

# Novel management strategies for dynamic provisioning and monitoring in all-optical, control plane enabled metro IP/WDM networks

*Nuevas estrategias de gestión para el suministro y monitorización dinámico de servicios en redes metropolitanas IP/WDM todo ópticas y con plano de control*

RESUMEN DE TESIS - Febrero 2007

XXVII Premios “Ingenieros de Telecomunicación”

por

Carolina Pinart Gilberga

*Director de tesis:* Prof. Gabriel Junyent i Giralt, Universitat Politècnica de Catalunya

*Presentación pública:* 20 de Diciembre de 2005

*Calificación:* Sobresaliente “Cum Laude” (por unanimidad del Tribunal)



# Índice general

<b>1. Descripción del trabajo</b>	<b>1</b>
1.1. Redes ópticas: historia y principios . . . . .	1
1.2. Motivación y objetivos de la tesis . . . . .	2
1.2.1. Hacia una red de transporte todo óptica . . . . .	2
1.2.2. Hacia una red automática y flexible . . . . .	3
1.3. Desarrollo de la tesis . . . . .	4
1.4. Conclusiones de la tesis . . . . .	6
<b>2. Originalidad: orientación y aportaciones</b>	<b>7</b>
2.1. Perspectiva global . . . . .	7
2.2. El <i>point and click</i> llega a las redes ópticas . . . . .	8
2.3. Calidad asegurada en el dominio de la luz . . . . .	9
<b>3. Resultados obtenidos</b>	<b>11</b>
3.1. Suministro de canales ópticos en menos de un segundo . . . . .	11
3.2. Validación de la calidad de servicio en tiempo real . . . . .	13
<b>4. Aplicabilidad práctica</b>	<b>15</b>
<b>Apéndices</b>	<b>19</b>
<b>A. Financiación y premios de la tesis</b>	<b>19</b>
<b>B. Producción científica de la tesis</b>	<b>21</b>



# Capítulo 1

## Descripción del trabajo

El marco de esta tesis son las redes ópticas metropolitanas, que son redes de alta velocidad que dan cobertura a un área geográfica extensa (ciudades y regiones) y proporcionan capacidad de integración de múltiples servicios mediante la transmisión de datos, voz y vídeo. En particular, esta tesis propone y demuestra experimentalmente estrategias eficientes (en coste y tiempo) de suministro y verificación de calidad para servicios todo ópticos. Los resultados obtenidos se han validado en un entorno experimental consistente en un prototipo de red todo óptica con plano de control y una plataforma de servicios. Este capítulo resume el contexto y motivación de la tesis, así como sus objetivos, desarrollo y conclusiones principales.

### 1.1. Redes ópticas: historia y principios

La historia de las redes ópticas comenzó a mediados del siglo XIX con el desarrollo de las comunicaciones por luz visible a largas distancias. Estos primeros trabajos se vieron rápidamente eclipsados por el desarrollo del telégrafo eléctrico, que tuvo lugar hacia 1830, por lo que podemos decir que las comunicaciones ópticas renacieron en 1960 a través del descubrimiento del **láser** por T. Maiman, desarrollo lógico de la amplificación de la radiación de microondas por emisión estimulada (maser), hallada por Townes y Schawlow al final de la década de los cincuenta. Este dispositivo produce luz de gran intensidad y coherencia, y con radiación monocromática, cualidades esenciales para la transmisión a través de la fibra óptica.

A mediados de esa década se desarrollaron las primeras **fibras ópticas**, que constituyen el medio de transmisión de las comunicaciones ópticas. En sus inicios, el problema fundamental de la fibra óptica era la atenuación, es decir, la pérdida de intensidad por unidad de longitud. Es asombroso que se haya pasado, en sólo cuarenta años, de un valor de 1000 dB/km a valores inferiores a 0.1 dB/km, mejorando la absorción atmosférica (1 dB/km). La fibra óptica desencadenó el siguiente descubrimiento vital para las redes ópticas, el **amplificador óptico**, que solucionó los efectos de la atenuación en recorridos largos, aunque introdujo ruido por emisión espontánea. Esta amplificación se consigue con el efecto láser, que intensifica la señal óptica. Los elementos más aptos para este efecto son los iones de las tierras raras (lantánidos). En especial se han estudiado el erbio, el presodimio y el tulio, siendo el amplificador de fibra dopada con erbio (**EDFA**) el más usado en las redes ópticas metropolitanas actuales.

A finales de los años 80 del pasado siglo se estandarizó la arquitectura de red óptica por jerarquía digital síncrona (acrónimo inglés **SDH**) para las redes de gran capacidad (metropolitanas y troncales), que permite la transmisión de datos de forma síncrona en redes de fibra óptica. Paralelamente, surgió el estándar americano Synchronous Optical Network (SONET), similar a

SDH. Ambas tecnologías permitieron construir redes más rápidas y más baratas que los equipos precursores, basados en la jerarquía digital plesiócrona. SDH y SONET introdujeron el concepto de sincronismo en las redes ópticas, que consiste en que los bits de un circuito son transportados en tramas sincronizadas con un reloj. Las tramas de SDH reciben el nombre de módulo de transporte síncrono (STM) y su capacidad se multiplica por cuatro sucesivamente partiendo de STM-1 (155 Mbit/s), siendo STM-64 el equivalente a 10 Gbit/s.

La multiplexación por longitud de onda (**WDM**) fue introducida a mediados de los años 90 como respuesta barata al crecimiento del tráfico transportado por las redes SDH. En la primera década de funcionamiento de las redes SDH, las fibras que interconectaban nodos ópticos transportaban un único canal. La tecnología WDM aumentó el número de canales sin necesidad de desplegar más fibras ópticas, pues permite transportar más de una portadora óptica en una misma fibra. Aunque el concepto de multiplexación óptica fue presentado en un artículo de 1958, se tardó 20 años en disponer de los primeros prototipos WDM, y más de una década en comercializar componentes. La combinación de SDH y WDM dio lugar a las arquitecturas de red metropolitanas actuales, basadas en nodos eléctricos de inserción y extracción de tramas SDH (equipos ADM) unidos por enlaces de fibra óptica en **topología de anillo**. Estos anillos están interconectados mediante equipos de conmutación eléctrica SDH (*Digital Cross-Connect*, DXC).

A finales del siglo XX empezaron a surgir los primeros prototipos de equipos de inserción y extracción de **canales ópticos (OADM)** y de conmutación (OXC) todo ópticos, así como los **láseres sintonizables**, capaces de emitir en cualquier frecuencia óptica de una banda de transmisión dada (p.ej., la región de 1550 nm, llamada tercera ventana o banda C), en contraste con los láseres surgidos a partir de los años 60, que emitían en una frecuencia fija. Según el informe publicado por In-Stat en 2000, el mercado mundial de redes metropolitanas ópticas debía pasar de trece a veintitrés mil millones de dólares en el periodo 2001-2005 gracias al crecimiento casi exponencial del tráfico de datos. Desafortunadamente, con la explosión de la famosa burbuja .com, la industria de las telecomunicaciones se replegó en su única fuente segura de ingresos: los **servicios**. Desde hace unos años, la situación está mejorando, y es precisamente la confluencia de esto con los factores mencionados (el incesante crecimiento del tráfico de datos y la madurez de las tecnologías fotónicas) y los nuevos servicios y aplicaciones como *peer-to-peer* lo que marca el punto de partida de la evolución hacia las redes todo ópticas, y también de esta tesis.

## 1.2. Motivación y objetivos de la tesis

Este trabajo parte pues de tres ejes: la existencia de componentes y equipos fotónicos, que permiten construir una red de transporte completamente óptica, sin necesidad de regeneración eléctrica (como era el caso de SDH), el auge de nuevos servicios y aplicaciones que requieren arquitecturas y paradigmas de gestión distintos, y la consolidación del plano de control óptico como alternativa estándar para automatizar las funciones de red. A continuación se describe cada uno de estos ejes, que motivan los objetivos de la tesis.

### 1.2.1. Hacia una red de transporte todo óptica

La regeneración eléctrica necesaria en las redes SDH, basadas en tramas digitales, representa entre el 70 y el 90 % del coste de un canal óptico. Si a ello se suma el hecho de que tener tantos conversores electro-ópticos como formatos de datos transporte la red (p.ej., SDH, Ethernet) representa un cuello de botella tanto a nivel de coste como de velocidad, resulta evidente el marcado interés de la comunidad científica e industrial por los dispositivos todo ópticos. Estos dispositivos permiten tres cosas:

- Flexibilidad. La suma de los láseres sintonizables y los equipos de conmutación controlables (ver apartado 1.2.2) dota las futuras redes ópticas de una gran flexibilidad y dinamismo.
- Transparencia. Al no haber regeneración eléctrica, los elementos de inserción/extracción y de conmutación de la red son transparentes al formato de los datos transportados.
- Independencia de la velocidad (*bit rate*). Es lo equivalente al punto anterior por lo que respecta al *bit rate* de los datos transportados.

Estas ventajas, muy importantes, se ven actualmente ensombrecidas por un gran desafío: gestionar la acumulación de las degradaciones físicas. Esto es debido a la eliminación de la conversión electro-óptica que se realiza en los nodos SDH, que, además de regenerar la señal óptica eléctricamente a nivel de forma y sincronismo, permite monitorizar la calidad de la señal y así contener las degradaciones propias de la transmisión por fibra óptica y las debidas a las imperfecciones de los dispositivos ópticos. Estas degradaciones, que se dividen en lineales y no lineales, sufren una acumulación en las redes todo ópticas, que no disponen del ‘freno eléctrico’ en los nodos intermedios, puesto que en estas redes las conversiones electro-ópticas únicamente se realizan en los extremos de la conexión óptica (transmisión y recepción).

### 1.2.2. Hacia una red automática y flexible

La estandarización de la arquitectura de **plano de control** óptico (*Automatic-Switched Optical Network*, ASON) en 2001 y de la tecnología *Generalized Multi-Protocol Label Switching* (GMPLS) en 2004 permite la (re)configuración automática de los nodos todo ópticos y de otras funciones de red, como el descubrimiento de vecindad o de la topología de la red. Esto significa que los equipos que formarán los nodos ópticos del futuro estarán controlados por un tipo de software (p.ej., protocolos GMPLS) similar al de las redes orientadas a Internet (IP). Este software de control permite lo anteriormente expuesto y lo que de ello se deriva: suministro ultra rápido (en segundos, frente a las horas, días o semanas actuales) de conexiones, optimización de rutas, asignación automática de recursos, etc. Por otra parte, esta automatización de procesos minimiza, y en algunos casos hace innecesarias, ciertas operaciones que tradicionalmente han realizado los sistemas de gestión de las redes ópticas (SDH). El problema es que la línea entre el plano de gestión y el de control es borrosa, lo que puede llevar a la duplicación de funciones, con el aumento de coste que conlleva, o, aún peor, a las lagunas funcionales.

Por otro lado, la arquitectura de las **redes IP/WDM**, que es la que apuntan las futuras redes metropolitanas, conlleva la eliminación de la capa SDH y de otras capas superpuestas, como la *Asynchronous Transfer Mode* (ATM). Esto simplifica en gran manera su gestión, que actualmente está orientada a las diferentes tecnologías existentes en las redes ópticas, es decir, se requieren diferentes sistemas de gestión para SDH, ATM, IP y WDM. Pero también presenta desafíos; al eliminar estas capas, las funciones que realizan los sistemas de gestión asociados deben ser absorbidas por otros elementos de la red. Estas funciones son la ingeniería de tráfico y la gestión de la calidad de servicio (incluyendo la robustez de la red). Además, este hecho se ve agravado en redes grandes, que por su extensión requieren varios dominios administrativos donde la actual centralización de sistemas de gestión representa un cuello de botella, sobre todo para las funciones sensibles a la latencia, como la protección/restauración de servicios caídos.

Otro aspecto novedoso es que en los últimos años se ha pasado paulatinamente de un paradigma de servicio operador-cliente a otro mucho más difuso. Esto es debido, por una parte, al hecho de que la fibra óptica ya no pertenece necesariamente a un tercero (el operador), sino

que puede pertenecer a un usuario o a un condominio. Esto se conoce como *user-* o *customer-empowered network*. Además de las operadoras de telecomunicaciones, otras empresas (televisión, distribuidoras de energía, carreteras, ferrocarriles, etc.) e instituciones (Ayuntamientos, comunidades vecinales) disponen de fibra óptica, llamada oscura. A esto se suman los nuevos **servicios y aplicaciones distribuidos** como los *grids*, que requieren un gran ancho de banda bajo demanda, de forma rápida y en algunos casos también de forma autónoma.

De lo expuesto anteriormente, este trabajo pretende dar respuesta a las siguientes preguntas, que son a la vez los objetivos de la tesis:

1. ¿Cómo podemos modelar un plano de gestión simple y descentralizado que pueda ocuparse de forma eficiente de las tareas relacionadas con el establecimiento de conexiones ópticas y la operación del entorno de red dinámico y distribuido derivado del plano de control y las nuevas aplicaciones y servicios?
2. ¿Cuánto y cuán rápido podemos saber sobre los servicios transportados por una red óptica IP/WDM para poder asegurar que disponemos de suficiente información para garantizar una cierta calidad de servicio, todo ello sin destruir la transparencia (señal óptica)?

Cabe destacar que en esta tesis las palabras *conexión* y *servicio* óptico se utilizan indistintamente, pues se considera una red IP/WDM de conmutación de circuitos (canales WDM), es decir, la red ofrece un único servicio (*lambda service*) en forma de conexión extremo a extremo.

### 1.3. Desarrollo de la tesis

Partiendo de un escenario de migración de las actuales redes SDH a redes todo ópticas con un plano de control, la visión de esta tesis es que el plano de control será el responsable del encaminamiento, los mecanismos de establecimiento y eliminación de las conexiones ópticas y la ingeniería de tráfico. Es decir, muchas de las funciones ‘clásicas’ del plano de gestión serán absorbidas por el plano de control, y de esta forma el plano de gestión ya no necesitará disponer de un conocimiento detallado de la red. Otras funciones de gestión, como la interfaz con los usuarios, serán compartidas entre ambos planos funcionales. Las únicas funciones que claramente quedarán detro de las competencias del plano de gestión serán la monitorización y la gestión de la calidad de servicio. Por ello, es imprescindible un buen diálogo entre los planos de control y gestión, que en esta tesis constituye el **primer nivel de descentralización** del plano de gestión propuesto, llamado interfaz de gestión de red (**NMI**) y resumido en el lema “la red es la base de datos”.

Por otro lado, las arquitecturas y servicios emergentes que sitúan a los usuarios en el corazón de la red (*customer-empowered networks*) conllevan una necesaria descentralización de al menos la gestión de las peticiones de conexiones ópticas. Esto constituye el **segundo nivel de descentralización** propuesto por esta tesis, llamado interfaz de gestión de usuario (**UMI**) y resumido en el lema “los usuarios pueden solicitar servicios de forma autónoma”. Finalmente, el **tercer nivel de descentralización** propuesto es la distribución de los sistemas de gestión de la red que, juntamente con los agentes de gestión, forman el plano de gestión. Este nivel viene motivado por la necesidad de gestionar de forma rápida y eficiente redes con más de un dominio, como es el caso de la mayor parte de redes metropolitanas. Este nivel recibe el nombre de la interfaz que lo hace posible (como los anteriores niveles propuestos), que es la interfaz inter-gestión (**I-MI**) y tiene como consecuencia la transformación del clásico sistema de gestión (NMS) en gestores ópticos distribuidos (**DOM**).

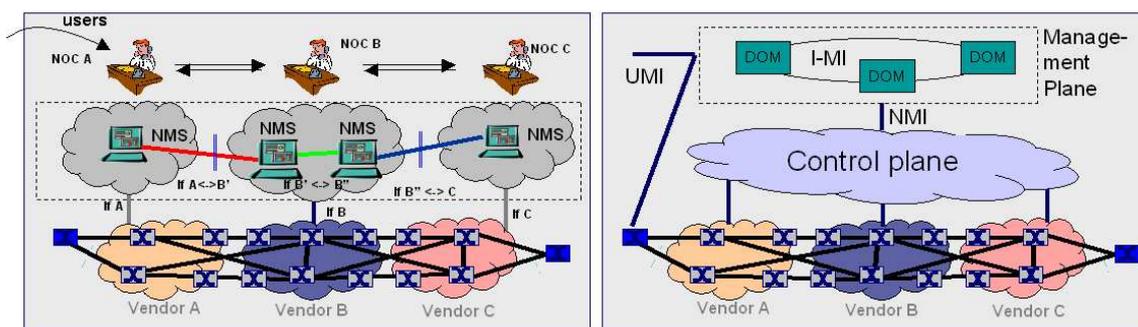


Figura 1.1: Evolución de red propuesta: de múltiples sistemas orientados a tecnologías y con intervención humana (a) a automatización de funciones e interfaces universales (b).

Con la aplicación de estos tres niveles de descentralización conseguimos pasar de una red multicapa (IP, ATM, SDH, WDM) con intervención humana por parte del operador en varias funciones, incluyendo el suministro de conexiones (Fig. 1.1, izquierda) a una red automática con interfaces universales con los usuarios y entre los planos funcionales de la red (Fig. 1.1, derecha).

El desarrollo del segundo objetivo de la tesis se centra en la **definición de parámetros de servicio** (SLA) aplicables en redes todo ópticas, y en el **diseño de un sistema de monitorización** capaz de medir estos parámetros en tiempo real y de forma no intrusiva, para cumplir con dos preceptos especiales: la validación de la calidad de servicio en tiempo real (puesto que las conexiones son bajo demanda y su 'vida' puede ser corta) y en la preservación de la transparencia, por las ventajas que aporta (ver apartado 1.2.1). Si se quiere garantizar la calidad de los servicios transportados en canales WDM, entendiéndolo que un canal transporta una única clase de servicio (*lambda service*) de forma no intrusiva, el primer requisito es definir clases con complejidad limitada. Esta tesis propone tres clases (VoIP-like, IPTV-like e Internet+), que están inspiradas por los requerimientos de los servicios *Triple Play*<sup>1</sup>, añadiendo características relevantes de servicios de emergencia (establecimiento rápido, gran disponibilidad) y conversacionales (bajas pérdidas de paquetes y latencia).

Los parámetros de servicio propuestos están descritos en el capítulo 3. Cabe destacar que únicamente tienen en cuenta las capas física (óptica, con WDM) y de red (IP), pues son las capas de las redes IP/WDM. Las métricas de paquetes (capa IP) están derivadas de los requerimientos de los perfiles de tráfico que forman cada servicio. También cabe destacar que una red todo óptica introduce un único tipo de latencia (*delay*), que es el debido a la transmisión (unos 5 microsegundos por kilómetro), pues no realiza regeneración eléctrica en los nodos intermedios. Esta latencia es un porcentaje  $\alpha$  de la latencia extremo a extremo de los paquetes. Por este mismo motivo, las únicas pérdidas de paquetes (*packet loss*) apreciables en recepción son las causadas por la acumulación de degradaciones físicas mencionada en el apartado 1.2.1. La única métrica de la capa óptica es la relación señal a ruido óptica, que proporciona una estimación del bit error rate, tal como demostraron Humblet, Azizogğlu y Becker en los años 90. Además de estos parámetros, monitorizables una vez el servicio está activo, se han propuesto métricas del tiempo máximo de establecimiento de un canal óptico, vital para el ancho de banda bajo demanda, y de disponibilidad (probabilidad de bloqueo), muy importante en servicios de emergencia y aplicaciones distribuidas como *grids* (p.ej., teleastronomía, que únicamente dispone de unos minutos al día para obtener datos de un satélite).

<sup>1</sup>Voz sobre IP (VoIP), televisión IP (IPTV) y datos.

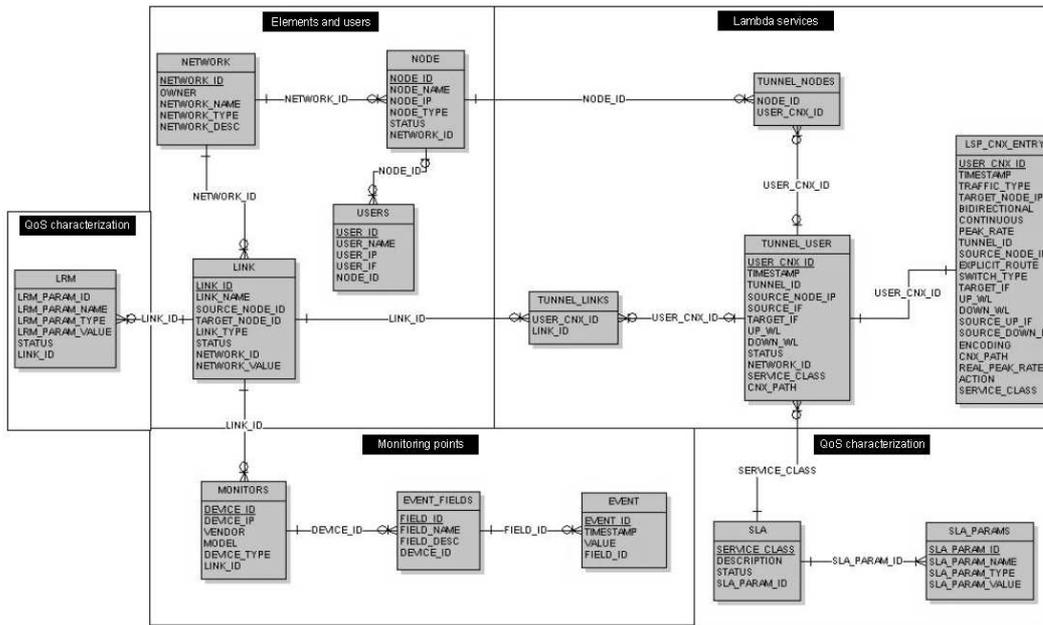


Figura 1.2: Modelo de información del sistema de monitorización propuesto.

La Fig. 1.2 ilustra el modelo de información del sistema de monitorización propuesto. Cabe destacar que la base de este sistema son los elementos de monitorización, o sensores, que permiten obtener métricas WDM e IP sin destruir la señal óptica, lo que se traduce en monitorización espectral en la capa óptica y en medidas de paquetes en los equipos clientes (después de la conversión opto-eléctrica, en recepción) o mediante paquetes IP de prueba multiplexados con los datos de los clientes de la red óptica. La información proporcionada por estos elementos es filtrada y unificada por elementos intermedios (los *gatherers*), que reenvían la información relevante al gestor de eventos para la validación de la calidad de los servicios activos (según los parámetros del Cuadro 2.1) y la actualización del estado de los recursos ópticos (para que el plano de control pueda realizar tareas de protección/restauración y encaminamiento teniendo en cuenta las degradaciones físicas, es decir, *impairment-aware routing and wavelength assignment*).

## 1.4. Conclusiones de la tesis

A pesar de la ralentización del sector de las telecomunicaciones, las cifras actuales y las previsiones de futuro<sup>2</sup> hacen pensar que la evolución hacia redes todo ópticas se iniciará en la primera década del siglo XXI. Estas redes permitirán el transporte de todos los tipos de servicios y aplicaciones existentes, y los que surjan en el futuro. Sin embargo, esta perspectiva tan prometedora se ve amenazada por los desafíos que representa la integración de inteligencia (control) y la eliminación de la regeneración eléctrica, que deben ser gestionadas correctamente. En este contexto, esta tesis ha propuesto y ha demostrado experimentalmente (ver capítulos 3 y 4) varias estrategias de gestión para suministrar de forma rápida y dinámica servicios ópticos con distintas calidades, y validar dichas calidades en tiempo real sin destruir la transparencia.

<sup>2</sup>Fuente: IDC Worldwide Next-Generation Optical Networking 2005-2009 Forecast Update.

## Capítulo 2

# Originalidad: orientación y aportaciones

La gestión de las redes metropolitanas del futuro presenta dos desafíos básicos: la eficiencia y la flexibilidad. Esta tesis ha abordado estos desafíos desde una perspectiva global y ha realizado varias aportaciones novedosas en lo que al suministro y garantía de calidad de servicio se refiere.

### 2.1. Perspectiva global

Los desafíos mencionados se han abordado desde una **perspectiva inter-plano** (*cross-plane*), tal como ilustra la Fig. 2.1, y que constituye una de las aportaciones originales de la tesis porque está basada en el diálogo entre planos funcionales y en interfaces universales, que pueden ser implementadas en virtualmente cualquier tecnología sin por ello modificar las funciones de cada interfaz y a la vez permite la integración de las propuestas de gestión en entornos heterogéneos. Por ejemplo, tal como detalla el capítulo 4, las interfaces UMI y NMI, que intervienen en el suministro de servicios, no tienen por qué estar implementadas en la misma tecnología, y de hecho en la implementación experimental realizada en esta tesis no lo están. Cabe destacar que, dentro de la I-MI y la NMI, esta tesis ha diseñado una **base de datos de gestión** simple y efectiva. La implementación de esta base dentro del *Internet-Standard Management Framework* de la organización *Internet Engineering Task Force* (IETF), llamada GMPLS-OCC-CTTC-MIB (Fig. 4.3 derecha), ha resultado ser mucho más simple (lo que deriva en gestión rápida) que las propuestas por la IETF, p.ej., GMPLS-LSR-MIB.

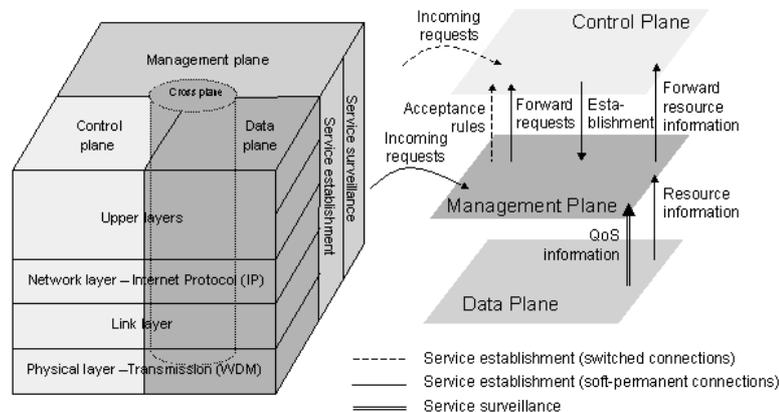


Figura 2.1: Cross-plane: planos, capas, funciones y diálogos.

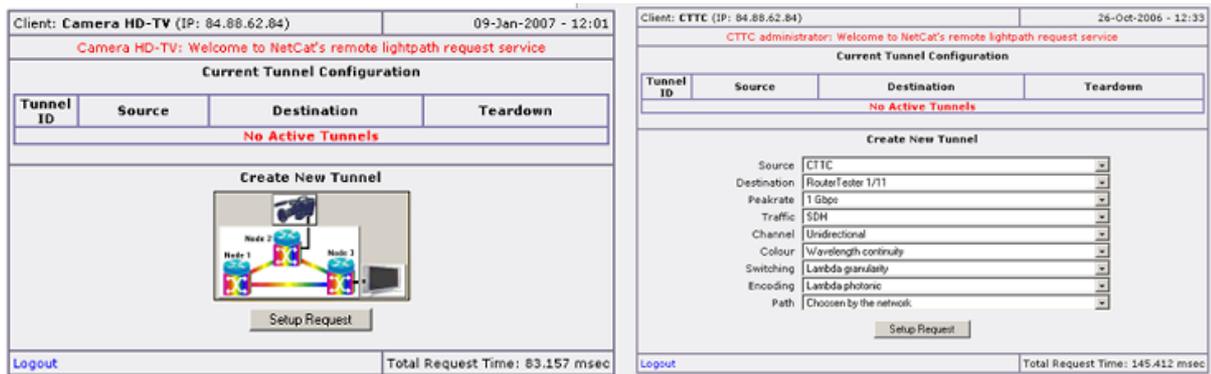


Figura 2.2: Formulario de solicitud de conexiones ópticas de la plataforma NetCat para un usuario con un único servicio (a) y para un usuario con múltiples servicios posibles (b).

Además, esta tesis aborda la **gestión multi-dominio desde una perspectiva peer-to-peer** (P2P), radicalmente distinta a los paradigmas actuales, que son centralizados o jerarquizados. A través de la interfaz I-MI propuesta, los gestores de la red (DOMs) forman una red virtual P2P estructurada. Esto significa que la red I-MI, que es superpuesta de forma lógica respecto a la red óptica, se realiza en base a un algoritmo conocido de antemano, que en este trabajo es Chord, propuesto por Stoica en 2003. Tanto los DOMs como los contenidos de gestión tienen asignado un identificador (*NodeID* y *Key*, respectivamente) pertenecientes al mismo dominio. El sistema P2P propuesto (DOMs e I-MI) utiliza una función DHT (tabla de Hash distribuida) para generar dichos identificadores y dispone de un algoritmo de *lookup* (Chord) capaz de localizar el DOM responsable de un contenido a partir de su identificador.

## 2.2. El *point and click* llega a las redes ópticas

El *point and click* es la acción que realizamos delante de una pantalla que permite interactividad (p.ej. un ordenador personal) cuando movemos el cursor hacia un punto determinado y clicamos con el botón del ratón u otro método de interacción. Esta acción es muy sencilla y por este motivo se utiliza en muchos sistemas, desde las páginas web hasta las interfaces gráficas de los cajeros automáticos. Una aportación original de esta tesis es trasladar este concepto al mundo de los servicios ópticos. Esto se ha realizado mediante el modelado de un **interfaz de usuario universal** (UMI, ver apartado 1.3) y la implementación de una plataforma de gestión de servicios accesible desde un sitio web. Esta plataforma es vista por los usuarios como un **sencillo** formulario (Fig. 2.2) con distintas opciones dependiendo del perfil de usuario. Esto representa un gran cambio respecto a la interacción entre los usuarios de una red metropolitana y los centros de servicio de la red (NOC, ver Fig. 1.1), que es lenta y requiere varias operaciones manuales. Un buen ejemplo de ello es la frase “*rapid circuit provisioning (often same day)*”<sup>3</sup>, que la operadora londinense Fibernet destaca por su ‘rapidez’ en suministrar servicios. Además de ser una interfaz **universal** y automática, el sistema *point and click* propuesto (plataforma NetCat, ver capítulo 4) permite la solicitud de conexiones de forma **autónoma** por parte del usuario.

<sup>3</sup>Fuente: [http://www.fibernet.co.uk/products\\_and\\_solutions/carrier\\_services/lcr.asp](http://www.fibernet.co.uk/products_and_solutions/carrier_services/lcr.asp)

Cuadro 2.1: Definición de SLAs en redes IP/WDM transparentes

SLA parameter		Lambda service class			Monitoring point
QoS block	QoS parameter	VoIP-like	IPTV-like	Internet+	
Service-intrinsic	Setup delay	<1 sec	<10 sec	<1.5 min	OCC or DOM
	Availability (BP)	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	Control plane
	Throughput	Up to maximum laser bit rate			
	Packet delay/ $\alpha$	<50msec	<500msec	<5sec	IP meter
	Packet loss	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-1}$	
	Physical (OSNR)	$OSNR_{targetBER} + \Delta OSNR_{BERest}$			

### 2.3. Calidad asegurada en el dominio de la luz

Actualmente, los acuerdos de servicio (SLA) incluyen únicamente parámetros digitales, ya sea a nivel de capa física (*bit error rate*), de enlace (*block error checks*) o de red (paquetes perdidos, latencia de paquetes extremo a extremo). En una red todo óptica, estos parámetros se pueden obtener únicamente en un punto: después del receptor óptico. Esto deriva en tres alternativas no excluyentes: i) añadir parámetros de servicio que puedan ser monitorizados en cualquier lugar de la red sin destruir la señal óptica, ii) destruir la transparencia en ciertos puntos de la red para obtener parámetros digitales mediante regeneración eléctrica, y iii) obtener información únicamente extremo a extremo. Optar por una única alternativa es ‘peligroso’, pues la calidad de los servicios ofrecidos es la base de negocio de cualquier operador de red de telecomunicaciones.

Esta tesis propone combinar estas alternativas de la forma menos costosa en términos de *capital expenditure* (capex), y un pequeño incremento del coste operacional (opex) del sistemas de monitorización, del que cualquier red dispone. Esto se consigue combinando dos factores: una propuesta de SLA simple, con un número reducido de clases y con parámetros medibles de forma no intrusiva (Cuadro 2.1), tal como se ha explicado en el apartado 1.3, y un sistema capaz de proporcionar la información necesaria para validar esta SLA en tiempo real y, adicionalmente, proporcionar información de capa física para ser integrada en los mecanismos de encaminamiento y reserva de longitudes de onda necesarios para establecer conexiones ópticas, con el fin de tener en cuenta el estado de los recursos y así evitar rutas que no proporcionen la calidad deseada para el tipo de tráfico que transportará el servicio solicitado. Y todo ello sin destruir las señales ópticas.

Podemos decir que la originalidad de esta tesis tiene dos vertientes bien diferenciadas: por un lado, la orientación, y por otro, la apuesta decidida por el entorno todo óptico y dinámico. Además, este trabajo ha cubierto los objetivos planteados desde una perspectiva holística y realista, ambas cualidades indispensables de cualquier sistema de gestión. En cuanto a las aportaciones, se han primado la rapidez y flexibilidad en las funciones de gestión tratadas (el suministro y la monitorización de conexiones ópticas), y la garantía de la calidad de servicio, pues son requerimientos esenciales para afrontar y superar los desafíos apuntados al inicio de este capítulo.



# Capítulo 3

## Resultados obtenidos

Esta tesis persigue la sencillez y eficiencia de un plano de gestión óptico en lo que se refiere al suministro y validación online de la calidad de servicios ópticos, es decir, conexiones (canales WDM extremo a extremo). Por regla general, cuanto más sencillo y eficiente es un sistema, más rápido es. Por lo tanto, la figura de mérito de los resultados obtenidos es el tiempo que cada uno de los procesos de gestión tarda en realizar las tareas mencionadas.

### 3.1. Suministro de canales ópticos en menos de un segundo

Se han realizado extensas campañas de medidas de tiempos de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas desde la **perspectiva del operador** de la red y de los usuarios [A2,A3,A4,C4,C7,C8,C11,C12,C14]. Esto se ha realizado en el contexto de un demostrador de red experimental, tal como se describe en el capítulo 4. En el primer caso, además, se ha realizado un modelo analítico basado en generación de peticiones de suministro de servicios siguiendo el conocido modelo de Poisson y se ha comparado con las medidas obtenidas (Fig. 3.1a) [C17]. En un mismo entorno de red, los tiempos de establecimiento (y también de eliminación, aunque no se muestran en la figura) de conexiones ópticas obtenidos con el modelo analítico propuesto se ajustan entre un 85 % y un 95 % a los tiempos obtenidos experimentalmente para tiempos entre llegadas de peticiones superiores a 50 milisegundos ( $0,5\mu$ , donde  $\mu$  es el tiempo de servicio del sistema de gestión). Es decir, los escenarios en los que el modelo se comporta correctamente parecen realistas para las redes IP/WDM con *lambda services*. En media, se ha observado que la eliminación de conexiones ópticas es diez veces más rápida que el suministro (establecimiento).

En cuanto a los tiempos de establecimiento obtenidos en las diversas campañas de medida, éstos han sido muy inferiores al segundo, aunque cabe destacar que a estos tiempos debería añadirse los tiempos de conmutación y encendido de los componentes ópticos, que suelen ser del orden de decenas de milisegundos. Por lo tanto, podemos decir que las estrategias de gestión propuestas permiten el suministro de canales ópticos en menos de un segundo. Esto se ha comprobado experimentalmente con una red de nueve nodos: tres del demostrador ADRENALINE (ver capítulo 4) más seis nodos emulados. También se ha estudiado el efecto de las características de las peticiones (uniformes o no uniformes) sobre el tiempo de establecimiento de las conexiones ópticas (Fig. 3.1b). Para ello, se ha introducido un factor de no uniformidad en el modelo de generación de peticiones de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas, que como en el caso anterior ha seguido el modelo de Poisson con duraciones de conexiones (*holding time*) distribuidas exponencialmente con media negativa. Se ha observado que en escenarios con nodos que concentran gran número de peticiones, p.ej. *hot spots*, los tiempos de establecimiento y

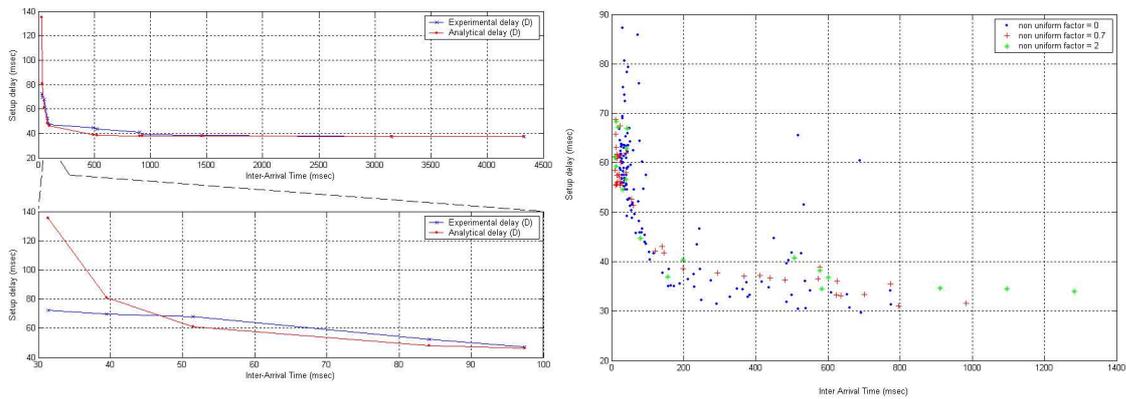


Figura 3.1: Tiempos de establecimiento de conexiones (analítico vs. experimental) para tráfico uniforme (a) y tiempos de establecimiento medidos experimentalmente para distintos tipos de tráfico no uniforme (b).

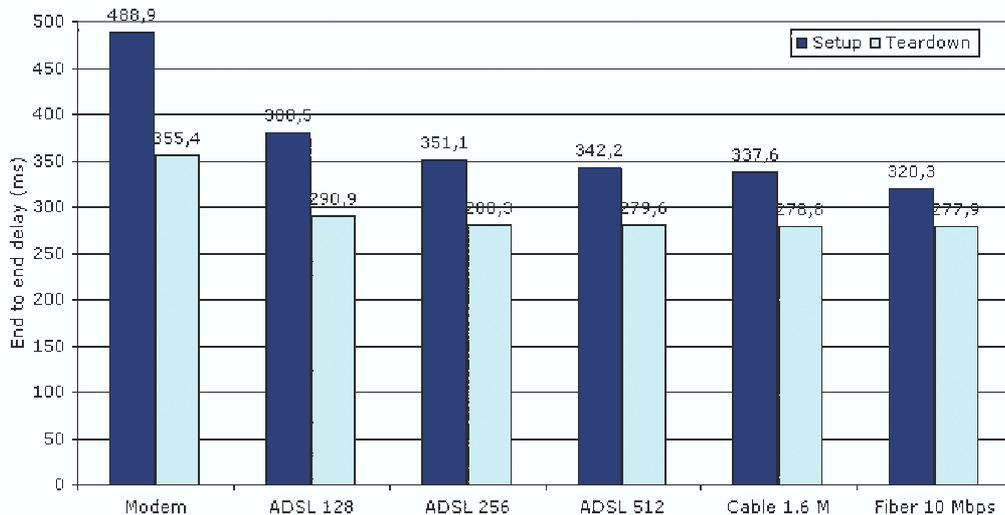


Figura 3.2: Tiempos de servicio percibidos por usuarios que solicitan conexiones de forma remota.

eliminación de conexiones apenas varían respecto a las peticiones uniformes (no uniformidad=0).

En el caso de **conexiones solicitadas** de forma autónoma **por parte de los usuarios**, se han medido los tiempos totales de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas solicitadas por parte de usuarios de forma remota mediante una plataforma web (NetCat, ver capítulo 4). La Fig. 3.2 ilustra estos tiempos para distintas redes de acceso (del usuario a la red óptica). Obviamente, estos tiempos son bastante más elevados porque a los tiempos ilustrados en la Fig. 3.1 se suman los tiempos de la plataforma de servicios que permite la gestión remota por parte de los usuarios (NetCat) y los tiempos de acceso de los usuarios a la plataforma, que presentan grandes diferencias dependiendo de la tecnología de acceso. Pero en cualquier caso, estos tiempos continúan por debajo de un segundo.

Finalmente, si consideramos que el **sistema de gestión** está **distribuido** (varios DOMs), los tiempos de servicio mencionados antes se ven incrementados entre un 5 y un 10 % a causa de la interfaz I-MI, lo que continúa por debajo de un segundo.

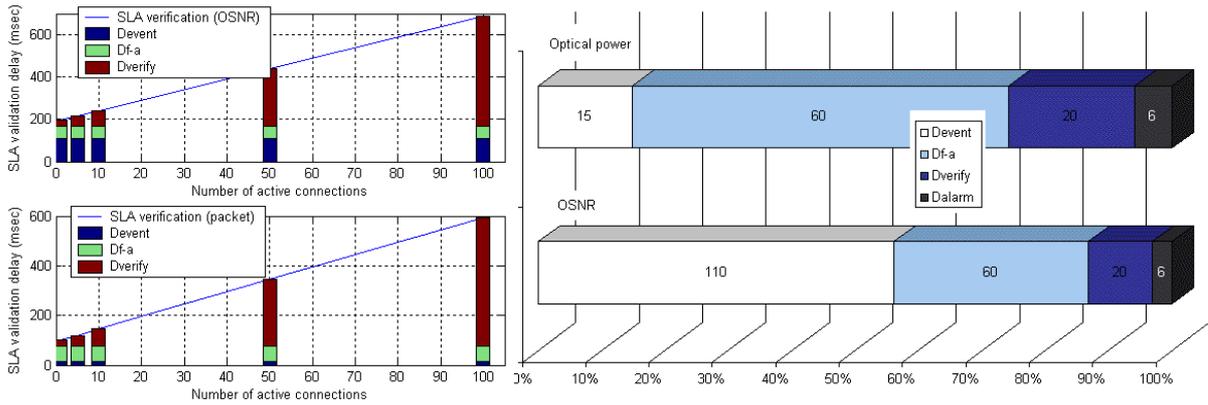


Figura 3.3: Tiempos de validación de calidad de servicio (a) y tiempos de actualización de recursos a nivel de canal WDM (b).

### 3.2. Validación de la calidad de servicio en tiempo real

Se han realizado varias medidas en distintos escenarios de servicios ópticos [C9,C10,C16,C18]. La Fig. 3.3a ilustra los tiempos de validación de calidad de servicio mediante distintos parámetros incluidos en la SLA propuesta (Cuadro 2.1). Se puede observar que el proceso que más influye en el tiempo total de validación de la calidad de los servicios transportados en la red es el de verificación (*Dverify* en la Fig. 3.3), pues se ha considerado el peor escenario, en el cual el gestor de eventos del sistema de monitorización valida los servicios de forma secuencial. Aún así, para 100 conexiones activas en el momento de la **validación de calidad**, el tiempo total es inferior al segundo, lo que puede ser considerado **tiempo real**. Y además, esto es realizado de manera totalmente no intrusiva, **preservando la transparencia** en todo momento.

Este resultado es muy interesante porque significa que es viable utilizar el sistema de monitorización propuesto no sólo para garantizar los parámetros de las SLAs (cosa que hoy en día es posible en redes SDH aunque únicamente mediante métodos intrusivos) sino también para **proveer al plano de control de información** sobre el estado de los recursos para que éste tome decisiones sobre nuevas conexiones a establecer o sobre la protección/restauración de las conexiones existentes. Insistimos en el hecho de que la eliminación de la regeneración eléctrica hace indispensables estas acciones, pues ya no se puede considerar a la red de transporte como ‘ideal’. En este sentido, la Fig. 3.3b ilustra los tiempos de actualización de recursos a nivel de canal WDM, que es la mínima granularidad que ofrece el entorno de red considerado en este trabajo (*lambda service*). Estos tiempos son inferiores a los 300 milisegundos, es decir, del orden de los tiempos de un plano de control GMPLS.

Los resultados presentados confirman que las estrategias de gestión propuestas permiten tiempos de establecimiento de conexiones ópticas suficientemente pequeños como para cumplir con el parámetro de tiempo máximo de establecimiento de las SLAs que están siendo propuestas para los servicios bajo demanda más restrictivos, incluidos los propuestos en esta tesis (Cuadro 2.1). Además, hemos demostrado que estas SLAs pueden ser validadas en tiempo real incluso para servicios con duración de segundos, y que se puede proporcionar información sobre el estado de los recursos a un plano de control en tiempo real. Y todo ello sin destruir la señal óptica.



# Capítulo 4

## Aplicabilidad práctica

Todas las propuestas y diseños descritos en los capítulos anteriores han sido implementadas experimentalmente. Los objetivos de estos prototipos, que forman un plano de gestión experimental, son por un lado la validación de las ideas propuestas, y por el otro la demostración de su integrabilidad tanto en la evolución de infraestructuras de red actuales como en el despliegue de redes futuras. Esto se ha conseguido mediante el balance entre arquitecturas y tecnologías actuales y emergentes, y en un entorno de sistemas heterogéneos. El plano de gestión experimental implementado forma parte de la infraestructura de red de laboratorio “All-optical Dynamic REliable Network hAndLING IP/Ethernet Gigabit traffic with QoS” (ADRENALINE), desarrollada íntegramente por el *Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya*. Además, dada la importancia de los servicios en esta tesis, se ha desarrollado una plataforma de petición remota y autónoma de conexiones ópticas (NetCat). En este capítulo se exponen las características novedosas que han aportado los prototipos experimentales derivados de esta tesis.

La Fig. 4.1 muestra el demostrador de red ADRENALINE a día de hoy. Al iniciar esta tesis, la arquitectura del demostrador constaba de tres nodos interconectados en topología de anillo mediante enlaces de fibra con WDM denso (espaciado de 100GHz). Cada nodo está dotado de un OADM y software GMPLS, y dispone de cuatro puertos cliente, para los cuales se dispone de láseres fijos y sintonizables en banda C. Los equipos cliente están emulados mediante un equipo comercial de generación y análisis de tráfico, el *Router Tester 900* de Agilent Technologies.

Esta tesis ha diseñado, implementado y validado el **plano de gestión del demostrador ADRENALINE**, formado por tres elementos (gestores de red, agentes de gestión y sistema de monitorización), y de un sistema de gestión de conexiones por parte de los usuarios (NetCat). Cabe destacar que el sistema de gestión de la red han sido probado en experimentos conjuntos con las **empresas** Telefónica I+D (operadora), Atos Origin (software GMPLS) y Alcatel (CIT y Bel, equipos de red) en el marco de un proyecto europeo [E1]. Asimismo, el sistema de monitorización ha formado parte de dos proyectos europeos [E2,E3], y en el proyecto [E3] se ha contado con el respaldo de un fabricante de dispositivos ópticos y de monitorización (la empresa israelí Civcom).

Los **gestores de red** (DOM) han sido implementados en el entorno Windows .Net, para el cual se ha utilizado el lenguaje C#. Su arquitectura, ilustrada en la Fig. 4.2, está basada en una aproximación orientada a servicios. Para ello se ha usado una tecnología emergente y que es la base de los extendidos *web services*: el protocolo *Service Oriented Architecture Protocol* (SOAP) y el lenguaje *eXtensible Markup Language* (XML). Es decir, los mensajes de la interfaz I-MI (entre gestores) y UMI (entre la plataforma de servicios NetCat y los gestores de red) están basados en SOAP/XML. Otro aspecto interesante es el uso de tablas de Hash distribuidas y del algoritmo Chord en la arquitectura de la red virtual que forma la I-MI (ver capítulo 2).

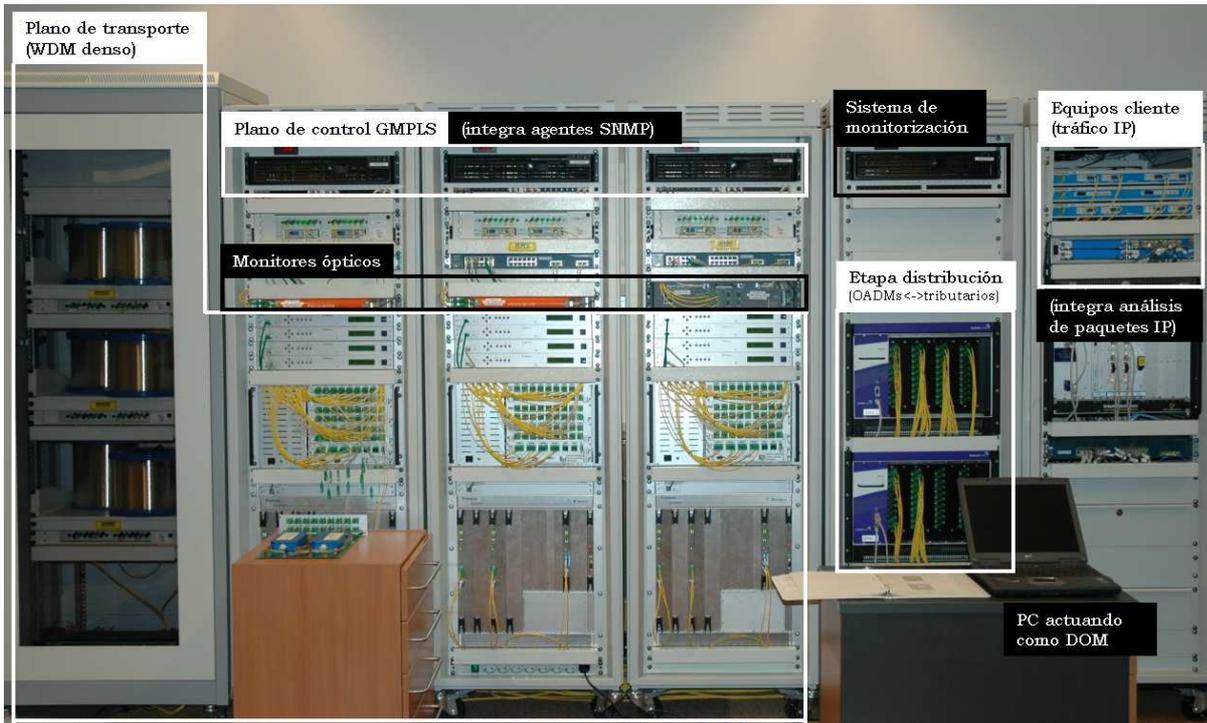


Figura 4.1: Vista del prototipo de red ADRENALINE, con tres nodos IP/WDM.

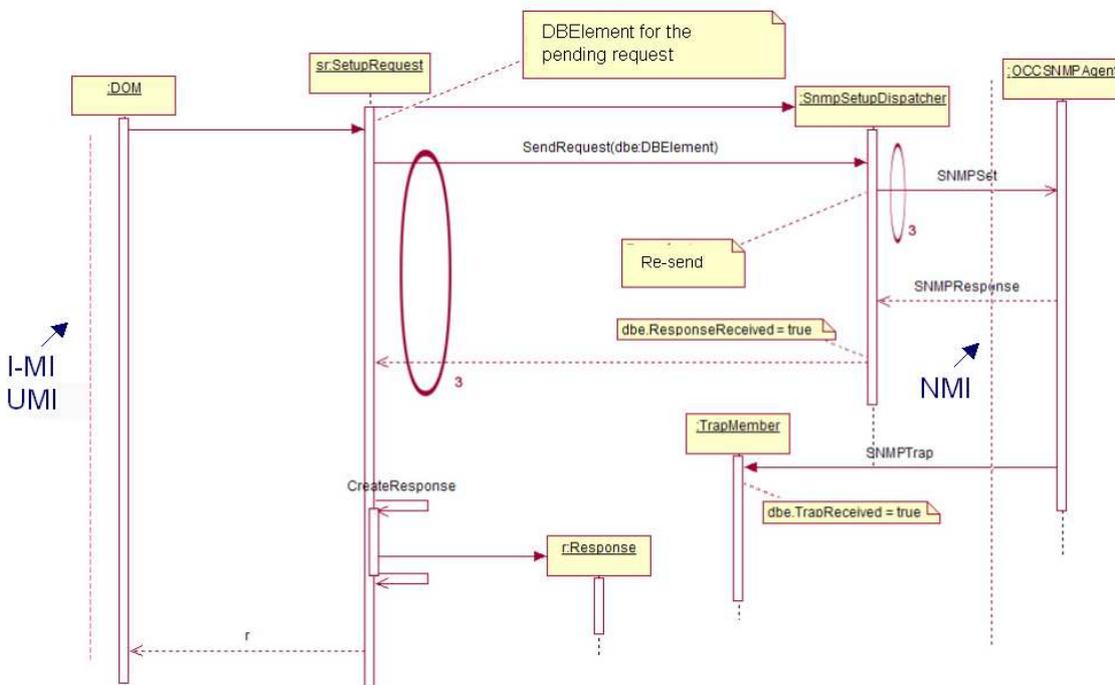


Figura 4.2: Arquitectura de los gestores de red (secuencia de eventos para suministro de servicios).

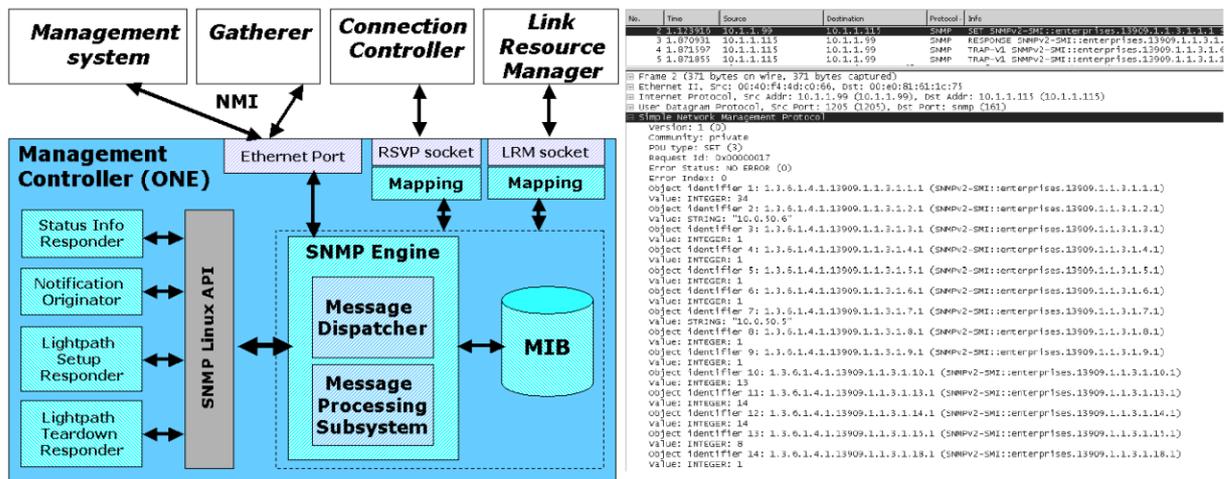


Figura 4.3: Arquitectura de los agentes de gestión (a) y mensaje SNMP de petición de establecimiento de una conexión óptica a través de la interfaz NMI (b).

Los **agentes de gestión** han sido integrados en los controladores que albergan el software GMPLS mencionado anteriormente. Por este motivo, los agentes han sido implementados en sistema operativo abierto Linux con lenguaje C. El protocolo utilizado para implementar la NMI es el más estándar y desplegado de las redes actuales, tanto ópticas como de otra índole: *Simple Network Management Protocol* (SNMP). La Fig. 4.3 muestra el diagrama de bloques de los agentes y un mensaje SNMP intercambiado entre un agente y un DOM utilizando los objetos del módulo de gestión GMPLS-OCC-CTTC-MIB, diseñado en esta tesis (ver capítulo 2).

La **plataforma de servicios** NetCat, accesible por parte de los usuarios de ADRENALINE vía web en <http://netcat.cttc.es> o bien mediante la instalación de una aplicación cliente SOAP, permite a los clientes autorizados (con equipos conectados físicamente a la red óptica) la petición de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas de forma remota y autónoma, eliminando la intervención de un operador de red humano. La Fig. 2.2 muestra el sencillo formulario de petición de establecimiento o eliminación de una conexión óptica por parte de dos perfiles de usuario distintos, con lo que se muestran todas las opciones posibles a elegir (fuente, destino, capacidad, velocidad de transmisión, etc.). Recientemente, se ha demostrado la aplicabilidad de esta plataforma para un servicio de televisión de alta definición (Fig. 2.2, izquierda).

El **sistema de monitorización** implementado experimentalmente es un sistema distribuido no intrusivo basado en las tecnologías Java y Shell Script y que realiza las tareas de monitorización y validación del estado de los recursos y de los parámetros de servicio definidos en el apartado 1.3 en tiempo real. Los monitores que proporcionan información del estado de los recursos son equipos comerciales de distintos fabricantes (Agilent Technologies, Proximion Fiber Optics y Digital Lightwave). La Fig. 4.1 ilustra los diferentes elementos del sistema. El equipo marcado como “sistema de monitorización” integra los *gatherers* y el gestor de eventos.

En líneas generales, podemos decir que la implementación de prototipos experimentales de las diferentes propuestas de la tesis demuestra la aplicabilidad de las mismas, y que además de hacerlo en un entorno de laboratorio, se han realizado pruebas de interoperabilidad con productos pre-comerciales de fabricantes de equipos, software de control y operadoras.



# Apéndice A

## Financiación y premios de la tesis

Esta tesis ha sido realizada íntegramente en el Área Investigación en Redes Ópticas del *Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya* (CTTC) y ha formado parte de **5 proyectos de I+D** financiados con fondos públicos liderados y/o con participación del CTTC. Los contenidos de la tesis incluidos en estos proyectos forman parte de **16 contribuciones a informes técnicos**, 7 de los cuales han sido editados por la autora. Además, la tesis ha derivado en **3 becas y premios**.

### PROYECTOS DE ÁMBITO NACIONAL

- [N1] “Estudio de Mejora de redes Personales y Locales para acceso Inalámbrico de alta velocidad y Realización de una red óptica de transporte con configuración dinámica de Canales Ópticos” (EMPIRICO). Organismo: Ministerio de Ciencia y Tecnología (Parques Científicos y Tecnológicos, PU-2002-56). Junio 2002 - Diciembre 2003.
- [N2] “Red Temática de Gestión en redes IP orientadas a circuitos virtuales MPLS”. Organismo: Ministerio de Educación y Ciencia (TEC2004-21061-E). Enero 2004 - Diciembre 2005.

### PROYECTOS DE ÁMBITO EUROPEO

- [E1] “Transparent Backbone Optical Network Simulator” (TBONES). Programa: EUREKA/ITEA (*label* 02024). Mayo 2003 - Mayo 2005.
- [E2] “Provisioning and monitoring of optical services” (PROMISE). Programa: EUREKA/CELTIC (*label* CP\_013). Enero 2005 - Septiembre 2006.
- [E3] IP “Next-generation Optical networks for Broadband European Leadership” (NOBEL). Programa: Information Society Technologies (IST). Enero 2004 - Diciembre 2005.

### INFORMES TÉCNICOS DERIVADOS DE PROYECTOS DE I+D

- [D1] **C. Pinart**, “State of the art and design criteria for the testbed implementation of an ASON management plane”. Proyecto EMPIRICO, Milestone 1 WP7, Octubre 2002.
- [D2] “Transparent Optical Networks: Requirements, Architecture, and Benefits. Part A: Requirements for Next Generation Transport Networks”. Proyecto TBONES, Deliverable D11/A, Agosto 2003.
- [D3] **C. Pinart**, “Implementation of the Optical NMS”. Proyecto EMPIRICO, Milestone 2 WP7, Septiembre 2003.

- [D4] “Transparent Optical Networks: Requirements, Architecture, and Benefits. Part B: Requirements for the TBONES simulator and testbed”. Proyecto TBONES, Deliverable D11/B, Diciembre 2003.
- [D5] “Specification of management plane simulator”. Proyecto TBONES, Deliverable D31, Enero 2004.
- [D6] “Specification of (validation) scenarios”, editado por **C. Pinart**. Proyecto TBONES, Deliverable D41, Mayo 2004.
- [D7] “Feasibility analysis of an integrated field trial”. Proyecto NOBEL, Deliverable D7, Septiembre 2004.
- [D8] **C. Pinart**, A. Amrani, R. Martínez, R. Jiménez, “Design and experimental implementation of an in-service performance monitoring system for intelligent, transparent WDM networks”, Proyecto NOBEL, Task Force ‘Optical Performance Monitoring’, Dic. 2004.
- [D9] “Identification and design of testbed experiments”. Proyecto NOBEL, Deliverable D14, Enero 2005.
- [D10] “Requirements for performance monitoring”, editado por **C. Pinart**. Proyecto PROMISE, Deliverable D3.4, Marzo 2005.
- [D11] “Experimental results obtained with the simulator and the interconnected simulator-real system platform”, editado por **C. Pinart**. Proyecto TBONES, Deliverable D42, Abril 2005.
- [D12] “Conclusions on NM and CP functional scope and standardization approaches; NM and ASON prototype functional scope”. Proyecto NOBEL, Deliverable D18, Abril 2005.
- [D13] “Preliminary integration and experimental results”, editado por **C. Pinart**. Proyecto NOBEL, Deliverable D22, Junio 2005.
- [D14] “Solutions for inter-domain and multi-layer NM & CP and Service Management concepts; NM and ASON prototype functional and design specification and test plan”. Proyecto NOBEL, Deliverable D25, Octubre 2005.
- [D15] “Specification of the measurement and monitoring solutions”. Proyecto PROMISE, Draft Deliverable D3.5, Marzo 2006.
- [D16] J. González Ordás, P. Arozarena Llopis, J. García Algarra, G. Shabtay, **C. Pinart Gilberga**, G. Junyent Giralt, J. Comellas Colomé, E. Escalona Zorita, S. Figuerola Fernández, “PROMISE: provisioning and monitoring of optical services”, Comunicaciones de Telefónica I+D, Issue 38, pp. 205-218, Abril 2006.

### BECAS Y PREMIOS

- [B1] Premio para Estudios de Postgrado otorgado por la *Fundació Agrupació Mútua*. Nov. 2003.
- [B2] Bolsa de viaje de la Acción Europea COST 270 para la *Short-Term Scientific Mission* “In-service performance monitoring and reliability aspects in physical impairments aware domains of transparency”. Estancia en *Kungliga Tekniska Högskolan* (Suecia), Junio 2005.
- [B3] Beca *Post-doctoral Fellowship for Foreign Researchers (Short-Term)* de la Japan Society for the Promotion of Science (JSPS). Estancia en *National Institute of Information and Communications Technology* (Tokio, Japón), Agosto-Septiembre 2006.

## Apéndice B

# Producción científica de la tesis

Esta tesis doctoral ha derivado en **8 artículos** en revistas internacionales de alto factor de impacto y **23 contribuciones** a congresos científico-técnicos.

### ARTÍCULOS EN REVISTAS

- [A1] R. Muñoz, **C. Pinart**, R. Martínez, A. Amrani, G. Junyent, “An experimental ASON based on OADM rings and a GMPLS control plane”, *Journal of Fiber and Integrated Optics*, Vol. 23, Nb. 2-3, pp. 67-84, Marzo-Junio 2004.
- [A2] R. Muñoz, **C. Pinart**, R. Martínez, J. Sorribes, G. Junyent, M. Maier, A. Amrani, “The ADRENALINE Test Bed: Integrating GMPLS, XML and SNMP in transparent DWDM networks”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 43, Issue 8, pp. s40-s48, Agosto 2005.
- [A3] **C. Pinart**, G. Junyent, “On managing optical services in future control plane enabled IP/WDM networks”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, Nb. 10, pp. 2868-2876, Octubre 2005.
- [A4] **C. Pinart**, G. Junyent, “Integration of peer-to-peer strategies and SOAP/XML for inter-domain, user-driven provisioning in an ASON/GMPLS network”, *IEEE/OSA Journal of Optical Networking*, Vol. 5, Nb. 4, pp. 246-262, Abril 2006.
- [A5] **C. Pinart**, G. Junyent, “The INIM system: in-service non-intrusive monitoring for QoS enabled transparent WDM”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 12, Nb. 4, pp. 635-644, Julio/Agosto 2006.
- [A6] R. Martínez, **C. Pinart**, F. Cugini, N. Andriolli, L. Valcarengi, P. Castoldi, L. Wosinska, J. Comellas, G. Junyent, “Challenges and requirements for introducing impairment-awareness into the management and control planes of ASON/GMPLS WDM networks”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 44, Nb. 12, pp. 76-85, Diciembre 2006.
- [A7] **C. Pinart**, “Alternatives for in-service BER estimation in all-optical networks: towards minimum intrusion”, *Journal of Computers*, Academy Publisher, pendiente de publicación, 2007.
- [A8] **C. Pinart**, H. Harai, R. Martínez, “Novel approach to building optical-layer link parameters for impairment constraint-based routing”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, pendiente de publicación, 2007.

## ARTÍCULOS EN ACTAS DE CONGRESOS Y CONFERENCIAS

- [C1] R. Muñoz, **C. Pinart**, G. Junyent, “Proyecto EMPIRICO: anillo metropolitano Gigabit Ethernet DWDM configurable dinámicamente mediante un plano de control óptico basado en GMPLS”, en *Proc. XII Jornadas Telecom I + D*. Madrid, 19-21 Noviembre 2002.
- [C2] R. Muñoz, **C. Pinart**, G. Junyent, “A GMPLS optical control plane for IP/Gigabit Ethernet over dynamic DWDM networks. Testbed implementation for soft-permanent connections”, en *Proc. 7th IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM 2003)*. Budapest (Hungría), 3-5 Febrero 2003.
- [C3] R. Muñoz, R. Martínez, G. Junyent, **C. Pinart**, A. Amrani, “Performance evaluation of two new GMPLS lightpath setup proposals over an unidirectional OADM ring implemented on a testbed”, en *Proc. 29th European Conference on Optical Communication (ECOC 2003)*. Rimini (Italia), 21-25 Septiembre 2003.
- [C4] **C. Pinart**, G. Junyent, “On implementing a management plane for service provisioning in IP over reconfigurable WDM networks”, en *Proc. 8th Working Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM 2004)*. Gante (Bélgica), 2-4 Febrero 2004.
- [C5] B. Berde, O. Audouin, D. Colle, S. De Maesschalck, P. Demeester, I. Lievens, D. Papadimitriou, B. Rousseau, **C. Pinart**, R. Muñoz, R. Martínez, J. González, J. Jiménez, P. Arozarena, R. Theillaud, V. Piperaud, “Service-oriented transparent optical backbone networks in the ITEA TBONES project”, en *Proc. 8th Working Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM 2004)*. Gante (Bélgica), 2-4 Febrero 2004.
- [C6] R. Muñoz, **C. Pinart**, R. Martínez, J. Sorribes, G. Junyent, “Experimental demonstration of two new GMPLS lightpath setup proposals for soft-permanent connections over a unidirectional OADM ring implemented on EMPIRICO testbed”, en *Proc. III Workshop MPLS Networks*. Girona, 25-26 Marzo 2004.
- [C7] **C. Pinart**, G. Junyent, “Experimental test of management integration in GMPLS enabled metro WDM networks for service provisioning”, en *Proc. 30th European Conference on Optical Communications (ECOC 2004)*. Estocolmo (Suecia), 5-9 Septiembre 2004.
- [C8] **C. Pinart**, R. Muñoz, G. Junyent, “Experimental implementation of distributed management for service provisioning in an ASON/GMPLS testbed”, en *Proc. 9th IEEE International Conference on Communications Systems (ICCS 2004)*. Singapur, 6-8 Sept. 2004.
- [C9] **C. Pinart**, A. Amrani, G. Junyent, “Monitoring service "health" in intelligent, transparent optical networks”, en *Proc. IFIP Optical Networks & Technologies Conference (OpNeTec 2004)*. Pisa (Italia), 18-20 Octubre 2004.
- [C10] **C. Pinart**, A. Amrani, G. Junyent, “Monitorización de servicios en redes ópticas inteligentes y transparentes”, en *Proc. XIV Jornadas Telecom I+D*. Madrid, 23-25 Noviembre 2004.
- [C11] R. Muñoz, **C. Pinart**, R. Martínez, J. Sorribes, G. Junyent, “ADRENALINE testbed: User management of lightpaths over intelligent optical WDM networks through GMPLS and XML”, en *Proc. IFIP International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TRIDENT COM 2005)*. Trento (Italia), 22-25 Febrero 2005.

- 
- [C12] **C. Pinart**, G. Junyent, “NetCat: cross-plane approach for dynamic, distributed service provisioning in a GMPLS enabled optical testbed”, *en Proc. Optical Fiber Communications Conference/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2005)*. Anaheim (USA), 6-11 Marzo 2005.
- [C13] R. Muñoz, **C. Pinart**, R. Martínez, M. Requena, A. Amrani, J. Sorribes, G. Junyent, “Experimental GMPLS fault management for OULSR transport networks”, *en Proc. OFC/NFOEC 2005*. Anaheim (USA), Marzo 6-11 2005.
- [C14] **C. Pinart**, R. Muñoz, J. Cebrià, G. Junyent, “Experimental user-oriented architecture for rapid provisioning in IP/WDM networks”, Poster/demo session, *en Proc. IEEE INFOCOM Conference (INFOCOM 2005)*. Miami (USA), 13-17 Marzo 2005.
- [C15] B. Berde, **C. Pinart**, J. González, J. Jiménez, K. Casier, R. Theillaud, V. Piperaud, D. Papadimitriou, “An Experience on Implementing Network Management for a GMPLS Network”, *en Proc. IV G/MPLS Workshop*. Girona, 22-25 Abril 2005.
- [C16] **C. Pinart**, A. Amrani, G. Junyent, “Design and experimental implementation of a hybrid optical performance monitoring system for in-service SLA guarantee”, *en Proc. 9th IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2005)*. Niza (Francia), 16-19 Mayo 2005.
- [C17] **C. Pinart**, V. Cardoner, G. Junyent, “Analytical study and experimental validation of soft-permanent provisioning delays in ASON/GMPLS”, *en Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC 2005)*. Seúl (Corea), 16-20 Mayo 2005.
- [C18] **C. Pinart**, R. Martínez, G. Junyent, “Experimental implementation of dynamic in-service performance monitoring for lambda services”, *en Proc. 31st European Conference on Optical Communications (ECOC 2005)*. Glasgow (Inglaterra), 25-29 Septiembre 2005.
- [C19] R. Muñoz, R. Martínez, **C. Pinart**, J. Sorribes, G. Junyent, “Experimental in-fiber GMPLS fault management for 1:1 OUPSR R-OADM networks”, *en Proc. 31st European Conference on Optical Communications (ECOC 2005)*. Glasgow (Inglaterra), 25-29 Septiembre 2005.
- [C20] R. Muñoz, P. Vázquez, I. Martínez, M. Requena, **C. Pinart**, G. Junyent, “Optical Transport Network of the ADRENALINE Testbed: GMPLS Metropolitan All-Optical Tuneable AWG-based R-OADM ring”, *en Proc. IEEE/Create-net International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TRIDENTCOM 2006)*. Barcelona, 1-3 Marzo 2006.
- [C21] R. Martínez, **C. Pinart**, J. Comellas, G. Junyent, “On-line ICBR in a transparent GMPLS network: a reality check”, *en Proc. V Workshop in G/MPLS networks (WGN5)*. Girona, 30-31 Marzo 2006.
- [C22] R. Martínez, **C. Pinart**, J. Comellas, G. Junyent, “Routing issues in transparent optical networks”, *invited paper en el 2nd Reliability Issues in Next Generation Optical Networks (RONEXT) COST270 WG1 Workshop*, *en Proc. 8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2006)*. Nottingham (Inglaterra), 18-22 Junio 2006.
- [C23] **C. Pinart**, “Minimum-intrusion approaches for in-service BER estimation in transparent WDM networks”, *en Proc. 17th IFIP/IEEE International Workshop on Distributed Systems: Operations and Management (DSOM 2006)*. Lecture Notes in Computer Science, LNCS 4269, pp. 221-226. Dublín (Irlanda), 23-25 Octubre 2006.