las distintas técnicas OPM y se exponen las principales ventajas e inconvenientes.

Esta tesina también está centrada en el estudio de la monitorización de la calidad de la señal. Como se extrae del capítulo 3, hay muchos parámetros de la señal que se pueden medir (Q-factor/BER, OSNR, PMD, dispersión cromática), pero entre todos ellos el BER es uno de los más efectivos para la administración de los fallos. El problema de las actuales técnicas de estimación de BER es su tiempo de respuesta y sus limitaciones en cuanto a la velocidad de transmisión.

Para solventar estas limitaciones, en el capítulo 4 se propone una técnica de monitorización de la calidad de la señal adecuada para las redes de conmutación de paquetes de alta velocidad. Este método se basa en el uso de la correlación óptica para estimar la calidad de la señal en el dominio óptico con requerimientos de velocidad menores. Para ello, se inserta un campo de monitorización en la cabecera del paquete óptico el cual se procesa en cada uno de los nodos intermedios mediante un correlador óptico basado en redes de difracción de Bragg. La potencia del pulso de autocorrelación se muestrea y se define una variable estadística llamada P_{decision} que se compara un cierto umbral para decidir si un paquete se enruta o no de acuerdo a los requerimientos de calidad.

Además, en el capítulo 4 se realiza un estudio para determinar los valores más apropiados de algunas variables que influyen en la P_{decision} tales como el número de bits del campo de monitorización y el umbral óptimo de modo que se estime de forma adecuada los valores reales de BER. En las simulaciones, se concluye que con un campo de monitorización de 12 bits y un umbral fijado a la mitad de la potencia de un '1', los valores de BER y de la P_{decision} tienen el mismo orden de magnitud. Por otro lado, también se realiza un estudio de la eficiencia de tráfico de esta técnica, obteniendo un porcentaje de descarte no demasiado eficiente y, por ello, se introduce una modificación en el campo de monitorización consistente en replicar varias veces dicho campo que se reduce a una longitud de 2 bits. Con esta mejora, se obtiene una reducción de la carga de tráfico de la red de un 1%.

V.2. LÍNEAS FUTURAS

En esta tesina se ha propuesto una técnica para monitorizar la calidad de la señal basada en la estimación del BER. Pero hay otro parámetro muy importante en la administración de las redes ópticas que es la OSNR [56-58]. Así una posible línea futura a este trabajo puede ser la propuesta de una técnica que mida la OSNR en una red de conmutación de paquetes. De hecho, como extensión a esta tesina se ha propuesto un dispositivo basado en un interferómetro Mach-Zendher que mide la OSNR de los paquetes de entrada y que además, descarta aquellos que tienen baja calidad [59].

La arquitectura de esta técnica propuesta se muestra en la Fig 22. Se basa principalmente en un subsistema de monitorización pasivo y un SOA para dejar pasar o no el paquete.

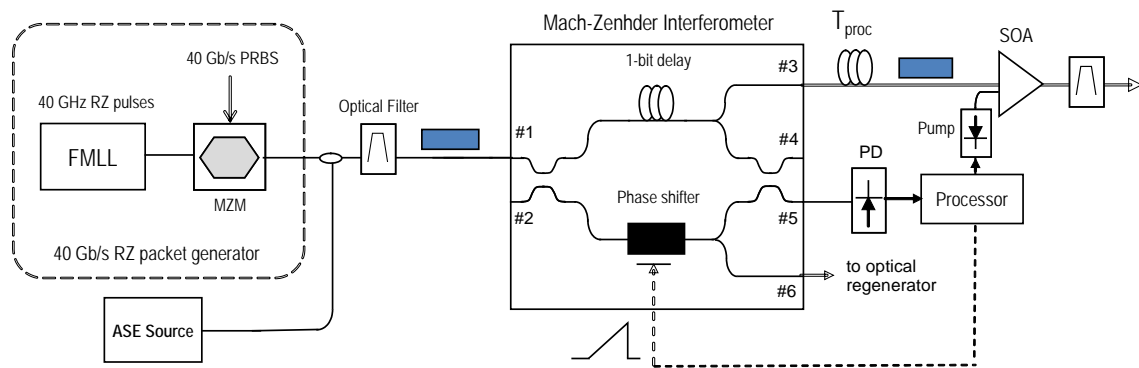


Fig 22. Arquitectura del sistema de monitorización de la OSNR para paquetes

Los paquetes de entrada entran en el interferómetro a través del puerto #1 para su monitorización. El phase shifter controla la fracción de potencia de los paquetes de entrada que es encaminada a los puertos #4 y #5 del interferómetro. Por tanto, variando el voltaje aplicado al phase shifter, la potencia óptica medida en cada uno de los puertos exhibe el comportamiento que muestra la Fig 23.

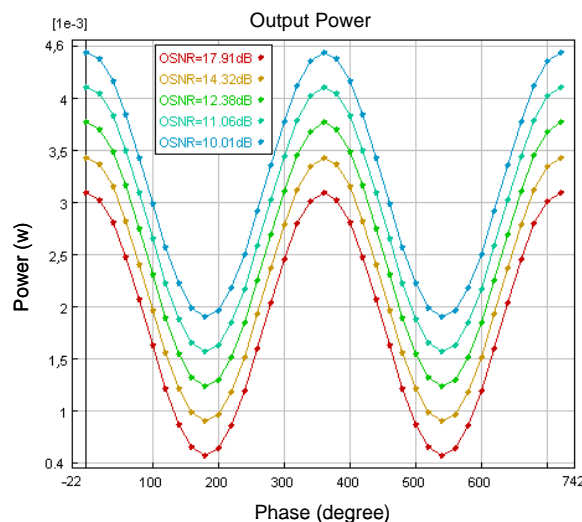


Fig 23. Potencia de salida medida en función del desplazamiento de fase para distintos valores de OSNR

Cuando se obtiene un máximo en el puerto #4, se obtiene un mínimo en el #5. Con estos valores de potencia máxima y mínima, se puede estimar la OSNR. Si el valor de OSNR medido supera el umbral de calidad, el paquete se encamina al puerto #3. En el caso contrario, el procesador electrónico genera la señal adecuada para que el SOA bloquee dicho paquete.

Los resultados que se han validado mediante simulación, demuestran el correcto funcionamiento de la técnica.

Pero lo interesante sería conseguir que fuera el mismo dispositivo el que simultáneamente realizara la medida de la calidad y en función de ella, se descarta o encaminara el paquete. Por eso, los esfuerzos están dirigidos en conseguir la medida de la OSNR mediante el uso de un SOA-MZI. Para ello, se debe trabajar en el modelado del ruido óptico introducido por los SOA para poder separar el ruido óptico del nivel de señal y, así, obtener la relación buscada.

Aparte, también es un campo para la investigación futura diseñar una técnica que mida otros parámetros tales como la PMD. Una idea sería utilizar el mismo dispositivo SOA-MZI para poder monitorizar este aspecto.

Por tanto, el objetivo futuro es diseñar mecanismos que midan los parámetros de la señal óptica de forma sencilla y que además, el mismo sistema permite decidir si se encamina o descarta el paquete de acuerdo a la calidad obtenida.

VI. AGRADECIMIENTOS

Esta tesina está integrada dentro del trabajo realizado en el proyecto europeo IST-LASAGNE.

REFERENCIAS

- [1] T. Koonen, I. Tafur, et al, "Optical Label switched networks: the FP5-IST-STOLAS project"
- [2] J. Capmany, D. Pastor, et al. "Subcarrier multiplexed optical label swapping based on subcarrier multiplexing: a network paradigm for the implementation of optical internet", ICTON 2003
- [3] F. Ramos, E. Kehayas, J.M. Martínez, et al. "IST-LASAGNE: Towards all-optical label swapping employing optical logia gates and optical slip-flops", Journal of Lightwave Technology, nov. 2005
- [4] Qun Li et al., "Performance characteristics of a WDM channel monitor based on an all-fiber AOTF with an on-fiber photodetector," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, no. 5, pp. 718–720, May 2003.
- [5] T. Sasaki, T. Komiya, Y. Fujimura, M. Saito, S. Semura, and M. Nishimura, "Multi-channel power level monitor with upward-reflector and sensor-array integrated in planar lightwave circuit," in Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001 (OFC 2001), 2001, vol. 3, pp. WB6–1–WB6–3.
- [6] Sang-Yuep Kim, Sang-Hoon Han, and Jae-Seung Lee, "WDM channel wavelength monitoring by periodically modulating the AWG temperature," in Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002 (OFC 2002), Mar. 2002, pp. 748–749.
- [7] J. H. Lee and Y. C. Chung, "Improved OSNR monitoring technique based on polarization-nulling method," Electronics Letters, vol. 37, no. 15, pp. 972–973, 19 July 2001.
- [8] Wenlu Chen, Shan Zhong, Zhonghua Zhu, Wei Chen, and Yung-Jui Chen, "Adding OSNR and wavelength monitoring functionalities on a double resolution AWG-based power monitoring circuit," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, no. 6, pp. 858–860, June 2003.
- [9] W. Chen, R. S. Tucker, X. Yi, W. Shieh, and J. S. Evans, "Optical signal-to-noise ratio monitoring using uncorrelated beat noise," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 17, no. 11, pp. 2484–2486, Nov. 2005.
- [10] Qian Yu, Zhongqi Pan, Lian-Shan Yan, and A. E. Willner, "Chromatic dispersion monitoring technique using sideband optical filtering and clock phase-shift detection," J. Lightwave Technol., vol. 20, no. 12, pp. 2267–2271, Dec. 2002.
- [11] L. Meflah, B. Thomsen, J. Mitchell, and P. Bayvel, "Chromatic dispersion monitoring of a multi-channel 40 gbit/s system for dynamically reconfigurable networks," in the 31st European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2005), Sept. 2005, vol. 4, pp. 935–936.
- [12] Liu, G. J. Pendock, and R. S. Tucker, "Chromatic dispersion monitoring for systems using dual-drive Mach-Zehnder modulators," in The 18th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2005, (LEOS 2005), Oct. 2005, pp. 892–893.
- [13] L. Noirie, F. Cerou, G. Moustakides, O. Audouin, and P. Peloso, "New transparent optical monitoring of the eye and BER using asynchronous undersampling of the signal," in the 28th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2002), Sept. 2002, vol. 5, pp. 1–2.
- [14] Shake, H. Takara, and S. Kawanishi, "Simple measurement of eye diagram and BER using high-speed asynchronous sampling," J. Lightwave Technol., vol. 22, no. 5, pp. 1296–1302, May 2004.
- [15] D. C. Kilper, A. Azarov, W. Weingartner, and P. Vorreau, "Q-factor monitoring for fault management applications," in Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2004 (OFC 2004), Feb. 2004, vol. 2.
- [16] Shake, H. Takara, and S. Kawanishi, "Simple Q factor monitoring for BER estimation using opened eye diagrams captured by high-speed asynchronous electrooptical sampling," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, no. 4, pp. 620–622, Apr. 2003.

- [17]S.M.R.M. Nezam, Yong-Won Song, Changyuan Yu, J. E. McGeehan, A. B. Sahin, and A. E. Willner, "First-order PMD monitoring for NRZ data using RF clock regeneration techniques," *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 1086–1093, Apr. 2004.
- [18]J. Dorring, H. Ereifej, G. Carter, and Y. J. Chen, "Timing jitter measurement of 40 Gbit/s RZ Raman loop data using gated autoand cross-correlation," in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002 (OFC 2002)*, Mar. 2002, vol. 2.
- [19]M. Odlyzko, "Internet traffic growth: Sources and implications", in *Proc. SPIE- Optical Transmission Systems and Equipment WDM Networking II*, 2003, vol. 5247, pp. 1-15
- [20]Qiao, C. and Yoo, M. (1999). Optical burst switching (OBS)-A new paradigm for an optical Internet. *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, n° 1, pp. 69-84.
- [21]Baldine, I., Rouskas, G. N., and Stevenson, D. (2002). JumpStart: A just-in-time signaling architecture for WDM burst-switched networks. *IEEE Communications*, vol. 40, n° 2 pp. 82-89.
- [22]Blumenthal, D., Ikegami, T., Prucnal, P. R., and (editors), L. T. (1999). Special issue on photonic packet switching technologies, techniques, and systems. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, n° 12.
- [23]O'Mahony, M. J., Simeonidou, D., Hunter, D. K., and Tzanakaki, A. (2001). The application of optical packet switching in future communication networks. *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, n° 3, pp. 128-135.
- [24]Yao, S., Yoo, S. J. B., Mukherjee, B., and Dixit, S. (2001). All-optical packet switching for metropolitan area networks: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, n° 3, pp. 142-148.
- [25]J. Spring and R. S. Tucker, "Photonice 2 × 2 packet switch with input buffers," *Electronics Letters*, vol. 29, pp. 284–285, 1993.
- [26]P. Gambini et al., "Transparent optical packet switching: network architecture and demonstrators in the keops project," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, pp. 1245–1259, Sept. 1998.
- [27]C. Guillemot et al., "Transparent optical packet switching: the European ACTS KEOPS project approach," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 12, pp. 2117–2133, Dec. 1998.
- [28]R. Van Caenegem, D. Roccatto and R. Vilar, "The design of an all-optical packet-switching network", *IEEE Communication Magazine*
- [29]"An overview of ITU-T G. 709", *Agilent Technologies*
- [30]M. Düser and P. Bayvel, "Analysis of a dynamically wavelength-routed optical burst switched network architecture", *J. Lightwave Technol.* , vol. 20, n° 4, April 2002
- [31]Erik Van Breusegem, Jan Cheyns, Davy De Winter, Didier Colle, Mario Pickavet, Piet Demeester, Joris Moreau, "A Broad view on overspill routing in optical networks: a real synthesis of packet and circuit switching ", *Optical Switching and Networking (invited paper)*, Vol.1, No.1, pp. 51-64
- [32]R. Van Caenegem, D. Roccatto and R. Vilar, "Evolution towards an all-optical switched packet networks: the LASAGNE viewpoint", *11th European Conference on networks and Optical Communications*, Berlín 2006. (ISBN: 3-923613-40)
- [33]Erik Van Breusegem, "Study and design of hybrid optical network architectures", *PhD Thesis*, (2005), ISBN 90-8578-061-6
- [34]C. Qiao, "Polymorphic Control for Cost-Effective Design of Optical Networks", *European Transactions on Telecommunications*, 11(1):17–26, 2000.
- [35] I.de Miguel, J. C. Gonzez, T. Koonen, R. Dur, P. Fernandez, and I. T. Monroy, "Polymorphic architectures for optical networks and their seamless evolution towards next generation networks", *Photonic Network Communications*, Vol. 8, no. 2, September 2004.
- [36]D. C. Kilper, R. Bach, D.J. Blumenthal, D. Einstein, T. Landolsi, L. Ostar, M. Preiss and A. E. Willner, "Optical Performance Monitoring", *J. Lightwave Technol*, vol. 22, n° 1, 2004, pp. 294-304
- [37]G. Bendilli, et al, "Optical performance monitoring techniques", *ECOC 2000*, vol. 4, pp. 113-116, Munich, Sept. 2000.
- [38]B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J. P. Heritage, and B. Mukherjee, "Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 1713–1723, 1999.
- [39]D. C. Kilper and W. Weingartner, "Monitoring optical network performance degradation due to amplifier noise," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 1171–1178, May 2003.
- [40]R. Giles et al, "Monitoring the optical networks", *Symposium on optical fiber measurements*, pp. 19- 24, Boulders, United States, 2002.
- [41]Y. Hamazumi and M. Koga, "Transmission capacity of optical path overhead transfer scheme using pilot tone for optical path network", *Journal of Lightwave Technol*, vol. 15, n° 12, Dec. 1997
- [42]T.E. Dimmick, G. Rossi and D. J. Blumenthal, "Optical dispersion monitoring technique using double sideband subcarriers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, n° 7, p. 900. July 2000

- [43]Ming-Seng Kao, "Effect of polarization mode dispersion on a coherent optical system with pilot carrier", *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, nº 2, p. 303, Feb. 1993
- [44]K. J. Park, "Polarisation-mode dispersion monitoring technique based on polarisation scrambling", *Electronics Letters*, vol. 38, nº 2, p. 83, 2002
- [45]C. Dorerr and S. Ramachandran, "Self-referencing dispersion characterization of multimode structures using direct instantaneous frequency measurement", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, nº 7, p. 1700, July 2004
- [46]K. Mueller, "Application of amplitude histograms to monitor performance of optical channels", *Electronics Letters*, vol. 35, nº 5, p. 403, March 1999
- [47]Kirstaedter, M. Wrage, G. Goeger, W. Fischler, B. Spinnler, "Current aspects of optical performance monitoring and failure root cause analysis in optical WDM networks", SIEMENS Corporate Technology, Information and Communications, Munich, Germany.
- [48]D. Ye and W. -D. Zhong, "Improved BER monitoring based on amplitude histogram and multi-Gaussian curve fitting," *J. Optical Networking*. 6, pp. 584-598, 2007
- [49]Lei Ding, Wen-De Zhong, Chao Lu, Yivin Wang, "A New Bit Error Rate Monitoring Method Based on Histograms and Curve Fitting", *ICICS-PCM*, 2003
- [50]M.C. Hauer et al, "Optically assisted Internet routing using arrays of novel dynamically reconfigurable FBG-based correlators", *J. of Lightwave Technol*, vol. 21, nº 11, Nov 2003
- [51]R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, "Técnicas de detección de fallo y monitorización de la señal en tiempo real en redes ópticas de conmutación de paquetes", *Telecom I+D*, Madrid 2006. (ISBN: 84-690-4355-4)
- [52]Ni Yan, I. Tafur Monroy, Jose M. Martinez, E. Kehayas, P.v. Holm-Nielsen, R. V. Caenegem, Y. Liu, Diego Roccato, Kostas Christodouloupoulos, Deliverable 2.2, "Initial report on AOLS node architecture" del proyecto LASAGNE (IST-1-507509)
- [53]R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, "Optical signal quality monitoring in packet-switched networks through optical correlation", 12th European Conference on networks and Optical Communications, Estocolmo 2007. (ISBN: 978-91-633-0869-7)
- [54]R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, "Optical signal quality monitoring using fibre-Bragg-grating-based correlators in optical packet-switched networks", *ECOC 2007*
- [55]B. Anderson, A. Durrezi, D. Rabb and F. Abou-Galala, "Real-time all-optical quality service monitoring by use of correlation and a network protocol to exploit it", *Applied Optics*, vol. 43, nº 5, p. 1121, Feb. 2004
- [56]Z. Tao, Z. Chen, L. Fu and A. Xu, "Monitoring of OSNR by using a Mach-Zehnder Interferometer", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 30, nº 1, July 2001
- [57]X. Liu and Y.H. Kao, "A simple OSNR monitoring technique independent of PMD and chromatic dispersion based on a 1-bit delay interferometer", *ECOC 2006*, paper Mo 4.4.5
- [58]X. Liu, Y.H. Kao, S. Chandrasekhar, I. Kang, and L.L. Buhl, "OSNR monitoring method for OOK and DPSK based on optical delay interferometer", *IEEE Photonics Technol Letters*, vol. 19, nº 15, August 2007
- [59]R. Vilar, F. Ramos and J. Martí, "Optical performance monitor for packet-switched networks based on optical delay interferometer", *Conference BroadBand Europe*, Dec. 2007 (Pendiente de confirmación)

ANEXOS

Esta tesina ha dado lugar a las siguientes publicaciones:

- R. Van Caenegem, D. Roccato and R. Vilar, “Evolution towards an all-optical switched packet networks: the LASAGNE viewpoint”, 11th European Conference on networks and Optical Communications, Berlín 2006. (ISBN: 3-923613-40)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Técnicas de detección de fallo y monitorización de la señal en tiempo real en redes ópticas de conmutación de paquetes”, Telecom I+D, Madrid 2006. (ISBN: 84-690-4355-4)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Optical signal quality monitoring in packet-switched networks through optical correlation”, 12th European Conference on networks and Optical Communications, Estocolmo 2007. (ISBN: 978-91-633-0869-7)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Marti, “Optical signal quality monitoring using fibre-Bragg-grating-based correlators in optical packet-switched networks”, ECOC 2007
- R. Van Caenegem, D. Roccato and R. Vilar, “The design of an all-optical packet-switching network”, Optical Communication Magazine (Aceptado, pero pendiente de publicarse)
- R. Vilar, F. Ramos and J. Martí, “Optical performance monitor for packet-switched networks based on optical delay interferometer”, Conference BroadBand Europe, Dec. 2007 (Pendiente de confirmación)

A continuación se adjuntan los artículos.