



EMPIRICO project: Gigabit Ethernet DWDM metropolitan ring dynamically configurable through a GMPLS-based optical control plane (original title: Proyecto EMPIRICO: Anillo Metropolitano Gigabit Ethernet DWDM Configurable)

R. Muñoz, C. Pinart, G. Junyent

Publication:	XIV Jornadas Telecom I+D. Madrid (Spain)
Vol.:	-
No.:	-
pp.:	-
Date:	November 19-21, 2002

This publication has been included here just to facilitate downloads to those people asking for personal use copies. This material may be published at copyrighted journals or conference proceedings, so personal use of the download is required. In particular, publications from IEEE have to be downloaded according to the following IEEE note:

©2007 IEEE. Personal use of this material is permitted. However, permission to reprint/republish this material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution to servers or lists, or to reuse any copyrighted component of this work in other works must be obtained from the IEEE.

Proyecto EMPIRICO: Anillo Metropolitano Gigabit Ethernet DWDM Configurable Dinámicamente Mediante un Plano de Control Óptico basado en GMPLS

Raül Muñoz¹, Carolina Pinart¹, Gabriel Junyent²

¹Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Cataluña (CTTC), Área de Redes Ópticas
C/ Gran Capità 2-4 08034 Barcelona, {raul.munoz, carolina.pinart}@cttc.es

²Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Grupo de Comunicaciones Ópticas
C/ Jordi Girona 1-3 08034 Barcelona, junyent@tsc.upc.es

Resumen

En este artículo se presenta un resumen de la red óptica del proyecto '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), dedicado al diseño e implementación de un *test-bed* basado en la arquitectura de una red *Automatically Switched Optical Network* (ASON). La red óptica del proyecto pretende ser una alternativa a las redes actuales de datos multicapa (IP/ATM/SDH/WDM), con problemas de escalabilidad frente a la gran demanda de ancho de banda de tráfico de datos que existe actualmente, proponiendo la tecnología Gigabit Ethernet como sustituto de ATM/SDH.

EMPIRICO pretende realizar el diseño e implementación de un anillo metropolitano DWDM reconfigurable dinámicamente, en tiempo real, mediante un plano de control basado en GMPLS, ofreciendo también todas las ventajas de Ethernet como ancho de banda flexible, escalable y bajo demanda (*just-in-time*) a bajo coste o un sistema de gestión simple, pero ofreciendo aquello que actualmente Ethernet es incapaz de ofrecer en comparación con SONET/SDH: supervivencia [protección], fiabilidad y calidad de servicio (QoS).

1 Introducción

Desde 1995 ha habido un extraordinario incremento en el tráfico de datos a nivel mundial, liderado principalmente por el explosivo crecimiento de Internet. En [1] se muestra una estimación de la demanda de tráfico IP a nivel europeo, requiriendo en el 2005 un ancho de banda de 25.000 Gbit/s correspondiente al tráfico nacional (del conjunto de los diferentes países), y un ancho de banda de 10.000 Gbit/s para el tráfico internacional (o de interconexión entre ellos). Justo al inicio del milenio, el volumen mundial del tráfico de datos duplicaba al del tráfico de voz, y esta tendencia continuará en los próximos años. Al mismo tiempo existe una fuerte presión por parte de los clientes para reducir los precios de las redes.

La necesidad de transportar más tráfico de datos, combinada con la necesidad de minimizar el coste de transportar dicho tráfico, da lugar a una situación donde los proveedores de servicios (SP) necesitan soluciones que les permitan transportar un gran volumen de tráfico de datos de la manera más económica posible, tanto para redes metropolitanas (MAN) como para redes de área extendida (WAN).

Con la arquitectura de red de datos actual (Figura 1), se ha demostrado que aportar soluciones que permitan a los SPs transportar un gran volumen de datos de una manera eficiente en coste es todo un desafío [2].

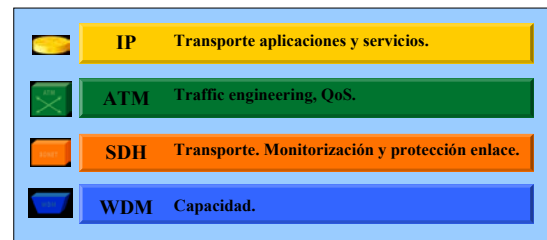


Figura 1. Arquitectura actual de las redes de datos

Esta situación está motivando a la comunidad de investigación a buscar nuevas tecnologías capaces de solucionar el difícil compromiso entre incremento de ancho de banda y minimización de costes. Una propuesta novedosa es la idea de expandir Ethernet más allá de los límites de la LAN, aprovechando todas las ventajas que ofrece Ethernet respecto SDH/ATM. Dichas ventajas son:

- Ancho de banda escalable a bajo coste: desde 10, 100, 1000 Mbit/s o 10 Gbit/s a un precio comparativamente reducido. En redes SDH aumentar la velocidad de línea conlleva un gran coste.

- Flexibilidad, ancho de banda dinámico: suministro de un ancho de banda en incrementos tan pequeños como 10 Kbit/s, seleccionados y ajustados por el cliente, con el cliente pagando sólo por el ancho de banda utilizado. Los cambios en el ancho de banda Ethernet se pueden realizar en segundos, mientras que en tiempo típico requerido para los servicios tradicionales de SDH es de semanas.

- Gestión de red más simple: la gestión de una red Ethernet se simplifica considerablemente debido a la carencia de conversiones de protocolos (SDH y ATM).

- Menor Coste: las redes Ethernet son más económicas de desarrollar que las redes SDH, debido a que requieren un equipamiento de menor coste y una formación del personal menos especializada.

Pero la evolución de Ethernet a MAN/WAN no es tan simple y directa como cabría esperar, fundamentalmente debido a dos principales desventajas que se detallan a continuación:

- QoS: SDH y ATM ofrecen una QoS garantizada, superando a la tecnología Ethernet, que sólo puede ofrecer *best-effort* QoS.

- Supervivencia (protección/restauración): Ethernet permite *loops* que suministran redundancia tolerante a los fallos, pero sin embargo en una red Ethernet *multi-loop*, la reconfiguración para identificar una ruta alternativa, deseable en caso de una avería en la red, puede llevar varios minutos.

Por consiguiente, la tecnología Ethernet aún no está lo bastante madura, comparada con SDH/ATM, para traspasar el límite de la LAN, y requiere de mejoras considerables. Siguiendo esta línea, existe una iniciativa del IEEE 802.17 denominada *Resilience Packet Ring* (RPR), que intenta paliar dichos problemas. EMPIRICO es otro esfuerzo en ese sentido que toma provecho de los nuevos adelantos en tecnología óptica y de conmutación para realizar redes de conmutación ópticas inteligentes capaces de hacer Ethernet más fiable, ofreciendo supervivencia y QoS que permitan desarrollar redes de datos de alta velocidad, y solucionar las carencias que actualmente presenta Ethernet frente a SDH/ATM.

2 Descripción del proyecto EMPIRICO

El proyecto EMPIRICO, iniciado en Junio de 2002 y con una duración de 2 años, se basa en el diseño e implementación en laboratorio de un anillo Gigabit Ethernet metropolitano con tecnología DWDM, formado por tres nodos *Optical Add-Drop Multiplexer* (OADM) capaces de insertar y extraer longitudes de onda de forma totalmente óptica, donde se pueden establecer dinámicamente y en tiempo real conexiones ópticas bi-direccionales entre dos puntos de la red de forma totalmente transparente. Cada conexión óptica transportará 1 Gigabit Ethernet, pero debido a la transparencia de la capa óptica se pueden transportar otros tipos de tráfico cliente (SDH, ATM, etc.). Para los transmisores y los receptores ópticos de este proyecto la velocidad máxima se ha limitado a 2,5 Gbit/s por longitud de onda.

EMPIRICO está basado en el concepto de redes ASON cuya arquitectura lógica (Figura 2) se puede descomponer en tres planos; el plano de transporte, plano de control y plano de gestión.

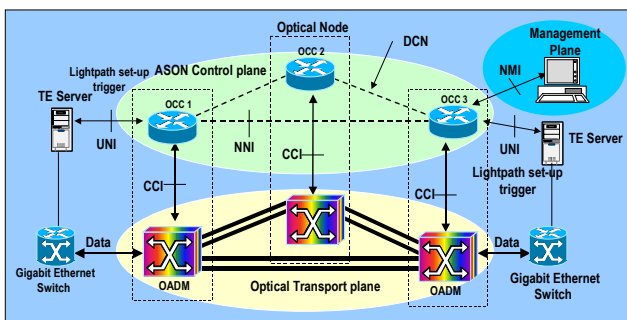


Figura 2. Arquitectura lógica del test-bed de EMPIRICO

El plano de transporte es la red de transporte óptica propiamente dicha, y es el responsable de suministrar canales ópticos unidireccionales o bi-direccionales entre usuarios y detectar información del estado de la conexión (como averías o calidad de la señal). El plano de control soporta el establecimiento/eliminación en tiempo real y de forma dinámica de conexiones ópticas mediante protocolos de señalización y enrutamiento, utilizando la interfaz *Network Node Interface* (NNI) para comunicarse con los otros nodos y la interfaz *Connection Control Interface* (CCI) para configurar el hardware óptico del nodo. Finalmente, el plano de gestión lleva a cabo la solicitud de conexiones ópticas *soft-permanent* y, en un futuro,

realizará funciones de gestión para los planos de control y transporte, como gestión de averías, configuración de elementos de red, operaciones de contabilidad o seguridad.

2.1. Establecimiento de canales ópticos

Existen dos casos de establecimiento de canales ópticos en el *test-bed* del proyecto EMPIRICO: mediante el sistema de gestión de la red óptica (NMS) o mediante un servidor de ingeniería de tráfico (TES).

En el primer caso (Figura 3), el NMS es quien inicia el establecimiento de la conexión óptica, es decir, informa al nodo origen, a través de la interfaz *Network Management Interface* (NMI), de la petición de establecimiento de una conexión óptica. Una vez el nodo origen recibe dicha petición, se utilizan los protocolos de señalización y enrutamiento del plano de control para establecer el canal óptico con el nodo destino. Por último, el nodo origen recibe una respuesta afirmativa o negativa de la creación de la conexión óptica e informa al NMS. Este tipo de conexión recibe el nombre de *soft-permanent*.

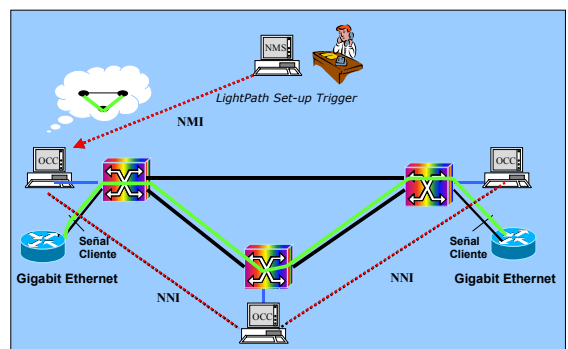


Figura 3. Establecimiento de conexión mediante NMS

Así, la comunicación entre el NMS y el nodo óptico origen se realiza a través de la interfaz NMI, y se basa en el protocolo de gestión *Simple Network Management Protocol* (SNMP), mientras que la comunicación entre los nodos ópticos se realiza a través de la interfaz NNI, y se basa en los protocolos de enrutamiento y señalización de *Generalized Multiprotocol Label Switching* (GMPLS), con lo que este tipo de conexiones se considera híbrido porque involucra tanto al plano de gestión como al de control, aunque no explota todas las posibilidades del plano de control óptico. Por último, hay que remarcar que quien solicita la conexión óptica al NMS es el operador de red, con lo cual la petición de conexiones ópticas *soft-permanent* depende única y exclusivamente del factor humano.

En el segundo caso (Figura 4), los comandos de iniciación para establecer canales ópticos son enviados por TES. Cada nodo dispone de un TES que se encarga de monitorizar el tráfico en los equipos cliente, que en el *test-bed* de EMPIRICO son conmutadores Gigabit Ethernet con capacidad de enrutar tráfico IP (*routing and switching*). La información recogida por cada TES (carga de cada puerto, paquetes perdidos, recursos disponibles, etc.) se utiliza para estimar situaciones desfavorables en que podrían ser necesarias más conexiones ópticas. Cuando un TES detecta una situación crítica se solicita una nueva

conexión óptica a su nodo. Igual que en el caso anterior, cuando el nodo origen detecta la petición de establecimiento de una conexión, se utilizan los protocolos de señalización y de enrutamiento del plano de control para establecer la conexión óptica con el nodo destino. Una vez el nodo origen recibe la respuesta afirmativa o negativa de la creación de la conexión óptica, se informará al TES para que éste configure los puertos del equipo cliente que requiere el canal óptico. Este tipo de conexión recibe el nombre de *dinámica*, y en él la comunicación entre el TES y el nodo óptico se realiza a través de la interfaz *User Network Interface* (UNI) [15].

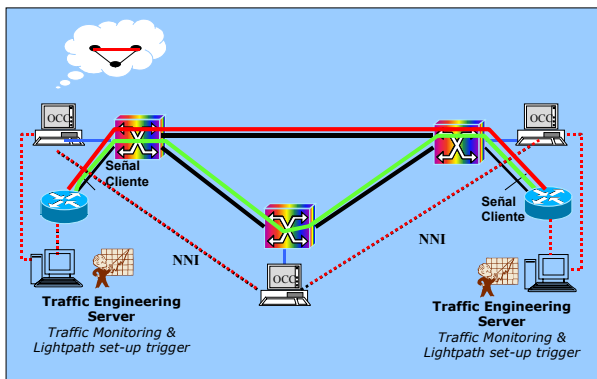


Figura 4. Establecimiento de conexión mediante TES

2.2. Arquitectura propuesta para el plano de transporte

Una red de transporte óptica (OTN) ofrece canales ópticos unidireccionales o bi-direccionales transparentes al formato y a la velocidad de la señal cliente que transportan, lo que permite crear una plataforma multi-cliente (IP, ATM, SDH, PDH, Ethernet, etc.) donde cada cliente puede operar con una velocidad independiente de las demás. En el proyecto EMPIRICO se realizará una red óptica experimental de laboratorio basada en un anillo metropolitano DWDM que interconectará diferentes redes de área local (LAN), con interfaces de 1 Gigabit Ethernet, aunque cada canal óptico podrá soportar hasta 2,5 Gbit/s.

La red experimental del proyecto EMPIRICO está formada por un anillo DWDM con tres nodos ópticos que permiten la extracción e inserción de canales ópticos de forma totalmente óptica. Cada par de nodos ópticos está unido por dos carretes de fibra óptica de 35 km en el *test-bed* de laboratorio, y cada fibra transporta 8 canales de datos DWDM con una separación de 100 GHz. En el proyecto EMPIRICO se realizarán dos implementaciones del anillo óptico: (i) unidireccional y (ii) bi-direccional [3]. El primer año se implementará un anillo óptico unidireccional y el segundo un anillo óptico bi-direccional, incluyendo sus respectivos mecanismos de protección para cada tipo de anillo. A continuación se describe brevemente el funcionamiento de cada tipo de anillo, la estructura de los nodos ópticos y los mecanismos de protección de los canales para anillos uni- y bi-direccionales.

2.2.1. Anillo óptico unidireccional

Un anillo unidireccional (Figura 5) sólo utiliza una de las dos fibras para transmitir los canales ópticos en servicio en un único sentido. La otra fibra está dedicada exclusivamente a la protección.

La protección en la capa óptica se basa en conmutar los canales ópticos que circulan por la fibra de trabajo hacia la fibra de protección. Esta conmutación se realiza a nivel de multiplexado óptico, es decir, se conmuta todo el multiplexado de canales DWDM como si fueran una única unidad. Este tipo de protección contempla tanto las averías del nodo óptico, como de la fibra de trabajo. Cada nodo óptico dispone de un par de conmutadores ópticos 2x2 que son los responsables de dicha conmutación. Este mecanismo de protección recibe el nombre de *Automatic Protection Switching* (APS).

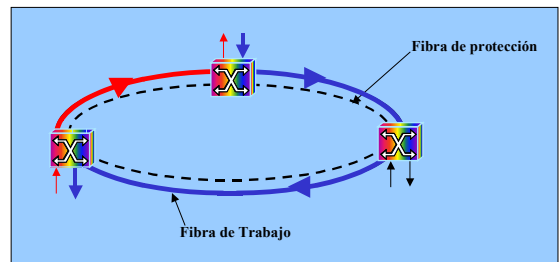


Figura 5. Ejemplo de canal óptico bi-direccional en anillo unidireccional

La estructura básica de un nodo óptico de un anillo unidireccional (Figura 6) está formada por un OADM, que permite la inserción y extracción de longitudes de onda de forma óptica, amplificadores ópticos, conmutadores ópticos 2x2 que permiten realizar la protección óptica y monitorizadores, que permiten detectar los niveles de potencia en la fibra óptica. Además de todos estos componentes ópticos se necesita un controlador que monitorice y configure los diferentes componentes que forman el nodo.

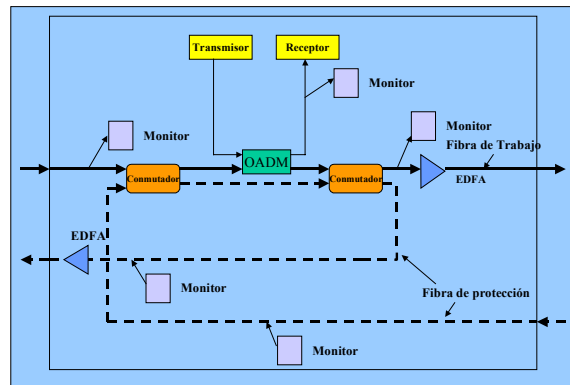


Figura 6. Estructura de un nodo óptico de un anillo unidireccional

2.2.2. Anillo óptico bi-direccional

Un anillo bi-direccional (Figura 7) utiliza dos fibras para transmitir canales ópticos de servicio, de tal forma que se utiliza una fibra para transmitir en un sentido y la otra para transmitir en sentido opuesto.

La principal diferencia entre la estructura de un nodo óptico unidireccional con respecto a la de un nodo bi-direccional es la inclusión de otro OADM, y la eliminación de los conmutadores 2x2. Además también se deben incluir dispositivos que dupliquen la señal óptica y conmutadores que seleccionen la mejor señal óptica recibida, para implementar la protección óptica, tal y como se describe más adelante.

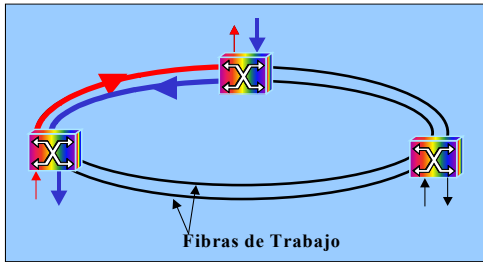


Figura 7. Ejemplo de canal óptico bi-direccional en anillo bi-direccional

Básicamente, el funcionamiento de un nodo óptico bi-direccional (Figura 8) se basa en dos OADMs, uno para cada fibra óptica, ya que se utilizan ambas fibras para transportar canales ópticos de trabajo. La señal óptica a transmitir se duplica en transmisión para enviarla en los dos sentidos del anillo. Análogamente, en recepción se recibirán señales ópticas por ambos sentidos del anillo, reservando una de ellas para la protección óptica. Cuando se deje de detectar potencia en la señal óptica recibida se conmutará para poder recibir la señal óptica del otro sentido del anillo.

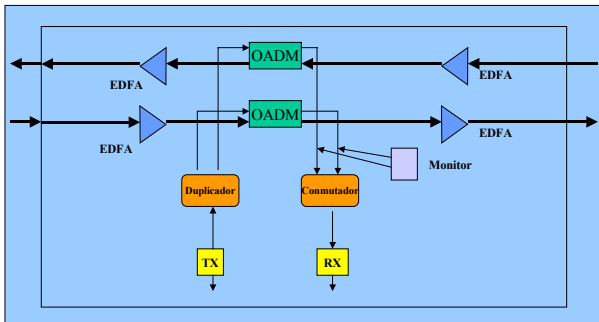


Figura 8. Estructura de un nodo óptico de un anillo bi-direccional

2.2.3. Dispositivos OADM

La función de un OADM es extraer un canal óptico que se transporta en una longitud de onda DWDM de una fibra óptica, e insertar un nuevo canal óptico a la misma longitud de onda, bien sea de forma fija o de forma dinámica mediante dispositivos reconfigurables. En el proyecto EMPIRICO se implementarán un total de 6 OADMs configurables dinámicamente donde cada OADM podrá insertar y extraer hasta 4 longitudes de onda de las 8 disponibles por cada fibra óptica. Para la implementación de los OADM se evaluarán las siguientes tecnologías [4]: conmutadores 2x2, conmutadores NxN, *Arrayed Waveguide Gratings* (AWG) y filtros sintonizables *Bragg Gratings*.

La Figura 9 ilustra el diagrama de bloques de un OADM reconfigurable dinámicamente que utiliza multiplexadores por división en el espacio (conmutadores) 2x2 entre un multiplexador y un demultiplexador. Se necesita un conmutador 2x2 por longitud de onda, y en función de la configuración del conmutador óptico se permite que dicho canal óptico continúe hacia el demultiplexador y la fibra de salida, o bien que sea extraído del nodo y se inserte un nuevo canal óptico en su lugar.

El OADM basado en conmutadores NxN (Figura 10) es muy parecido al anterior, simplemente se utiliza una matriz de conmutación NxN en lugar del array de conmutadores

2x2. La tecnología más evolucionada es la *Micro-Electro Mechanical Systems* (MEMS), que se basa en espejos controlados mecánicamente mediante tecnologías electrostáticas o magnéticas. Existen dos tecnologías: la 2D, que permite actualmente tener un máximo de 32 puertos, y la 3D, que permite tener miles de puertos.

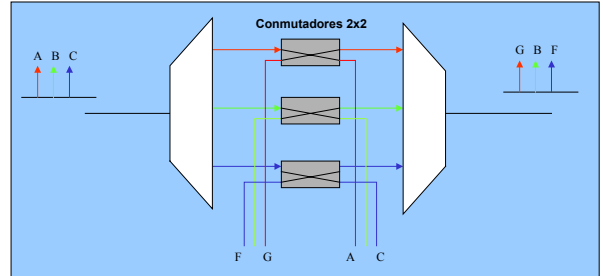


Figura 9. OADM reconfigurable basado en conmutadores 2x2

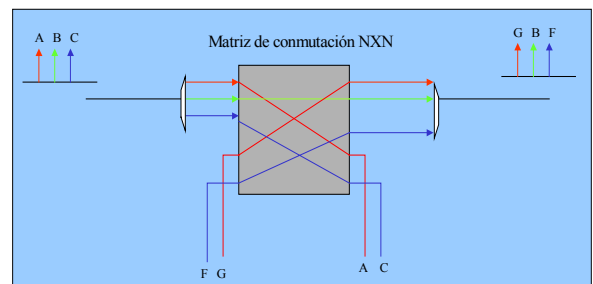


Figura 10. OADM reconfigurable basado en conmutadores NxN

Los dispositivos AWG también se conocen comúnmente como *Phased-Array Gratings* (PHASARS) y *Waveguide Grating Routers* (WGR). Es una de las tecnologías líder para la construcción del dispositivo OADM, debido a que permite integrar muchas funciones en un único dispositivo de óptica integrada. Básicamente, el AWG es un dispositivo de N entradas y N salidas que permite multiplexar, demultiplexar y enrutar, es decir, si a la entrada se inyecta una señal multiplexada se tiene a la salida todas las longitudes de onda y viceversa, si a las entradas se conectan longitudes de onda separadas se agrupan todas en una única salida. Mediante la combinación de un AWG de NxN y varios conmutadores 2x2 (uno por longitud de onda) se pueden obtener nodos ópticos con funcionalidad de OADM (Figura 11).

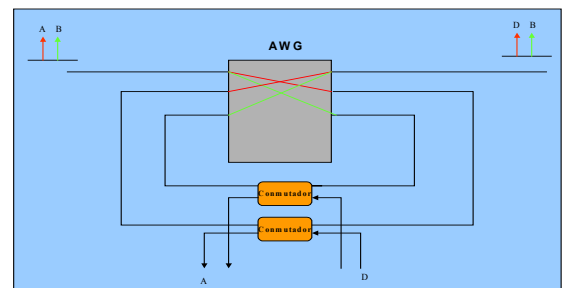


Figura 11. OADM reconfigurable basado en conmutadores NxN

Existen diferentes tecnologías para filtros sintonizables, pero una de las más prometedoras es la que utiliza *Bragg Grating* en fibras ópticas. Estos filtros tienen la característica de dejar pasar todas las longitudes de onda con muy débil atenuación, menos aquella que se sintoniza.

El resultado es la reflexión de la longitud de onda deseada. Concatenado una serie de estos filtros en la fibra óptica se logrará separar tantas longitudes de onda como se quiera (Figura 12). Además, al ser filtros sintonizables podrán ser reconfigurables dinámicamente. Para extraer las longitudes de ondas reflejadas se utiliza un circulador óptico, y una vez que se han extraído se separan mediante un demultiplexador. Para insertar canales ópticos sólo hace falta un multiplexador y otro circulador óptico.

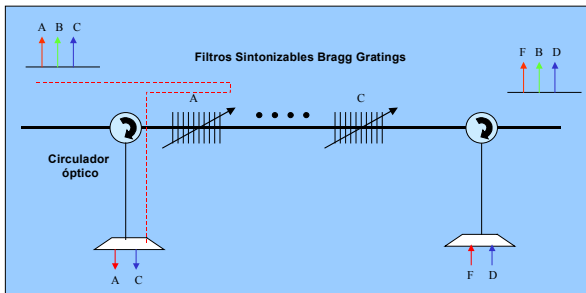


Figura 12. OADM reconfigurable basado en Bragg gratings sintonizables

2.2.4. Interconexión entre OADM y equipos clientes

El OADM puede insertar y extraer un conjunto de canales ópticos simultáneos, y a la vez también habrá un conjunto de equipos cliente que deberán utilizar dichos canales. Los equipos cliente, que en el proyecto EMPIRICO serán conmutadores Gigabit Ethernet, tienen varios puertos ópticos bidireccionales (transmisión y recepción) que pueden emitir en primera o segunda ventana. Por tanto se deberán adaptar estos puertos a las longitudes de onda que se insertan y se extraen del anillo óptico. Es decir, la idea es que cualquier equipo cliente pueda recibir e insertar cualquiera de las longitudes de onda disponibles en el OADM. Existen posibles soluciones para solucionar este problema, y todas pasan por la utilización de láseres sintonizables que permitirán al equipo cliente seleccionar un longitud de onda dentro de un rango, y conmutadores 1xN o NXM que permiten seleccionar diferentes puertos de entrada/salida de un OADM.

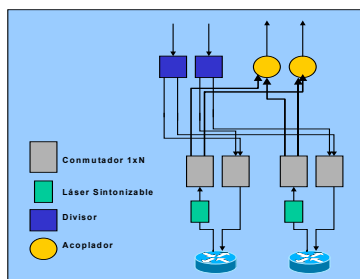


Figura 13. Interconexión equipos cliente y OADM con conmutadores 1xN

En el proyecto EMPIRICO se opta por la opción 1xN (Figura 13), para la que se necesita un conmutador 1xN para cada transmisor y receptor, y una serie de *splitters* (divisores) y acopladores que dividen y agrupan la señal óptica respectivamente en N fibras ópticas. Hoy en día existen *splitters* que compensan las pérdidas que introducen mediante la incorporación de amplificadores ópticos integrados en el mismo dispositivo.

2.3. Arquitectura propuesta para el plano de control

Este apartado presenta un estudio experimental del plano de control óptico propuesto para el *test-bed* de la red ASON [5] del proyecto EMPIRICO.

El plano de control óptico de una ASON tiene la función principal de dotar de inteligencia a la red de transporte óptica [6], permitiendo, mediante protocolos de enrutamiento y señalización, el aprovisionamiento (establecimiento y eliminación) dinámico y flexible de canales ópticos en tiempo real, ingeniería de tráfico (TE) para la asignación de las rutas y recursos (longitudes de onda), protección / restauración óptica automática, calidad de servicio y redes privadas virtuales ópticas (OVPN).

El plano de control puede estar basado en protocolos IP o en ATM. Originariamente la *Internet Engineering Task Force* (IETF) propuso basar el plano de control de una red óptica en protocolos de enrutamiento y señalización IP, particularmente en el plano de control MPLS, que es esencialmente el plano de control *Multiprotocol Label Switching* (MPLS) con extensiones para la conmutación de λ s. Más recientemente, también ha sido propuesto GMPLS [7], que extiende MPLS para soportar múltiples tipos de conmutación, como la conmutación de paquetes, por división en el tiempo (TDM, que permite la conmutación SONET/SDH), de λ s o de fibras.

Concretamente, el plano de control GMPLS toma como base los siguientes protocolos IP: *Link Management Protocol* (LMP) [8] como protocolo de descubrimiento de vecinos, *Open Shortest Path First* (OSPF) [9] o *Intermediate System-Intermediate System* (IS-IS) [10] como protocolo de descubrimiento de los recursos y topología de la red óptica, y *Resource Reservation Protocol Traffic Engineering* (RSVP-TE) [11] o *Constraint-Based Routing Label Distribution Protocol* (CR-LDP) [12] como protocolo de señalización. En los últimos meses también se ha propuesto basar el plano de control en protocolos ATM, como el *Private Optical NNI protocol* (PONNI) [13].

El proyecto EMPIRICO se centra en la descripción, diseño e implementación de los principios arquitectónicos y de los requerimientos funcionales de un plano de control óptico basado en GMPLS. Así, el plano de control óptico propuesto (Figura 14) está compuesto por una red de comunicación de datos (DCN) y por tres controladores de conexiones ópticas (OCC). La DCN está implementada por enlaces Ethernet de 100 Mbit/s transportados en longitudes de onda de 1310 nm, fuera de banda, proporcionando canales de control con conectividad IP entre nodos ópticos vecinos. Los canales de datos multiplexados se transportan en la banda C (1550 nm) por la misma fibra que los mensajes de control, siendo los OCCs los responsables de manipular los recursos ópticos de la red de transporte con el objetivo de gestionar y supervisar el establecimiento y eliminación de las conexiones ópticas mediante el intercambio de mensajes de control. Cada OCC se ha implementado en una plataforma Linux bi-procesadora a 1 GHz que actúa como un *router* IP, en el que cada interfaz Ethernet utiliza direcciones IPv4. Obsérvese que el NMS también utiliza la DCN para el intercambio de mensajes de gestión.

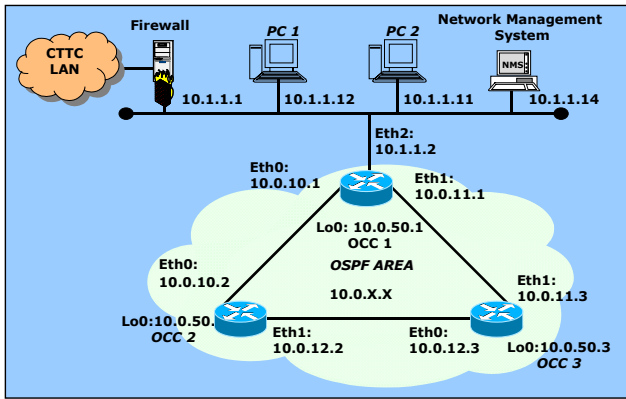


Figura 14. Red de comunicación de datos (DCN)

Los OCCs se han diseñado siguiendo una arquitectura en línea con [5] (Figura 15), y sólo difieren en la ausencia de funcionalidades menores no contempladas por el proyecto EMPIRICO, como encriptación o autenticación. Hay que remarcar que [5] describe el plano de control únicamente en términos de módulos que representan entidades abstractas, definiendo los servicios suministrados y/o utilizados por cada módulo, así como sus interfaces, quedando sin especificar qué protocolos de enrutamiento y señalización se deben utilizar. A continuación se ofrece una breve descripción de cada módulo de la arquitectura propuesta para el plano de control óptico:

- **Connection controller (CC):** gestiona y supervisa el establecimiento, modificación y eliminación de las conexiones ópticas, asignando rutas y recursos ópticos a cada petición. Es el responsable de la coordinación entre todos los demás módulos.

- **Routing controller (RC):** almacena información de la topología de la red óptica. Consiste en una lista de destinos alcanzables y un enlace de salida recomendado para cada destino, que se actualiza dinámicamente mediante el protocolo de enrutamiento OSPF. La función de RC es responder a las peticiones del CC cuando éste necesita información sobre una ruta para establecer un canal óptico.

- **Link Resource Manager (LRM):** almacena información local sobre el estado de los recursos de los enlaces ópticos, tanto los disponibles como los que se utilizan para alguna conexión. La información almacenada es global en caso de utilizarse el protocolo de enrutamiento OSPF con extensiones para GMPLS.

- **Network Call Controller (NetCallC):** acepta (después de verificar los derechos y políticas de recursos), procesa y valida las peticiones entrantes del servidor de ingeniería de tráfico, por lo tanto este módulo no se implementa para conexiones *soft-permanent*.

- **Protocol Controller (PC):** mapea los parámetros de las interfaces abstractas de los componentes de control en mensajes transportados por un protocolo para soportar interconexión mediante una interfaz. En el proyecto EMPIRICO se implementan cuatro interfaces; NNI, CCI, NMI y UNI. La interfaz NNI, aún en vías de estandarización, permite comunicarse con los demás OCCs de la red óptica mediante los canales de control de la DCN, utilizándose el protocolo RSVP para señalización, con las oportunas extensiones para adaptarlo a la arquitectura

GMPLS [11] [14]. En cuanto a la interfaz UNI, estandarizada en versión 1.0 [15], permite comunicarse con el TES e, igual que la interfaz NNI, utiliza RSVP como protocolo de señalización. Para la interfaz CCI, que permite comunicarse con el hardware óptico del nodo, incluyendo los OADMs, el proyecto EMPIRICO implementará un protocolo de carácter propietario, debido a la ausencia de un protocolo utilizado por la mayoría de los fabricantes, existiendo únicamente el *General Switch Management Protocol* (GSMP) [16] como propuesta de la IETF para protocolo estándar de la interfaz CCI. Por último, la interfaz NMI permite comunicarse con el NMS y se basa en el protocolo en SNMP [17], estandarizado para gestión, operaciones y mantenimiento de redes.

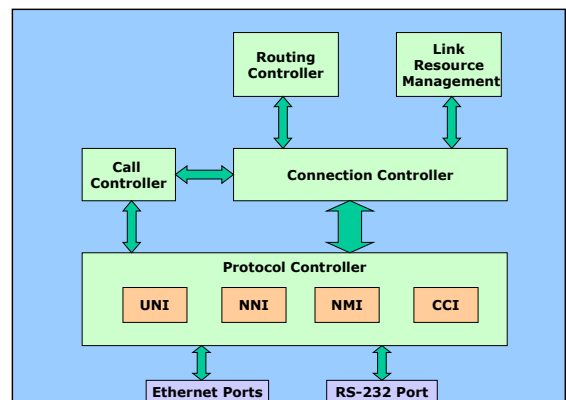


Figura 15. Arquitectura propuesta para los OCCs

2.3.1. Implementación de los módulos del OCC para conexiones *soft-permanent*

En este apartado se describe la implementación de los módulos de los OCCs para el caso de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas *soft-permanent*, en las que el NMS configura el nodo origen de la conexión óptica y, mediante los protocolos de enrutamiento y señalización del plano de control óptico, se establece la conexión óptica con el nodo destino. Este escenario se está desarrollando actualmente en el *test-bed* del proyecto EMPIRICO, implementándose en el segundo año del proyecto los TES, encargados de monitorizar los equipos cliente y establecer dinámicamente conexiones ópticas a través de la interfaz UNI en función del tráfico.

2.3.1.1. Routing Controller y Link Resource Manager

La función principal de estos controladores es almacenar la información de topología y disponibilidad de recursos de la red óptica en bases de datos, para ser utilizada por el CC.

Cuando se desea establecer un canal óptico, el CC debe decidir la ruta (nodos y enlaces) y longitud de onda para dicho canal óptico. Dado un conjunto de conexiones, el problema de asignar una ruta y una longitud de onda a cada conexión se conoce como *Routing and Wavelength Assignment* (RWA) [18, 19], para el que existen tres variantes, en función del tipo de petición de las conexiones ópticas (estático, incremental o dinámico).

Con tráfico estático, se conoce de antemano el conjunto entero de conexiones, consistiendo el problema RWA en establecer canales ópticos para dichas conexiones de una forma global minimizando los recursos, como el número de

longitudes de onda o de fibras en la red. Este problema se conoce como *Static LightPath Establishment* (SLE).

En el caso de tráfico incremental, las peticiones de conexiones llegan de forma secuencial, estableciéndose un canal óptico para cada conexión, el cual permanece en la red indefinidamente. Para tráfico dinámico, se establece un canal óptico cada vez que se recibe una petición de conexión, y se elimina después de un tiempo finito. En ambos casos, se deben establecer canales ópticos y asignar longitudes de onda minimizando la cantidad de conexiones bloqueadas, o maximizando el número de conexiones que se establecen en la red. Este problema es conocido como *Dynamic LightPath Establishment* (DLE). En el proyecto EMPIRICO se realizarán peticiones de conexiones dinámicas, para lo que se divide el problema del DLE en dos sub-problemas: enrutamiento y asignación de longitudes de onda.

En cuanto al problema de enrutamiento, éste tiene tres posibles soluciones: (i) *Fixed Routing*, donde se predetermina una única ruta fija entre una par fuente-destino, (ii) *Fixed-Alternate Routing*, donde se predeterminan múltiples rutas fijas entre un par origen-destino y (iii) *Adaptive Routing*, donde la ruta entre un origen y un destino se calcula dinámicamente dependiendo del estado de la red. En el proyecto EMPIRICO se utiliza la solución *Adaptive Routing* distribuido basado en información global, e implementado por el protocolo de estado de enlace OSPF para distribuir la información de la topología de la red.

Una forma de *Adaptive Routing* es el *Shortest-Cost Path routing* (SCP), que está especialmente indicado para redes con conversión de longitud de onda. Así, dada una topología, primero se determina la ruta de menor coste entre un origen y un destino utilizando el algoritmo de Dijkstra y después se asigna una longitud de onda. Si existen múltiples rutas con el mismo coste, se escoge una aleatoriamente. El algoritmo de Dijkstra asocia cada enlace de la red con un peso, que depende de varios factores, y determina el camino de coste mínimo basándose en los pesos de los enlaces. A modo de ejemplo, en [19] se propone la ponderación siguiente: un enlace no utilizado tiene un coste 1, cada enlace utilizado tiene un coste ∞ y cada enlace con conversión de longitud de onda tiene un coste c . En [20, 21] se propone incorporar información específica WDM en las funciones de los pesos para mejorar el comportamiento del algoritmo, como el número de longitudes de onda disponibles, el número total de longitudes de onda por enlace, el número de saltos o combinaciones de ambos.

La Figura 16 ilustra la representación de la topología de la red del proyecto EMPIRICO mediante un grafo con pesos que representan el número de longitudes de onda disponibles en un cierto momento de tiempo, y una matriz de adyacencias denominada *Global Link Connectivity Table* (GLCT), utilizada por el algoritmo de Dijkstra para el cálculo del camino de menor coste. Cada fila i de dicha matriz corresponde al *Local Link Connectivity Vector* y representa la conectividad local del nodo i , donde cada elemento j de dicho vector representa el coste del enlace activo con el nodo j . Hay que remarcar que, en el proyecto

EMPIRICO, el *Local Link Connectivity Vector* es configurado manualmente en cada nodo, aunque se contempla la configuración automática mediante un mecanismo de descubrimiento de vecinos, lo que permitirá detectar enlaces activos entre un nodo dado y su vecino, y almacenarlos en el *Local Link Connectivity Vector*.

Mediante el mecanismo de *flooding* de OSPF (Figura 17) se difunde la información de los *Local Link Connectivity Vectors* por toda la red, de tal forma que cada nodo construye su GLCT y guarda dicha información en el *Link State Database* de OSPF. A su vez, OSPF guarda la información de conectividad de cada enlace en los campos *Link TLV* y *Sub-link Traffic Engineering Metric*. Por último, el resultado del algoritmo de Dijkstra se almacena en la *Routing Table*, utilizada por el CC cuando necesita información de ruta para establecer conexiones ópticas.

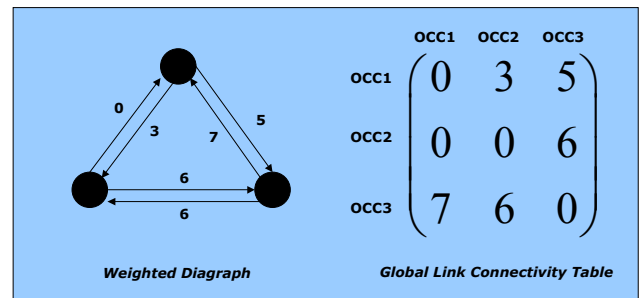


Figura 16. Grafo y matriz de adyacencias (GLCT)

Otra forma de *Adaptive Routing* es el *Least-Congested Path routing* (LCP), que propone pre-seleccionar una secuencia de rutas entre cada par origen-destino, igual que el *Fixed-Alternate Routing*, y una vez se recibe la petición de una conexión se asigna la ruta menos congestionada, donde la congestión se mide mediante el número de longitudes de onda disponibles. En [22] se examina la combinación de SCP y LCP mediante simulación, concluyendo que se obtiene mejor comportamiento utilizando primero SCP y después LCP. En el proyecto EMPIRICO se experimentará con el *adaptive SCP routing* con varios pesos con el fin de analizar y evaluar con qué combinación se obtiene el mejor comportamiento, evaluando las ventajas e inconvenientes de utilizar información específica WDM.

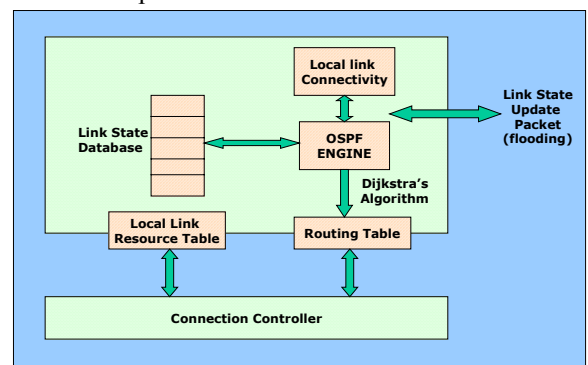


Figura 17. Arquitectura OSPF

En cuanto al problema de asignación de longitud de onda, éste aparece cuando existen múltiples longitudes de onda entre un nodo origen y un nodo destino, y por lo tanto se requiere de un algoritmo que seleccione una longitud de

onda para un canal óptico dado. Este tipo de algoritmo está basado en métodos heurísticos que intentan minimizar el bloqueo de conexiones. En la literatura se proponen varios algoritmos heurísticos [19] ya clásicos, como *Random*, *First-Fit*, *Least-Used*, *Most-Used*, *Min-Product*, *Least Loaded*, *Max-Sum*, *Relative Capacity Loss*, *Wavelength Reservation* o *Protection Threshold*. Dichos algoritmos de asignación de longitud de onda se pueden dividir en aquellos que requieren información global de la disponibilidad de los recursos ópticos (fibras y longitudes de onda), y aquellos que requieren únicamente información a nivel local. De los algoritmos citados anteriormente, el *Random* y el *First-Fit* son los únicos que no requieren conocimiento global de la disponibilidad de los recursos. En el proyecto EMPIRICO, tal y como se ha descrito en el apartado anterior, la información de recursos disponibles es a nivel local, con lo que cada nodo dispone de una *Local Link Resource Table* donde almacena todos los recursos ópticos de los que dispone.

El algoritmo *First-Fit* es preferido en la práctica debido a su buen comportamiento en cuanto a la probabilidad de bloqueo, su pequeño overhead computacional y su baja complejidad. *First-Fit* consiste en empaquetar todas las longitudes de onda que están en uso en el extremo inferior del espacio de longitudes de onda, de tal forma que las rutas continuas de mayor distancia tienen una probabilidad más alta de estar disponibles en el extremo superior del espacio de longitudes de onda. Una de las cuestiones claves es cómo identificar los recursos para almacenarlos en la *Local Link Resource Table*, para lo que se requiere definir un esquema de direccionamiento para todos los recursos de la red óptica. La opción más simple consiste en asignar una dirección IP por longitud de onda, lo que representa un claro despilfarro de direcciones IP, motivo por el que IETF propone los esquemas de direccionamiento *Unnumbered Links* [23] y *Bundled Link* [24].

El esquema de direccionamiento *Unnumbered Links* consiste en dotar a cada nodo óptico (en consecuencia, a cada OCC) de una única dirección IPv4 que actúa como identificador de nodo (*Node ID*). Para identificar cada longitud de onda se utiliza el concepto de identificador de puerto lógico, formado por el identificador de puerto físico (*Port ID*), que identifica las diversas fibras del nodo óptico, y el identificador de canal (*Channel ID*), que identifica los diversos canales ópticos dentro de una fibra. Hay que remarcar que para realizar conmutación a nivel de slot de tiempo TDM (como SONET/SDH), se debe incluir el identificador de sub-canal (*Sub-channel ID*) en el *Port ID*, lo que permite identificar los canales (slots) de tiempo de una señal TDM incluidos dentro de un canal óptico. En el proyecto EMPIRICO no se utiliza *Sub-channel ID* porque no se realiza conmutación a nivel TDM, sino a nivel de longitud de onda.

A su vez, el *Bundled Link* permite agrupar diferentes enlaces que comparten características comunes bajo un mismo identificador, de tal forma que se consigue reducir la carga computacional. La Figura 18 ilustra un ejemplo del esquema de direccionamiento del nodo OCC1.

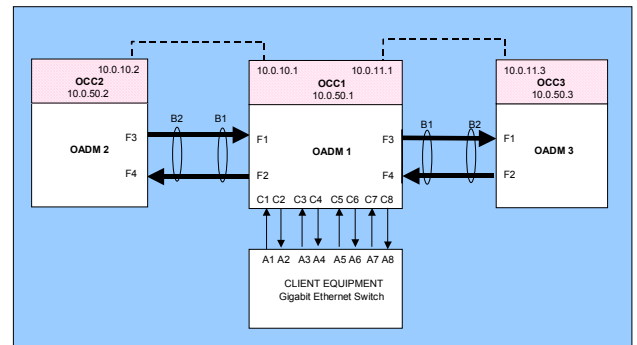


Figura 18. Esquema de direccionamiento del nodo OCC1

Dichos identificadores sólo tienen valor localmente, es decir, cada OCC puede asignar diferentes identificadores a la misma fibra o longitud de onda. Por lo tanto, es necesario que cada OCC activo tenga registrado todos los enlaces de que dispone el nodo óptico en su *Local Link Resource Table* y además mapee sus identificadores con los OCCs vecinos activos (dos OCC activos se consideran vecinos cuando están unidos directamente mediante un enlace físico y dicho enlace está en condiciones de trabajo). Aunque esta operación puede realizarse de forma automática mediante un mecanismo de descubrimiento automático de vecindario (NDP), aportando un gran valor añadido dado que cada OCC puede descubrir de forma automática nuevas fibras insertadas/extraídas al nodo óptico y registrarlas en su *Local Link Resource Table*, pudiendo además alertar a los nodos vecinos de las variaciones para que éstos puedan mapear los identificadores, en el proyecto EMPIRICO, por motivos de simplicidad, se realiza de forma manual mediante un operador encargado de configurar los nodos afectados cuando se produce un cambio de fibras y de mapear los identificadores correspondientes.

La Figura 19 ilustra un ejemplo de *Local Link Resource Table* para el nodo OCC1, en la que cada longitud de onda se identifica por su *PORT_ID* (fibra del nodo local), *CH_ID* (longitud de onda dentro de una fibra), *RNODE_ID* (dirección IPv4 única dentro la red que identifica el nodo vecino), *RPORT_ID* (fibra para el nodo vecino), *RCH_ID* (longitud de onda dentro de la fibra para el nodo vecino), *SRLG* (lista con información de los *Shared Risk Link Group* a los que pertenece), *ISC* (tipo de conmutación que soporta: paquete, slot, lambda o fibra, tomando en el proyecto EMPIRICO el valor *Lambda Switch Capable*, *LSC*), *RES_BW* (ancho de banda máximo que soporta el canal óptico), *ENC* (tipo de señal cliente que se transporta), *OP_STAT* (estado en el que se encuentra el recurso: *Unequipped*, *Reserved*, *In-service*, *Failed* o *Stand-by*), *LPT* (tipo de protección del enlace: *Unprotected*, *Extra Traffic*, *Shared*, *Dedicated 1+1*, *Dedicated 1:1* o *Enhanced*) y *DIR* (transmisión o recepción).

Hay que remarcar que un *SRLG* es un grupo administrativo asociado a determinados recursos ópticos que comparten vulnerabilidad frente a una avería. Por ejemplo, se puede asignar un *SRLG* a todas las fibras de un mismo conducto porque en caso de corte del conducto todas las fibras resultarían afectadas. El *SRLG* se utiliza en los mecanismos de protección con la finalidad de que el

camino de protección no se establezca por conductos comunes con el camino primario.

PORT_ID	CH_ID	RNODE_ID	RPORT_ID	RCH_ID	SRLG	ISC	RES_BW	ENC	OP_STAT	LPT	DIR
F1	1	10.0.50.2	F3	11	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	RX
F1	2	10.0.50.2	F3	12	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	RX
F1	3	10.0.50.2	F3	13	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	RX
F1	4	10.0.50.2	F3	14	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	RX
F1	5	10.0.50.2	F3	15	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	RX
F1	6	10.0.50.2	F3	16	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	RX
F1	7	10.0.50.2	F3	17	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	RX
F1	8	10.0.50.2	F3	18	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	RX
F2	1	10.0.50.2	F4	21	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	TX
F2	2	10.0.50.2	F4	22	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	TX
F2	3	10.0.50.2	F4	23	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	TX
F2	4	10.0.50.2	F4	24	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	TX
F2	5	10.0.50.2	F4	25	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	TX
F2	6	10.0.50.2	F4	26	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	TX
F2	7	10.0.50.2	F4	27	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	TX
F2	8	10.0.50.2	F4	28	100	LSC	0mD8450C0	8	4	0x02	TX

Figura 19. Local Link Resource Table

Por último, para que cada nodo disponga de una tabla con la información de todos los recursos disponibles a nivel global, se debe distribuir la información de las *Local Link Resource Tables* de cada nodo a toda la red óptica, realizando las oportunas extensiones al protocolo OSPF, lo que permitirá a SCP encontrar una ruta desde un origen hasta un destino de la red con la condición de continuidad en longitud de onda. Para ello se debe construir un grafo donde cada capa corresponda a la disponibilidad de una longitud de onda, unificando los problemas de enrutamiento y asignación de longitud de onda [25].

2.3.1.2. Connection Controller y Protocol Controller

CC es el controlador principal del plano de control óptico. Su función es recibir y procesar las peticiones de conexiones ópticas que solicitan el TES, el NMS y los nodos ópticos vecinos, a través de sus respectivas interfaces, gestionadas por el PC. La Figura 20 ilustra la arquitectura implementada en el proyecto EMPIRICO para el CC y el PC, denominados *GMPLS Daemon* para conexiones *soft-permanent*.

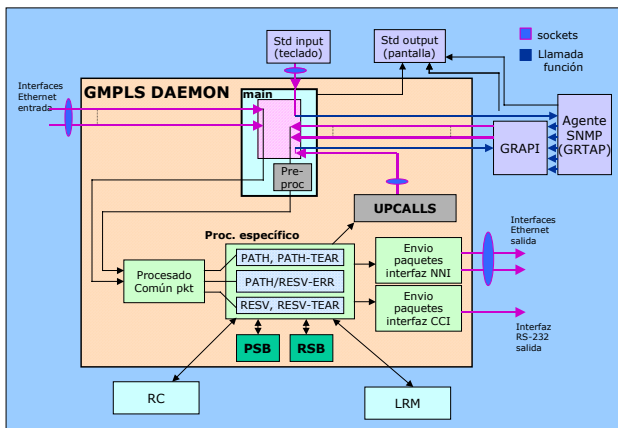


Figura 20. GMPLS Daemon

GMPLS Daemon se basa en el protocolo RSVP [26] para la señalización de los canales ópticos, tanto a nivel de interfaz NNI como UNI, por lo tanto se ha adoptado gran parte del mecanismo de funcionamiento RSVP. Se ha implementado una librería de funciones denominada *GMPLS RSVP Application Program Interface (GRAPI)* que permite la comunicación y solicitud de conexiones ópticas a *GMPLS Daemon*. Dichas funciones recogen todos los parámetros GMPLS para RSVP definidos por IETF.

Así, GRAPI ha sido especialmente diseñada con el objetivo de ser utilizada por el agente SNMP del nodo

óptico. Debido a la no disponibilidad actual de un agente SNMP, se ha implementado una aplicación denominada *GMPLS Real Time Application Program (GRTAP)* que permite, en tiempo real, establecer y eliminar canales ópticos mediante una serie de comandos introducidos por el teclado o por un fichero. Es decir, GRTAP interpreta comandos introducidos y llama a la función de GRAPI que corresponda. La comunicación inicial entre GRAPI y *GMPLS Daemon* se realiza mediante un socket predeterminado, de tal forma que cada vez que se recibe una petición de conexión óptica por parte de GRAPI se utiliza dicho socket genérico para solicitar un socket específico para el uso exclusivo de la sesión que ha solicitado el canal óptico. GRAPI utiliza dichos sockets específicos a cada sesión para intercambiar toda la información relacionada con cada sesión, de tal forma que una vez eliminada la conexión óptica se eliminará su sesión y socket específico relacionado.

En *GMPLS Daemon* se pueden diferenciar claramente tres funciones principales: escucha, procesado y envío. La primera función consiste en un bucle principal donde se espera hasta que se activa alguno de los sockets que se están escuchando. Además de los sockets de GRAPI existen otros sockets de especial interés, destacando el conjunto de sockets por donde se reciben mensajes RSVP con extensiones GMPLS para NNI provenientes de *GMPLS Daemons* de otros nodos ópticos, y en un futuro mensajes RSVP con extensiones GMPLS para UNI provenientes de TES. Una vez activado alguno de los sockets que se están escuchando, *GMPLS Daemon* identifica qué socket se ha activado para llamar a la función pertinente que procesará dicha información.

En cuanto al procesado de los paquetes provenientes de otros *GMPLS Daemon*, es igual que el procesado de los paquetes que llegan de GRAPI, con la única diferencia de que a estos últimos se les hace un pre-procesado que adapta los paquetes de la GRAPI al mismo formato que los paquetes que llegan de la red. Antes de explicar el funcionamiento del procesado común de los paquetes RSVP, a continuación se describen brevemente las operaciones básicas del protocolo RSVP.

Existen dos tipos de mensajes RSVP básicos: Path y Resv. Un nodo genera una petición de establecimiento de conexión óptica mediante la transmisión de un mensaje Path dirigido al destino de la conexión. En respuesta a la recepción del mensaje Path, el nodo destino envía un mensaje de petición de reserva (Resv) con destino al origen de la conexión. Los mensajes Path y Resv crean estados de *rutas* y *reservas* en los nodos a lo largo de la ruta de la conexión óptica, que se establece cuando el nodo origen recibe el mensaje Resv para dicha conexión.

RSVP utiliza *soft state* para mantener los estados de *ruta* y *reserva*. El *soft state* se basa en la retransmisión periódica de mensajes Path y Resv (aproximadamente cada 30 segundos) para refrescar el estado de rutas y reservas. Si no llegan mensajes de refresco antes de un intervalo de tiempo definido se elimina el estado. Los estados de Path y Resv también pueden ser eliminados explícitamente utilizando mensajes PathTear y ResvTear, de tal forma que PathTear se envía desde el origen hacia el

destino y elimina tanto el estado de las rutas como de las reservas para la conexión asociada, mientras que el mensaje ResvTear se envía desde el destino hacia el origen y solo elimina el estado de reservas asociado.

Un mensaje (paquete) RSVP está formado por una cabecera común y por una serie de objetos. Las extensiones de GMPLS a la señalización RSVP, propuestas por OIF e IETF [7, 14, 15], se basan en introducir nuevos objetos a los mensajes RSVP, definiendo su formato, atributos y funcionalidad para establecer, modificar y eliminar *General Label Switched Paths* (G-LSP).

Concretamente, en el proyecto EMPIRICO se experimenta con la introducción a la señalización RSVP de los objetos SESSION, LSP_TUNEL_IPV4_FILTER_SPEC y LSP_TUNEL_IPV4_SENDER_TEMPLATE (permiten identificar unívocamente un túnel G-LSP mediante los atributos TUNNEL_ID, EXTENDED_TUNNEL_ID y LSP_ID), IPV4_IF_ID_RSVP_HOP (utilizado en enlaces donde no existe una asociación entre un canal de datos y un canal de control, es decir, sólo existe un canal de control para múltiples canales de datos, equivalentes a longitudes de onda), GENERALIZED_LABEL_REQUEST (indica la clase de conmutación solicitada; de canales ópticos, de paquetes, de fibras o de slots de tiempo SONET/SDH), GENERALIZED_LABEL (nueva etiqueta *label* que soporta cada clase de conmutación), LABEL_SET (conjunto de *Generalized Labels* que restringen la elección de etiqueta por parte del nodo, permitiendo conexiones ópticas con continuidad en longitud de onda), UPSTREAM_LABEL (permite el establecimiento de G-LSP bi-direccionales) y EXPLICIT_ROUTE (permite al origen explicitar una ruta para el G-LSP de extremo a extremo a nivel de nodo y puerto).

Recapitulando, dichos objetos permiten implementar conexiones ópticas unidireccionales, bi-direccionales, con continuidad de onda y con ruta explícita utilizando señalización fuera de banda. La Figura 21 ilustra la captura de un paquete GMPLS RSVP.

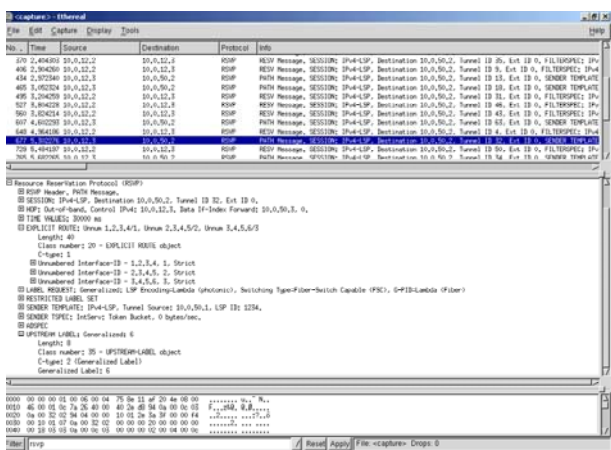


Figura 21. Captura de un paquete RSVP - GMPLS

Cuando un agente SNMP solicita el establecimiento de un canal óptico mediante el uso de las funciones de la librería GRAPI, la GRAPI genera un pseudo-paquete Path que es comunicado al *GMPLS Daemon* a través del socket específico de la sesión. Cuando el *GMPLS Daemon* advierte de la activación del socket, lo identifica y al

detectar que corresponde a la GRAPI realiza un pre-procesado del pseudo-paquete Path con el fin de adaptarlo al mismo formato que tienen los paquetes Path recibidos por la interfaz NNI y poder realizar un procesamiento común para todos. Igualmente cuando el agente SNMP solicita la eliminación de una conexión óptica la GRAPI genera un pseudo-paquete PathTear y lo mismo sucede con los demás mensajes RSVP.

Los mensajes Path están formados por los objetos SESSION y LSP_TUNEL_IPV4_SENDER_TEMPLATE para identificar unívocamente la sesión y el G-LSP, el objeto GENERALIZED_LABEL_REQUEST para solicitar un G-LSP basado en conmutación de lambda, y el objeto IPV4_IF_ID_RSVP_HOP para indicar qué nodo y por qué fibra se está solicitando el canal óptico (en el caso de un paquete generado por la GRAPI, el nodo identifica la GRAPI y la fibra identifica la conexión de los equipos clientes). También se pueden incluir LABEL_SET, UPSTREAM_LABEL y EXPLICIT_ROUTE para solicitar un canal óptico continuo en longitud de onda, bi-direccional, o con una ruta explícita, así como el objeto SENDER_TSPEC, en que se especifica el ancho de banda requerido. Dicho paquete Path se envía al destino de la conexión óptica (Figura 22).

El primer paso en el procesamiento común de los paquetes (tanto de la NNI como de la GRAPI) es comprobar el tipo de paquete (Path, Resv, Pathtear, Resvtheart, etc.) para realizar un proceso específico para cada tipo de mensaje. A continuación se procede a la comprobación de sesión establecida para dicha conexión óptica. Si existe, el mensaje Path recibido es de refresco, por lo tanto sólo se debe comprobar si ha variado algún atributo y actualizar la *Path State Block* (PSB) asociada. Si no existe ninguna sesión, se está solicitando una conexión óptica nueva, por lo tanto se debe crear una nueva PSB y guardar los datos del mensaje Path recibido, especialmente el TUNNEL_ID, LSP_ID y EXTENDED_TUNNEL_ID, que sirven para identificar la sesión establecida.

Se procesan todos los objetos incluidos en el mensaje Path analizando el destino del LSP, el tipo de conmutación solicitada (si es diferente a la conmutación de lambda se genera un paquete de error), el ancho de banda solicitado, la fibra por la que se solicita la longitud de onda, la bi-direccionalidad y continuidad, y se comprueba su viabilidad consultando al RC y al LRM. Se consultan las longitudes de onda disponibles en la fibra solicitada y, si existen longitudes de onda disponibles que cumplan las condiciones, y se asigna y reserva una longitud de onda mediante el algoritmo de *First-Fit*. También se consulta en la tabla de enrutamiento del RC el siguiente nodo al que se debe enviar el mensaje Path, y al LRM la fibra por la que se va a solicitar la longitud de onda al próximo nodo. Si no se cumplen las condiciones exigidas se envía un mensaje de error. Los recursos reservados se registran en la PSB, así como todos los objetos nuevos que se envían en el nuevo mensaje Path, pero no se da la orden al hardware óptico para que realice la conmutación física.

Cuando el mensaje Path alcanza su destino, el último nodo responde con el mensaje Resv (Figura 23), donde se incluye el objeto GENERALIZED_LABEL, que informa

al nodo que lo recibe de la longitud de onda que le ha sido asignada en la fibra que solicitó previamente, es decir, la longitud de onda reservada previamente con el mensaje Path. Análogamente a los mensajes Path, se crea un Resv State Block (RSB) por cada sesión y se da la orden de configuración del hardware óptico a través de la interfaz CCI. Los mensajes Resv siguen la ruta inversa a los mensajes Path, de tal forma que cuando el nodo origen recibe el mensaje Resv empieza a transmitir el tráfico cliente por la longitud de onda asignada.

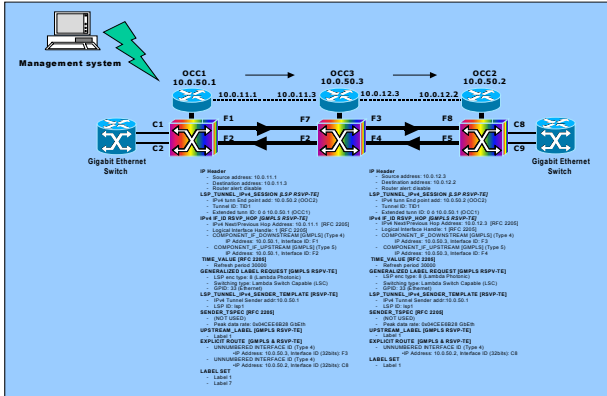


Figura 22. Flujo de mensajes Path en el establecimiento de una conexión

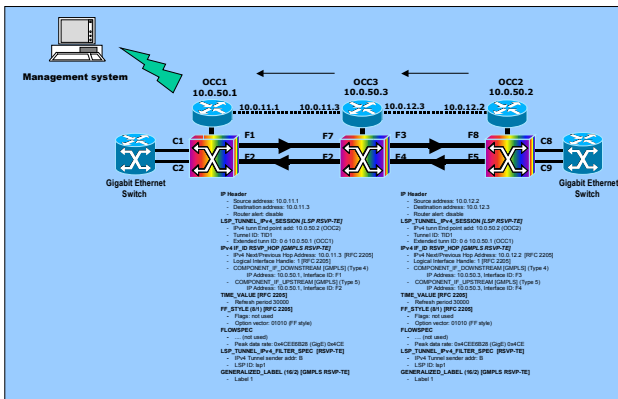


Figura 23. Flujo de mensajes Resv en el establecimiento de una conexión

Obsérvese que esta implementación de señalización RSVP no utiliza ningún mecanismo de entrega de mensajes RSVP fiable, como el definido por IETF en [27]. Si un paquete Path o Resv que está solicitando una conexión se pierde, el único mecanismo de recuperación de que se dispone es el de refresco, es decir, al cabo de 30 seg se volverá a enviar el mismo paquete. Esta situación no es muy crítica en el sentido de que los canales de control se transmiten por fibra y por lo tanto se tiene una probabilidad de paquetes perdidos muy baja en comparación con otros medios. Por otra parte, esto implica que para *GMPLS Daemon* el mecanismo de refresco es el proceso más prioritario, por lo que dispone de un eje de tiempo almacenado en una estructura donde se registran todas las retransmisiones que se deben ejecutar y el tiempo que resta para su ejecución. De esta forma, *GMPLS Daemon* puede saber el tiempo exacto que hay entre eventos y utilizar estos slots libres para escuchar los sockets en el bucle principal. Si se activa algún socket mientras *GMPLS Daemon* está escuchando, se ejecuta la aplicación correspondiente y cuando finaliza se comprueba el eje de

tiempos. Si entonces hay alguna retransmisión pendiente no efectuada, *GMPLS Daemon* la realiza y vuelve a empezar el ciclo, garantizándose un tiempo aproximado de 30 seg evitando el trabajo en paralelo.

2.4. Arquitectura propuesta para el plano de gestión

El proyecto EMPIRICO implementa un plano de gestión ASON cuya función principal es la realización de peticiones de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas *soft-permanent* (Figura 3), integrándose en un futuro funciones de monitorización de los planos de control y transporte. Este apartado describe los requerimientos y criterios de diseño del plano de gestión del proyecto EMPIRICO, así como los escenarios de experimentación definidos hasta la fecha.

El plano de gestión del proyecto EMPIRICO tiene dos ejes básicos: (i) una estructura de información de gestión basada en SMI v2 [31], que utiliza MIB-II [30] como base de datos de gestión, y (ii) una interfaz de comunicación entre el plano de gestión y el de control (NMI, Figura 2), que utiliza SNMP como protocolo de transferencia de información de gestión y la DCN para el intercambio de mensajes de gestión.

Por otra parte, el plano de gestión contempla la arquitectura funcional de gestión genérica [29] y para ASON [5], por lo que está formado por un NMS (Figura 2) que contiene un bloque gestor para el plano de control del anillo óptico (cuyo diseño modular permitirá la incorporación de funciones de monitorización de los planos de control y transporte), está conectado a dicho plano de control por la DCN (Figura 14), y realiza funciones de sistema de operaciones, transformación y estación de trabajo [29], que permiten la petición de establecimiento y eliminación de canales ópticos *soft-permanent* y la interpretación de información de gestión.

Lo expuesto anteriormente se traduce en los siguientes elementos funcionales necesarios para la implementación del plano de gestión del proyecto EMPIRICO:

- *En el plano de gestión:* un entorno de introducción de parámetros de caracterización del establecimiento o eliminación de canales ópticos (pues la petición de conexiones *soft-permanent* depende del factor humano) y de interpretación de mensajes (respuestas a dichas peticiones, notificaciones y alarmas) y una interfaz de comunicación entre los planos de gestión y de control del anillo óptico que permita al NMS dar al primer nodo óptico (OCC) la orden de establecer/eliminar un canal óptico *soft-permanent* entre dos puntos de la red (NMI basada en el protocolo de gestión SNMP), ambos elementos contenidos en la aplicación *Optical NMS*.
- *En el plano de control:* acceso y almacenamiento de la información de gestión contenida en los OCCs del plano de control (*Management Information Base*, MIB) y una interfaz de comunicación entre los planos de gestión y de control (NMI mediante protocolo SNMP), ambos elementos contenidos en el bloque agente SNMP de los OCCs del plano de control. Hay que remarcar que los OCCs dispondrán de información actualizada sobre sí mismos (clientes de cada nodo óptico, mapeo entre puertos, etc.), sus condiciones de funcionamiento, su

vecindario (OCCs y routers activos, averías, estadísticas, etc.) y las conexiones ópticas activas, información que se almacenará según las directrices del *Common Control And Management Protocols Working Group* (CCAMP) de IETF para la modelización y gestión de etiquetas del protocolo GMPLS [28] y será accedida por el NMS en las peticiones de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas *soft-permanent*.

2.4.1. Optical NMS

Es la aplicación de gestión de la red óptica, responsable del diálogo con los OCCs para el inicio del establecimiento y eliminación de conexiones ópticas *soft-permanent*. Este diálogo se realiza mediante una interfaz de comunicación NMI basada en SNMP [17], concretamente *Windows SNMP API*, WinSNMP, según la arquitectura ilustrada en la Figura 24.

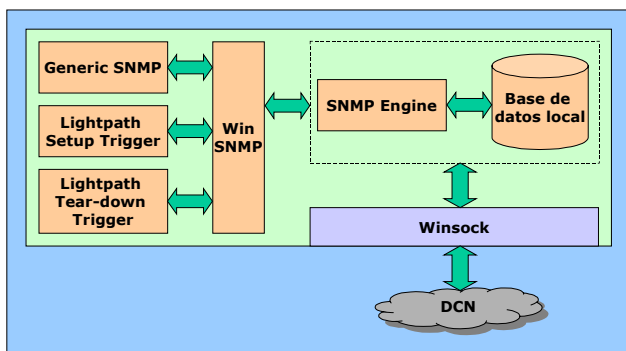


Figura 24. Arquitectura de Optical NMS

La arquitectura de *Optical NMS* está formada por una función principal, *SNMP Engine*, accedida de forma gráfica (Figura 25), que está a la escucha de acciones de gestión, ya sea el envío o recepción de mensajes genéricos SNMP (función *Generic SNMP*) o la realización de peticiones de establecimiento (función *LightPath Setup Trigger*) o eliminación (función *LightPath Tear-down Trigger*) de conexiones ópticas, descritas a continuación.

Para realizar una petición de establecimiento de una conexión óptica, *Optical NMS* requiere la selección de ocho parámetros, agrupados en dos tipos: caracterización del agente SNMP al que se envía la petición (nodo origen de la conexión óptica a establecer) y caracterización de la conexión óptica (OCC destino, tipo de tráfico, velocidad, bidireccionalidad, continuidad, ruta explícita y tipo de conmutación). Dichos parámetros configuran los *object identifier* del mensaje que será enviado al agente SNMP (OCC origen), siendo por tanto el valor de los objetos GMPLS TUNNEL_ID y EXTENDED_TUNNEL_ID asignado por el NMS.

El mensaje de respuesta a una petición de establecimiento, enviado por el agente SNMP, contiene el resultado de la acción solicitada (éxito en caso de establecimiento de la conexión y motivo en caso de fallo). En caso de éxito, *Optical NMS* almacena y muestra las características de la conexión establecida (*LightPath Tear-down Requests* en Figura 25), y, en caso de imposibilidad de establecimiento, muestra el motivo del fallo (*Display* en Figura 25).

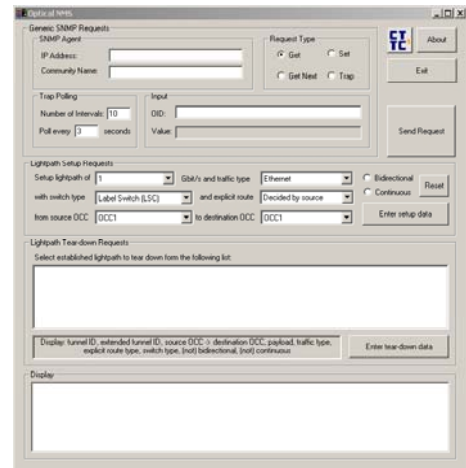


Figura 25. Entorno gráfico de Optical NMS

En cuanto a la eliminación de conexiones ópticas previamente establecidas, *Optical NMS* requiere la selección de una conexión establecida, listada en *LightPath Tear-down Requests* (Figura 25), que está asociada en la base de datos local del NMS con su OCC origen, al que el NMS enviará un mensaje SNMP con el *object identifier* correspondiente a la conexión a eliminar y un mensaje SNMP de petición de eliminación. El OCC, a su vez, eliminará la conexión óptica solicitada, vaciará la entrada de su MIB indexada con el valor del *object identifier* recibido y devolverá un mensaje de respuesta al NMS, que en caso de éxito eliminará el identificador de la conexión del menú gráfico y de la base de datos local.

Así, el sistema de gestión del anillo óptico utiliza mensajes SNMP para solicitar operaciones en las variables de gestión mantenidas por los OCCs, que son vistos por el NMS como agentes SNMP, a través de una interfaz de transporte WinSock, con lo que se ha obtenido una primera versión de NMS con diseño modular, lo que permitirá integrar nuevas funciones en futuras versiones, o migrar a SNMPv3, de forma simple.

Hasta la fecha de redacción de este artículo se han realizado pruebas de funcionamiento de la aplicación *Optical NMS*, para las que se han dispuesto dos estaciones de trabajo PC Pentium III 1 GHz con tarjeta de red 10/100BaseT Ethernet y Windows 2000 como sistema operativo, una de las cuales es el sistema de gestión, y por tanto manager SNMP (*Optical NMS*) y la otra contiene un simulador del OCC1 del plano de control, implementado mediante una extensión del agente SNMP del paquete Demo/SDK de DMH Software, que recibe y responde mensajes SNMP de tipo *Get Request*, *Set Request* y *Trap* y al que se ha incorporado una MIB simplificada, implementada según [30] y que contiene los parámetros de caracterización básicos para el establecimiento y eliminación de una conexión óptica (OCC destino, tipo de tráfico, velocidad, bidireccionalidad, continuidad, ruta explícita y tipo de conmutación).

En dicha experimentación se han utilizado dos escenarios de comunicación entre el NMS y el simulador de OCC. Un primer escenario es la realización de peticiones de establecimiento de conexiones ópticas *soft-permanent*, en el que el NMS solicita secuencialmente al

simulador de OCC1 (Figura 2) uno o más canales ópticos Gigabit Ethernet con diferentes parámetros de caracterización, a través de la interfaz NMI, el simulador de OCC1 actualiza los *object identifiers* para cada par TUNNEL_ID, EXTENDED_TUNNEL_ID y devuelve mensajes de respuesta al NMS que a su vez, para cada conexión establecida con éxito, almacenará y mostrará los parámetros de la conexión. El segundo escenario es la realización de peticiones de eliminación de conexiones ópticas previamente establecidas, mediante la selección de una conexión listada en *LightPath Tear-down Requests*, tras la que el NMS envía un mensaje SNMP (según los datos asociados a dicha conexión) al simulador OCC1 a través de NMI, a lo que el simulador de OCC1 anulará los *object identifiers* correspondientes y devolverá un mensaje de respuesta al NMS, que, para el canal eliminado, borrará los datos correspondientes de su base de datos local y menú gráfico.

En la siguiente fase del plano de gestión del proyecto EMPIRICO se implementarán la MIB [28] y el agente SNMP en cada OCC [17] (actualmente simulado por la aplicación GRTAP, ver Figura 20) según la arquitectura de la Figura 26, se incorporará a *Optical NMS* una función de tratamiento de notificaciones provenientes de los OCCs y se interconectarán el NMS y la DCN (Figura 14).

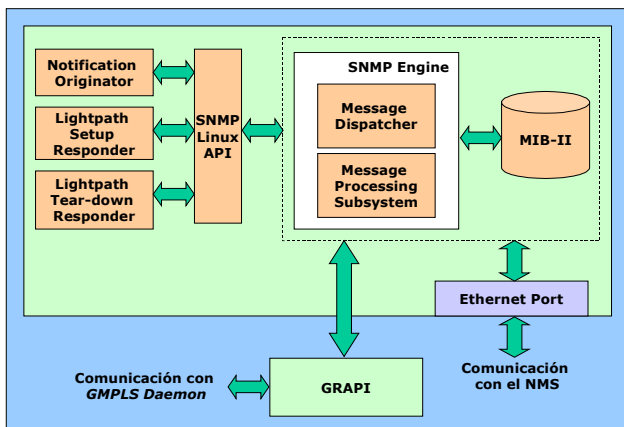


Figura 26. Arquitectura del agente SNMP en OCC

3 Sumario

Este artículo ha presentado el eje del proyecto EMPIRICO dedicado al diseño e implementación de un anillo metropolitano DWDM reconfigurable en tiempo real y de forma dinámica mediante un plano de control basado en GMPLS, que aprovecha las ventajas de Ethernet y aporta, de forma innovadora, las funcionalidades que actualmente Ethernet es incapaz de ofrecer, es decir, supervivencia, fiabilidad y calidad de servicio comparables con SONET/SDH.

El proyecto EMPIRICO es liderado por el Centro Tecnológico de Comunicaciones de Cataluña (CTTC) y en él participa activamente el Grupo de Comunicaciones Ópticas de la Universidad Politécnica de Cataluña. Ha sido presentado a la convocatoria 2002 del programa de Parques Científicos y Tecnológicos del MCyT y ha servido como base para la expresión de interés 'All-optical dynamic reliable network handling IP/Ethernet Gigabit traffic with

QoS' (ADAGIO) presentada al Sexto Programa Marco IST de la Comunidad Europea.

4 Referencias

- [1] J.F. Lobo, W. Warzanskyj, *Redes de transmisión todo ópticas: independencia frente a las redes de transporte*, Comunicaciones de Telefónica I+D, Número 23, Noviembre 2001.
- [2] T. Gimpelson, *Ethernet/SONET debate strong as ever*, NetworkWorld Fusion, Junio 2001.
- [3] B. Mukhejee, *Optical Communications Networks*, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [4] K. A. McGreer, *Arrayed Waveguide Gratings for Wavelength Routing*, IEEE Communications Magazine, Diciembre 1998.
- [5] ITU-T Recommendation G.8080, *Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)*, Noviembre 2001.
- [6] ITU-T Recommendation G.872, *Architecture of Optical Transport Networks (OTN)*, Noviembre 2001.
- [7] E. Mannie et al, *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture*, IETF (work in progress) draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-*, Marzo 2002.
- [8] O. Aboul-Magd et al, *Link Management Protocol (LMP) for DWDM Optical Line Systems*, IETF (work in progress) draft-ietf-ccamp-lmp-wdm-*, Febrero 2002.
- [9] K. Kompella et al, *OSPF Extensions in Support of Generalized MPLS*, IETF (work in progress) ccamp-ospf-gmpls-extensions-*, Mayo 2002.
- [10] K. Kompella et al, *IS-IS Extensions in Support of Generalized MPLS*, IETF (work in progress) draft-ietf-isis-gmpls-extensions-*, Mayo 2002.
- [11] P. Ashwood-Smith et al, *Generalized MPLS Signaling - RSVP-TE Extensions*, IETF (work in progress) draft-ietf-mpls-generalized-rsvp-te-*, Abril 2002.
- [12] P. Ashwood-Smith et al, *Generalized MPLS Signaling - CR-LDP Extensions*, IETF (work in progress) draft-ietf-mpls-generalized-cr-ldp-*, Abril 2002.
- [13] S. Sánchez, X. Masip-Bruin, J. Solé-Pareta, J. Domingo-Pascual, *PONNI: A routing Information Exchange Protocol for ASON*, Eurescom Summit 2002, Heidelberg (Alemania), 21-24 Octubre 2002.
- [14] P. Ashwood-Smith et al, *Generalized MPLS-Signaling Functional Description*, IETF (work in progress) draft-ietf-mpls-generalized-signaling-*, Abril 2002.
- [15] O. Abul-Magd et al., *Interim User Network Interface (UNI) Signaling Implementation Agreement for SuperComm 2001*, OIF2001.152, Abril 2001.
- [16] J. Sadler et al, *Generalized Switch Management Protocol (GSMP)*, IETF (work in progress) draft-sadler-gsmp-tdm-labels-*, Febrero 2001.
- [17] D. Harrington, R. Presuhn, B. Wijnen, *An Architecture for Describing SNMP Management Frameworks*, IETF (draft standard) RFC 2571, Abril 1999.
- [18] H. Zang, J. P. Jue, L. Sahasrabudhe, R. Ramamurthy, B. Biswanath, *Dynamic Lightpath Establishment in Wavelength-Routed WDM Networks*, IEEE Comm. Magazine, Vol. 39, Num. 9, pp. 100-108, Septiembre 2001.
- [19] H.Zang, P. Jue, B. Mukherjee, *A review of Routing*

and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks, Optical Networks Magazine, Vol. 1, Num. 1, pp. 47-60, Enero 2000.

[20] T. Fabry-Asztalos, N. Bhide, K.M. Sivalingam, *Adaptive Weight Functions for Shortest Path Routing Algorithms for Multi-Wavelength Optical WDM Networks*, IEEE Intl. Conference on Communications (ICC 2000), New Orleans (USA), 18-22 Junio 2000.

[21] N. M. Bhide, K. M. Sivalingam, T. Fabry-Asztalos, *Routing Mechanisms Employing Adaptive Weight Functions for Shortest Path Routing in Optical WDM Networks*, Journal of Photonic Network Communications, Vol. 3, Núm. 3, pp. 227-236, Julio 2001.

[22] K. Chan, T. P. Yum, *Analysis of Least Congested Path Routing in WDM Lightwave Networks*, IEEE INFOCOM, Toronto (Canada), Junio 1994.

[23] K. Kompella et al, *Signalling Unnumbered Links in RSVP-TE*, IETF (work in progress) draft-ietf-mpls-rsvp-unnum-*, Julio 2002.

[24] K. Kompella et al, *Link Bundling in MPLS Traffic Engineering*, IETF (work in progress) draft-ietf-mpls-bundle-*, Julio 2002.

[25] C. Assi, A. Shami, M. A. Ali, *Optical Networking and Real-Time Provisioning: An integrated Vision for the Next-Generation Internet*, IEEE Network, Vol. 15, Núm. 4, pp. 36-45, Julio/Agosto 2001.

[26] R. Braden et al, *Resource Reservation Protocol – Version 1 Functional Specification*, IETF (draft standard) RFC 2205, Septiembre 1997.

[27] L. Berger et al, *RSVP Refresh Overhead Reduction Extensions*, IETF (draft standard) RFC 2961, Abril 2001.

[28] T. D. Nadeau et al., *Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS) Label Management Information Base*, IETF (work in progress) draft-nadeau-ccamp-gmpls-label-mib-*, Enero 2002.

[29] ITU-T Recommendation M.3010, *Principles for a Telecommunications Management Network (TMN)*, Febrero 2000.

[30] K. McCloghrie, M. Rose, *Management Information Base for Network Management of TCP/IP-based Internets: MIB-II*, IETF (draft standard) RFC 1213, Marzo 1991.

[31] K. McCloghrie, D. Perkins, *Structure of Management Information Version 2 (SMIv2)*, IETF (draft standard) RFC2578, Abril 1999.



Raúl Muñoz (Vic, 1977) es Ingeniero Superior de Telecomunicaciones (UPC, 2001) y actualmente doctorando en el Grupo de Comunicaciones Ópticas (GCO) de la UPC. Ha sido Administrador de Sistemas en la UPC (Barcelona, 1999-2000). Ha realizado el proyecto final de carrera en el centro de I+D de Telecom Italia, TILAB, (Turín, 2000-2001), participando

en el proyecto IST de la Unión Europea LION. También ha realizado actividades docentes en Comunicaciones Ópticas como Profesor Asociado de la UPC (Barcelona, 2001), participando conjuntamente en el proyecto “Internet de segunda generación en Catalunya” (I2-CAT). Actualmente es Investigador Asistente del Área de Redes Ópticas del CTTC.



Carolina Pinart (Barcelona, 1975) es Ingeniero Superior de Telecomunicaciones (UPC, 1999) y doctorando en el GCO (UPC). Le fueron concedidas una beca Siemens Erasmus Asociado y una beca Siemens-Praktikant para la realización de su proyecto de fin de carrera en el Centro de Desarrollo de Siemens-Nixdorf (Munich, 1998-1999). A través del grupo Altran, ha sido Ingeniero de Desarrollo en Ericsson Francia (París, 1999-2000), Coordinadora de Proyecto para el operador móvil MobiNil (París y El Cairo, 2000-2001) y ha participado en 4 proyectos de I+D de la Unión Europea (INFORM, DIAMOND, ITSWAP y TPEG) como Coordinadora en Renault Recherche et Développement (París, 2001). Actualmente es Coordinadora de Área Interna del CTTC y miembro de IEEE y LEOS.



Gabriel Junyent (1950), Ingeniero Superior de Telecomunicaciones (UPM, 1973) y Doctor Ingeniero de Telecomunicación (UPC, 1979), ha realizado actividades de tipo docente como profesor encargado de curso (UPC, 1973-1977), adjunto interino (UPC, 1977-1983), agregado interino (UPC, 1983-1985), titular (UPC, 1985-1989) y catedrático (desde 1989). Desde 1985 ha participado en más de 34 proyectos de I+D nacionales e internacionales, financiados con fondos públicos (MCyT o Comisión Europea), así como con empresas, ha publicado más de 25 artículos técnicos y capítulos de libros en revistas de difusión internacional (IEEE, OSA u Optical Communications, entre otras), más de 30 comunicaciones en congresos internacionales (N&OC, LEOS, CLEO, OFC o ECOC, entre otros) y más de 50 comunicaciones en congresos nacionales, además de diversas presentaciones como invitado. Ha sido, entre otros méritos, director de la ETSI Telecomunicación de Barcelona (1986-1989), miembro del C. O. de las Jornadas de Comunicaciones por Fibras Ópticas de España (1983-1988), miembro del Comité Técnico de ECOC (1986 y 2002), responsable y cofundador del C.CABA, responsable de la investigación del GCO de la UPC, y premio Salvá y Campillo al proyecto de investigación más destacado (1998) y más original (2000) otorgado por la Asociación de Ingenieros de Telecomunicación de Cataluña.